

เส้นใยสององค์ประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต

**BICOMPONENT FIBER FROM POLYLACTIC ACID
AND POLYBUTYLENE SUCCINATE**



เอกทินัย จันทร์ศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

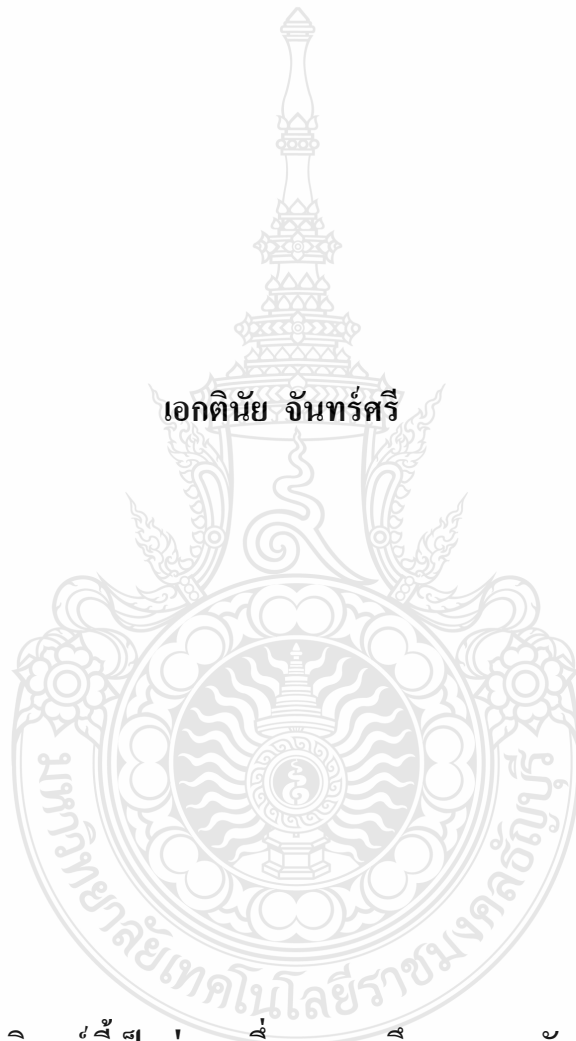
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เส้นใยสององค์ประกอบระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซักซิเนต



เอกตัญญ์ จันทร์ศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

| | |
|----------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | เส้นใยสององค์ประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต |
| ชื่อ-นามสกุล | นายเอกดิษฐ์ จันทร์ศรี |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมวัสดุ |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D. |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | อาจารย์นที ศรีสวัสดิ์, ปร.ด. |
| ปีการศึกษา | 2556 |

บทคัดย่อ

ปัจจุบันพอลิเมอร์ย่อยสลายทางชีวภาพได้รับความสนใจจากนักวิจัยอย่างมากเนื่องมาจากความกังวลในเรื่องของปัญหาสิ่งแวดล้อมและการตระหนักว่าแหล่งทรัพยากรปิโตรเลียมของเรามีอยู่อย่างจำกัด พอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (PBS) จัดอยู่ในกลุ่มของพอลิเมอร์จากแหล่งชีวภาพ ซึ่ง PLA เป็นวัสดุที่มีความเปราะในขณะที่ PBS มีความสามารถในการยืดตัวได้ดีพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้สามารถขึ้นรูปได้หลากหลายกระบวนการขึ้นอยู่กับการใช้งาน การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Bicomponent Fiber) ระหว่างพอลิแลคติกแอซิด กับพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (PLA/PBS)

การศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบด้วยการขึ้นรูปให้เป็นลักษณะชิดติดกัน (Side-by-Side) ด้วยอัตราส่วนของพอลิเมอร์ 50 ต่อ 50 ในการขึ้นรูปใช้ความเร็วในการม้วนเก็บที่ 500, 750 และ 1,000 เมตรต่อนาที โดยมีอัตราส่วนลดขนาดเท่ากับ 1.66, 1.81 และ 2.0 ตามลำดับ

สำหรับเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านการลดขนาด พบว่าเมื่อเส้นใยผ่านการลดขนาด ความถี่ของรอยหยักในเส้นใยเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ผลทดสอบค่าความแข็งแรงและการหดตัวของเส้นใยสององค์ประกอบพบว่ามีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการลดขนาด ในขณะที่ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของเส้นใยสององค์ประกอบลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วในการม้วนเก็บ การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานของเส้นใยสององค์ประกอบตรวจสอบโดยเทคนิค SEM พบว่าเกิดการแยกตัวออกจากกันระหว่างการยืดติดของเส้นใยสององค์ประกอบที่ผ่านการลดขนาด นอกจากนั้นจุดหลอมเหลวของ PLA และ PBS ในเส้นใยสององค์ประกอบที่ผ่านการลดขนาดพบว่ามีค่าคล้ายคลึงกับที่พบในเส้นใยสององค์ประกอบที่ไม่ผ่านการลดขนาด

คำสำคัญ: เส้นใยสององค์ประกอบ พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต พอลิแลคติกแอซิด ลักษณะชิดติดกัน

| | |
|--------------------------|---|
| Thesis Title | Bicomponent Fiber from Polylactic Acid (PLA) and Polybutylene Succinate (PBS) |
| Name-Surname | Mr. Ektinai Junsri |
| Program | Materials Engineering |
| Thesis Advisor | Mr. Narongchai O-Charoen, Ph.D. |
| Thesis Co-advisor | Mr. Natee Srisawat, Ph.D. |
| Academic Year | 2013 |

ABSTRACT

At present, biodegradable polymers have been attracted to many researchers due to environmental problem concerns and the realization that our petroleum resources are limited. Polylactic acid (PLA) and Polybutylene succinate (PBS) are classified as the bio-based polymer. PLA is generally known as a brittle material, while PBS has good elastic properties. The both materials can be molded in several method. The aims of this research are to study how to make the bicomponent fiber from Polylactic acid (PLA) and Polybutylene succinate (PBS).

Bicomponent fiber was spun from polylactic acid (PLA) and polybutylene succinate (PBS) in side-by-side profile with polymer ratio of 50:50. Spinning speeds or take up speeds used in this study were 500, 750 and 1,000 m/min with drawn ratio 1.66, 1.81 and 2.0 respectively.

The results showed of that PLA/PBS bicomponent drawn fiber after drawing process clearly increased in the crimp frequently. The tenacity and shrinkage properties of PLA/PBS bicomponent fibers tended to increase after drawing process, while elongation at break decreased when increasing spinning speed. The fiber morphology was investigated by Scanning Electron Microscope (SEM). From SEM images, the splitting at the PLA/PBS interface in bicomponent drawn fiber were observed. In addition, the melting points of PLA and PBS in bicomponent drawn fiber were found similar to those in bicomponent undrawn fiber.

Keywords: bicomponent, polybutylene succinate, polylactic acid, side-by-side

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จจุล่งไปได้อย่างดีด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของ ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ ดร.นที ศรีสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์ ดร.กุลวดี สังข์สนิท กรรมการสอบและดร.จุริรัตน์ ประสาร ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณความอนุเคราะห์ด้าน วัสดุ เครื่องมือและสารเคมีในการทำวิจัย และเครื่องมือวิเคราะห์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการและภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ

ขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ พี่น้องและครอบครัว ที่สนับสนุนทั้งกำลังใจและกำลังทรัพย์ ทุกท่านที่มีส่วนให้ความสนับสนุนช่วยเหลือ รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ด้วย สำหรับคุณความดีอันเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เอกตินัย จันท์ศรี



สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | (3) |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | (4) |
| กิตติกรรมประกาศ..... | (5) |
| สารบัญ..... | (6) |
| สารบัญตาราง..... | (8) |
| สารบัญรูป..... | (9) |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 14 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ..... | 14 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 15 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 15 |
| 1.4 ประโยชน์ของการวิจัย..... | 16 |
| 1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย..... | 17 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 18 |
| 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 18 |
| 2.2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง..... | 30 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 58 |
| 3.1 แผนการดำเนินงาน..... | 58 |
| 3.2 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี..... | 59 |
| 3.3 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย..... | 60 |
| 3.4 การทดลองขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS..... | 62 |
| 3.5 การขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ผ่านลูกกลิ้งลดขนาด..... | 63 |
| 3.6 การทดสอบสมบัติของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS..... | 65 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง..... | 76 |
| 4.1 การทดลองขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS | 76 |
| 4.2 การขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ผ่านลูกกลิ้งลดขนาด..... | 83 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง..... | 98 |
| 5.1 สรุปผลการทดลองการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS | 98 |
| 5.2 สรุปผลการทดลองขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ผ่านลูกกลิ้งลดขนาด.... | 99 |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ..... | 100 |
| รายการอ้างอิง..... | 101 |
| ภาคผนวก..... | 104 |
| ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่..... | 105 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 123 |



สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 สภาวะการขึ้นรูปและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PBS..... | 26 |
| ตารางที่ 2.2 Spinning Techniques..... | 38 |
| ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน..... | 58 |
| ตารางที่ 3.2 สภาวะการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS..... | 63 |
| ตารางที่ 3.3 สภาวะการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านการลดขนาด (Drawn) | 64 |
| ตารางที่ 4.1 ค่าดัชนีการไหลของ PLA และ PBS..... | 77 |
| ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของ PLA, PBS และเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS | 79 |
| ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงของเส้นใย..... | 81 |
| ตารางที่ 4.4 ขนาดเบอร์ด้าย (Denier)..... | 83 |
| ตารางที่ 4.5 น้ำหนักของเส้นใยสององค์ประกอบ ก่อนและหลังถูกละลาย..... | 88 |
| ตารางที่ 4.6 การคืนตัวของรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Contraction, %CC)..... | 90 |
| ตารางที่ 4.7 ค่าการทดสอบลักษณะรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Characteristic)..... | 91 |
| ตารางที่ 4.8 ค่าความถี่ของรอยหยิกเส้นใยขนสัตว์..... | 92 |
| ตารางที่ 4.9 สมบัติทางความร้อนของเส้นใยเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS..... | 94 |
| ตารางที่ 4.10 การหดตัวของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS..... | 95 |

สารบัญรูป

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 ไมโครกราฟของผลึก PBS จากเทคนิค Polarized Optical..... | 19 |
| รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของ PLLA จากเทคนิค WAXD..... | 20 |
| รูปที่ 2.3 การวิเคราะห์รูปแบบผลึกของ PBS Fibers จากเทคนิค WAXD..... | 21 |
| รูปที่ 2.4 ค่ามอดูลัส (Tensile Strength Modulus) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at Break) ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS..... | 22 |
| รูปที่ 2.5 เส้นใยสององค์ประกอบที่ผ่านการดึงยึดเปรียบเทียบกับเส้นใยสององค์ประกอบ ที่ไม่ได้ผ่านการลดขนาด | 23 |
| รูปที่ 2.6 อัตราความเครียดและอัตราการดึงที่มีผลต่อผลึก..... | 24 |
| รูปที่ 2.7 รูปแบบผลึกจากเทคนิค WAXD..... | 25 |
| รูปที่ 2.8 ลักษณะการหักงอของเส้นใยที่อัตราการลดขนาดต่างกัน..... | 26 |
| รูปที่ 2.9 ลักษณะภาคตัดขวางของพอลิเมอร์อัดรีดผ่านสปินเนอร์ตต่างกันจากเทคนิค SEM..... | 28 |
| รูปที่ 2.10 ลักษณะภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS ที่ได้จากเทคนิค SEM..... | 29 |
| รูปที่ 2.11 ค่า T_m และ T_g ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS อัตราส่วนต่างกัน..... | 30 |
| รูปที่ 2.12 ลักษณะวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS จากเทคนิค SEM..... | 30 |
| รูปที่ 2.13 สูตรโครงสร้างของ PLA..... | 34 |
| รูปที่ 2.14 ลักษณะการย่อยสลายของพอลิแลกติกแอซิด..... | 35 |
| รูปที่ 2.15 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก PLA..... | 36 |
| รูปที่ 2.16 สูตรโครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS)..... | 36 |
| รูปที่ 2.17 Polymer in Powdered or Chip form can be Fed Directly to Melt-Spinning Equipment..... | 39 |
| รูปที่ 2.18 Conventional Spinning Plant..... | 40 |
| รูปที่ 2.19 Longitudinal Cross-Section of Spinneret Holes Showing Streamlining of Polymer Flow..... | 40 |
| รูปที่ 2.20 Spinneret Hole (Orifice) Cross-Section and Its Relation to The Fiber Cross-Section..... | 41 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.21 สัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่อัตราการม้วนเก็บต่างกัน ของเส้นใยพอลิเอสเตอร์..... | 44 |
| รูปที่ 2.22 กระบวนการปั่นเปียก (Wet Spinning)..... | 45 |
| รูปที่ 2.23 กระบวนการปั่นแห้ง (Dry-Spinning)..... | 46 |
| รูปที่ 2.24 การเรียงตัวของสายโซ่โพลิเมอร์ก่อน-หลังการลดขนาด..... | 47 |
| รูปที่ 2.25 สัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดขนาดและความเร็วในการม้วนเก็บ..... | 48 |
| รูปที่ 2.26 ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของเส้นใยที่ลดขนาด..... | 49 |
| รูปที่ 2.27 อุปกรณ์พื้นฐานทุกระบบ Hot Drawing..... | 51 |
| รูปที่ 2.28 รูปแบบภาคตัดขวางของเส้นใยสององค์ประกอบ Side-by-Side..... | 52 |
| รูปที่ 2.29 รูปแบบภาคตัดขวางของเส้นใยสององค์ประกอบแบบ Sheath-Core (S/C)..... | 53 |
| รูปที่ 2.30 ภาคตัดตามยาวและตัดตามขวางของเส้นใยสององค์ประกอบ Islands-in-the-Sea Fiber..... | 54 |
| รูปที่ 2.31 ส่วนประกอบในภาคตัดขวางของเส้นใยสององค์ประกอบแบบ Segmented Pie..... | 54 |
| รูปที่ 2.32 Hollow Pie Wedge Structure..... | 55 |
| รูปที่ 2.33 Conjugate Structure..... | 55 |
| รูปที่ 2.34 Segmented Cross Structure | 56 |
| รูปที่ 2.35 Tipped Trilobal Structure..... | 56 |
| รูปที่ 2.36 เครื่องผลิตเส้นใยสององค์ประกอบ Hills: Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model LBS-100..... | 57 |
| รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย..... | 60 |
| รูปที่ 3.2 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย (ต่อ)..... | 61 |
| รูปที่ 3.3 Hills: Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model LBS-100..... | 62 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.4 Hills: Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model | |
| LBS-100 พร้อมชุดลดขนาด (Draw Unit) และชุดม้วนเก็บ (Winding Unit)..... | 65 |
| รูปที่ 3.5 เครื่องกรอผ้า..... | 66 |
| รูปที่ 3.6 Microtome และกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope, OM)..... | 67 |
| รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงดึงและแบบติดชิ้นงาน (Template)..... | 68 |
| รูปที่ 3.8 เครื่องดีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)..... | 69 |
| รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index)..... | 70 |
| รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบสมบัติการหดตัวของเส้นใย (%Shrinkage)..... | 71 |
| รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบ Crimp Contraction..... | 72 |
| รูปที่ 3.12 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ Crimp Length..... | 74 |
| รูปที่ 3.13 สารละลาย Tetrahydrofulan (C ₄ H ₈ O)..... | 75 |
| รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการทดสอบด้วยสารละลาย Tetrahydrofulan (C ₄ H ₈ O)..... | 75 |
| รูปที่ 4.1 ภาคตัดขวางของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS..... | 76 |
| รูปที่ 4.2 เส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS จากกล้องจุลทรรศน์(OM) กำลังขยาย 4 เท่า..... | 77 |
| รูปที่ 4.3 ลักษณะความฟองฟูของเส้นใย..... | 78 |
| รูปที่ 4.4 การฟองฟูของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS..... | 78 |
| รูปที่ 4.5 สมบัติทางความร้อนจากเทคนิค | 80 |
| ดีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์(DSC)..... | |
| รูปที่ 4.6 ค่า Stress-Strain ของเส้นใย PLA, PBS และ PLA/PBS..... | 82 |
| รูปที่ 4.7 ลักษณะเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านลูกกลิ้งลดขนาด..... | 84 |
| รูปที่ 4.8 เทคนิค SEM กำลังขยาย 150 เท่า เส้นใยสององค์ประกอบ | |
| PLA/PBS ที่ผ่านการลดขนาดและไม่ผ่านการลดขนาดที่ความเร็วม้วนเก็บ | |
| 500 m/min | 85 |
| รูปที่ 4.9 เทคนิค SEM กำลังขยาย 150 เท่า เส้นใยสององค์ประกอบ | |
| PLA/PBS ที่ผ่านการลดขนาดและไม่ผ่านการลดขนาดที่ความเร็วม้วนเก็บ | |
| 750 m/min | 86 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.10 เทคนิค SEM กำลังขยาย 150 เท่า เส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านการลดขนาดและไม่ผ่านการลดขนาดที่ความเร็วหมุนเก็บ 1,000 m/min | 87 |
| รูปที่ 4.11 ภาพตัดขวางของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS จากกล้องจุลทรรศน์(OM) กำลังขยาย 10 เท่า..... | 88 |
| รูปที่ 4.12 เทคนิค SEM ของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS หลัง PLA ถูกละลายด้วยสารละลายที่กำลังขยาย 100 และ 500 เท่า..... | 89 |
| รูปที่ 4.13 ค่าการคืนตัวของรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Contraction, %CC)..... | 90 |
| รูปที่ 4.14 ลักษณะความยาวของรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Length) ที่ 500, 750 และ 1,000 เมตรต่อหน้าที่อัตราลดขนาดต่างกัน..... | 92 |
| รูปที่ 4.15 สมบัติทางความร้อนจาก เทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์(DSC)..... | 93 |
| รูปที่ 4.16 ค่าการหดตัวในเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS..... | 95 |
| รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งแรงของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS..... | 96 |
| รูปที่ 4.18 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS..... | 97 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | |
|------------------------|---|
| ASTM | มาตรฐานการทดสอบของประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society of Testing and Materials) |
| C_f | ความถี่ของรอยหยิก (Crimp Frequency) |
| $^{\circ}\text{C}$ | องศาเซลเซียส |
| %CC | การคืนตัวของรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Contraction) |
| DIN | มาตรฐานการทดสอบของประเทศเยอรมัน (Deutsch Institute Norms) |
| DR | อัตราการลดขนาด (Draw Ratio) |
| DSC | ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning calorimeter) |
| g | กรัม |
| g/cm^3 | กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร |
| m/min | เมตรต่อนาที |
| MFI | ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index) |
| L_c | ความยาวของรอยหยิก (Length Crimp) |
| PLA | พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) |
| PBS | พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (PolyButylene Succinate, PBS) |
| rpm | รอบต่อนาที (Round per Minute) |
| T | อุณหภูมิ (Temperature) |
| T_c | อุณหภูมิก่อผลึก (Crystallization Temperature) |
| T_g | อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature) |
| T_m | อุณหภูมิหลอมตัวผลึก (Crystalline Melting Temperature) |
| μm | ไมโครเมตร |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในภาวะปัจจุบันที่ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ทำมาจากพลาสติกทำให้มีปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นจึงก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดโดยการฝังกลบและส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมนอกจากนี้พลาสติกเกือบทั้งหมดในปัจจุบันผลิตจากวัตถุดิบที่เป็นน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งมีปริมาณจำกัดและราคาที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยกลไกการย่อยสลายจะแตกต่างกันตามโครงสร้างของพลาสติก เช่น การย่อยสลายโดยใช้แสง (Photo Degradation), การย่อยสลายเชิงกล (Mechanical Degradation) หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradation) เป็นต้น ซึ่งกลไกข้างต้นนั้นทำให้พลาสติกแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ เท่านั้นจึงต้องใช้เวลาในการย่อยสลายให้เป็นสารที่พืชสามารถนำกลับไปใช้ได้ และไม่สามารถกำจัดได้โดยการฝังกลบต่างจากพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastic) ที่สามารถเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เมื่ออยู่ในสภาวะของการฝังกลบได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้

พลาสติกย่อยสลายมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อทดแทนพลาสติกที่ใช้อยู่กันในปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายได้ที่นิยมใช้กันมากคือ พอลิแลคติกเอซิด (PLA) และ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดพอลิเอสเตอร์ (Polyester) ผลิตจากกระบวนการหมักน้ำตาลให้เป็นกรดแลคติก จากนั้นจึงนำมาทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ผลิตเป็นเม็ดพลาสติก PLA โดยมีลักษณะทั่วไปคือ มีความใส ถ้ายืด ความร้อนและความชื้นได้ดีเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆ ทั้งการฉีด การอัด การเป่าขึ้นรูป การอัดรีดเป็นเส้นใยและสามารถย่อยสลายได้ที่อุณหภูมิ 60°C ขึ้นไปโดยขั้นตอนแรก PLA จะถูกย่อยสลายไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้และกรดแลคติกโดยการไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นภายในระยะเวลาประมาณ 2 สัปดาห์ สารประกอบและกรดแลคติกที่ได้จะถูกย่อยต่อไปด้วยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ส่วนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีสมบัติคล้ายกับ PLA แต่ PBS จะมีความยืดหยุ่นและสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่า ส่วนการย่อยสลายของ PBS เกิดขึ้นโดยเริ่มจากการย่อยสลายทางชีวภาพโดยผ่านกลไกของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นที่พันธะเอสเทอร์ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของ PBS ลดลงและสามารถเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ต่อไป

มีงานวิจัยระบุว่า PBS สามารถผสมกับ PLA เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความยืดหยุ่นได้ [1] ซึ่งพลาสติกย่อยสลายได้ทั้ง 2 ชนิดนี้ยังสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้จึงเป็นประเด็นทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนาเป็นเส้นใยสององค์ประกอบ (Bicomponent Fiber) ระหว่าง PLA กับ PBS ซึ่งการผลิตเส้นใยสององค์ประกอบในเชิงการค้าครั้งแรกนั้นถูกผลิตโดยบริษัท DuPont ในปี ค.ศ 1960 จุดประสงค์เริ่มแรกของเส้นใยสององค์ประกอบคือ การทำให้เกิดเส้นใยที่หยิกงอได้ด้วยตัวเองหรือ Self-Crimping [2] เส้นใยสององค์ประกอบเป็นเส้นใยพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยการแบ่งเป็นสององค์ประกอบในขอบเขตวิภาคที่แตกต่างกันค่อนข้างชัดเจน [3] เส้นใยสององค์ประกอบจะเกิดขอบเขตวิภาคที่มีอิสระจากกัน ทำให้สมบัติของแต่ละองค์ประกอบมีสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่น ซึ่งเส้นใยสององค์ประกอบสามารถขึ้นรูปได้ในลักษณะรูปแบบต่างๆ คือ Sheath-Core, Side-by-Side, Layer-by-Layer, Islands-in-the-Sea และ Segmented Pie เป็นต้น ซึ่งในการศึกษานี้ทำการศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยในลักษณะแบบซิดติดกัน (Side-by-Side) ที่อัตราส่วน 50 : 50 ทั้งนี้เพราะว่าการขึ้นรูปในลักษณะนี้มีโครงสร้างง่ายที่สุดจึงทำให้เกิดเส้นใยที่หยิกงอได้ด้วยตัวเองได้ง่าย [4] ซึ่งเป็นการลดขั้นตอนในการผลิตให้น้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการเท็กซ์เจอร์ ที่เป็นกระบวนการที่ทำให้เส้นใยเกิดความพองฟู

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบลักษณะแบบซิดติดกัน (Side-by-Side)

1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติของเส้นใยสององค์ประกอบลักษณะแบบซิดติดกัน (Side-by-Side) ระหว่าง PLA กับ PBS ที่ผ่านการลดขนาด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบแบบซิดติดกันด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใย Hills : Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model LBS-100 ด้วยความเร็วในการม้วนเก็บที่แตกต่างกันคือ 500, 750 และ 1,000 เมตรต่อนาทีตามลำดับทั้งที่ผ่านลูกกลิ้งลดขนาดและไม่ผ่านลูกกลิ้งลดขนาด

1.3.2 ทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของเส้นใยสององค์ประกอบลักษณะแบบซิดติดกัน

1. ทดสอบความแข็งแรงของเส้นใย (Tensile Properties) ตามมาตรฐาน ASTM D 2256-02 และ ASTM D 3822
2. ทดสอบการหดตัวของเส้นใย (Fiber Shrinkage Testing) ตามมาตรฐาน ASTM D 5104-02
3. การทดสอบการคืนตัวของรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Contraction, %CC)
4. การทดสอบลักษณะรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Characteristic)
5. การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน (Differential Scanning Calorimeter, DSC)
6. การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope, OM) และ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
7. การทดสอบลักษณะการติดกันของเส้นใยสององค์ประกอบ
8. การทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index, MFI)

1.4 ประโยชน์ของการวิจัย

- 1.4.1 สามารถผลิตเส้นใยย่อยสลายได้ที่หยิกงอได้ด้วยตัวเอง (Self-Crimping) ในกระบวนการเดียว
- 1.4.2 สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เส้นใย PLA กับ PBS และเพิ่มการใช้งานของเส้นใยสององค์ประกอบของ PLA กับ PBS

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 เตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1.5.3 เตรียมขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบลักษณะแบบซิดติดกันตามเงื่อนไขการทดลอง

1.5.4 ทำการวิเคราะห์สมบัติของเส้นใยสององค์ประกอบลักษณะแบบซิดติดกัน

ได้แก่ การทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index, MFI), ทดสอบความแข็งแรงของเส้นใย (Tensile Properties), ทดสอบการหดตัวของเส้นใย (Fiber Shrinkage Testing), การทดสอบลักษณะรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Characteristic), การหาค่าการคืนตัวของรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Contraction, %CC), การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน (Differential Scanning Calorimetry, DSC), การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope, OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

1.5.5 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการวิจัย



บทที่ 2

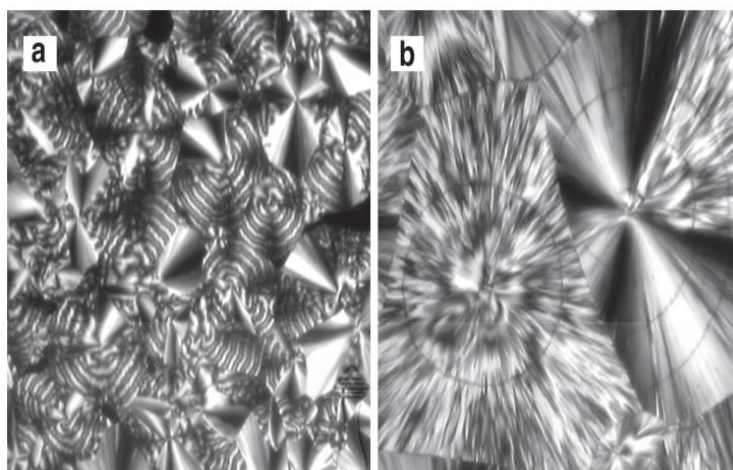
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบและผลการทดสอบสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสมที่สามารถนำไปประยุกต์ในการทำวิจัย ยกตัวอย่างดังต่อไปนี้

ปี 2001 J.K LEE และคณะ[5] ได้ศึกษาผลของสภาวะเงื่อนไขในการลดขนาดในแนวแกนการจัดเรียงตัวของฟิล์ม Poly(L-lactide) (PLLA) โดยตัวอย่างถูกขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัด ตัวอย่างจะถูกตรวจสอบด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Dichroism และการวิเคราะห์เชิงความร้อน ผลการวิเคราะห์ได้แสดงว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเรียงตัวในแนวแรงดึงของ PLLA คืออัตราการลดขนาด, อุณหภูมิลดขนาด และสัดส่วนการลดขนาด โดยตัวอย่างอุณหภูมิพื้นฐานจะมีการเรียงตัวที่สูงขึ้นเมื่อได้รับการลดขนาดที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากสายโซ่เกิดการคลายตัวได้ช้าซึ่งในทางกลับกันการลดขนาดที่อุณหภูมิสูงสายโซ่โมเลกุลจะเกิดการเรียงตัวที่สูงขึ้น นำไปสู่โอกาสในเกิดผลึก

ปี 2001 Gan ZH และคณะ[6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างภายในและสมบัติทางความร้อนและการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ Polybutylene Succinate (PBS) ซึ่งอธิบายไว้ว่า PBS เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบกิ่งผลึกซึ่งสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรงต่อแรงดึง, ความต้านทานต่อแรงกระแทกและความสามารถในการบิดงอ ความโปร่งใสและการย่อยสลายทั้งหมดขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกและระดับเกิดผลึกที่มีขอบเขตพฤติกรรมเกิดผลึกของ PBS ดูได้จากรูปที่ 2.1 จะคล้ายกับของ Polyethylene คือความหนาของ Lamellar จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตกผลึกซึ่งความหนาของ Lamellar จะเกิดขึ้นโดยการให้ความร้อนความหนาของผลึก PBS ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตกผลึก ความหนาของแกนกลางผลึก Lamellar จะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอและที่เป็นส่วนต่อต้นฐานจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิตกผลึก แต่ระดับการเพิ่มของการตกผลึกจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยต่ออุณหภูมิ

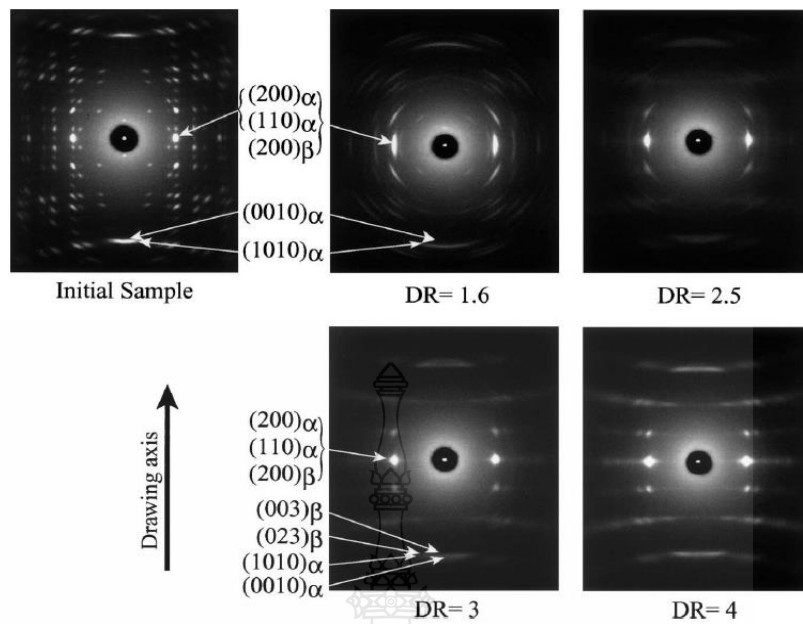


(a) ไมโครกราฟจากเทคนิค Polarized Optical ที่อุณหภูมิ 70 °C

(b) ไมโครกราฟจากเทคนิค Polarized Optical ที่อุณหภูมิ 90 °C

รูปที่ 2.1 ไมโครกราฟของผลึก PBS จากเทคนิค Polarized Optical [6]

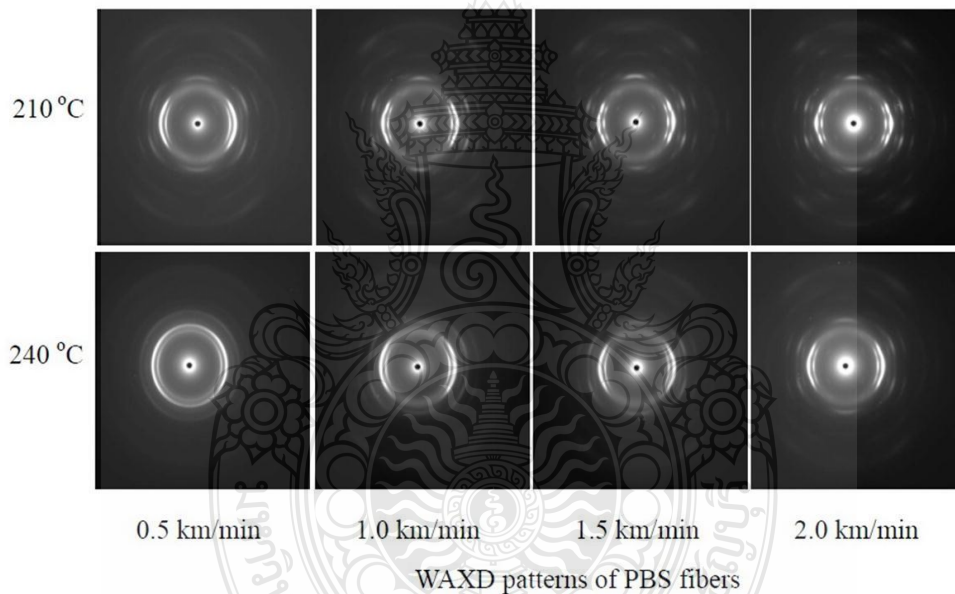
ปี 2004 K. Takashi และคณะ[7] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกฟิล์ม Poly (L-lactide)(PLLA) ที่ได้จากการขึ้นรูปแบบอัดจากนั้นนำตัวอย่างมาลดขนาดโดยใช้สภาวะที่แรงดึงและอุณหภูมิการลดขนาดต่างกัน ซึ่งจากการศึกษาผลของอัตราการลดขนาด (DR), อุณหภูมิลดขนาด (T_d) และความเค้นภายในของผลึก พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงผลึกจาก α -Form เป็น β -Form โดยที่แรกเริ่มของการลดขนาดผลึก α -Form จะมีการเรียงตัวสูง การเรียงตัวกระจายเป็นวงกว้างและเมื่อลดขนาดต่อไปผลึก α -Form จะกลายเป็นผลึก β -Form เมื่อเพิ่มอัตราการลดขนาดสำหรับการลดขนาดที่ T_d คงที่การเปลี่ยนแปลงผลึกยังคงดำเนินไป ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจากการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าอัตราการลดขนาดและอุณหภูมิการลดขนาดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกของฟิล์ม PLLA ซึ่งจากผลการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกจาก α -Form เป็น β -Form ให้ฟิล์ม PLLA มีความสามารถในการยึดตัว มีความเหนียวสูงขึ้น



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของ PLLA จากเทคนิค WAXD [7]

ปี 2005 Sangmook Lee และ Jae Wook Lee [8] ศึกษาสมบัติทางความร้อน การไหล ลักษณะพื้นฐานทางวิทยาและสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตอะดิเพท (PBSA) ด้วยเครื่องนวดผสมจากนั้นทำการขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆเพื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดีฟเฟอร์เรนเซียสสแกนนิงแคลลอริเมทรี พบว่าสมบัติทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตอะดิเพทหลังการผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ พบว่าสมบัติทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตอะดิเพท หลังการผสมพบว่ามีค่าเสถียรแต่ต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตอะดิเพท 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสมศึกษาจากสมบัติทางความร้อน สมบัติการไหลมีการเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนที่เปลี่ยนไปของพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่ออัตราส่วนของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตอะดิเพทเพิ่มขึ้นค่าความหนืดต่อแรงดึงและค่ายังส์ โมดูลัสลดลงที่อัตราส่วน 80:20 ของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตอะดิเพท พบว่าค่าความหนืดต่อแรงกระทำสูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆส่วนลักษณะพื้นฐานทางวิทยาของพอลิเมอร์ผสมได้แสดงถึงความไม่เข้ากันของการผสมและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ พบว่าอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมมีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพที่อัตราส่วน 80:20 ของพอลิแลคติกแอซิดและ พอลิบิวทีลีนซัคซิเนตอะดิเพท มีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด

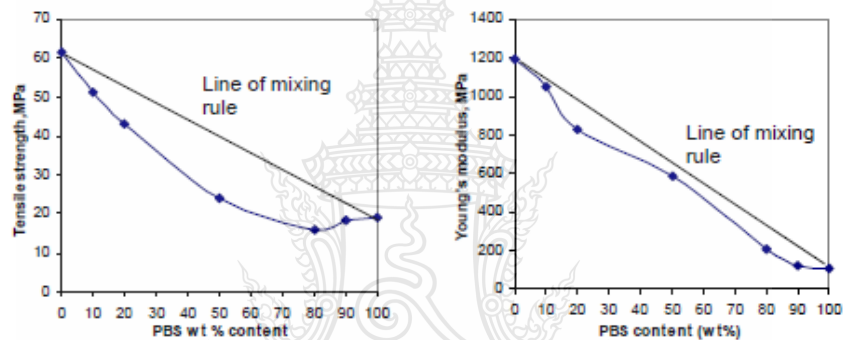
ปี 2006 X. Q. Shi และคณะ[9] ได้ศึกษาการพัฒนาโครงสร้างและสมบัติต่างๆด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยหลอมเหลว Poly(butylene terephthalate-co-succinate-co-adipate)(PB TSA) และ Polybutylene Succinate (PBS) ในการศึกษา PBS และ PB TSA จะถูกอบด้วยตู้อบแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นพอลิเมอร์จะถูกอัดรีดด้วยกระบวนการอัดรีดที่มีตัวควบคุมเนื้อพอลิเมอร์ (Gear Pump) เส้นใยจะถูกอัดรีดที่อุณหภูมิต่างกันที่ 210, 240, 250 และ 270 °C และม้วนเก็บด้วยความเร็วที่ต่างกันคือ 0.5, 1, 1.5 และ 2 กิโลเมตรต่อนาทีตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของความเร็วในการม้วนเก็บทำให้เกิดการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลเนื่องจากอัตราความเค้นที่เพิ่มขึ้นทำให้สายโซ่โมเลกุลมีความสามารถในการเรียงตัวในแนวเดียวกันสายโซ่จึงอยู่ชิดกันมากขึ้นทำให้โครงสร้างผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยมีแนวโน้มการเกิดผลึกเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.3 การวิเคราะห์รูปแบบผลึกของ PBS Fibers จากเทคนิค WAXD [9]

ปี 2007 Bhatia และคณะ[10] ได้ทำการวิจัยและการศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (PBS) โดยการผสมกันที่อัตราส่วนต่างๆด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติการไหล และสมบัติเชิงกล โดยศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการศึกษาพบว่าเฟสที่ได้เรียบ และทำการวิเคราะห์ค่า T_g ด้วยเครื่อง Modulated

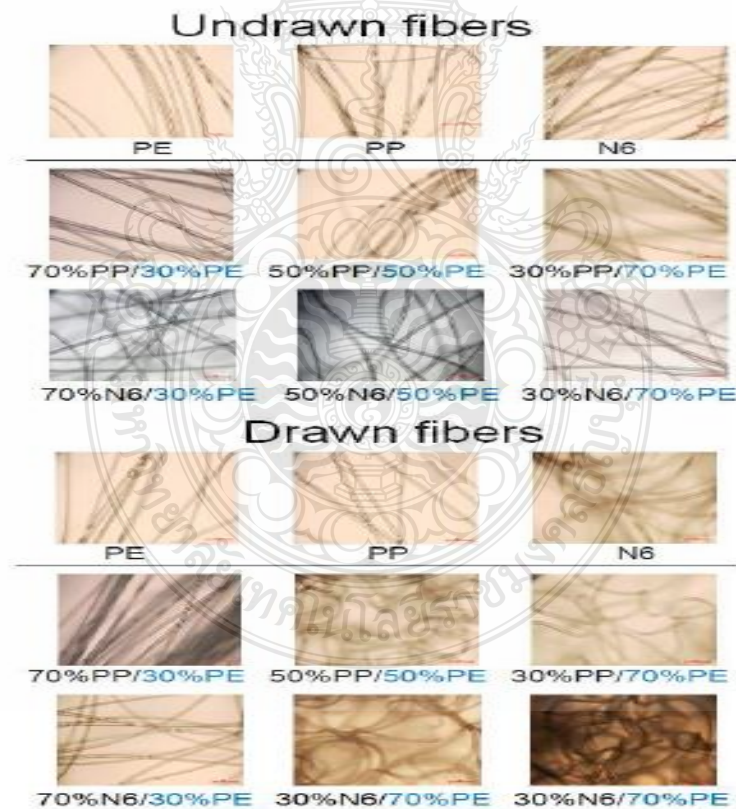
Differential Scanning Calorimeter (MDSC) พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่า T_g เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แต่จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA:PBS ที่อัตราส่วน 80:20 ร้อยละโดยน้ำหนัก สามารถเข้ากันได้บางส่วน และพบว่าค่ามอดูลัส (Young's Modulus) และค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตดังแสดงในรูปที่ 2.4 อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA:PBS ที่อัตราส่วน 80:20 ร้อยละโดยน้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกับกฎการผสมและผลของการไหลแสดงให้เห็นว่าการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดที่อัตราส่วนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต้องน้อยกว่า 20 ร้อยละโดยน้ำหนัก ซึ่งพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจะไปลดความเปราะของ PLA ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA:PBS สามารถนำมาแทนพลาสติกสำหรับงานกลุ่มบรรจุภัณฑ์



รูปที่ 2.4 ค่ามอดูลัส (Young's Modulus) และค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS [10]

ปี 2010 Feng He [11] ได้ทำการวิจัยและศึกษาสมบัติพื้นฐานของเส้นใยสององค์ประกอบระหว่าง Nylon 6 / Polyethylene (N6/PE) และ Polypropylene / Polyethylene (PP/PE) ที่มีการดึงยืดและไม่มีการดึงยืด และมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของส่วนประกอบ 30%, 50%, และ 70% ตามลำดับ โดยทั้งสองมีดีเนียร์ที่เท่ากัน เส้นใยจะผ่านลูกกิ้งที่ความเร็ว 400 รอบ/นาทิจำานผ่านสองลูกกิ้งที่ความเร็ว (400 รอบ/นาทิจำาน 900 รอบ/นาทิจำาน) ลูกกิ้งสุดท้ายที่ความเร็ว 900 รอบ/นาทิจำาน และม้วนเก็บที่ความเร็ว 900 รอบ/นาทิจำาน มีการเพิ่มของความเร็วในการหมุนเพื่อให้ได้อัตราส่วนการดึงยืดเท่ากับ 2.25 จากการทดสอบทางสัญญาณพบว่าเส้นใยสององค์ประกอบที่ผ่านการดึงยืดจะทำให้เกิดการหยิกงอได้ด้วยตัวเอง การดึงยืดจะแสดงความหยิกงอได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยสององค์ประกอบที่ไม่ได้ดึงยืด ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เส้นใยสององค์ประกอบที่

อัตราส่วนของ PE สูงแสดงให้เห็นถึงระดับความโค้งงอที่มากสำหรับทั้งสองคือเส้นใยสององค์ประกอบ N6/PE และ PP/PE และเมื่อให้แรงตามทิศทางการเรียงตัวระหว่างกระบวนการดึงยืดการยืดเกาะระหว่างอินเตอร์เฟซ ของสององค์ประกอบจะถูกทำลายส่งผลให้องค์ประกอบในเส้นใยเกิดการแยกออกจากกัน ลักษณะนี้อาจเป็นไปได้เนื่องจากการชักนำให้เกิดเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในโดยกระบวนการดึงยืดซึ่งจากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงพบว่า เมื่อทดสอบเส้นใยแบบเดี่ยว (Single Fiber) ของเส้นใยสององค์ประกอบที่มีความแตกต่างของระยะเกาะ สมบัติการทนต่อแรงดึงลดลงเมื่อเพิ่มระยะเกาะของตัวอย่างซึ่งเป็นผลที่ต่อเนื่องมาจากการเชื่อมต่อที่ไม่ดีของอินเตอร์เฟซ และจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงจะสังเกตได้ว่ามักจะมีส่วนประกอบที่เกิดการขาดก่อนและแยกตัวออกจากเส้นใยที่ทดสอบ ซึ่งส่วนที่เหลือยังคงอยู่ภายใต้แรงจนกระทั่งถึงจุดขาด เส้นใยสององค์ประกอบ PP/PE ที่มีปริมาณ PE สูงพบการแยกกันของเส้นใยได้ง่ายของค์ประกอบที่เป็น PP จะขาดก่อน PE

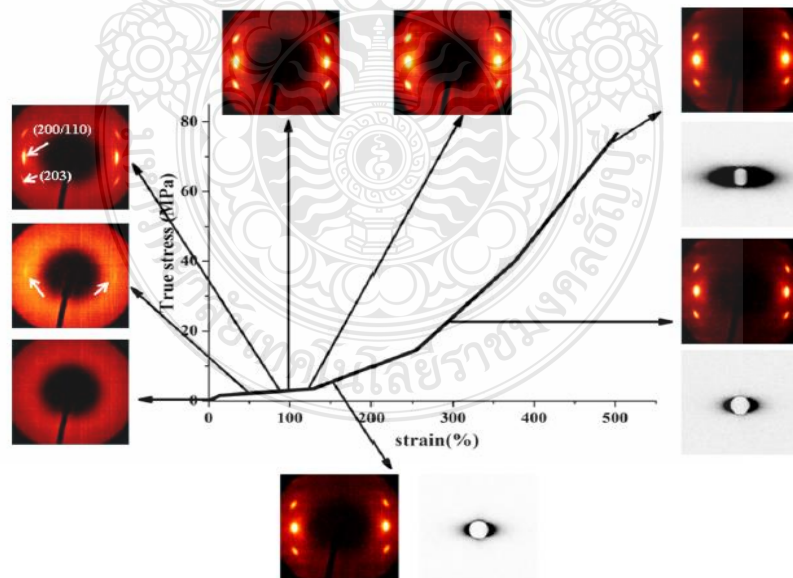


รูปที่ 2.5 เส้นใยสององค์ประกอบที่ผ่านการลดขนาดเปรียบเทียบกับเส้นใยสององค์ประกอบที่ไม่ได้ผ่านการลดขนาด [11]

ปี 2011 Xiuqin Z. และคณะ[12] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของส่วนอสังฐานของ Polylactic Acid (PLA) ที่เสีรูปจากการดึงยึดโดยตัวอย่างจะถูกเตรียมด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปจากการศึกษาการเสีรูปหรือการเป็นสื่อให้สายโซ่เกิดการเรียงตัวและการเกิดผลึกในส่วน โครงสร้างสังฐานวิทยาของ PLA พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงภายใต้อัตราความเครียดที่แตกต่างกัน ผลที่แสดงถึงอัตราความเครียดมีอิทธิพลสำคัญสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ

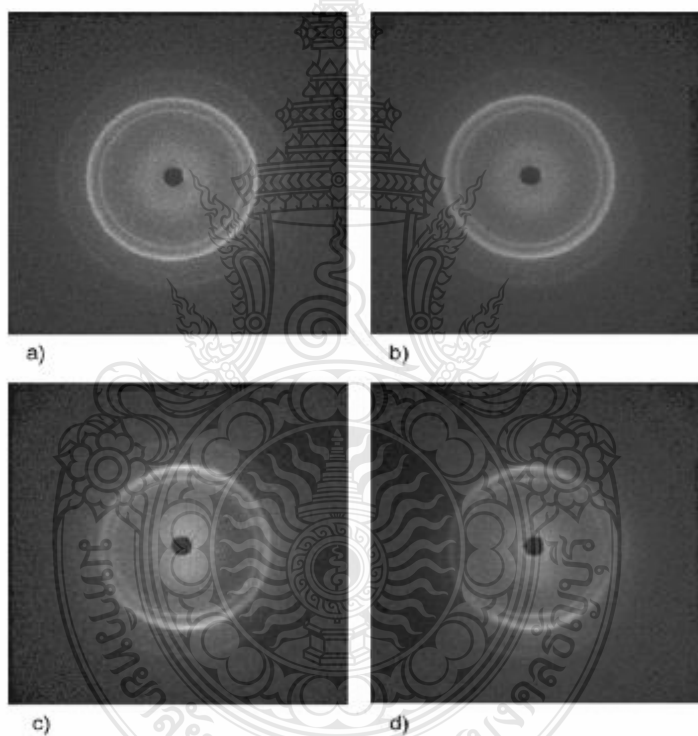
1. ที่ Small Strain (น้อยกว่า 100%) ความสามารถในการก่อผลึกของ PLA เพิ่มขึ้นโดยการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลจะเหนียวทำให้เกิดผลึก
2. ที่ Intermediate Strain (100%-160%) ความสามารถในการก่อผลึกของ PLA ลดลงเล็กน้อยเนื่องจากความเสียหายที่อยู่ในผลึกภายใต้แรงเค้นประกอบด้วยรูปแบบของช่องว่างและโพรงอากาศที่เกิดขึ้นใหม่
3. ที่ High Strain (มากกว่า 160%) การเพิ่มของปริมาณการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในส่วนอสังฐานทำให้เกิดผลึกใน PLA

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าที่อัตราความเครียดและอัตราการดึงยึดมีบทบาทสำคัญในการทำให้เกิดผลึกและการเรียงตัวของส่วน อสังฐานใน PLA ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 อัตราความเครียดและอัตราการดึงที่มีผลต่อผลึก [12]

ปี 2011 Y. J. Phua และคณะ[13] ได้ทำการวิจัยและศึกษาสมบัติเชิงกลและการพัฒนาโครงสร้างของ Polybutylene Succinate (PBS)/Organo-Montmorillonite (OMMT) นาโนคอมโพสิต ทำการผสมด้วยเครื่อง Internal Mixer แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัด จากนั้นนำตัวอย่างที่ขึ้นรูปได้ไปผ่านลูกกลิ้งเครื่องผสมแบบลูกกลิ้งคู่ (Two-roll Mill) โดยไม่มีการให้ความร้อน จากการศึกษาพบว่ารูปวงแหวนดังรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่า PBS วัสดุแบบ Isotropic ซึ่งเกิดการเรียงตัวโดยความหนาจะลดลงโดยการม้วนด้วยลูกกลิ้งเย็นในแนวเดียว เพื่อยืนยันว่า PBS เป็น วัสดุแบบ Isotropic เมื่ออัตราส่วนลูกกลิ้งเท่ากับ 2.5 เท่าของลูกกลิ้งแรก จะเห็นได้ว่าปริมาณความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางและรัศมีแสดงให้เห็นถึงการพัฒนาการเรียงตัวของสายโซ่โพลิเมอร์ของ PBS ซึ่งจะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ผลึกของ PBS จะมีค่าลดลงจากตารางที่ 2.1 เกิดจากบริเวณที่เป็นผลึกขนาดใหญ่ถูกทำลายซึ่งทำให้ผลึกของ Lamellar มีความหนาลดลง



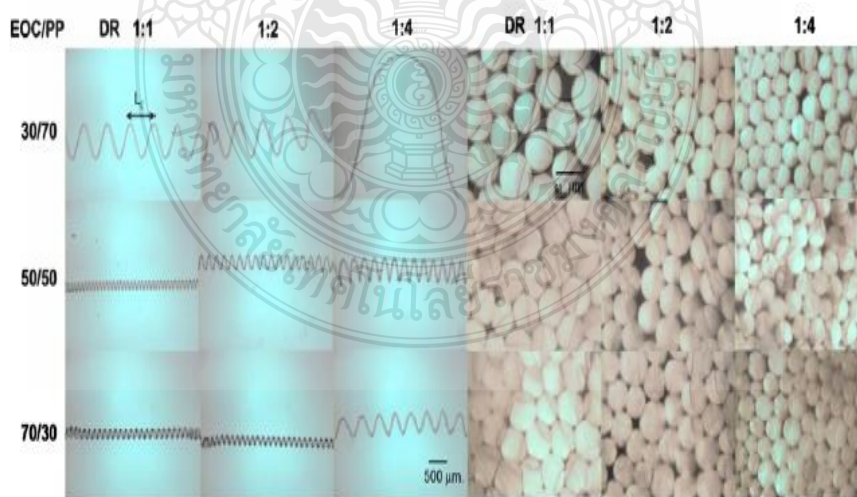
- (a) Unrolled
- (b) Rolled 1.25
- (c) Rolled 1.67
- (d) Rolled 2.50

รูปที่ 2.7 รูปแบบผลึกจากเทคนิค WAXD [13]

ตารางที่ 2.1 สภาวะการขึ้นรูปและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PBS

| Material | Condition | %X _C |
|----------|-----------|-----------------|
| PBS | Unrolled | 49.37 |
| | 1.25 | 46.98 |
| | 1.67 | 46.75 |
| | 2.50 | 40.74 |

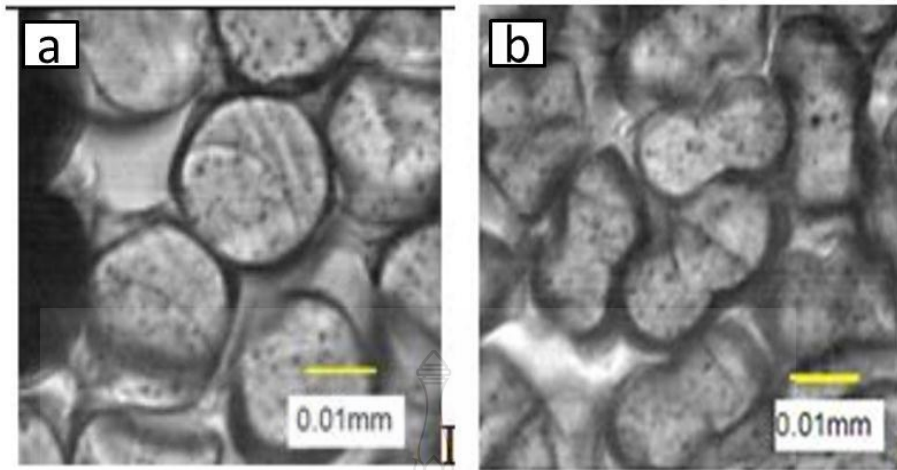
ปี 2012 Chureerat Prahsam และคณะ[4] ได้ทำการวิจัยและศึกษาสมบัติการเกิดการหยิกงอได้ด้วยตัวเอง (Self-Crimping) ของเส้นใยสององค์ประกอบแบบ Side-by-Side ของพอลิพรอพิลีน (PP) กับเอททิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (EOC) พบว่าสัดส่วนขององค์ประกอบในเส้นใยสององค์ประกอบและอัตราส่วนการดึงยืดมีผลต่อลักษณะการหยิกงอของเส้นใยสององค์ประกอบระหว่าง EOC/PP แสดงให้เห็นถึงการหยิกงอได้ด้วยตัวเองที่ระดับแตกต่างกันเมื่อถูกดึงยืดอย่างเต็มที่ เส้นใยมีแนวโน้มมีความหยิกงอเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ EOC (มากกว่า 50 %) แต่ลดลงโดยอัตราส่วนการดึงยืดเส้นใย เส้นใยสององค์ประกอบ EOC/PP ที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50 มีความหยิกงอสูงสุด โดยคำนึงถึงความความยาวของการหยิกงอและความสามารถในการขยายออก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 พฤติกรรมการเกิดความหยิกงอได้ด้วยตัวเองได้ถูกอธิบายว่าเกิดมาจากความไม่สมดุลของแรงเป็นผลจากความแตกต่างในความสามารถในการยืดตัวและการทิศทางจัดเรียงตัวของวิภาค EOC และ PP



รูปที่ 2.8 ลักษณะการหยิกงอของเส้นใยที่อัตราการลดขนาดต่างกัน [4]

ปี 2012 รุ่งนภา รักท้วม และคณะ[14] ได้ศึกษาผลของพอลิเอธิลีนไกลคอล(PEG) ต่อพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนต (PBS) พอลิเมอร์ผสมเตรียมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ที่อุณหภูมิกระบอกฉีด 170-185 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 80 รอบต่อนาที อัตราส่วนของ PLA:PBS ที่ศึกษาคือ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 0:100 และเติม PEG น้ำหนักโมเลกุล 6000 (PEG 6000) ที่ปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 (ร้อยละโดยน้ำหนัก) นำพอลิเมอร์ผสมไปทดสอบค่าดัชนีการไหล ลักษณะพื้นฐานวิทยา ความทนทานแรงดึง ความทนทานต่อแรงกระแทก ความแข็งและสมบัติทางความร้อน พบว่าเมื่ออัตราส่วน PBS ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าความทนทานแรงดึง ความทนทานต่อแรงกระแทก และความแข็งลดลง ลักษณะพื้นฐานวิทยาแสดงให้เห็นการแยกเฟสของพอลิเมอร์ผสมในทุกอัตราส่วนเมื่อเติม PEG 6000 ที่ปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 ร้อยละโดยน้ำหนัก พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ PEG 6000 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีการไหล และความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความทนทานแรงดึง และความแข็งลดลง ลักษณะพื้นฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดสามารถรวมตัวเข้ากันได้ดีที่การเติม PEG 6000 ปริมาณ 2, 4 และ 6 ร้อยละโดยน้ำหนักหากเติมปริมาณ PEG 6000 มากกว่านี้จะเกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์ผสมในทุกอัตราส่วน

ปี 2013 Fumei Wang และคณะ[15] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการหยิกงอและความเครียดในการยืดตัวของ Poly(trimethylene Terephthalate (PTT) และ Polyethylene Terephthalate (PET) ทำการขึ้นรูปเส้นใยให้เกิดสมบัติหยิกงอได้ด้วยตัวเอง ด้วยการออกแบบสปินเนอร์ที่ต่างกัน 2 ชุด ซึ่งความหยิกงอถูกประมาณค่าบนพื้นฐานของพารามิเตอร์ของภาคตัดขวางและสมบัติของพอลิเมอร์ โดยความเครียดในการยืดตัวจะเกี่ยวข้องกับการกำจัดความหยิกงอ และจากการวัดค่าโดยตรงจากกราฟความเค้นและความเครียดของเส้นใย พบว่าความหยิกงอของ PTT/PET ทั้ง 2 ชุดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PTT ความสัมพันธ์ของความเครียดในการยืดตัวกับการประมาณค่าความหยิกงอที่ได้มีความสัมพันธ์กับเป็นกราฟเส้นตรงเชิงบวกและจากรูปถ่ายที่ได้จากเทคนิค SEM ดังแสดงในรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่าการออกแบบสปินเนอร์ให้มีทางไหลของพอลิเมอร์ต่างกันจะทำให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะภาคตัดขวางที่ต่างกันแม้จะเป็นสปินเนอร์ที่มีรูปแบบภาคตัดขวางพื้นฐานเป็นแบบเดียวกัน

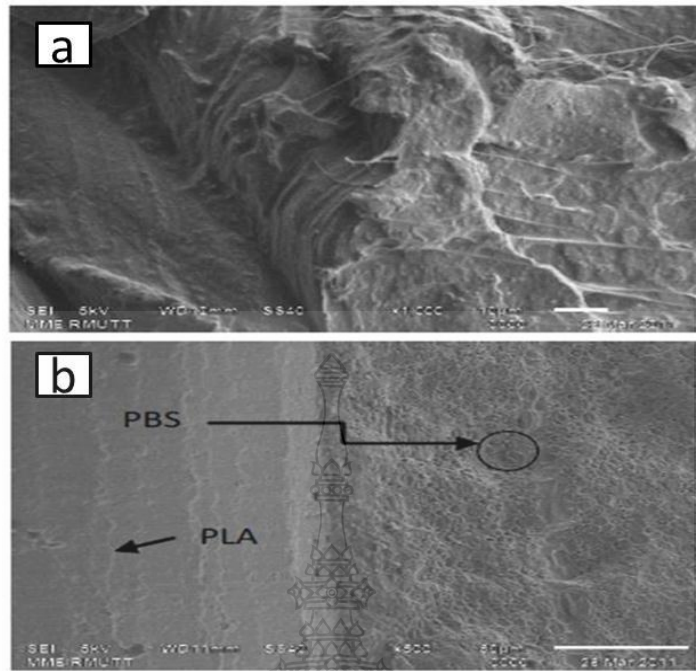


(a) ภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ที่อัดรีดผ่านสปินเนอร์แบบ B

(b) ภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ที่อัดรีดผ่านสปินเนอร์แบบ K

รูปที่ 2.9 ลักษณะภาคตัดขวางของพอลิเมอร์อัดรีดผ่านสปินเนอร์แบบต่างกันจากเทคนิค SEM [15]

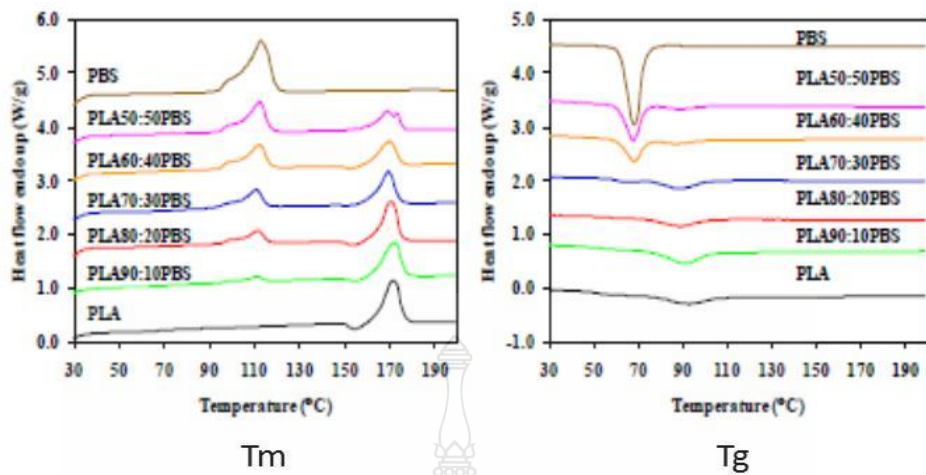
ปี 2013 ชัยพฤษ อาภาเวท และคณะ[1] ได้ศึกษาการผสมระหว่าง Poly(lactic Acid) (PLA) และ Poly(butylene Succinate) (PBS) โดยใช้กระบวนการผสมด้วยความร้อน พบว่าการผสมพอลิเมอร์ผสมทั้ง 2 ชนิดจะเป็นแบบ Immiscible Blend เมื่อปริมาณของ PBS ในพอลิเมอร์ผสมมากกว่า 10% พบว่าเมื่อเติม PBS ต่ำกว่า 10% จะเห็นได้ว่าค่า T_m และ T_g ของ PLA จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณ PBS เป็น 20% จะมีการเปลี่ยนแปลงของ T_m และ T_g อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างทางจุลภาค โครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS ที่สัดส่วน 90/10 และ 80/20 จะเห็นได้ว่าที่สัดส่วน 90/10 จะเห็นโครงสร้างเป็นเฟสเดียวในขณะที่สัดส่วน 80/20 จะเห็นเฟสของ PBS เป็นอนุภาคกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอผลการศึกษาสสมบัติเชิงกลพบว่า การเพิ่มปริมาณ PBS จะช่วยทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS มีแนวโน้มที่จะมีความเป็น Elastic มากขึ้นถึงแม้ว่าค่าการทนแรงดึงและค่ามอดูลัสมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณของ PBS ที่เพิ่ม ขึ้นในขณะที่พอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มยืดตัวได้มากขึ้นตามปริมาณ PBS ที่เติมลงไปจากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการเติม PBS ลงใน PLA จะช่วยแก้ปัญหาสมบัติที่แข็งแต่เปราะของ PLA ให้ลดลงได้บ้างเนื่องจากการผสม PBS ในปริมาณมากพอลิเมอร์ผสมจะมีการผสมแบบ Immiscible Blend ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งมีแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างต่ำ ซึ่งจำเป็นต้องพัฒนาความเข้ากันระหว่าง PLA และ PBS เพื่อลดการเปราะของ PLA ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มขอบเขตการนำ PLA ไปใช้งานให้หลากหลายมากขึ้นเช่นในกระบวนการเป่าหรือการขึ้นรูปเส้นใย



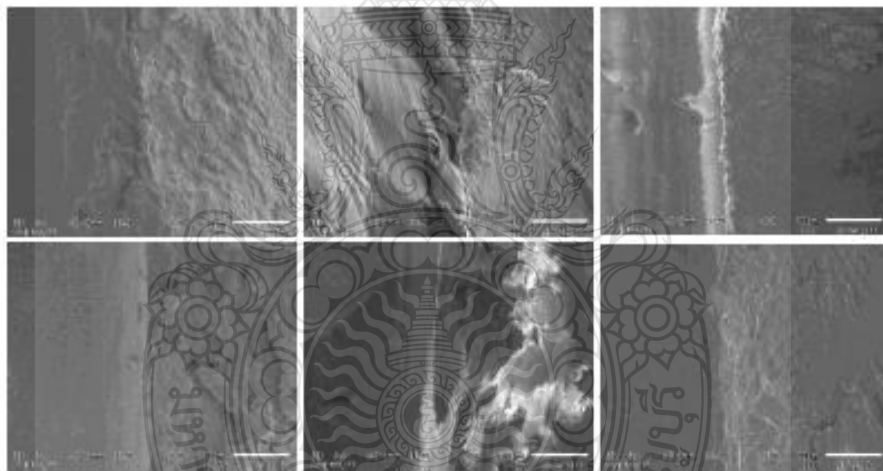
- (a) ลักษณะการผสมที่ไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ระหว่าง PLA และ PBS
- (b) ลักษณะการผสมที่เกิดการแยกวัฏภาคระหว่าง PLA และ PBS

รูปที่ 2.10 ลักษณะภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS ที่ได้จากเทคนิค SEM [1]

ปี 2013 ลลิตา จอมแปลง และคณะ[16] ได้ทำการวิจัยและศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง Polylactic Acid (PLA) และ Polybutylene Succinate (PBS) เพื่อใช้ผลิตเส้นใย โดยใช้วิธีการผสมด้วยการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ที่อัตราการผสมต่างๆแล้วทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล จากผลการศึกษาการผสมพอลิเมอร์ในอัตราส่วนต่างกันพบว่า พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันเป็นแบบ Immissible Blend จากผล DSC ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งภาพจาก SEM ดังแสดงในรูปที่ 2.12 แสดงถึงการแยกวัฏภาคของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด และจากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่ามีค่าความแข็งแรงตามความยาวสูงที่สุดในอัตราส่วนของ PBS เท่ากับ 10 %(wt) ซึ่งจากทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปเส้นใยผสมระหว่าง PLA/PBS คือที่อัตราส่วน ปริมาณ PBS 10%(wt)



รูปที่ 2.11 ค่า T_m และ T_g ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS ที่อัตราส่วนต่างกัน [16]



รูปที่ 2.12 ลักษณะวิภูภาคของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS จากเทคนิค SEM [16]

2.2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [17]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือ พลาสติกที่มีการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ จุลินทรีย์ หรือ แบคทีเรียที่มีอยู่ในธรรมชาติ ซึ่งเมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะเหลือเพียงน้ำ มวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการย่อยสลายทางชีวภาพจะมีกระบวนการหลักๆ อยู่ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะเป็น

การย่อยสายพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งการย่อยสลายครั้งแรกนี้จะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-Enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบและแบบ Exo-Enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอที่จะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปย่อยสลายครั้งที่ 2 ภายในเซลล์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นตอนนี้ก็คือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติได้แก่ แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำเกลือแร่ธาตุต่างๆ และชีวภาพ ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถแยกประเภทตามวัตถุดิบที่ใช้ออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้

แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ ได้แก่ พืชผลทางการเกษตรจำพวกแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด มันฝรั่ง มันสำปะหลัง อ้อย หัวบีท ข้าวสาลีข้าวไรย์ และปาล์มในประเทศสหรัฐอเมริกาพืชผลทางการเกษตรหลักที่ใช้ในการผลิตสารตั้งต้น ได้แก่ ข้าวโพด ในขณะที่น้ำตาลจากหัวบีทถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในกลุ่มประเทศสหภาพยุโรปนอกจากพืชผลทางการเกษตรแล้วยังมีการนำผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมนมโค ได้แก่ หางนม (Whey Permeate) มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอนอเมอร์ (กรดแลคติก) เนื่องจากความต้องการในการลดต้นทุนการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงมีการแสวงหามวลชีวภาพประเภทอื่นที่มีศักยภาพและราคาต่ำมาใช้เป็นวัตถุดิบนอกเหนือจากแป้งและน้ำตาล ได้แก่ เซลลูโลส และลิกโนเซลลูโลซิก (Lignocellulosics) ที่มีอยู่ในพืช ซึ่งสามารถนำไปย่อยเป็นน้ำตาลได้ อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีสำหรับการย่อยเซลลูโลสและลิกโนเซลลูโลซิกไปเป็นน้ำตาลในระดับอุตสาหกรรมยังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนา

2. แหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม

แหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม เช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ แนพธา (Naphtha) และถ่านหินซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ไม่สามารถหาทดแทนได้ และถูกใช้เป็นที่แหล่งให้พลังงานและแหล่งวัตถุดิบในกระบวนการผลิตแหล่งวัตถุดิบดังกล่าวนอกจากจะใช้แล้วหมดไปแล้ว กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้ยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมอีกด้วยแหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่คำนึงถึงการนำไปใช้เป็นที่แหล่งให้พลังงานและแหล่งวัตถุดิบในการผลิตวัสดุ โดยเฉพาะวัสดุประเภทพลาสติกเพื่อลดการใช้วัตถุดิบปิโตรเลียมลงนอกจากวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทน

ใหม่ได้สามารถแก้ปัญหาเรื่องการขาดแคลนด้านวัตถุดิบแล้วยังช่วยบรรเทาเรื่องผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมด้วย

กลไกการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็นประเภทใหญ่ๆ คือ

พลาสติกชนิดย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradation) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติกเป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญเกิดเป็นสารประกอบ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing Additive) ของแสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชันซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

พลาสติกย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation Plastics) การย่อยสลายด้วยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone Group) อยู่ในโครงสร้างเมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระซึ่งไม่เสถียรจึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้อาจไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะหรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีดหรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการเคลือบด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไฮโดรด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยทั่วไปปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่ง

ประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ เช่น Glycohydrolase และ Depolymerase Lipase esterase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ เช่น โลหะแอลคาไลน์ (Alkaline Metal) เบสและกรดที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมีสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิลของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

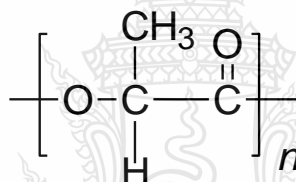
พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics) เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ชนิดหนึ่งที่มีกลไกการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ และแบคทีเรียในธรรมชาติ เมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ มวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืช รวมถึงมันสำปะหลังและ ข้าวโพด ที่เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังนั้นวงจรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงมีรูปแบบคือ มีสมบัติในการใช้งานเช่นเดียวกับพลาสติกโดยทั่วไปแต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่เมื่อทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ไปเป็นขยะ และอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมคือ มีแบคทีเรียและเอนไซม์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นก็จะเกิดการย่อยสลายได้

2.2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid) หรือ PLA

PLA เป็นพลาสติกที่ผลิตจากกระบวนการหมักพืชจำพวกแป้ง (ข้าวโพด) ซึ่งกำลังกลายเป็นทางเลือกใหม่มาแทนที่พลาสติกจากปิโตรเลียม PLA เป็นแหล่งคาร์บอนที่ได้จากวัตถุดิบที่สร้างขึ้นทดแทนได้ โดยคาร์บอนที่ดูดซับโดยพืชเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดการแพร่ของปรากฏการณ์ก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้โลกร้อนขึ้นและ PLA ยังไม่ก่อให้เกิดก๊าซพิษเมื่อถูกเผาเป็นถ่าน

กระบวนการผลิต PLA เริ่มต้นจากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบโดยการปลูกข้าวโพดซึ่งใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำเป็นวัตถุดิบ ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชได้ผลผลิตเป็นแป้ง จากนั้นจึงนำเอาแป้งข้าวโพดมาผ่านกระบวนการหมักบ่มโดยใช้จุลินทรีย์เฉพาะเพื่อย่อยโมเลกุลขนาดใหญ่ของแป้งและน้ำตาลเป็นกรดแลคติก (Lactic Acid, $C_3H_5O_3$) ซึ่งใช้เป็นมอนอเมอร์

ในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิเมอร์สามารถจำแนกได้เป็น 2 กระบวนการที่แตกต่างกัน คือ กระบวนการควบแน่นและกระบวนการเปิดวง ถึงแม้ว่าพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จากทั้งสองกระบวนการนี้จะมีโครงสร้างและสมบัติต่างๆเหมือนกันทุกประการ แต่ก็มีรายละเอียดขั้นตอนของกระบวนการสังเคราะห์ที่ต่างกันจึงเป็นที่มาของการเรียกชื่อพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการแรกมักจะเรียกว่า “พอลิแลคติกแอซิด” ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการนี้เริ่มต้นจากการใช้กรดแลคติกโดยตรงจนได้พอลิเมอร์ในขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการที่สองจะมีการเปลี่ยนกรดแลคติกโดยปฏิกิริยาการรวมตัวของกรดแลคติก 2 โมเลกุลแล้วเกิดเป็นสารประกอบแบบวงที่มีชื่อว่า แลคไทด์ (Lactide) ก่อนจากนั้นจึงนำเอาวงแหวนแลคไทด์นี้มาสังเคราะห์เป็นสายโซ่ยาวพอลิเมอร์ในขั้นตอนต่อมาด้วยเหตุนี้จึงเรียกชื่อผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์จากกระบวนการนี้ว่า “พอลิแลคไทด์” อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ที่ได้จากทั้งสองกระบวนการก็คือสารชนิดเดียวกันนั่นเอง ซึ่งเมื่อสังเคราะห์ได้แล้วก็สามารถนำมาขึ้นรูปเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 2.13 สูตรโครงสร้างของ PLA

สมบัติของ PLA มีลักษณะใส และมีความแวววาวสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารเติมแต่งที่ใช้ PLA มีสมบัติทางกล และสามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับพอลิเมอร์พื้นฐานทั่วไปที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก PLA สามารถกักเก็บกลิ่น และรสชาติได้ดี มีความต้านทานต่อน้ำมัน และไขมันสูง ในขณะที่ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ดีมีความคงทนต่อการกระแทก (Impact Strength) ต่ำ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PVC ที่ไม่มีการเติมสารเสริมสร้างพลาสติก มีความแข็งความคงทนต่อการกระแทก และความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับ PET นอกจากนี้ PLA ยังมีสมบัติใกล้เคียงกับ PS และสามารถนำไปดัดแปรให้มีสมบัติใกล้เคียงกับ Polyethylene (PE) หรือ Polypropylene (PP) ดังนั้น PLA จึงสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติพื้นฐานทั้งด้านการขึ้นรูปและการใช้งานได้เช่นเดียวกับพลาสติกโพลีเอสเตอร์ที่ผลิตจากกระบวนการทางปิโตรเคมี

การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของ PLA สามารถย่อยสลายได้ดีในโรงหมักขยะอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไปแต่จะไม่ย่อยสลายทันทีที่อุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจาก PLA มีอุณหภูมิการ

เปลี่ยนเนื้อแก้ว (Glass-Transition Temperature; Tg) ใกล้เคียง 60 องศาเซลเซียสโดยขั้นตอนแรก PLA จะถูกย่อยสลายไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ และกรดแลคติกโดยการไฮโดรไลซิสซึ่งจะเกิดขึ้นภายใน 2 สัปดาห์ สารประกอบและกรดแลคติกที่ได้จะถูกย่อยต่อไปด้วยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยการ Metabolisation อย่างรวดเร็วไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ



รูปที่ 2.14 ลักษณะการย่อยสลายของพอลิแลคติกแอซิด [17]

การนำไปใช้ประโยชน์ของ PLA เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติหลากหลายทำให้สามารถนำไปประยุกต์เป็นพลาสติกมูลค่าเพิ่มต่างๆหลายด้าน ได้แก่ ด้านการแพทย์ เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อ (Biocompatible) และสามารถถูกดูดซึม (Bioresorbable) ได้โดยระบบชีวภาพ (Biological System) ในร่างกาย จึงทำให้ PLA เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงสำหรับงานทางการแพทย์ และถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือทางการแพทย์มานาน เช่น ไหมเย็บแผล (Sutures) ตัวเย็บแผล (Staples) วัสดุปิดแผล (Wound Dressing) อุปกรณ์ฝังในร่างกาย (Surgical Implants) อุปกรณ์สำหรับยึดกระดูก (Orthopedic Fixation Devices) วัสดุสำหรับนำพาหรือปลดปล่อยตัวยา ซึ่งสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ, ด้านการเกษตร เช่น ภาชนะปลูกพืช วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ยตามเวลาที่กำหนด, ด้านบรรจุภัณฑ์เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง ภาชนะบรรจุอาหาร ขวดน้ำถุงพลาสติก กล่อง โฟม พลาสติกสำหรับหีบห่อ เม็ดโฟมกันกระแทก ตัวเคลือบภาชนะกระดาษ, ด้านเส้นใย และแผ่นผ้าแบบ Non-Woven เช่น ผลิตภัณฑ์อนามัย ผ้าอ้อมสำเร็จรูป เสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่มเส้นใยสำหรับบรรจุในเครื่องนอนและอุปกรณ์ต่างๆในด้านยานยนต์ เช่น อุปกรณ์ลดแรงกระแทก (Bumpers) แผ่นรองพื้น (Floor Mats) และอุปกรณ์ตกแต่งภายใน, ด้านอิเล็กทรอนิกส์ และการสื่อสาร

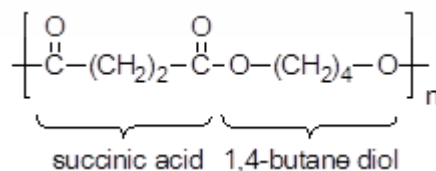
เช่น ชิ้นส่วนประกอบในโทรศัพท์เคลื่อนที่ ชิ้นส่วนประกอบในคอมพิวเตอร์ แผ่นซีดี, อื่นๆ เช่น อุปกรณ์เครื่องเขียน บัตรพลาสติก ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในบ้านเรือน สารเคลือบกระดาษสารยึดติดท่อพลาสติกชั่วคราว



รูปที่ 2.15 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก PLA [17]

2.2.3 พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Polybutylene Succinate) หรือ PBS

เป็นพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงย่อยสลายได้ทางชีวภาพดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาการควบแน่นของกรดซัคซินิกและ 1, 4 บิวเทนไดออล โดยในปัจจุบันมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี โดยเริ่มจากก๊าซบิวเทนถูกเปลี่ยนไปเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ จากนั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็น กรดซัคซินิกและ 1, 4 บิวเทนไดออลต่อไป อย่างไรก็ตาม กรดซัคซินิกยังสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้จากกระบวนการทางชีวภาพโดยการหมัก และสามารถเป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิต 1, 4 บิวเทนไดออลโดยผ่านการเตรียมเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ก่อน จากนั้นมอนอเมอร์ทั้งสองคือ กรดซัคซินิกและ 1, 4 บิวเทนไดออล จะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นแล้วเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวของ PBS



รูปที่ 2.16 สูตร โครงสร้างของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (PBS)

สมบัติของ PBS ซึ่ง PBS เป็นเทอร์โมพลาสติกสีขาว มีความหนาแน่น 1.23 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตรซึ่งใกล้เคียงกับ PLA โดยทั่วไปแล้ว PBS มีสมบัติเชิงกลสูงและทนความร้อนได้ถึง 200 องศาเซลเซียสโดยไม่เสียสภาพอีกทั้งสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์และยังย่อยสลายได้ดีอีกด้วยนอกจากนี้ PBS ยังสามารถนำมาผสมกับแป้งเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลได้แต่คุณสมบัติดังกล่าวยังมีค่าต่ำกว่า พอลิเอสเตอร์

การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของ PBS การย่อยสลายของ PBS เกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการ Hydro-Biodegradable เริ่มจากการย่อยสลายทางชีวภาพโดยผ่านกลไกของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเกิดขึ้นที่พันธะเอสเทอร์ ซึ่งส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของ PBS ลดลง และสามารถเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ต่อไปมีงานวิจัยระบุว่าแผ่นฟิล์ม PBS ที่มีความหนา 40 ไมครอน สามารถถูกย่อยสลายได้ถึงร้อยละ 50 ภายใน 1 เดือนในดินที่ใช้เพาะปลูกทั่วไป

การนำไปใช้ประโยชน์ของ PBS สามารถนำไปใช้แทนที่ผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ผลิตจาก PET, PP และพอลิเอทิลีนส์ได้โดยเฉพาะ Low Density Polyethylene (LDPE), High-Density Polyethylene (HDPE), Polystyrene (PS) และ PLA นอกจากนี้ PBS ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น หลอดฉีดยา ผลิตภัณฑ์ใช้ครั้งเดียวทิ้ง ฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร ขวดน้ำ ผลิตภัณฑ์อานามัย เบาะ โฟม สารเสริมสร้างพลาสติกแบบ Non-Migrating สำหรับ Polyvinyl Chloride (PVC) และพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทอื่นๆ ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตร กระถางต้นไม้ วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ย รวมไปถึงวัสดุที่ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมต่างๆ เช่น ส่วนประกอบและชิ้นส่วนตกแต่งภายในยานยนต์ เป็นต้น

2.2.3 เทคนิคในการปั่นเส้นใย (Spinning Technique) [18]

ในการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ การปั่นเส้นใยจะรวมตั้งแต่การอัดรีดและการขึ้นรูปเส้นใย (Fiber Formation) ด้วยเหตุที่พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติจะเกิดการเสียสภาพได้ง่ายในสภาวะความร้อนสูงที่จุดหลอมเหลว ซึ่งทำให้สภาวะที่เหมาะสมในการปั่นเส้นใยต้องทำในรูปแบบที่เป็นสารละลายเท่านั้นซึ่งสามารถแยกได้เป็น 2 วิธีคือ การปั่นเส้นใยแบบเปียก (Wet Spinning) และการปั่นเส้นใยแบบแห้ง (Dry Spinning) ซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิม ก่อนที่จะมีการพัฒนามาเป็นวิธีการปั่นแบบหลอมเหลว (Melt Spinning) ดังนั้นสามารถแยกการปั่นเส้นใยได้เป็น 2 กลุ่มคือ การปั่นแบบหลอมเหลว และการปั่นแบบสารละลาย (การปั่นแบบเปียกและแบบแห้ง) ซึ่งเส้นใยแต่ละประเภทจะมีการปั่นเส้นใยที่แตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยการปั่นแบบหลอมเหลวเป็นเทคนิคที่เป็นที่นิยม และคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์จะคุ้มค่ามากที่สุดแต่ก็

สามารถใช้ได้กับพอลิเมอร์ที่สามารถอ่อนหลอมตัวได้ที่อุณหภูมิที่ซึ่งไม่ทำให้โครงสร้างหรือสมบัติเปลี่ยนไป ส่วนการปั่นแบบแห้ง สารละลายพอลิเมอร์ที่มีตัวทำละลายกับพอลิเมอร์จะถูกอัดรีดผ่านสปินเนอร์เร็วแล้วผ่านไปยังส่วนที่ทำให้ตัวทำละลายเกิดการระเหยออกจากเส้นใยขณะปั่น ทำให้เส้นใยแข็งตัว ส่วนการปั่นแบบเปียกนั้นสารละลายพอลิเมอร์จะถูกอัดรีดผ่านสปินเนอร์เร็วผ่านไปยังอ่างของของเหลวที่ไม่ใช่ตัวทำละลาย เส้นใยก็จะเกิดการตกตะกอน โดยอาจจะเป็นได้ทั้งที่ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (เปลี่ยนสภาพทางกายภาพ) และเกิดปฏิกิริยาเกิดการกลับสู่สภาพเดิม (Regenerate) ดังเช่นการเกิดเป็นเกลือ

ตารางที่ 2.2 Spinning Techniques

| Melt Spinning | Dry Spinning | Wet Spinning |
|---------------|--------------|--------------|
| Nylon | Acetate | Viscose |
| Polyester | Triacetate | Cupro |
| Polypropylene | Acrylic | Acrylic |
| Polyethylene | Spandex | Spandex |

การปั่นเส้นใยยังมีอีกหลายวิธี แต่ไม่เป็นที่นิยมมากนัก ดังเช่น Reaction Spinning, Dispersion Spinning, Emulsion Spinning, Dry-Jet Wet Spinning, Semimelt Spinning, Fusion-Melt Spinning, Centrifugal Spinning, Electrostatic Spinning, Gel Spinning และ Tack Spinning ซึ่งวิธีการปั่นเส้นใยที่นิยมใช้กันมากมีดังนี้

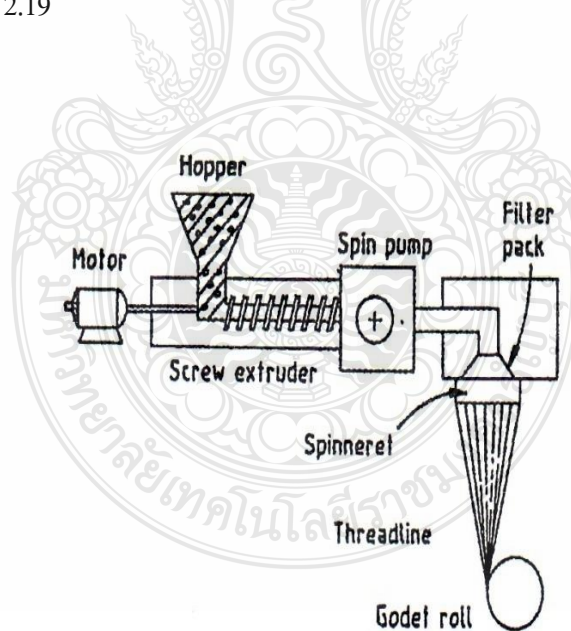
1. การปั่นแบบหลอมเหลว (Melt Spinning)

การปั่นแบบหลอมเหลวได้ถูกพัฒนาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 เพื่อในการผลิตเส้นใยไนลอน 6 และไนลอน 6,6 และปัจจุบันก็นำมาผลิตเส้นใยอยู่หลายประเภทในช่วงต้นจะเรียกว่าเป็น Grid Spinning โดยเป็นที่นิยมมากในการผลิตเส้นใยไนลอนและพอลิเอสเตอร์ ในกระบวนการผลิตนี้ Grid จะประกอบด้วยท่อเหล็กหรือแท่งเหล็กที่ร้อน (ด้วยไฟฟ้า หรือวิธีอื่น) เพื่อทำให้เม็ดฉีพเกิดการหลอมตัวแล้วตกลงสู่อ่างหลอมเหลวแล้วจะถูกปั่นผ่านไปยังรูเล็ก ๆ แล้วทำให้แข็งตัวเป็นเส้นใยและเพื่อไม่ให้เกิดการเสื่อมและเกิดการพอลิเมอร์ไรซ์เพิ่มขึ้นมาอีกของพอลิเมอร์อาจต้องมีการหล่อด้วยก๊าซที่เฉื่อย (ปราศจากออกซิเจน) ซึ่งก็คือก๊าซไนโตรเจนโดยเฉพาะกับไนลอน ในช่วงหลังของการพัฒนามีการปรับเปลี่ยนการหลอมตัวพอลิเมอร์โดยอาศัยเกลียวหนอน (Extrusion Screw) ทำให้เกิดการหลอมตัวและทำให้เกิดความดันให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านไปยังสปินเนอร์เร็ว ดังรูปที่ 2.17 ซึ่ง Extruder ตัวเดียวกันก็ยังสามารถแบ่งไปสู่สายการผลิตได้หลายตัวได้ ดังรูปที่ 2.18

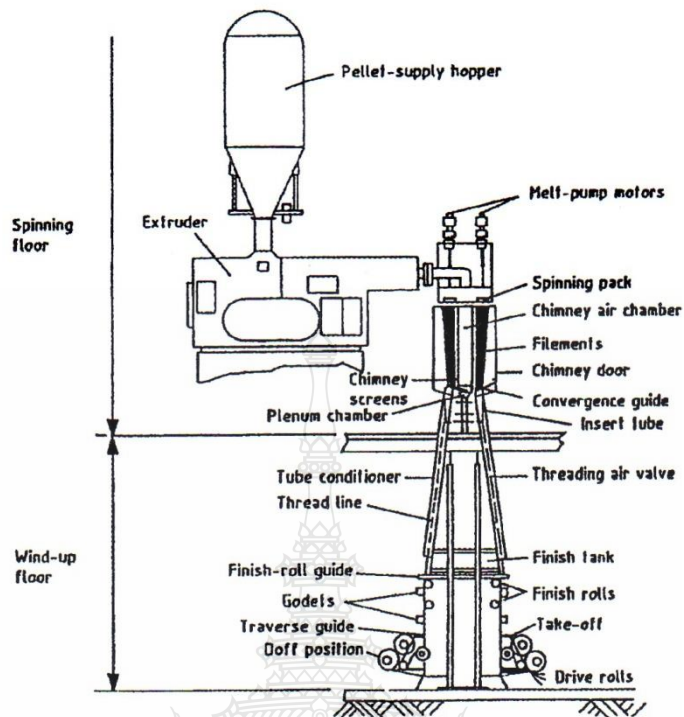
เส้นใยพอลิเอสเตอร์และไนลอนปัจจุบันจะมีการใช้วิธีการปั่นแบบหลอมเหลวแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะไม่ทำให้พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ทำให้แข็งตัวเป็นเม็ดชิพ แต่จะส่งผ่านพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านไปยัง Manifold แล้วส่งไปยังส่วนการปั่นเลยโดยตรง โดยการปั่นนี้ส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งก็คือ Metering Gear Pump เพื่อควบคุมการไหลของพอลิเมอร์ที่คงที่สู่ส่วนกรองและผ่านสปินเนอร์เรทใน Spin Pack

ก่อนที่พอลิเมอร์หลอมจะผ่านไปยังสปินเนอร์เรทต้องมีการกรองเพื่อกำจัดอนุภาคแปลกปลอม วัสดุใหญ่หรือพอลิเมอร์ที่ไม่ได้รับการหลอมตัว (Gel Particle) เพราะจะทำให้เกิดการอุดตันรูสปินเนอร์เรทได้ หรือหากผ่านรูไปได้ อาจทำให้มีขนาดของเส้นใยที่ไม่ได้ตามต้องการ และอนุภาคก็อาจแสดงเป็นจุดบกพร่องทำให้เส้นใยอ่อนแอได้

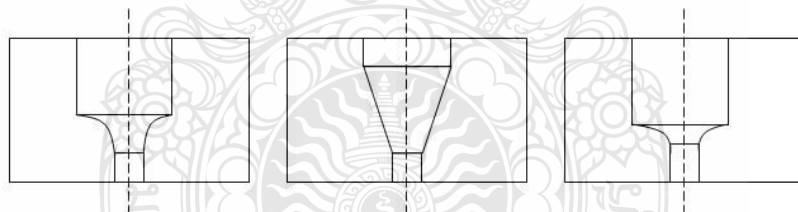
เมื่อผ่านส่วนกรองแล้วพอลิเมอร์ก็ผ่านไปยังสปินเนอร์เรท ซึ่งเป็นแผ่นโลหะบางมีรูเล็กจำนวนมากตามจำนวนเส้นใยที่ต้องการ โดยการนำผ่านนั้นอาจต้องใช้ความดันจาก Extruder มากถึง 20 เมกะปาสคาล เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกของรูสปินเนอร์เรทมีตั้งแต่ 175-750 ไมโครเมตร ส่วนมากมักเล็กกว่าความหนาของแผ่นสปินเนอร์เรท ซึ่งในกรณีของปั่นแบบหลอมเหลวนี้จะประมาณ 3 – 10 มิลลิเมตร โดยทางเข้ารูจะกว้างกว่าแล้วแคบเข้าเพื่อให้การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลอย่างไม่ติดขัดดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.17 Polymer in Powdered or Chip form can be Fed Directly to Melt-Spinning Equipment [18]



รูปที่ 2.18 Conventional Spinning Plant [18]



รูปที่ 2.19 Longitudinal Cross-Section of Spinneret Holes Showing Streamlining of Polymer Flow [18]

จำนวนรูจะมีตั้งแต่รูเดียวไปจนถึงหลายพันรูต่อหนึ่งแผ่นสปินเนอร์รีท ในการผลิตเส้นใยยาวมักมีจำนวนสิบหรือไม่กี่จำนวนร้อย แต่ในการผลิตเส้น Tow เพื่อตัดเส้นใยยาวเป็นเส้นใยสั้นจะมีจำนวนหลายร้อยไปจนถึงเป็นพันรู และรูปร่างรูมีตั้งแต่รูกลมไปจนถึงหลายรูปร่างเป็น Profile หรือมีรูกลวง (Hollow) ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติที่พิเศษที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 2.20

| SINGLE-ORIFICE | |
|------------------|--|
| Orifice design | |
| Fibre profile | |
| MULTIPLE-ORIFICE | |
| Orifice design | |
| Fibre profile | |

Spinneret hole (orifice) cross-section and its relation to the fiber cross-section

รูปที่ 2.20 Spinneret Hole (Orifice) Cross-Section and Its Relation to The Fiber Cross-Section [18]

รูปของสปินเนอร์เรทไม่ได้ควบคุมความละเอียด (ขนาด) ของเส้นใยโดยตรง โดยที่ความละเอียดจะถูกควบคุมโดยอัตราการไหล (Throughput or Output) ของพอลิเมอร์ผ่านรูหนึ่งๆ (W, g/min) และความเร็วของการม้วนเก็บ (Winding Speed or Take Up Speed: V, m/min) ความละเอียดเส้นใย (Tex) ของเส้นใยที่ปั่นได้ (Melt-Spun Filament) จะเท่ากับ $103 W/V$

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรูสปินเนอร์เรทและความละเอียดของเส้นใย Linear Density จะเกี่ยวข้องกับอัตราการยืดตัว (Stretch Ratio) ระหว่างเส้นใยที่ออกจากรูกับเส้นใยที่ม้วนเก็บ (V_0/V) ซึ่ง V_0 คือความเร็วในการอัดรีดเฉลี่ย (Mean Extrusion Velocity)

$$\text{Linear density} = \frac{A\rho W_p V_0}{V} \tag{2.1}$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของรู (ตารางมิลลิเมตร)

ρ คือ ความถ่วงจำเพาะของพอลิเมอร์หลอมเหลว ณ อุณหภูมิการอัดรีดมีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

W_p คือ สัดส่วนโดยน้ำหนัก (Weight Fraction) ของพอลิเมอร์ ในส่วนที่ออกมาจากรู (Extrudate) ขณะที่ออกมาจากรูสปินเนอร์เร็ทซึ่งสำหรับการปั่นแบบหลอมเหลว $W_p = 1$

พอลิเมอร์หลอมเหลวจะถูกอัดผ่านรูสปินเนอร์เร็ท ถูกรีดลดขนาดลงด้วยแรงที่ได้รับจากการม้วนเก็บ พร้อมกับอุณหภูมิของ Threadline ลดลงอย่างรวดเร็ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนที่จะเล็กลงจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของรู ซึ่งเรียกว่า Die Swell โดยเป็นการคลายตัว (Relaxation) ของ Viscoelastic Stress ที่ได้รับในรูสปินเนอร์เร็ท

เมื่อปั่นเส้นใยที่ว่องไวต่อการออกซิเดชันจะมีการใช้ Blanket ช่วงแคบๆหลังจากไหลออกจากรูทันที ด้วยก๊าซเฉื่อยเพื่อป้องกันการเสื่อม (Degradation) และการสลายตัว (Decomposition) ของพอลิเมอร์รอบรู เมื่อออกจากส่วนนี้แล้วเส้นใยจะผ่านส่วนที่มีการไหลของอากาศเย็นที่มีการควบคุมการไหลอย่างราบเรียบ เพื่อควบคุมการเย็นตัวของพอลิเมอร์ การควบคุมการไหลของอากาศเย็นสามารถทำได้อยู่หลายประเภท เป็นที่ใช้กันอยู่มี 3 ชนิดคือ Cross-Flow Quench (One Side Across the Path of the Filament), In-Flow Quench (Radially Inward) และ Out-Flow Quench (Radially Outward) และจากนั้นก็มีการรวบเส้นใยเป็นเส้นด้าย

หลังจากนั้นเส้นใยจะถูกเคลือบน้ำมันที่ผิว (Spin Finish) โดยการผ่านอุปกรณ์สำหรับเคลือบน้ำมัน ซึ่งมีทั้งที่เป็นลูกกลิ้ง เซรามิกโค้ด หรือสเปรย์จากบีม เป็นต้น โดยน้ำมันที่ใช้จะมีส่วนผสมของสารหล่อลื่น (Lubricant) สารต้านทานการเกิดไฟฟ้าสถิต (Antistatic) และบางครั้งอาจมีการใช้สารฆ่าเชื้อรา (Biocides) และสารยับยั้งการกัดกร่อนด้วย (Corrosion Inhibitors) การเคลือบน้ำมันจะช่วยทำให้เส้นใยมีแรงยึดเหนี่ยวกันเพิ่มขึ้น และลดแรงเสียดทานต่ออุปกรณ์ที่เส้นด้ายผ่าน พร้อมทั้งไม่ให้เส้นด้ายแยกออกจากกัน อันจะทำให้มีปัญหาในการม้วนเก็บเข้าลูกด้าย และอาจส่งผลทำให้ผ้าที่ได้ไม่ราบเรียบ น้ำมันหรือสารตกค้างจะเป็นสารอิมัลชัน (Oil in Water) หลังจากทีระเหยน้ำออกแล้วปกติจะให้เหลือน้ำมันบนเส้นใยประมาณ 0.3 – 1 % wt ซึ่งประเด็นที่สำคัญในการลงสารตกค้างก็คือ ส่วนประกอบของสารเคมี และความเข้มข้นของสารเคมีนั้น

กรรมวิธีการปั่นแบบหลอมเหลวสามารถแบ่งได้ตามระดับของการเรียงตัวของโมเลกุลในเส้นใยที่ปั่นได้ โดยทำการม้วนเก็บด้วยความเร็วที่แตกต่างกันตั้งแต่ 1,500 จนถึง 6,000 เมตรต่อนาที หรือมากกว่าโดยให้สัญลักษณ์ ตั้งแต่ LOY (Low Orientation Yarn), MOY (Medium Orientation Yarn), POY (Partially Orientation Yarn), HOY (Highly Orientation Yarn), และ FOY (Fully Orientation Yarn) อย่างไรก็ตามการแบ่งแยกก็ยังไม่เด่นชัดนัก แต่จะคำนึงถึงการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลมากกว่าความเร็วในการปั่นเส้นใย

LOY Spinning Process จะทำการปั่นเส้นใยด้วยความเร็ว 500 ถึง 1,500 เมตรต่อนาที ความหนืดจากการปั่นเส้นใยจะทำให้มี Tension ใน Threadline เพียงเล็กน้อย และพบว่า Tension ที่ใช้ในการม้วนเก็บเส้นใยจะเท่ากับ Rheological Force ที่ต้องการในการปั่นเส้นใย ผลที่ได้คือ Tension ในการปั่นเส้นใยสามารถทำให้การปั่นเป็นไปได้อย่างต่อเนื่องคงที่ ภายใต้อิทธิพลของ Tension ที่มีผลต่อพอลิเมอร์หลอมเหลวนี้ทำให้ พอลิเมอร์ใน เส้นใยจะเกิดการเรียงตัวในเส้นใยเพียงเล็กน้อย ต่างกับเส้นใยที่ได้รับการปั่นที่ความเร็วนี้จะมีลักษณะเป็น Amorphous มีความแข็งแรงเล็กน้อย ยืดตัวได้มาก และต้องลดขนาดถึง 3.5-5.0 เท่าจากขนาดเดิมเพื่อให้เส้นใยนี้เหมาะสมกับการใช้งาน

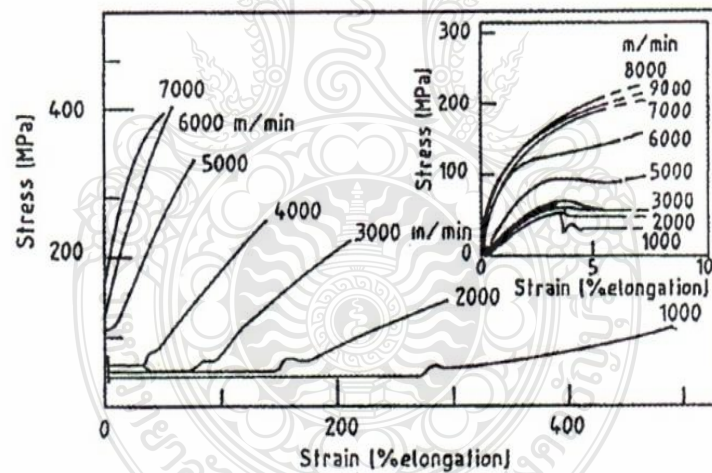
MOY Spinning Process ด้วยความต้องการประสิทธิภาพการผลิตที่มากขึ้นจึงมีการใช้ความเร็วที่สูงขึ้นคือ MOY Spinning ความเร็วที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 1,500 – 2,500 เมตรต่อนาที ความหนืดจากการปั่นเส้นใยจะทำให้มี Tension ใน Threadline เพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกันแต่ก็มีแรงฝืดจากอากาศ (Air Drag) ต่อ Threadline ร่วมด้วย ผลคือ Tension ในการปั่นเส้นใยที่มากจะทำให้การลดขนาดของเส้น Threadline ได้รวดเร็ว และโมเลกุลของพอลิเมอร์เริ่มมีสมบัติที่เป็น Viscoelastic เส้นใยที่ปั่นได้จะเป็น Amorphous แต่มีความแข็งแรงสูงขึ้นและการยืดตัวลดลงกว่า LOY และการลดขนาดจะใช้ประมาณ 3.5-5.0 เท่า

POY Spinning Process นี้เริ่มคิดค้นกันช่วงต้น ค.ศ. 1950 แต่ใช้กันเชิงอุตสาหกรรมในช่วงต้น ค.ศ. 1970 เพราะเครื่องมือม้วนเก็บยังไม่ผลิตมาใช้งาน ในช่วงท้ายของปี ค.ศ. 1960 มีการผลิตเครื่องเท็กเจอร์ (Simultaneous Draw Texturing) จึงทำให้มีความคิดในการพัฒนาเป็น POY โดยความเร็วที่ใช้ในการปั่นจะอยู่ระหว่าง 2,500 ถึง 4,000 เมตรต่อนาทีด้วยแรงฝืดจากอากาศ (Air Drag) และความหนืดจะทำให้เกิด Tension ใน Threadline เพิ่มขึ้นเรื่อยตามระยะทางที่ห่างจากสปินเนอร์เร็ท ด้วยการเพิ่ม Tension ใน Threadline นี้เส้นใยได้รับการลดขนาดอย่างรวดเร็ว และพอลิเมอร์จะเป็น Viscoelastic เส้นใยที่ได้ในการผลิตด้วยความเร็วแบบ POY จะเป็น Amorphouse แต่มีความแข็งแรงที่สูงกว่า และการยืดตัวได้น้อยลง กว่าที่ผลิตแบบ MOY

HOY Spinning Process ความเร็วที่ใช้สูงกว่า 4,000 เมตรต่อนาที ทั้งแรงฝืดจากอากาศ (Air Drag) และ ความหนืด จะทำให้เกิด Tension ใน Threadline ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อโครงสร้างทำให้มีส่วนที่เป็น Crystalline แทนที่ Amorphous พร้อมด้วย Elongational Viscosity เปลี่ยนแปลง การคายความร้อน (Exothermic Heat) ของการเกิดผลึก (Crystallization) ได้รับการปลดปล่อยออกมา และจุดที่เกิดการแข็งตัว (Solidification Point) ก็เปลี่ยนแปลงด้วย และแม้ว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอัตราการ

เย็นตัว (Cooling Rate) เปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆกับความเร็วในการปั่นเส้นใย แต่การเปลี่ยนแปลงนี้ก็เป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะส่งผลต่อสมบัติการไหล (Rheological Properties) และ อัตราการเป็นผลึก (Crystallization Rate) ต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนสูงความเร็วในการปั่นเส้นใย 4,000 ถึง 6,000 เมตรต่อนาที ความเป็นผลึกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และการเรียงตัวใน Amorphous ก็เพิ่มขึ้น

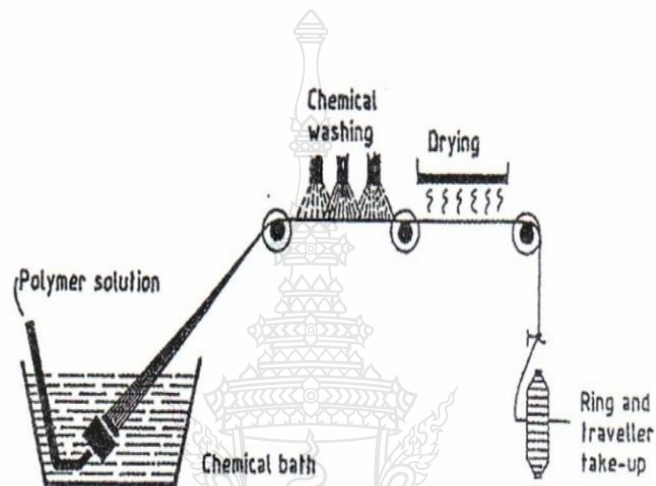
FOY Spinning Process ความเร็วใกล้เคียงหรือมากกว่า 6,000 เมตรต่อนาที ทั้งแรงฝัดจากอากาศ (Air Drag) และ ความหนืด (Inertial) ยังเป็นตัวเด่นในการทำให้เกิด Tension ใน Threadline สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, อัตราการเย็นตัว และ Radial Temperature Gradient ก็ยังคงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในความเร็วในการปั่นนี้เวลาในการทำให้เกิดผลึกสั้น และการเกิดผลึกก็สามารถทำให้เกิดการยับยั้งได้ ดังตัวอย่าง ความแข็งแรงของเส้นใย (Tenacity) จะลดลงในการปั่นด้วยความเร็วที่มากเกินไป คือ มากกว่า 6,500 เมตรต่อนาที และพร้อมกับกรรมวิธีการปั่นก็ยากเพราะทำให้ Threadline ขาดได้ง่าย ดังเช่น รูปที่ 2.21 แสดงถึง ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด สำหรับพอลิเอสเตอร์ปั่นที่ ความเร็วหมุนเก็บต่างๆ



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่อัตราการหมุนเก็บต่างกันของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ [18]

2. การปั่นแบบเปียก (Wet-Spinning)

ในกระบวนการผลิตแบบเปียกนี้ สารละลายจะถูกอัดรีดสู่อ่างเคมีซึ่งจะเกิดการตกตะกอนหรือการกลับคืนมาจากเส้นใยที่มีลักษณะคล้ายเจล จนเป็นของแข็ง (Gel-Like to Solid Filament) ทั้งตัวทำละลายที่เป็นน้ำ (Aqueous Solvent) และสารอินทรีย์ (Organic Solvent) สามารถใช้สำหรับการปั่นแบบเปียก ดังรูปที่ 2.22 กระบวนการปั่นเปียก

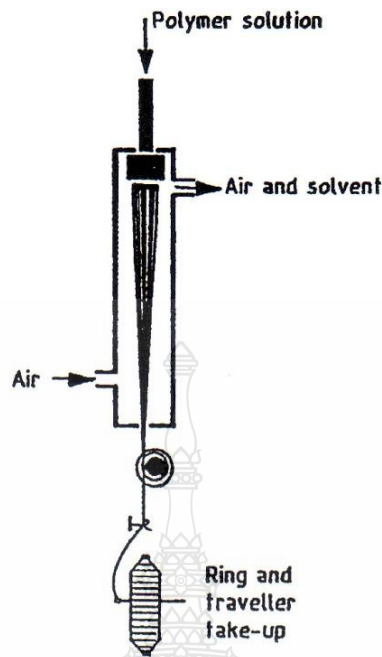


รูปที่ 2.22 กระบวนการปั่นเปียก (Wet Spinning) [18]

อัตราการลดขนาดที่เส้นใยเมื่อออกจากรูสปินเนอร์เร็ท โดยปราศจากการขาดของการปั่นแบบเปียก ช้ากว่าในการปั่นแบบหลอมเหลวและการปั่นแบบแห้ง การปั่นแบบเปียกแยกได้เป็น 2 วิธีกว้างๆดังนี้คือ ระบบ Solvent/Non-Solvent และ Chemical Reaction เพื่อสารละลายและการตกตะกอนของพอลิเมอร์ โดยเส้นใยอะคริลิกและโมดาคริลิกจะใช้วิธีแรก ส่วนเส้นใยวิสคอสจะใช้วิธีที่ 2

3. การปั่นแบบแห้ง (Dry-Spinning)

การปั่นแบบแห้งจะทำการอัดรีดสารละลายพอลิเมอร์ผ่านสปินเนอร์เร็ทสู่ที่เข็วหรืออากาศร้อน เพื่อให้ตัวทำละลายในสารละลายพอลิเมอร์ออกมาทำให้เปลี่ยนไปเป็นเส้นใย ตัวทำละลายตัวแรกที่น่ามาใช้คือ Acetone และ Methylene Chloride เพื่อผลิตเส้นใย Secondary Acetate และ Cellulose Acetate ส่วนในเส้นใย Acrylic และ Spandex ใช้วิธีนี้ค่อนข้างน้อยเพราะตัวทำละลายที่ใช้ คือ Dimethyl Formamide และ Dimethyl Acetamide ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการระเหย (จะเดือดที่อุณหภูมิ 150 °C ถึง 200 °C)



รูปที่ 2.23 กระบวนการปั่นแห้ง (Dry-Spinning) [18]

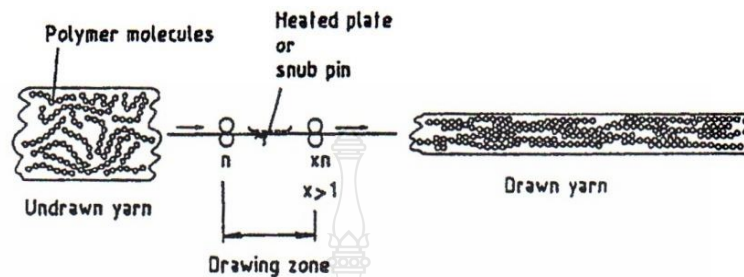
4. การปั่นด้วยวิธีอื่น

วิธีที่มีการใช้กันมากขึ้นคือ การผลิตเส้นใยจากแผ่นฟิล์ม (เส้นใยขนาดใหญ่) เป็นเพราะว่าทางเศรษฐศาสตร์จะคุ้มค่าที่สุดทั้งกรรมวิธีการผลิตและผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลาย วิธีการนี้จะมีการอัดรีดออกมาเป็นแผ่นโดยใช้ Slit Die ขึ้นรูปเป็นแผ่น จากนั้นจะทำให้เป็นเส้นใยได้หลายเครื่องมือ โดยพื้นฐานเส้นใยจะผลิตโดยการยืดตัวและการเรียงตัวฟิล์ม แล้วทำการตัดแยกออกให้เป็นเส้นใย ปัจจุบันเส้นใยพอลิพลอพิลีนใช้วิธีการนี้ในการผลิต (ผลิตเป็นเส้นใยแล้วนำมาทอเป็นกระสอบ เป็นต้น)

5. การลดขนาด (Drawing)

เส้นใยสิ่งทอทั้งหมด (ทั้งเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์) มีลักษณะที่เป็นพื้นฐานที่มีโมเลกุลเป็นลักษณะที่ยาวเหมือนที่เป็นเส้นใยและทั้งที่อัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่มาก เส้นใยประกอบจากโมเลกุลมากมายมารวมกันทั้งเรียงตัวกัน เชื่อมกัน แบบทางต่อหางตลอดความยาวของเส้นใย ดังรูปที่ 2.24 เพื่อที่จะให้มีสมบัติดังเป็นเส้นใยจำเป็นต้องมีการทำให้เส้นใยมีการเรียงตัวมากขึ้นตามความยาวของเส้นใย เมื่อทำให้ โมเลกุลเกิดการเรียงตัวกันสูงขึ้น (Orientation or Alignment) ทำให้เกิดพันธะทางเคมีระหว่าง โมเลกุลที่อยู่ใกล้กันสูงขึ้น อันเป็นผลทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยเพิ่มสูงขึ้น

ในขณะที่การยืดตัวลดลง โดยแรงที่ทำให้เส้นใยเกิดการยืดตัว แรงจะเกิดการถ่ายเทกันไประหว่างโมเลกุลที่พาดเกี่ยวกัน (Overlap) ตามความยาวของเส้นใย

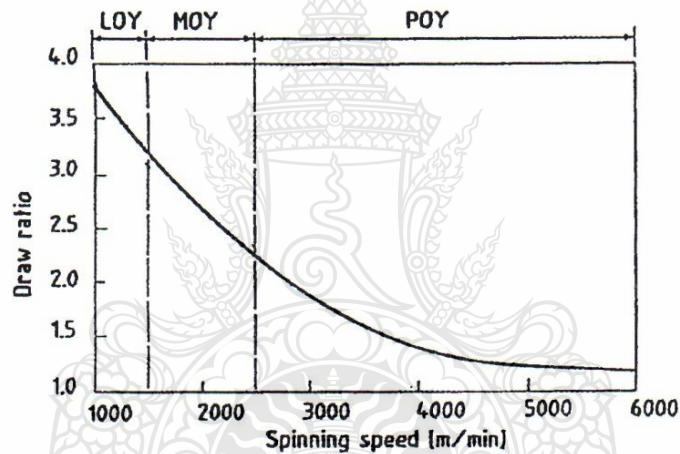


รูปที่ 2.24 การเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลก่อน-หลังการลดขนาด [18]

เส้นใยที่ได้รับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นแบบหลอมเหลว แบบแห้ง และแบบเปียกนั้นง่ายต่อการเสียรูป (Deform) การยืดตัวสูง (High Elongation) และบางกรณีการยืดตัวสูง (High Shrinkage) ขณะที่ได้รับความร้อนซึ่งทำให้ยังไม่เหมาะในการใช้งานเป็นเส้นใยหากยังไม่ได้ผ่านกระบวนการลดขนาด (Drawing Operation) การลดขนาดเส้นใยมีทั้งที่เป็นแบบเย็น (Cold Drawing) และแบบร้อน (Hot Drawing) โดยทำให้การยืดตัวที่ไม่สามารถกลับคืนได้ และทำให้เกิดการเรียงตัวของโมเลกุล มีการพัฒนาเป็นโครงสร้างเส้นใยขนาดเล็ก (Fiber-Fine Structure) โมเลกุลเกิดการเรียงตัวตามความยาวของเส้นใยสูงขึ้น (High Orientation) โดยทำให้เกิดมีความเป็นผลึกสูงขึ้น (High Degree of Crystallinity) โดยการเรียงตัวนั้นจะเกิดขึ้นทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่ไม่เป็นผลึกผลที่ได้ก็คือทำให้ความแข็งแรงตามยาวสูงขึ้น (Tensile Strength) และการยืดตัวเมื่อจุดขาดลดลง (Elongation at Break)

การลดขนาดทั้งแบบเย็นและแบบร้อน ขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะของวัสดุ สมบัตินี้คือ T_g (Glass Transition Temperature) ซึ่งหากว่า T_g ต่ำวัสดุจะแข็ง (Rigid) คล้ายแก้ว แต่หากว่า T_g สูงวัสดุจะอ่อนตัวได้ดี (Flexible) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g ของเส้นใยโมเลกุลจะไม่เกิดการเรียงตัวจากการลดขนาดเพราะสายโซ่พอลิเมอร์ไม่สามารถเคลื่อนตัวผ่านซึ่งกันและกัน และอยู่ในรูปที่ยืดตัว (More Extended Configuration) อย่างไรก็ตามสำหรับพอลิเมอร์ที่มี T_g ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง เช่น PA 6,6 และ PP ก็ไม่มีผลแต่อย่างไรเป็นเสมือนเพียงว่าเส้นใยถูกลดอุณหภูมิ แต่หากพอลิเมอร์ T_g สูงกว่าอุณหภูมิห้อง เช่น PET จำเป็นต้องให้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อทำการให้เกิดการเรียงตัว เมื่อทำการลดขนาดเส้นใย

การผลิตเส้นด้ายใยยาวต่อเนื่อง (Continuous Filament Yarn) การเรียงตัวของเส้นด้ายขึ้นอยู่กับความเร็วของการม้วนเก็บเส้นใย (ความเร็วของการปั่นเส้นใย) ปกติแล้วความเร็วใช้อยู่ประมาณ 1,500 เมตรต่อนาที ในการผลิตเส้นใย LOY และมากกว่า ประมาณ 2,500 เมตรต่อนาที ในการผลิตเส้นใย POY การเรียงตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงประมาณ 6,000 เมตรต่อนาที ดังรูปที่ 2.25 อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปการปั่นเส้นด้ายด้วยความเร็วสูงจะทำให้เกิดการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลน้อยกว่าเมื่อมีการลดขนาดในขณะที่เป็นเส้นด้ายแล้ว (Mechanical Drawing) เพราะเหตุจากอุณหภูมิของเส้นด้าย (Spinline) ขณะปั่นนั้นเกิดการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลที่เกิดการเรียงตัวแล้ว (ซึ่งสำคัญมาก) ดังนั้นจึงทำให้เกิดการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลนั้นโดยรวมน้อยลง

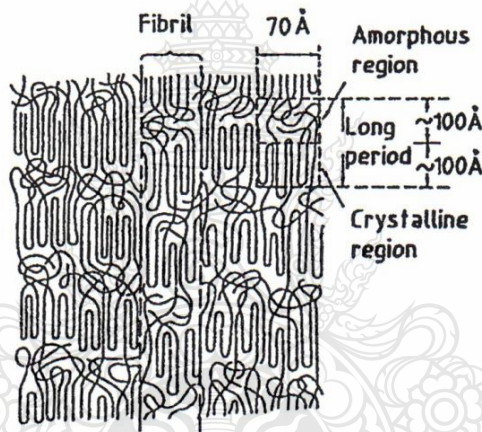


รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดขนาดและความเร็วในการม้วนเก็บ [18]

ผลิตภัณฑ์เส้นใยที่มีการจัดเรียงตัวต่ำต้องทำการลดขนาดที่อัตราการลดขนาด (Draw Ratio) ประมาณ 4-7 เพื่อผลิตเป็น FOY (Fully Oriented Yarn) การลดขนาดนั้นสามารถทำได้ทั้งแบบแยกขั้นตอน และแบบขั้นตอนเดียว สำหรับแบบแยกขั้นตอนนั้นเส้นด้ายจะถูกม้วนเข้า Bobbin แล้วจึงนำมาผ่านกระบวนการลดขนาด แบบขั้นตอนเดียวทำตั้งเป็นที่ทราบกันในระบบ Spin-Draw Process โดยเส้นด้ายจะถูกม้วนเก็บด้วยความเร็วต่ำแล้วผ่านไปยังส่วนที่ทำการลดขนาดทำให้เกิดการเรียงตัวของโมเลกุล และสุดท้ายก็ทำการม้วนเก็บด้วยความเร็วสูงอาจมากถึง 6,000 เมตรต่อนาที เส้นด้าย POY มักทำ

การปั่นด้วยความเร็ว 2,500 ถึง 4,000 เมตรต่อนาที และลดขนาดในกระบวนการต่อไป เช่น Draw Texturing หรือ Draw Warping

รูปจำลองโครงสร้างปกติของเส้นใยจะเป็นดังรูปที่ 2.26 นำเสนอโดย Dortmans ซึ่งมีอยู่ 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีการเรียงตัวไปในทิศทางเดียว (ส่วนที่เป็นระเบียบ Crystalline) และส่วนที่ไม่มีการเรียงตัว (ส่วนไม่เป็นระเบียบ Amorphous) เราจะเห็นได้ว่า โมเลกุลหนึ่งๆจะเป็นส่วนหนึ่งทั้งที่เป็นผลึกและไม่เป็นผลึก โดยโมเลกุลที่ผ่านทั้งสองส่วนนี้จะเรียกว่า Tie Molecule ความเป็นผลึกของเส้นใย จะอยู่ระหว่าง 30 – 40 %, ความยาวเฉลี่ยของโมเลกุลเท่ากับ 1700 Å (Angstrom) การเรียงตัวเฉลี่ยของส่วนที่เป็นผลึกประมาณ 0.98 และการเรียงตัวเฉลี่ยของโมเลกุลในส่วนที่ไม่เป็นระเบียบอยู่ระหว่าง 0.70 - 0.85 สำหรับเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ไมครอน (µm) จากเส้นใยนี้จะมีส่วนที่เป็น Fibril อยู่หลายล้าน Fibrils ประกอบกัน



รูปที่ 2.26 ลักษณะ โครงสร้างทั่วไปของเส้นใยที่ลดขนาด [18]

เส้นด้ายที่ไม่ได้ผ่านการลดขนาด (Undrawn Yam) จะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างมีนัยสำคัญถ้ามีการเก็บเป็นเวลานานการเปลี่ยนแปลงของ Morphology ดังเช่น การเกิดผลึกเพิ่ม (Further Crystallization), การเปลี่ยนแปลงการดูดซึมความชื้นกับความชื้นสัมพัทธ์ และบางครั้ง การดูดซึมสารตกแต่ง (Spin Finish) เข้าสู่เส้นด้ายอาจเกิดขึ้น ดังนั้นแล้วเป็นสิ่งสำคัญมากในการเก็บของเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการลดขนาดในสถานะที่ควบคุมโดยทั่วไปเส้นด้ายที่มีการเรียงตัวสูงจะมีความอ่อนไหวต่อสถานะการเก็บน้อย

1) การลดขนาดแบบไม่ใช้ความร้อน (Cold Drawing)

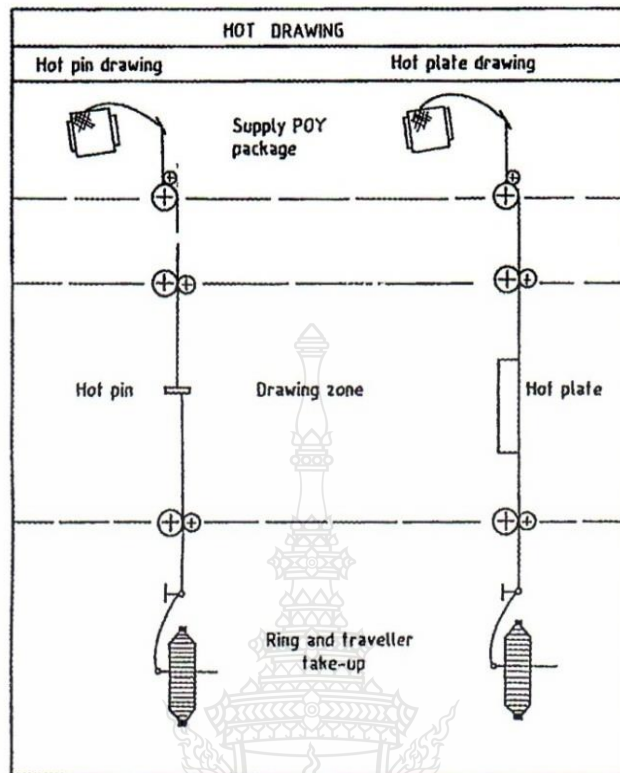
เส้นใยที่มีการเรียงตัวต่ำของพอลิเมอร์บางตัวแสดง ซึ่งเส้นใยได้รับแรงที่มากเพียงพอทำให้เกิดการยึดตัวที่ไม่สามารถกลับคืนได้ มีความยาวมากขึ้นกว่าความยาวเดิมหลายเท่าโดยการเกิดจุดที่เรียกว่า Neck โดยพฤติกรรมนี้เกิดที่อุณหภูมิใกล้ T_g ของพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้แรงดึงที่สูงจะทำให้เส้นใยพอลิเมอร์เกิดลักษณะเปราะโดยไม่เกิดการลดขนาด ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g การลดขนาดจะเกิดขึ้นที่แรงดึงต่ำได้และยังได้เส้นใยที่ดี Uniform และไม่เกิด Neck

เส้นใยไนลอน 6,6 มี T_g ที่ $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ที่ 100% RH) สามารถลดขนาดได้โดยไม่ต้องให้ความร้อน โดยผ่านเส้นใยไปยังเข็ม (Pin) ซึ่งเรียกว่า 'Snubbing Pin' ซึ่งจัดวางอยู่ระหว่างลูกกลิ้ง ซึ่งเข็มจะเป็นจุดที่เกิดการลดขนาด (Draw Point) และทำหน้าที่จับความร้อนที่เกิดขึ้น เข็มนี้มักผลิตจาก Titanium Oxide มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ใช้สำหรับเส้นด้ายขนาดเล็ก และ 8 มิลลิเมตร (mm) สำหรับเส้นด้ายขนาดกลาง โดยที่ผิวของเข็มจะถูกขัดผิว (Smooth-Polished Surface) ให้มีค่าความขรุขระเฉลี่ย Ra $0.2\text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้ลดขนาดแบบเย็นทั่วไปได้ดี

2) การลดขนาดแบบใช้ความร้อน (Hot Drawing)

ความแตกต่างระหว่างการลดขนาดแบบไม่ใช้ความร้อนและแบบใช้ความร้อนคือการทำให้เกิดจุดลดขนาดที่คงที่สม่ำเสมอ โดยในการลดขนาดแบบไม่ใช้ความร้อน จุดลดขนาดจะเกิดโดยแรงดึงที่เพิ่มขึ้นๆ ด้วยการพันเส้นด้ายรอบๆ เข็ม เป็นตำแหน่งของการเกิดการลดขนาด ส่วนในการลดขนาดแบบใช้ความร้อนนั้นจุดเกิดการลดขนาดจะเกิดโดยลูกกลิ้งที่ถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าจุด T_g ของเส้นใยที่จะทำการลดขนาด หลังจากการลดขนาดเส้นใยจะผ่านไปยังแผ่นร้อน (Hot Plate) เพื่อให้การลดขนาดมีความสม่ำเสมอ และกำจัดจุดลดขนาดที่ยังค้างอยู่โดยการทำให้เกิดผลึก (Crystallization) รูปที่ 2.27 แสดงอุปกรณ์พื้นฐานในการลดขนาดแบบใช้ความร้อนที่ใช้ใน Draw Twisting

มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตเครื่องมือต่างๆ ที่สูงขึ้นทำให้สามารถขึ้นตอนผลิตที่ต้องทำมาไว้ด้วยกัน Draw Warping (ทำให้เส้นใยเกิดรอยหยักพร้อมลดขนาด) และ Draw Texturing (ทำเท็กซ์เจอร์พร้อมลดขนาด) โดยทำกับเส้นด้าย POY โดยการทำเท็กซ์เจอร์มักทำด้วยวิธี False-Twist Texturing Technique และปัจจุบันก็มีการพัฒนาเป็นระบบ Spin-Draw-Texturing พร้อมในกระบวนการเดียวโดยมักทำกับเส้นใยที่มีขนาดกลางจนถึงขนาดใหญ่และมักทำเป็นระบบ Hot-Fluid-Jet-Texturing



รูปที่ 2.27 อุปกรณ์พื้นฐานทุกระบบ Hot Drawing [18]

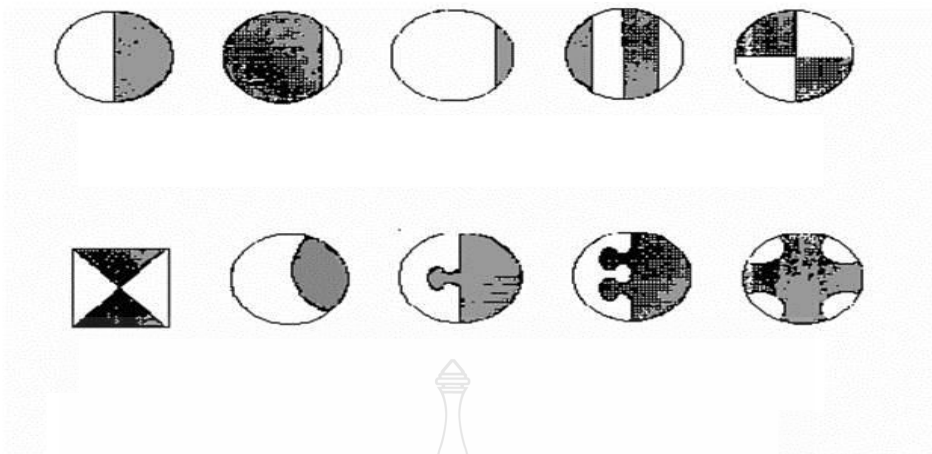
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตเส้นใยประดิษฐ์อาจอยู่ในหลายรูปแบบ เช่น ถ้าอยู่ในรูปแบบของเส้นใยยาวต่อเนื่อง เป็นเส้นเดี่ยวจะเรียกเป็นพวกเส้นใยเดี่ยว ซึ่งนิยมนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการการยึดตัวที่ดี ฝ้าม่าน หรือนำไปถักเป็นถุงนอน เป็นต้น และถ้าเส้นใยเดี่ยวมากกว่า 1 เส้นมาตีเกลียวควบเข้ากัน ได้ออกมาเป็นเส้นด้ายที่เรียกว่า เส้นด้ายควบ อีกรูปแบบหนึ่งที่พบบันมากก็คือเส้นใยยาวต่อเนื่องที่ได้จากระบวนการผลิตนั้น หากนำไปเตรียมตัดเป็นเส้นใยสั้นจะเรียกเส้นใยยาว นั้นว่าเส้นใยฟิลาเมนต์ดิบ (Filament tow) ได้ออกมาเป็นเส้นใยสั้น เพื่อนำไปใช้ปั่นเป็นเส้นด้ายปั่นต่อไป

2.2.4 เส้นใยสององค์ประกอบ (Bicomponent Fiber) [19]

เส้นใยสององค์ประกอบเป็นการอัดรีดพอลิเมอร์สองชนิดจากสปินเนอร์เดียวกัน โดยที่พอลิเมอร์ทั้งสองอยู่ภายในเส้นเดียวกัน ซึ่งมีความคล้ายกันกับ Co-Spun Fiber และคำว่า "Conjugate Fibers"

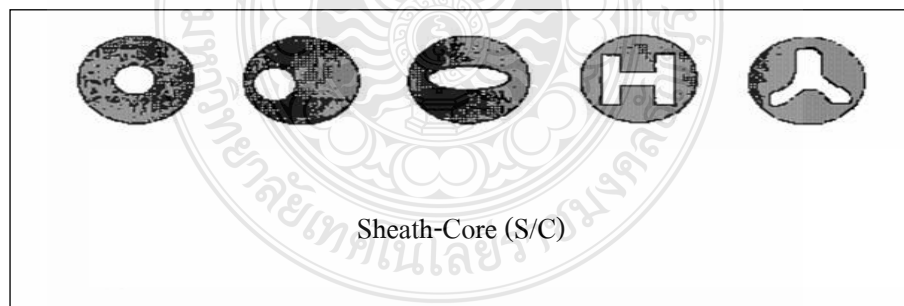
มักจะถูกใช้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเอเชียซึ่งเป็นความหมายเหมือนกันกับ Bicomponent Fiber โดยมี Du Pont เป็นผู้ผลิตเส้นใยสององค์ประกอบเชิงการค้าครั้งแรกในปี ค.ศ. 1960 ซึ่งจุดประสงค์เริ่มแรกของเส้นใยสององค์ประกอบ คือ การทำให้เกิดเส้นใยที่หยิกงอได้ด้วยตัวเอง (Self-Crimping) โดยทำเป็นเส้นใยลักษณะแบบชิดติดกัน (Side-by-Side) ใช้พอลิเมอร์ในลอนที่ต่างกันสองชนิดซึ่งผลที่ได้คือ ได้เส้นใยที่มีการขดตัวและยืดหยุ่นสูงในปี ค.ศ.1970 เส้นใยสององค์ประกอบได้เริ่มทำกันในเอเชียโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศญี่ปุ่นในกระบวนการผลิตจะเห็นได้ว่าสปินเพื่อมีความความซับซ้อนและมีราคาแพงเทคนิคเหล่านี้จะพบว่าไม่เป็นที่น่าสนใจและมีราคาแพงมากเกินไปภายหลังในปี ค.ศ.1989 ได้มีการพัฒนาแนวทางใหม่โดยใช้แผ่นบางเรียบแบนที่มีรูและร่องเพื่อกำหนดเส้นทางของพอลิเมอร์ วิธีการนี้มีความเหมาะสมกับราคาและค่อนข้างมีประสิทธิภาพ ลักษณะของเส้นใยสององค์ประกอบสามารถแบ่งได้หลักๆ ดังนี้

1. Side-by-Side (S/S) เส้นใยนี้มีสององค์ประกอบ วางตัวแบบ Side-by-Side ดังรูปที่ 2.28 โดยทั่วไปเส้นใยนี้จะประกอบไปด้วยสองส่วนประกอบ แบ่งตามความยาวออกเป็นสองหรือมากกว่าในบริเวณวัฏภาคที่แตกต่างกัน เส้นใยลักษณะนี้ โดยทั่วไปจะเป็นเส้นใยที่หยิกงอได้ด้วยตัวเอง (Side-by-Side) มีหลายระบบที่ใช้เพื่อให้ได้เส้นใยที่หยิกงอได้ด้วยตัวเอง โดยอาศัยพื้นฐานของลักษณะการหดตัวที่แตกต่างกันของแต่ละองค์ประกอบ ซึ่งบางประเภทของเส้นใยลักษณะนี้การหยิกงอจะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเกิดจากพลังงานจากความเครียดที่แฝงอยู่ ถูกปลดปล่อยโดยการให้แรงดึง โดยความหยิกงอจะถูกกำจัดเมื่อนำเส้นใยไปแช่น้ำและจะปรากฏขึ้นอีกครั้งเมื่อเส้นใยแห้ง นั่นเป็นปรากฏการณ์ที่อยู่บนพื้นฐานของลักษณะการเกิด Swelling ขององค์ประกอบ มีปัจจัยหลายประการที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเส้นใยโค้งงอ เช่น ความแตกต่างของการหดตัวระหว่างส่วนประกอบ ความแตกต่างระหว่างโมดูลัสของส่วนประกอบ รูปร่างและรูปทรงภาคตัดขวางเส้นใยแต่ละส่วนประกอบทั้งหมดและความหนาของเส้นใย



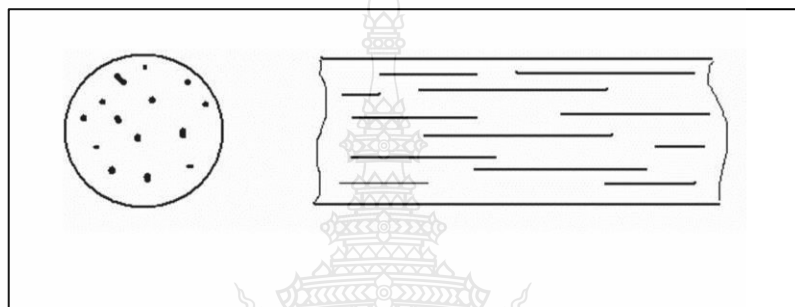
รูปที่ 2.28 รูปแบบภาคตัดขวางของเส้นใยสององค์ประกอบ Side-by-Side [19]

2. Sheath-Core (S/C) เส้นใยสององค์ประกอบลักษณะนี้ดังรูปที่ 2.29 มีองค์ประกอบส่วนแรกเป็นเป็นแกน (Core) โดยที่ส่วนนี้จะถูกล้อมรอบด้วยองค์ประกอบส่วนที่สองเรียกว่าส่วนหุ้ม (Sheath) ตามรูป การยึดเกาะกันขององค์ประกอบไม่ใช่สิ่งจำเป็นสำหรับความสมบูรณ์ของเส้นใย โครงสร้างนี้ถูกใช้งานเมื่อต้องการสมบัติของพื้นผิวสัมผัสพอลิเมอร์ เช่น ความมันวาว, การข้อมติดสี ในขณะที่ส่วน Core เป็นส่วนที่เสริมสร้างความแข็งแรง ลดค่าใช้จ่าย และเช่นเดียวกับอินเตอร์เฟซระหว่าง Core กับ Sheath ที่มีความโค้งมนสูงจะนำไปสู่กลไกการเชื่อมต่อกันระหว่างอินเตอร์เฟซ ซึ่งอาจเป็นที่ต้องการในกรณีที่ไม่มีการยึดเกาะที่ดี นอกจากนี้เส้นใยลักษณะนี้ยังสามารถนำมาใช้เป็นเส้นใยหยักงอ ใช้กันอย่างกว้างขวางในการนำมาใช้เป็นเส้นใยกาว (Bonding Fiber) ในอุตสาหกรรมผ้าไม่ถักไม่ทอและสามารถนำไปใช้งานทางด้านวัสดุเสริมแรงได้



รูปที่ 2.29 รูปแบบภาคตัดขวางของเส้นใยสององค์ประกอบแบบ Sheath-Core (S/C) [19]

3. Matrix-Fibril Bicomponent ซึ่งเส้นใยในลักษณะนี้สามารถเรียกได้อีกชื่อซึ่งนิยมกว่า ว่า Islands-in-the-Sea Fiber ดังรูปที่ 2.30 เทคนิคนี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนในการสร้างและการใช้งานใน ส่วนภาคตัดขวางพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งกระจายตัว (Island) อยู่ในพอลิเมอร์อีกชนิดที่เป็นเมทริกซ์ (Sea) เส้นใยสององค์ประกอบประเภทนี้ทำให้เกิดความสะดวกในการสร้างเส้นใยที่มีขนาดไมโครดีเนียร์ส่วน ที่เรียกว่า "Island" มักจะเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถเป็นบับหลอมเหลวได้เช่น ไนลอน, พอลิเอสเทอร์ หรือ พอลิพรอพิลีน ส่วนพอลิสไตรีน พอลิเอสเทอร์ที่ละลายน้ำได้ และพลาสติกไซเซออร์/สะฟอนิไฟ (Saponified) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ สามารถทำให้เป็นองค์ประกอบที่เป็นส่วนของ Sea หรือเมทริกซ์ได้



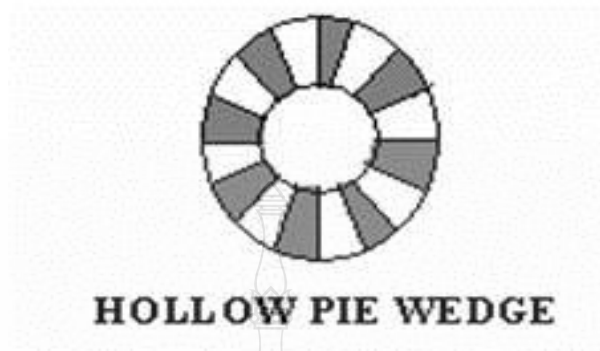
รูปที่ 2.30 ภาคตัดตามยาวและตัดตามขวางของเส้นใยสององค์ประกอบ Islands-in-the-Sea Fiber [19]

4. Segmented Pie โครงสร้างนี้แสดงในรูปที่ 2.31 โดยทั่วไปจะเรียก "Segmented Pie" หรือ "Citrus", Alternate Pie หรือ Wedges ทำมาจากไนลอนและพอลิเอสเทอร์ ภายในเส้นใยมีประมาณ 16 ส่วนซึ่ง เส้นใยจะนำมาถูกทำเป็นแผ่นและ แผ่นเส้นใยจะถูกส่งผ่านน้ำหรือ อากาศที่มีเจ็ทแรงดันสูงเพื่อที่จะแยก เส้นใย การแยกและการพันเกี่ยวกันนี้ทำให้ได้ผลลัพธ์คือผ้ามีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 2.31 ส่วนประกอบในภาคตัดขวางของเส้นใยสององค์ประกอบแบบ Segmented Pie [19]

บางครั้งการทำให้แต่ละเส้นใยแยกออกเป็นเรื่องยาก และในกรณีที่โครงสร้างมีลักษณะ กลวงจะใช้เป็นดังรูปที่ 2.31 และรูปที่ 2.33

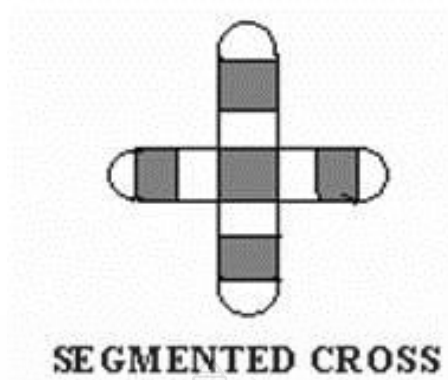


รูปที่ 2.32 Hollow Pie Wedge Structure [19]

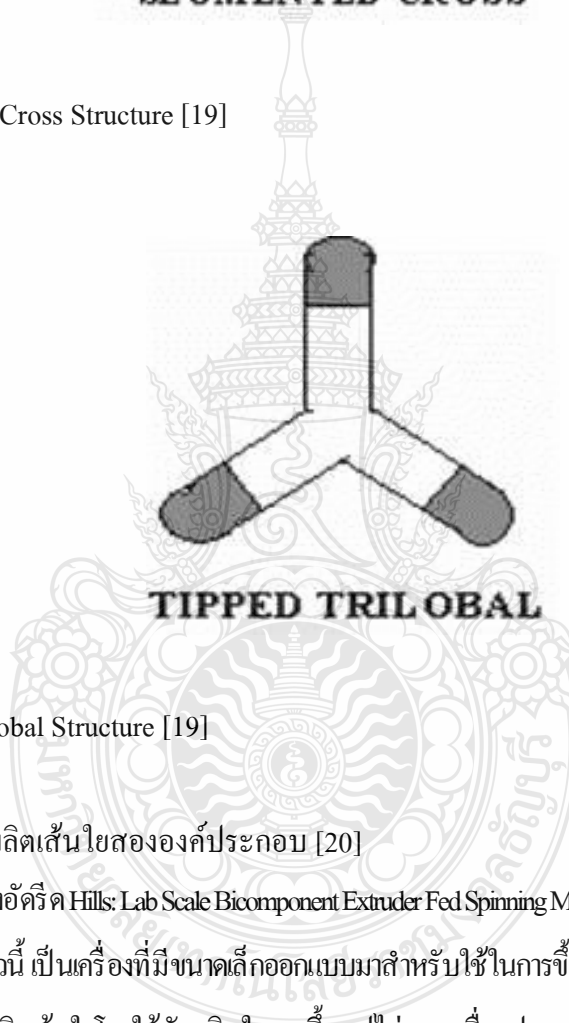


รูปที่ 2.33 Conjugate Structure [19]

และในบางครั้งก็กลายเป็นเรื่องยากมากที่จะได้เป็นแผ่นเส้นใยเพราะสมบัติของโมดูลัสที่แตกต่างกันและในการที่จะเอาชนะปัญหาโครงสร้างเหล่านี้ก็ต้องเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับในดังรูปที่ 2.33 และรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 Segmented Cross Structure [19]

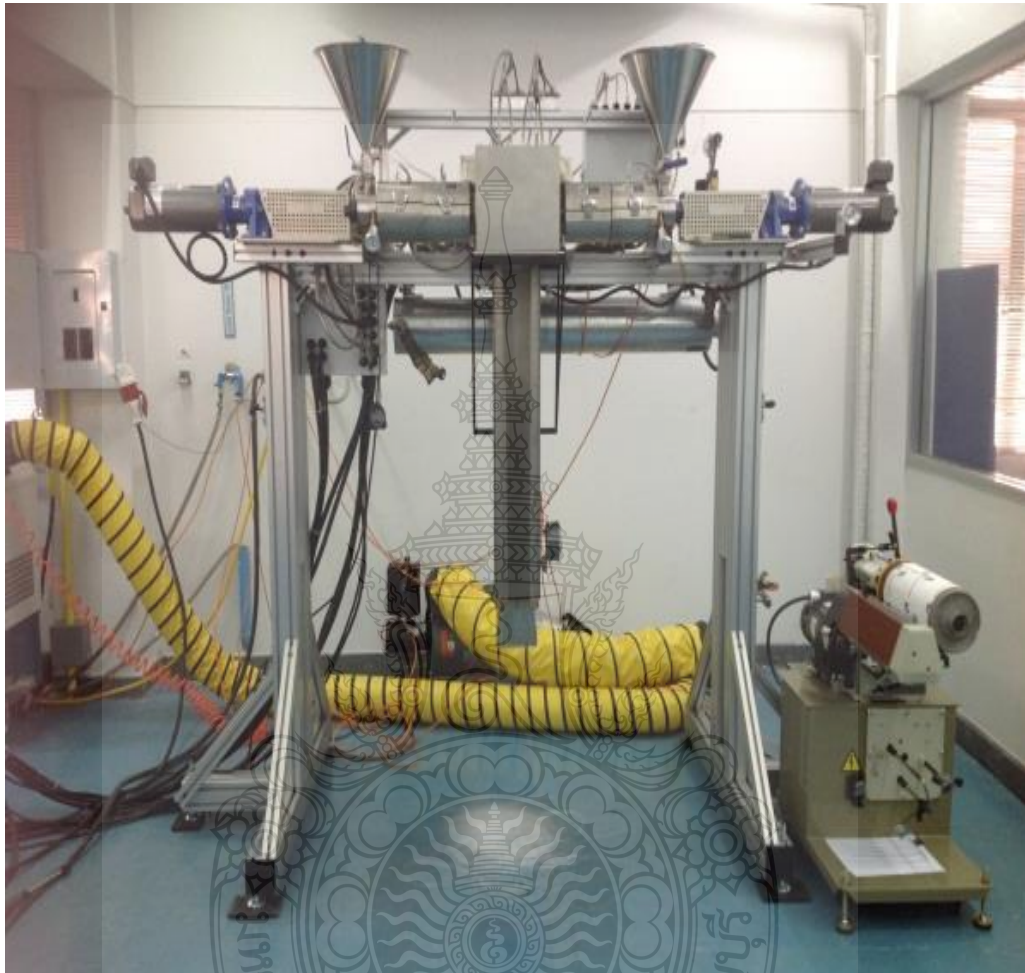


รูปที่ 2.35 Tipped Trilobal Structure [19]

2.2.4 การผลิตเส้นใยสององค์ประกอบ [20]

เครื่องอัดรีด Hills: Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model LBS-100 เครื่องขึ้นรูปเส้นใยแบบหลอมเหลวนี้ เป็นเครื่องที่มีขนาดเล็กออกแบบมาสำหรับใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบในห้องปฏิบัติการ สามารถผลิตเส้นใยโดยใช้วัสดุคิบในการขึ้นรูปไม่มาก เครื่องประกอบด้วยสกรูเดี่ยว 2 สกรูที่ติดกับ Spin Head ที่มี Metering Pump เพื่อควบคุมปริมาณของพอลิเมอร์ หลอมเหลวที่อัดส่งจากสกรูทั้งสองด้าน ความเร็วในการอัดรีดหรือหมุนของสกรูจะถูกตั้งค่าเพื่อให้ได้อัตราการไหลตามความต้องการ โดยมีการควบคุมความดันของพอลิเมอร์ หลอมเหลวที่ปลายสกรู โดยอัตโนมัติและกลไกการจำกัดแรงบิดเพื่อไม่ให้เกิดแรงคั่นเกิน และเครื่องนี้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลายประเภท ดังเช่น Monofilament, Multifilament, Meltblown และ Spunbond Webs และ

สามารถใช้ผลิตเส้นใยสององค์ประกอบทั้งที่เป็นแบบ Side-by-Side, Sheath-Core, Island-in-the-Sea และ Segment Pie ลักษณะของเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสามารถดูได้จากรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 เครื่องผลิตเส้นใยสององค์ประกอบ Hills: Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model LBS-100

3.2 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.2.1 วัตถุดิบ

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) เกรด 3052D (Specific Gravity, (ASTMD792)= 1.24 g/cm³, Melt Flow Rate, (ASTMD1238)= 14 g/10 min, T_m= 145 - 160 °C, T_g= 55 - 60 °C) จากบริษัท Nature Works LLC product

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene Succinate, PBS) เกรด FZ91PD (Density, (ISO 1183)= 1.26 g/cm³, Melt Flow Rate, (ISO 1133)= 5 g/10 min, T_m= 115 °C) จากบริษัท Mitsubishi

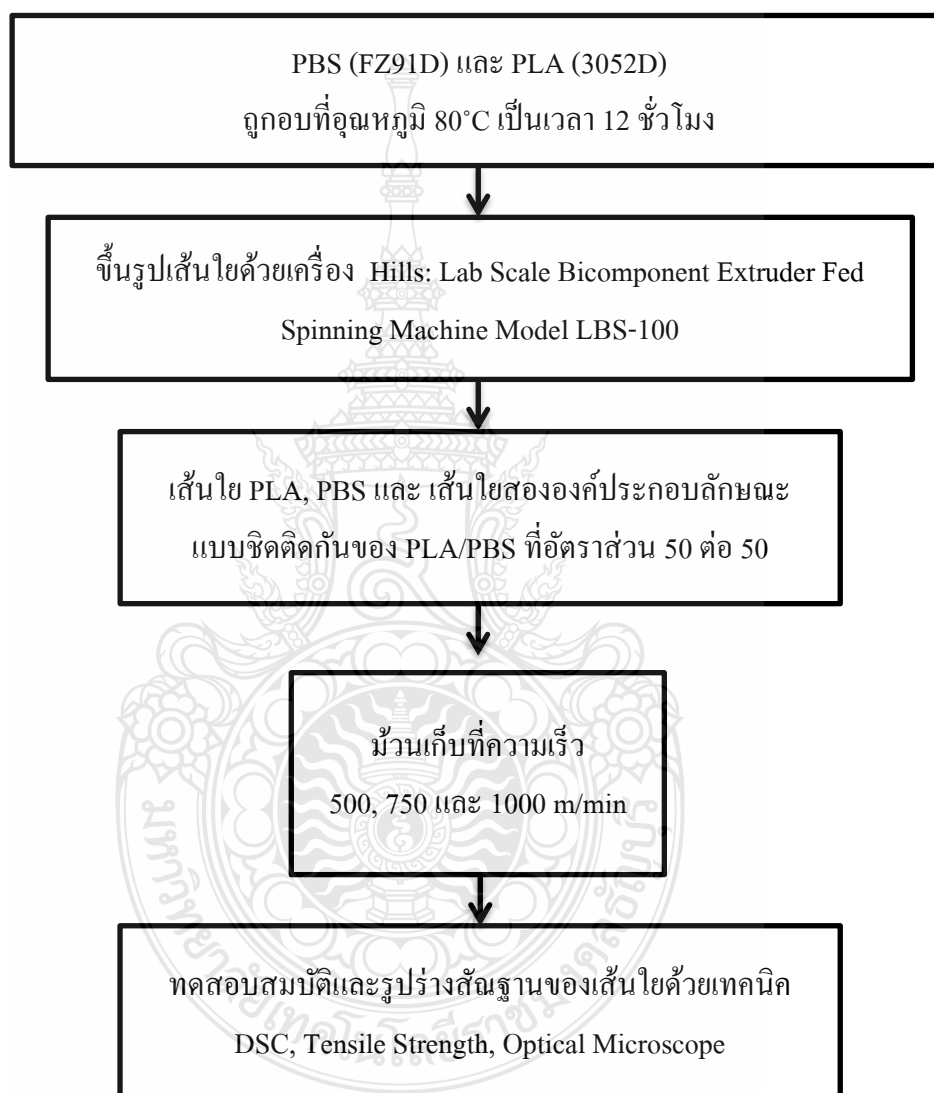
3.2.2 อุปกรณ์ และสารเคมี

1. ตู้อบแห้งและควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ Memmert
2. เครื่องอัดรีด Hills: Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model LBS-100 พร้อมชุดลดขนาด (Drawing) และชุดม้วนเก็บ (Winder)
3. กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope) ยี่ห้อ Olympus Model Cx41
4. กล้องดิจิทัล (Digital Camera) ยี่ห้อ Fujifilm รุ่น Jx-400
5. อุปกรณ์วัดความหยาบของเส้นใย (Bulkiness Tester)
6. อุปกรณ์ทดสอบการหดตัวของเส้นใย (Fiber Shrinkage Testing)
7. เครื่องทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength) จากบริษัท Instron Model Tensile Tester 5560
8. เครื่องทดสอบการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) รุ่น NETZSCH รุ่น DSC 200 F3
9. เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index, MFI) รุ่น Model Xrl-400A
10. เครื่องทดสอบความหนืด (Rheology Testing) ยี่ห้อ Malvern Instruments Model Gemini 200HR Nano
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ Jeol Model Jsm-6510
12. Printer Scanner ยี่ห้อ Canon Model Mp287

3.2.3 สารเคมี

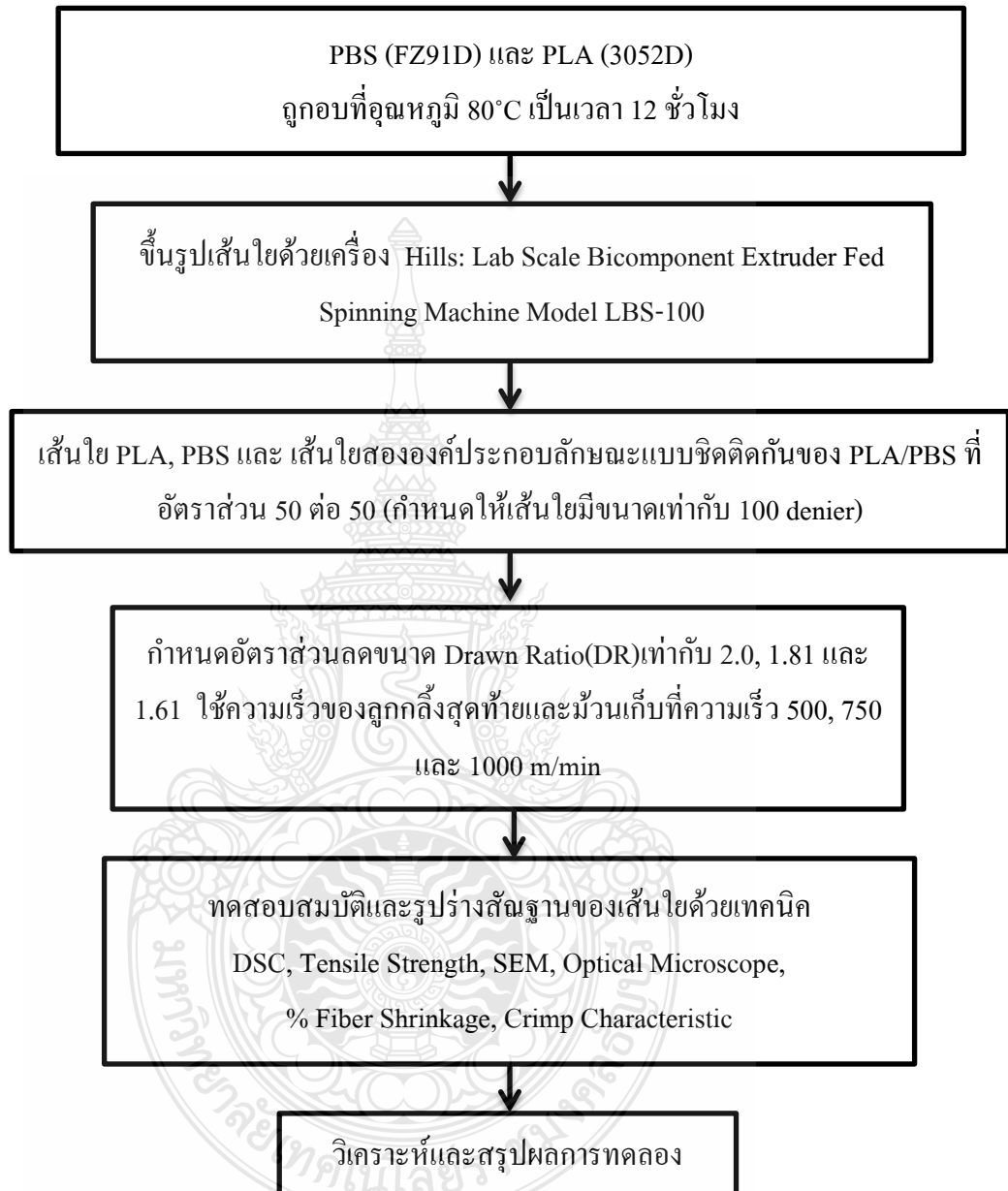
สารละลาย Tetrahydrofuran (C_4H_8O) จากบริษัท Ajax Finechem Pty Ltd

3.3 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.3 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย (ต่อ)



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย (ต่อ)

3.4 การทดลองขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

อบเม็ดพอลิเมอร์ PLA และ PBS ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงจากนั้นทำการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบด้วยเครื่อง Hills: Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model LBS-100 ชุดม้วนเก็บดังรูปที่ 3.3 ใช้ชุดสปินเนเรต (Spin Pack) ชนิด Side-by-Side จำนวน 24 ชุดแต่ละชุดมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ใช้สภาวะในการขึ้นรูปและการปรับตั้งค่าเครื่องขึ้นรูปแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.3 Hills: Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model LBS-100

ตารางที่ 3.2 สภาวะการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

| Polymer | Ext- Zone A1 (°C) | Ext- Zone A2 (°C) | Ext- Zone B1 (°C) | Ext- Zone B2 (°C) | SpinHead (°C) | Melt Pump (rpm) | Widing Unit (m/min) |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|--------------------|---------------------------|
| PLA | 200 | 230 | - | - | 230 | 8 | 500, 750 และ 1,000 |
| PBS | - | - | 200 | 230 | 230 | 8 | |
| PLA/PBS | 200 | 230 | 200 | 230 | 230 | 4/4 (PLA/PBS) | |

3.5 การขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ผ่านลูกกลิ้งลดขนาด

อบเม็ดพอลิเมอร์ PLA และ PBS ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงจากนั้นทำการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบด้วยเครื่อง Hills: Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model LBS-100 พร้อมชุดลดขนาด (Draw Unit) และ ชุดม้วนเก็บ (Winder) โดยจะกำหนดขนาดเส้นใยเท่ากับ 100 ดีเนียร์ และทำการปรับตั้งอุณหภูมิลูกกลิ้ง (Godet) ที่ 1 (G1), 2 (G2), 3(G3) เท่ากับ 30, 70 และ 90 °C ดังรูปที่ 3.4 โดยใช้สปีนเนอร์ชนิด Side-by-Side ใช้สภาวะในการขึ้นรูปและการปรับตั้งค่าเครื่องขึ้นรูป แสดงในตารางที่ 3.3 การกำหนดขนาดของเส้นใยให้ได้ตามต้องการสามารถทำได้ดังสมการที่ 3.1

$$\text{Polymer Feed (g/min)} = \frac{\text{Widing Speed} \times \text{denier}}{9000} \quad (3.1)$$

เช่น ต้องการเส้นใยที่มีขนาด 100 ดีเนียร์ ที่ใช้ความเร็วในการม้วนเก็บที่ 1000 เมตรต่อนาที

$$\text{Polymer Feed (g/min)} = \frac{1000 \times 100}{9000} = 11.11 \text{ g/min}$$

เมื่อทราบค่าดังกล่าวแล้วต้องนำไปคำนวณหาอัตราการปั๊มเนื้อพอลิเมอร์ของ Melt Pump ซึ่งค่าเบื้องต้นที่ควรรู้เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณคือค่า Melt Density ที่อุณหภูมิอัดรีดของพอลิเมอร์ (g/cm³), Pump Spec (cc/rev)

เมื่อทราบค่าดังกล่าวสามารถนำไปเทียบค่าอัตราการป้อนของ Melt Pump เช่น

Melt Density ของ PLA 3052D = 1.24 g/cm^3 , Pump Spec = 0.584 cc/rev

ดังนั้น $1.24 \text{ g/cm}^3 \times 0.584 \text{ cc/rev} = 0.72416 \text{ g/rev}$

จากนั้นนำไปเทียบกับค่าที่คำนวณในตัวอย่าง (3.1) โดยต้องการให้มีเนื้อพอลิเมอร์ถูกป้อนมาจาก Melt Pump ในปริมาณ 11.11 g/min ซึ่ง Melt Pump 1 rev จะเท่ากับ 0.72416 g/rev

เพราะฉะนั้นจะได้ $11.11 \text{ (g/min)} / 0.72416 \text{ (g/rev)} = 15.34 \text{ rev/min}$ เส้นใยที่ได้จะมีขนาด 100 ดีเนียร์ ที่ความเร็วในการม้วนเก็บที่ 1,000 เมตรต่อนาที

ตารางที่ 3.3 สภาวะการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านการลดขนาด (Drawn)

| Polymer | Ext-Zone A1 (°C) | Ext-Zone A2 (°C) | Ext-Zone B1 (°C) | Ext-Zone B2 (°C) | Spin Head (°C) | Melt Pump (rpm) | Drawn Ratio (DR= G3/G1) | Widing Unit (m/min) |
|---------|---------------------|------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|
| PLA/PBS | 200 | 230 | 200 | 230 | 230 | 4.2 : 4.2 | 2 , 1.81, 1.66 | 500 |
| | | | | | | 6.3 : 6.3 | 2 , 1.81, 1.66 | 750 |
| | | | | | | 8.4 : 8.4 | 2 , 1.81, 1.66 | 1,000 |



รูปที่ 3.4 Hills: Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model LBS-100 พร้อมชุดลดขนาด (Draw Unit) และชุดม้วนเก็บ (Widing Unit)

3.6 การทดสอบสมบัติของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

3.7.1 การหาขนาดเบอร์ด้าย

วิธีการทดสอบ

1. นำเส้นใยตัวอย่างที่ต้องการหาเบอร์ด้าย นำมากรอด้วยเครื่องกรอด้ายให้ได้ความยาวเท่ากับ 20 เมตรต่อ 1 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.5
2. นำเส้นใยที่ได้จากการกรอที่มีความยาวเท่ากับ 20 เมตร ไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำค่ามาแทนในสมการที่ 3.2

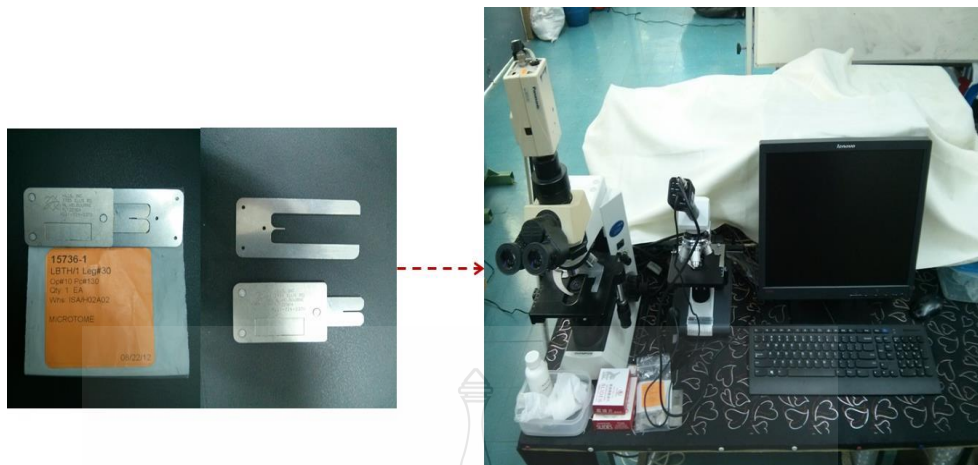
$$\text{Denier} = \frac{\text{น้ำหนัก (g)} \times 9,000}{\text{ความยาว (m)}} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.5 เครื่องกรอผ้า

3.7.2 การศึกษาลักษณะพื้นฐานของเส้นใยสององค์ประกอบที่ขึ้นรูปได้

เส้นใยสององค์ประกอบที่ได้หลังจากการผ่านกระบวนการแล้วจะถูกนำมาดูลักษณะภาคตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์ดังรูปที่ 3.6 และดูลักษณะการหยิกงอด้วยกล้องดิจิทัล โดยการดูลักษณะภาคตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์มีการเตรียมตัวอย่างดังนี้ คือนำเส้นใยมาใส่ในอุปกรณ์ตัดเส้นใย Microtome จากบริษัท Hill, Inc. จากนั้นใช้ไมโครโกนตัดเส้นใยตามแนวขวาง แล้วนำตรวจสอบลักษณะของภาคตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 3.6 Microtome และ กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope, OM)

3.7.3 ทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength)

ใช้ตัวอย่างทดสอบที่เป็นเส้นใยเดี่ยวและกลุ่มโดยใช้เครื่องทดสอบจากบริษัท Instron ดังรูปที่ 3.7 มีวิธีการเตรียมตัวอย่างการทดสอบดังนี้

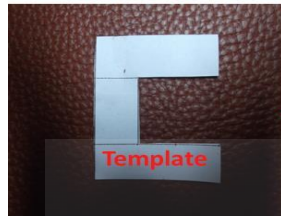
1. แยกเส้นใยจากเส้นด้ายที่เตรียมให้ ไปติดกับแบบที่ให้ (Template) โดยกระดาษกาว ด้านบนและด้านล่าง โดยที่หนึ่งตัวอย่างการทดลองจะต้องทำการทดลองอย่างน้อย 10 ชิ้นตัวอย่างจากนั้น หาค่าเฉลี่ย

2. ทดสอบเส้นใยเดี่ยวโดยใช้มาตรฐาน ASTM D 3822 โดยเส้นใยจะมีความยาว เส้นด้ายทดสอบ Gauge length เท่ากับ 25 มิลลิเมตร และใช้ความเร็วของการดึง (Crosshead Speed) เท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อนาที

3. การทดสอบความแข็งแรงของเส้นด้ายแบบกลุ่ม (Single-Strand Method) ใช้มาตรฐาน ASTM D 2256-02 ทำการทดสอบความแข็งแรงของเส้นด้ายที่เตรียมให้ด้วย ความเร็วของการดึง (Crosshead Speed) เท่ากับ 300 mm/min และ ความยาวของเส้นด้ายทดสอบ (Gauge Length) เท่ากับ 250 mm จำนวนเส้นด้ายที่ทดสอบใช้ 10 ตัวอย่างต่อด้าย 1 หลอด

4. ทำการจดบันทึกผลการทดลอง

5. สภาพที่ใช้ในการทดสอบที่ 21°C และความชื้นสัมพัทธ์ 65%



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงดึงและแบบตัดชิ้นงาน (Template)

3.7.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)

เป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการวัดอัตราการไหลของความร้อน (Heat Flow/ dQ/dt) ที่ให้แก่สารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิงเป็นฟังก์ชัน กับเวลาหรืออุณหภูมิ ในทางปฏิบัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์และเคมีจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี (Enthalpy) นี้สามารถใช้ DSC ตรวจสอบได้ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลายชนิด เช่นการเปลี่ยนแปลงมวล รูปร่างหรือสมบัติทางแสงของสารจะส่งผลต่อการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ นอกจากนี้เครื่อง DSC ยังใช้ในการวัดความจุความร้อน (Heat Capacity, C_p) ซึ่งเป็นสมบัติของพอลิเมอร์ที่มีความสำคัญเนื่องจากประวัติของกระบวนการผลิต สมบัติเชิงกล และการให้ความร้อนในรูปแบบต่างๆ จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ซึ่งใช้ บ่งบอกความเป็นสารนั้นในผลิตภัณฑ์สุดท้าย บางครั้งเรียกว่า Fingerprint นั้นแสดงค่าพลังงานของระบบจะมีค่าเฉพาะเพียงค่าเดียวเท่านั้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของ C_p เมื่อเทียบกับสารอ้างอิงสามารถใช้ในการบ่งบอกประวัติที่ผ่านมาของพอลิเมอร์ตัวอย่างนั้น รูปที่ 3.8 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์



รูปที่ 3.8 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)

1. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ จะเป็นเม็ด หรือเป็นชิ้นส่วนของสารตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ทำการชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างให้มีน้ำหนักประมาณ 5-10 มิลลิกรัม บรรจุตัวอย่างลงในภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง (Pan) ทำการอัดแน่นจนอากาศไม่สามารถเข้าไปได้ แล้วทำการทดสอบ

2. สภาวะการทดสอบ

อัตราการเพิ่มความร้อน $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จากอุณหภูมิ 30°C จนถึง 200°C โดยการรักษาอุณหภูมิที่ 200°C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัด Thermal History แล้วลดความร้อน $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จากอุณหภูมิ 200°C ลงมาจนถึง 30°C แล้วทำการวิเคราะห์ผลที่ได้และหาค่า สมการหาค่าเปอร์เซ็นต์ผลึกดังสมการที่ 3.3

$$\%X_c = \Delta(H_m/\Delta H_m^0) \times 100 \quad (3.3)$$

ΔH_m แทน เอนทาลปีของการหลอม

ΔH_m^0 แทน เอนทาลปีการหลอมของ PLA ที่ปริมาณผลึก 100% มีค่าเท่ากับ 93.7 J/g

ส่วน PBS ที่ปริมาณผลึก 100 % มีค่าเท่ากับ 110.3 J/g [21]

3.7.5 การทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index, MFI)

อัตราการหลอมไหลเป็นการวัดค่าความง่ายในการไหลของพลาสติกหลอมเหลวและถือเป็นวิธีหรือดัชนีที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพของเทอร์โมพลาสติก การทดสอบนี้จะคล้ายกับการ Extrusion คือเป็นการหลอมเหลวพลาสติกในกระบอกทดสอบ (Cylinder) ด้วยอุณหภูมิที่กำหนดแล้วใช้น้ำหนักกดตามค่าที่กำหนดเช่นกันกดลงบนแท่งกด (Piston) โดยให้แท่งกดกระทำกับพลาสติกเหลวที่อยู่ในกระบอกทดสอบ พลาสติกเหลวก็จะไหลผ่านหัวคายน์ออกมา หลังจากนั้นก็นำพลาสติกที่ไหลออกมาไปชั่งน้ำหนักเทียบกับเวลา 10 นาที เราก็จะได้ค่าของ MFI ของพลาสติก ซึ่งมีหน่วยเป็นกรัม /10 นาที



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index)

วิธีการทดสอบ

1. มีดพอลิเมอร์ PLA และ PBS จะถูกอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น
2. ชั่งตัวอย่างประมาณ 8 กรัม จากนั้นทำการทดสอบ โดยจะทดสอบค่าอัตราการไหลของพอลิเมอร์ ซึ่งจะกำหนดให้ใช้อุณหภูมิและน้ำหนักกดเดียวกันที่ 230°C น้ำหนักกด 2.18 กิโลกรัม

3.7.6 การทดสอบสมบัติการหดตัวของเส้นใย (Fiber Shrinkage Testing)



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบสมบัติการหดตัวของเส้นใย (%Shrinkage)

ทดสอบ Boiling Shrinkage ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 5104-02

วิธีการทดสอบ

1. นำเส้นใยที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ มาตัดจากนั้นผูกให้เป็นปมหัวท้ายโดยให้มีระยะห่างระหว่างปม 10 เซนติเมตรใส่บีกเกอร์ตัวอย่างละ 3 ชิ้น
2. นำเส้นใยที่เตรียมไว้ใส่บีกเกอร์ที่มีน้ำลงไปในห้องต้มต้ม Boiling Shrinkage ตามมาตรฐาน ASTM D5104-02 ที่อุณหภูมิ 90 °C นาน 30 นาที
3. เมื่อครบ 30 นาทีแล้วนำเส้นใยออกจากหม้อต้มทิ้งไว้ให้เย็นแล้วทำการวัดความยาวอีกครั้งว่ามีการหดตัวหรือเพิ่มขึ้นของเส้นหรือไม่
4. นำค่าที่วัดได้ของแต่ละตัวอย่าง เฉลี่ยที่ได้จากการวัดมาคำนวณตามสูตรและบันทึกผล

$$\% \text{ Shrinkage} = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100 \quad (3.4)$$

L_0 = ความยาวของเส้นใยก่อนต้ม

L_1 = ความยาวของเส้นใยหลังต้ม

3.7.7 การทดสอบการคืนตัวของรอยหยักในเส้นใย (Crimp Contraction, %CC)

การทดสอบนี้ทดสอบเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์การคืนตัวของเส้นใยเท็กเจอร์
ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบตามมาตรฐาน DIN 53840 รูปที่ 3.11 แสดงรูปเครื่องทดสอบ



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบ Crimp Contraction

วิธีการทดสอบ

1. ม้วนเส้นด้ายให้มีขนาด 2500 dtex โดยใช้เครื่องกรอด้ายที่มีเส้นรอบวง 1 เมตร
2. นำไปแขวนด้วยลูกตุ้มน้ำหนัก 0.2 cN/dtex (500 g) เป็นเวลา 10 วินาที แล้ววัดความยาว ความยาวนี้คือ L2 จากนั้นเปลี่ยนไปใช้ลูกตุ้มหนัก 0.001 cN/dtex (2.5 g) ทิ้งไว้ 10 นาทีแล้ววัดความยาว ความยาวนี้คือ L1 เมื่อได้ค่าต่างๆแล้วให้แทนในสมการดังนี้

$$\text{Crimp Contraction (\%)} = \frac{L_2 - L_1}{L_2} \times 100 \quad (3.5)$$

3.7.8 การทดสอบลักษณะรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Characteristic) [24]

การทดสอบนี้จะทดสอบเพื่อหาค่ารอยหยิกในเส้นใย (Crimp Characteristic) ซึ่งวัดได้จากลักษณะของส่วนโค้ง (Loop) ของเส้นใยต่อหนึ่งความยาว โดยวิธีการทดสอบทำดังนี้

1. ตัดตัวอย่างเส้นใยจากหลอดมาความยาวตามกำหนด
2. นำตัวอย่างที่ได้มาคลายความเครียด (Stress relax) โดยการดึงยืดเส้นใยให้ตึงแล้วปล่อยเส้นใยทิ้งไว้ 1 นาที จากนั้นทำการวัดค่า
3. การทดสอบในงานวิจัยนี้ วัดค่าโดยการคิดเส้นใยที่เตรียมไว้ลงบนกระจก (Glass Slide) จากนั้นนำเข้าสู่เครื่อง Printer Scanner ดังรูปที่ 3.12 จะได้รูปของเส้นใย จึงทำการวัดค่าที่ได้จากนั้นนำค่าความยาวของรอยหยิก (Crimp Length) ที่ได้มาแทนในสมการที่ 3.5 และนำค่าที่ได้จากสมการ 3.5 แทนลงในสมการ 3.6 เพื่อหาความถี่ของรอยหยิกคือหนึ่งความยาว (Crimp Frequency)

$$l_c = \frac{1}{2} \bar{\lambda} \text{ [mm] or [inch]} \quad (3.6)$$

l_c = ความยาวของรอยหยิก (Crimp Length)

$\bar{\lambda}$ = ระยะทางกึ่งกลางระหว่างสอง Loop ของรอยหยิก

$$C_f = \frac{2}{\bar{\lambda}} \left[\frac{1}{\text{inch}} \right] \text{ or } \left[\frac{1}{100 \text{ mm}} \right] \quad (3.7)$$

C_f = ความถี่ของรอยหยักต่อนี่ความยาว (Crimp Frequency)

$\bar{\lambda}$ = ระยะทางกึ่งกลางระหว่างสอง Loop ของรอยหยัก



(a) เครื่อง Printer Scanner

(b) ลักษณะการเตรียมตัวอย่าง

รูปที่ 3.12 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ Crimp Length

3.7.9 การทดสอบลักษณะการติดกันของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

เป็นการทดสอบถึงลักษณะการติดกันของเส้นใยสององค์ประกอบแบบ Side-by-Side เพื่อที่จะดูว่าลักษณะการติดกันของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปมีความเข้ากันได้หรือไม่ โดยดูจากลักษณะผิวหน้าสัมผัสของเฟสที่ถูกละลายออกไปซึ่งใน การทดสอบลักษณะการติดกันของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS นี้จะใช้สารละลาย Tetrahydrofuran (C_4H_8O) ดังรูปที่ 3.13 เพื่อที่จะละลายส่วนของ PLA ออก โดยจะชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบในการทดสอบนี้จะชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 0.1 กรัมต่อ สารละลาย 50 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 สารละลาย Tetrahydrofulan (C_4H_8O)



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการทดสอบด้วยสารละลาย Tetrahydrofulan (C_4H_8O)

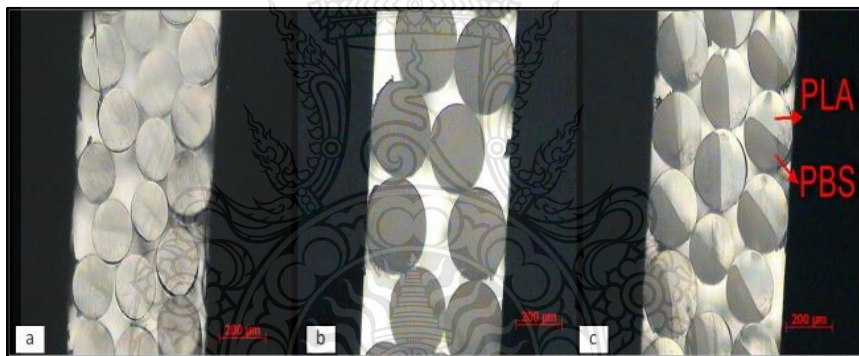
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การทดลองขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

4.1.1 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

จากรูปที่ 4.1 (a) แสดงภาคตัดขวางเส้นใย PLA (b) แสดงภาคตัดขวางของเส้นใย PBS มีลักษณะกลม มีสีใสและเข้มตามลำดับ (c) แสดงภาคตัดขวางจากการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบลักษณะแบบ Side-by-Side ที่มีอัตราส่วน 50 ต่อ 50 ตัวอย่างทั้งหมดเป็นเส้นใยที่ตกแบบอิสระ (Free Fall) จะได้เส้นใยที่มีลักษณะการแบ่งขอบเขตผิวภาคของแต่ละองค์ประกอบอย่างชัดเจน ตามอัตราส่วนการอัตราที่เท่ากัน โดยที่ลักษณะการติดกันของ PLA กับ PBS มีการติดกันอย่างแนบสนิทไม่มีลักษณะแยกออกจากกัน



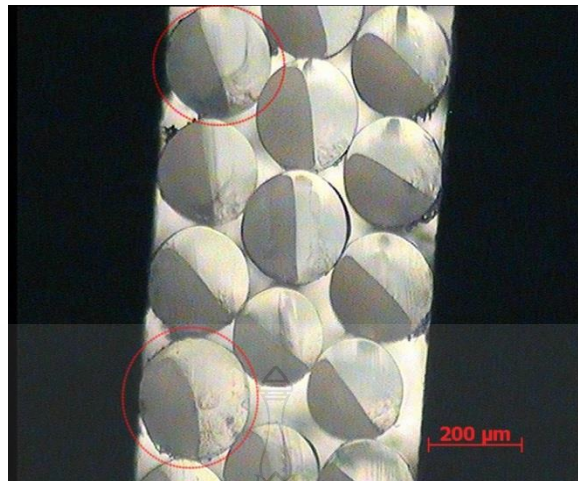
(a) ภาคตัดขวางเส้นใย PLA

(b) ภาคตัดขวางเส้นใย PBS

(c) ภาคตัดขวางจากการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบแบบ Side-by-Side ที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50

รูปที่ 4.1 ภาคตัดขวางของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

แต่เมื่อพิจารณา จากรูปที่ 4.2 จะสังเกตเห็นได้ว่าเส้นใยสององค์ประกอบที่ขึ้นรูปได้ บางส่วนมีปริมาณสัดส่วนเนื้อพอลิเมอร์ ในส่วนของ PLA มากกว่าส่วนของ PBS ซึ่งอาจจะเป็นปัจจัยมาจากอัตราการไหลที่ต่างกันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดหรือการทำงานในส่วนของ Melt Pump ของเครื่องขึ้นรูปเส้นใยไม่คงที่



รูปที่ 4.2 เส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS จากกล้องจุลทรรศน์(OM) กำลังขยาย 4 เท่า

4.1.2 การทดสอบดัชนีการไหล

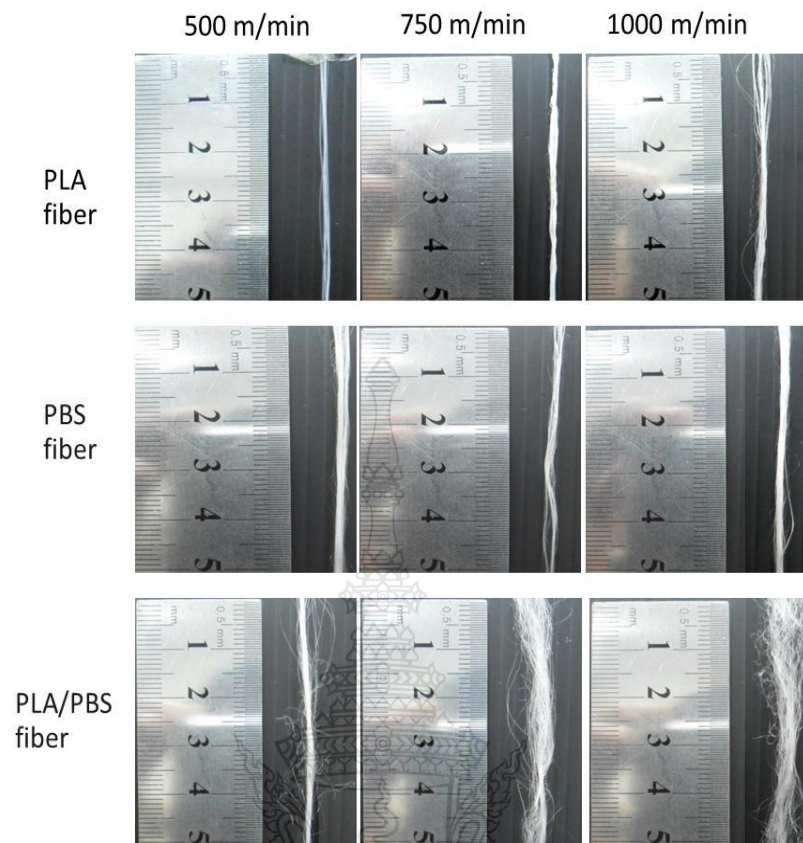
ผลการทดสอบค่าดัชนีการไหลดังตารางที่ 4.1 ทดสอบที่อุณหภูมิ 230 °C น้ำหนักที่ใช้กดเท่ากับ 2.16 กิโลกรัม พบว่า PBS มีค่าดัชนีการไหลสูงกว่า PLA ซึ่งหมายความว่าที่อุณหภูมิดังกล่าว PLA มีความหนืดมากกว่า PBS

ตารางที่ 4.1 ค่าดัชนีการไหลของ PLA และ PBS

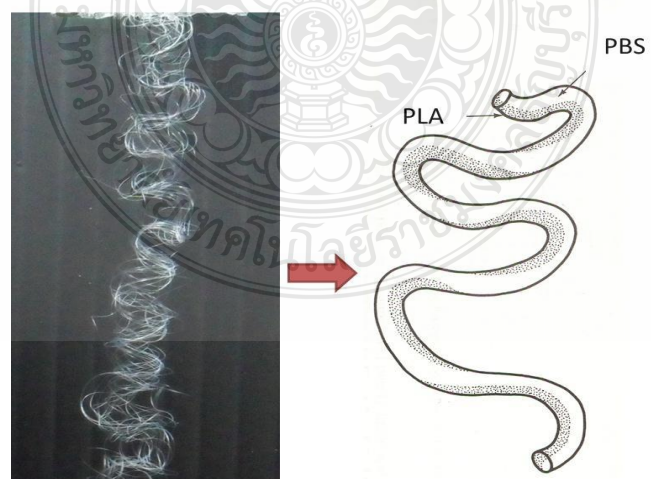
| วัสดุ | MFI (g/10 min) |
|-------|----------------|
| PLA | 34.48 |
| PBS | 47.46 |

4.1.3 ลักษณะความพองฟูของเส้นใย

จากการตรวจสอบลักษณะความพองฟูแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการม้วนเก็บจาก 500, 750 และ 1,000 เมตรต่อนาทีตามลำดับ ลักษณะของเส้นใยสององค์ประกอบของ PLA/PBS จะมีความพองฟูและหยิกงออย่างชัดเจนตามความเร็วในการม้วนเก็บ ดังรูปที่ 4.3 เกิดจากการยืดตัวของพอลิเมอร์ สองส่วนมีความแตกต่างกัน โดยที่ส่วนที่ยืดตัวได้น้อยกว่าจะแสดงเป็นส่วนด้านนอก ส่วนพอลิเมอร์ที่หดตัวได้ดีกว่าจะอยู่ด้านในรูปที่ 4.4 เส้นใยจึงมีลักษณะหยิกงอได้เอง (Self-Crimping) โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการอื่นอีก เช่น กระบวนการเท็กซ์เจอร์



รูปที่ 4.3 ลักษณะความฟองฟูของเส้นใย



รูปที่ 4.4 การฟองฟูของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

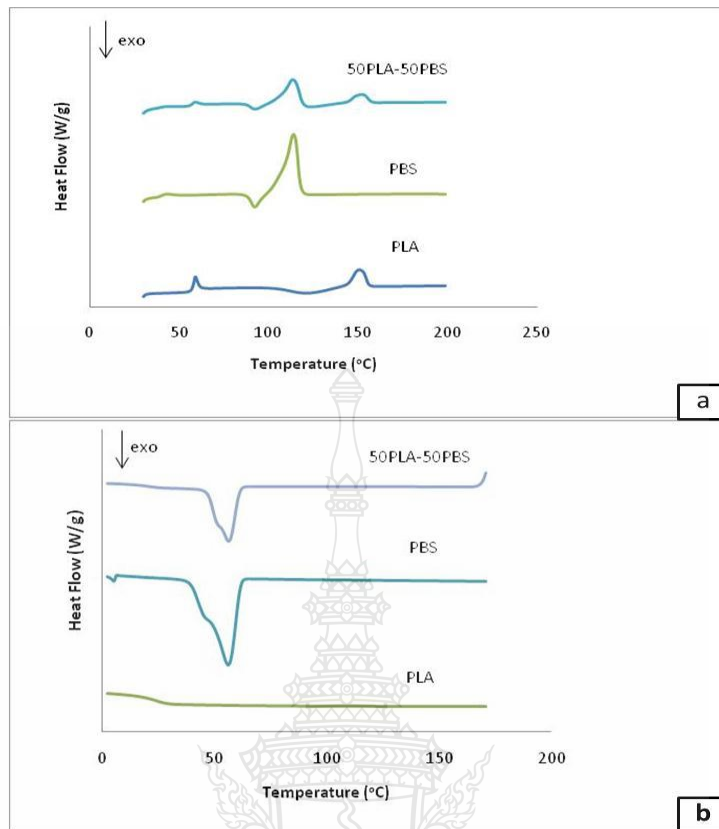
4.1.4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)

จากรูปที่ 4.5 (a) แสดงกราฟของอุณหภูมิหลอมเหลว T_m ของ (PLA, PBS) และเส้นใยสององค์ประกอบของ PLA/PBS ที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50 จะพบว่า PLA จะมีค่า T_m สูงกว่า PBS โดยที่ PLA มี Peak ของค่า T_m เท่ากับ 150.8 °C และ PBS มี Peak ของค่า T_m เท่ากับ 113.8 °C ส่วน T_m ของเส้นใยสององค์ประกอบของ PLA/PBS ที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50 พบว่าค่า T_m เท่ากับ 152.4 °C ซึ่งมีความเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และรูปที่ 4.5 (b) แสดงกราฟการเกิดผลึกของ T_c ของ (PLA/PBS) และเส้นใยสององค์ประกอบของ PLA/PBS ที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50 จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่า PLA ไม่เกิด Peak เนื่องจาก ในสภาวะเงื่อนไขของการทดสอบมีการให้อัตราการหลอมเย็นที่เร็วจนเกินไปจนทำให้ไม่เห็นผลึกของ PLA ส่วนกราฟที่แสดงค่า T_c ของ PBS จะเกิด Peak ที่ 84.0 °C ซึ่งจะสังเกตว่ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกราฟของเส้นใยสององค์ประกอบของ PLA/PBS ที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50 ที่มีค่า T_c เท่ากับ 84.5 °C

สาเหตุที่สมบัติทางความร้อนของเส้นใยสององค์ประกอบไม่มีความแตกต่างจาก PLA และ PBS เนื่องจากเส้นใยสององค์ประกอบ ที่มีลักษณะแบบซิดดิดกันจะมีการแยกแก้วภาคและแบ่งขอบเขตของแต่ละองค์ประกอบอย่างชัดเจน ไม่ได้รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันจึงทำให้สมบัติทางความร้อนของเส้นใยสององค์ประกอบไม่มีความแตกต่างกันจากทั้ง PLA และ PBS ซึ่งจากการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ผลึกของเส้นใยสององค์ประกอบพบว่า PLA มีค่าเปอร์เซ็นต์ผลึกลดลงเนื่องจาก PLA มีความสามารถในการเกิดผลึกได้น้อยกว่า PBS เมื่อขึ้นรูปเป็นเส้นใยสององค์ประกอบ ส่วน PBS จึงเป็นตัวขัดขวางการเกิดผลึกของ PLA สำหรับ PBS มีค่าเปอร์เซ็นต์ผลึกเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจาก PBS มีความสามารถในการเกิดผลึกได้ดีกว่า PLA ทำให้เมื่อขึ้นรูปเป็นเส้นใยสององค์ประกอบส่วนที่เป็น PLA จึงเป็นตัวหน่วงทำให้ PBS มีความสามารถในการเกิดผลึกเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของ PLA, PBS และเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

| Sample | T_m (°C) | | T_c (°C) | | %Crystallinity(% X_c) | |
|-------------|------------|-------|------------|------|--------------------------|------|
| | PLA | PBS | PLA | PBS | PLA | PBS |
| PLA100% | 150.8 | - | - | - | 31.1 | - |
| PBS100% | - | 113.8 | - | 84.0 | - | 62.9 |
| 50PLA:50PBS | 152.4 | 113.5 | - | 84.5 | 20.5 | 73.7 |



- (a) อุณหภูมิหลอมเหลว T_m
 (b) อุณหภูมิการเกิดผลึก T_c

รูปที่ 4.5 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)

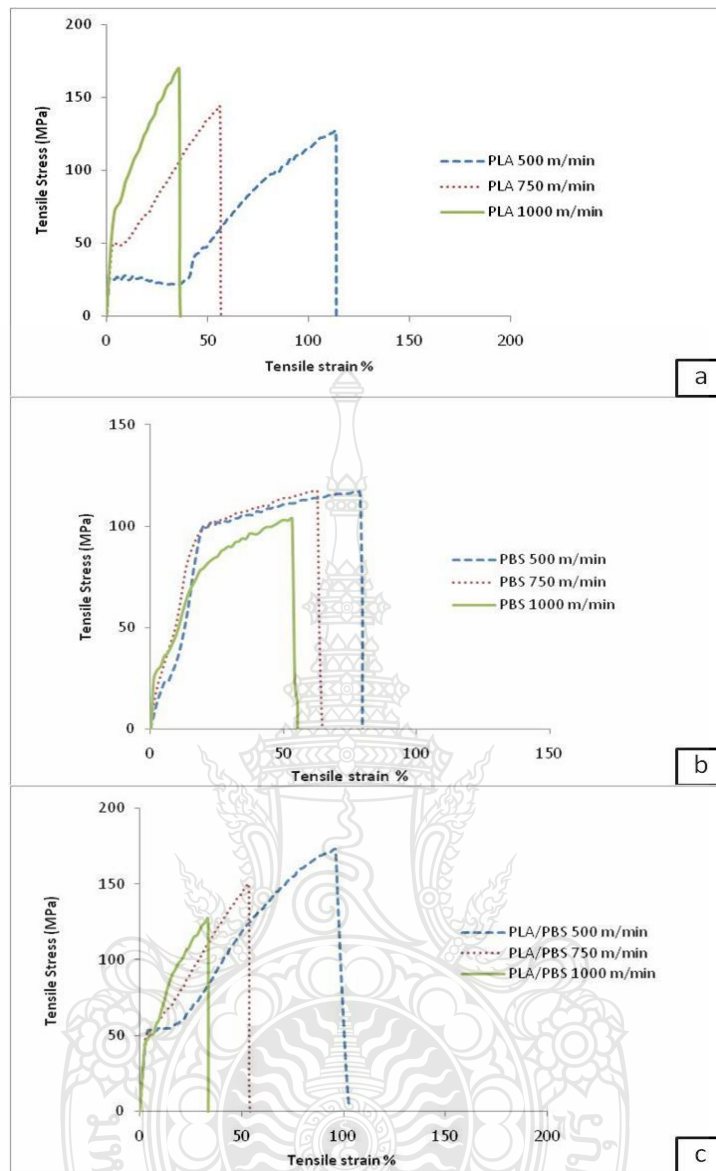
4.1.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงตามความยาวของเส้นใยเดี่ยว (Tensile Strength) จากกราฟรูปที่ 4.6(a) แสดงค่าความแข็งแรงตามความยาวของ PLA ที่มีความเร็วในการม้วนเก็บ 500, 750 และ 1,000 เมตรต่อนาที ตามลำดับ จากลักษณะของกราฟจะแสดงให้เห็นว่า ที่ความเร็วในการม้วนเก็บ 500 และ 700 เมตรต่อนาที เมื่อ PLA ได้รับแรงในช่วงแรกเส้นใยจะมีการยืดตัวออกเล็กน้อยโดยดูได้จากลักษณะความชันของกราฟ จากนั้นจะสามารถรับแรงได้สูงสุดแล้วจึงขาด เป็นผลจากการม้วนเก็บที่ความเร็วนี้เส้นใยยังมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน สายโซ่โมเลกุลเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ แต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการม้วนเก็บที่ 1,000 เมตรต่อนาที จะสังเกตว่าลักษณะของกราฟในช่วงแรก จะมีความชันมาก แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีความสามารถ

ในการรับแรงได้สูงและมีลักษณะการยืดตัวออกก่อนขาดน้อย ทำให้สามารถรับแรงได้สูงกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วในการม้วนเก็บที่ 500 และ 700 เมตรต่อนาที ซึ่งเกิดจาก เมื่อให้แรงตามทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยจะทำให้โครงสร้างสายโซ่โมเลกุลของเส้นใยสามารถเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันและมีความเป็นระเบียบมากขึ้น เป็นผลให้เส้นใยมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่การยืดตัวจะน้อยลง ส่วนรูปที่ 4.6 (b) แสดงค่าความแข็งแรงตามความยาวของ PBS ที่มีความเร็วในการม้วนเก็บ 500, 750 และ 1,000 เมตรต่อนาทีตามลำดับ จากลักษณะของกราฟจะแสดงให้เห็นว่า PBS เมื่อได้รับแรงสูงสุดจะเกิดการยืดตัวออกก่อนแล้วจึงขาดเนื่องจากโครงสร้างของ PBS มีองค์ประกอบที่เป็นส่วนของยาง ซึ่งจากองค์ประกอบที่มีส่วนของยางนี้ ทำให้ค่าความแข็งแรงตามความยาวและค่าการยืดตัวมีค่าลดลงเนื่องจากยางมีความสามารถในการจัดเรียงตัวของสายโซ่ โมเลกุลน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA และจากกราฟรูปที่ 4.6 (c) แสดงค่าความแข็งแรงของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่า ค่าความแข็งแรงตามความยาวและค่าการยืดตัวของเส้นใยสององค์ประกอบจะมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วในการม้วนเก็บ แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบส่วนที่เป็น PBS มีผลต่อค่าความแข็งแรงตามความยาวของเส้นใยสององค์ประกอบลักษณะแบบซิดดีดกันที่อัตราส่วนพอลิเมอร์ 50 ต่อ 50 และจากตารางที่ 4.3 เป็นตารางแสดงค่าความแข็งแรงของเส้นใยที่ผ่านการม้วนเก็บด้วยความเร็วแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงของเส้นใย

| ความเร็วในการม้วนเก็บ (m/min) | Diameter of fiber (μm) | Stress (MPa) | Strain (%) |
|----------------------------------|--|-----------------|---------------|
| PLA 500 | 23.5 | 127.2 | 116.1 |
| PLA 750 | 21.5 | 144.3 | 60.2 |
| PLA 1000 | 20.0 | 170.0 | 48.1 |
| PBS 500 | 24.0 | 117.0 | 106.5 |
| PBS 750 | 21.6 | 117.3 | 74.0 |
| PBS 1000 | 19.9 | 103.9 | 55.3 |
| PLA/PBS 500 | 31.1 | 172.7 | 114.2 |
| PLA/PBS 750 | 28.0 | 150.2 | 68.6 |
| PLA/PBS 1000 | 26.1 | 127.1 | 41.5 |



- (a) เส้นใย PLA ที่ความเร็วในการม้วนเก็บ 500, 750 และ 1,000 m/min
 (b) เส้นใย PBS ที่ความเร็วในการม้วนเก็บ 500, 750 และ 1,000 m/min
 (c) เส้นใย PLA/PBS ที่ความเร็วในการม้วนเก็บ 500, 750 และ 1,000 m/min

รูปที่ 4.6 ค่า Stress-Strain ของเส้นใย PLA, PBS และ PLA/PBS

4.2 การขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านลูกกลิ้งลดขนาด

จากการทดลองขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS แบบ Side-by-Side ที่ผ่านลูกกลิ้งลดขนาดพบว่า ที่อัตราส่วนการลดขนาด 2 เท่า สามารถม้วนเก็บเส้นใยได้ความเร็วเดียวคือ ที่ 500 เมตรต่อนาที ซึ่งที่ความเร็วการม้วนเก็บ 750 และ 1,000 เมตรต่อนาทีไม่สามารถม้วนเก็บได้เนื่องจากเส้นใยเกิดการขาด เพราะความเร็วของลูกกลิ้งลดขนาดต่างกันมากเกินไป โดยเส้นใยที่ขึ้นรูปได้มีขนาดตามตารางที่ 4.4

4.2.1 การทดสอบหาขนาดเบอร์ด้าย

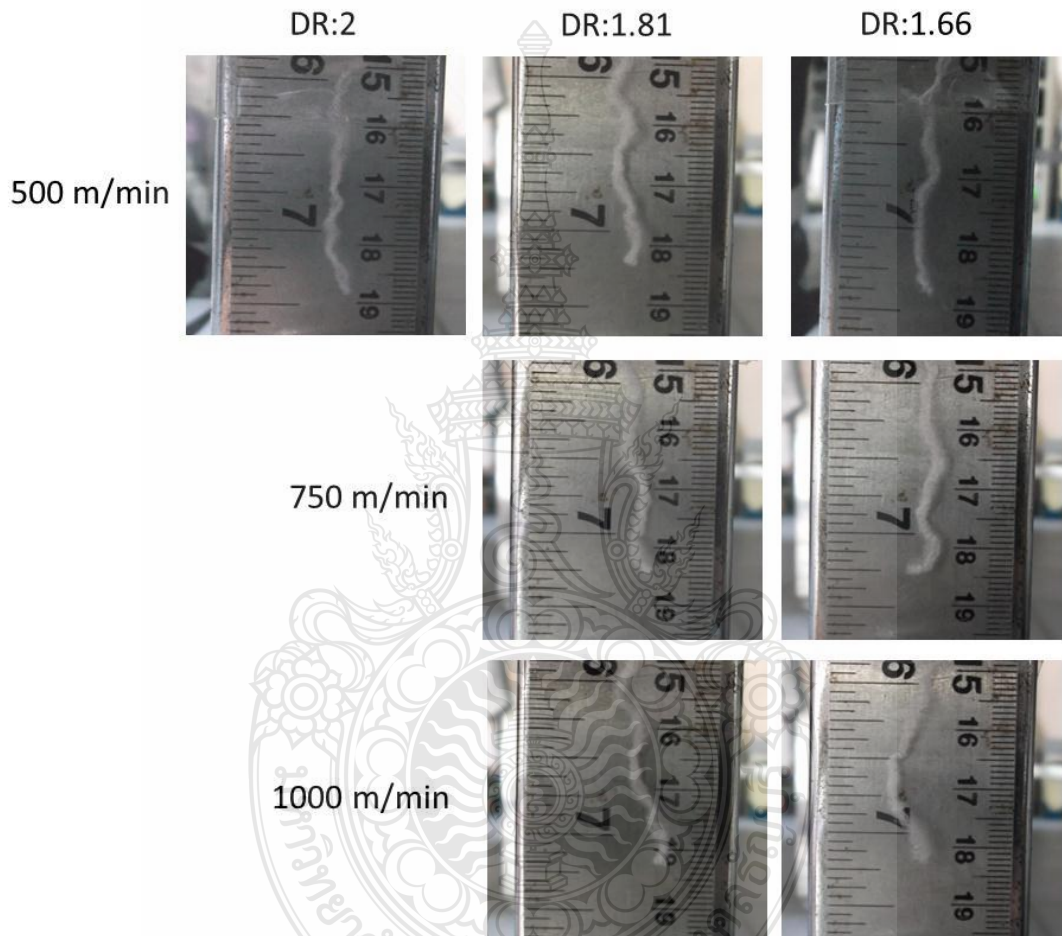
ตารางที่ 4.4 ขนาดเบอร์ด้าย(Denier)

| ความเร็วในการม้วนเก็บ (m/min) | อัตราส่วนการลดขนาด (Drawn Ratio) | ขนาดเบอร์ด้าย (Denier) |
|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| 500 | - | 105.45 |
| | 2 | 112.56 |
| | 1.81 | 112.92 |
| | 1.66 | 113.94 |
| 750 | - | 106.38 |
| | 2 | - |
| | 1.81 | 113.4 |
| | 1.66 | 110.13 |
| 1000 | - | 103.26 |
| | 2 | - |
| | 1.81 | 111.42 |
| | 1.66 | 114.24 |

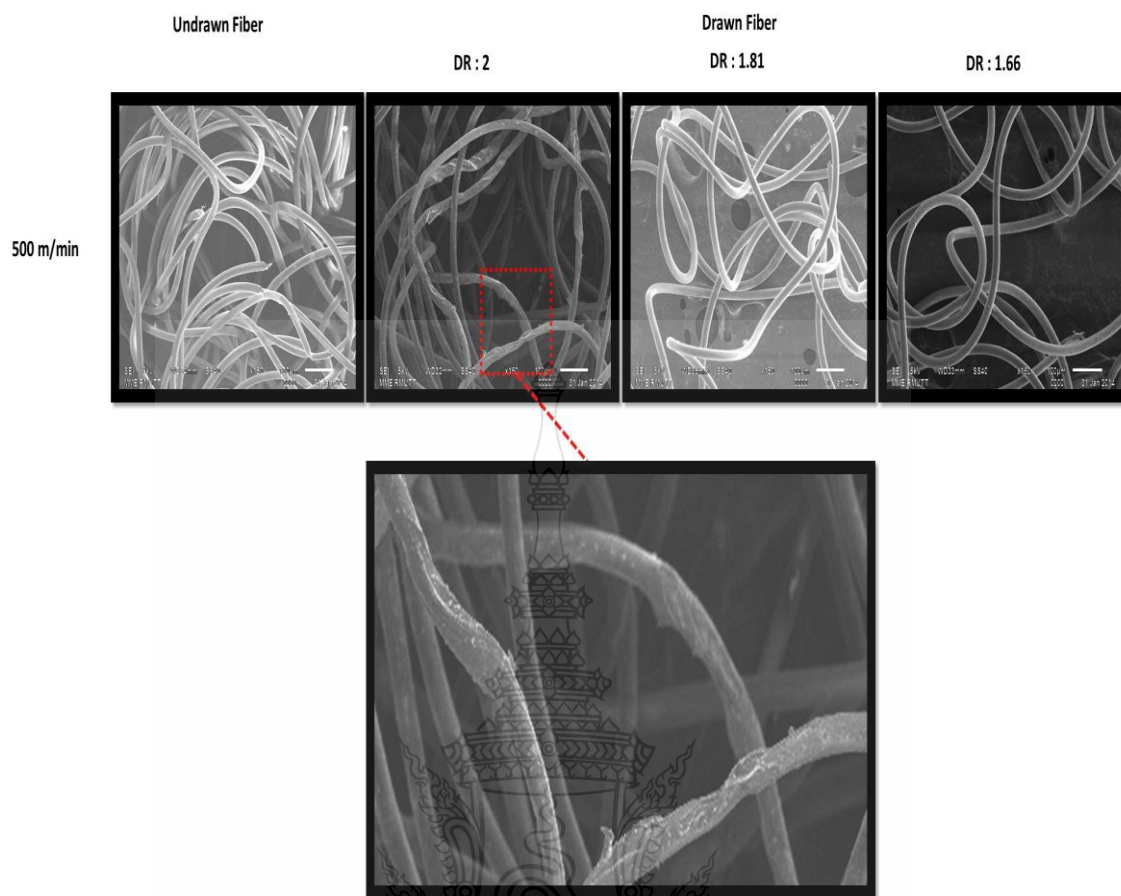
4.2.2 ลักษณะความพองฟูของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านลูกกลิ้งลดขนาด

ลักษณะความพองฟูของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านลูกกลิ้งลดขนาดจากรูปที่ 4.7 เส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านการลดขนาดเส้นใยจะมีลักษณะพองฟู เมื่อนำไป

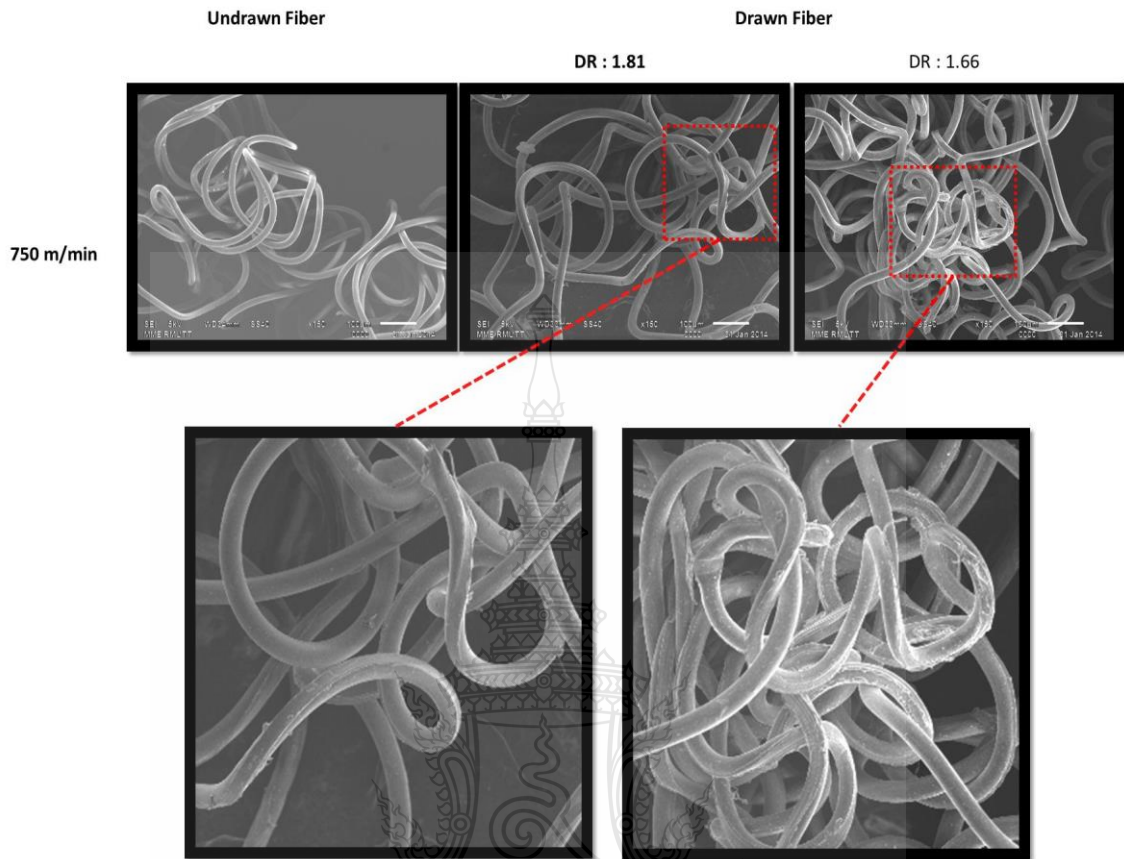
ตรวจสอบลักษณะของพื้นผิวเส้นใยด้วยเทคนิค SEM โดยรวมแล้วลักษณะเส้นใยจะมีพื้นผิวที่เรียบ แต่จะเห็นว่าเมื่อหมุนเก็บที่ความเร็ว 500 เมตรต่อนาที ที่อัตราส่วนลดขนาด 2 เท่า ดังรูปที่ 4.8 ลักษณะของเส้นใย จะเกิดความเสียหาย เส้นใยมีการแยกตัวออกจากกันซึ่งพบความเสียหายในลักษณะเดียวกันนี้ที่ความเร็ว 750 และ 1,000 เมตรต่อนาที อัตราส่วนลดขนาด 1.81 และ 1.61 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



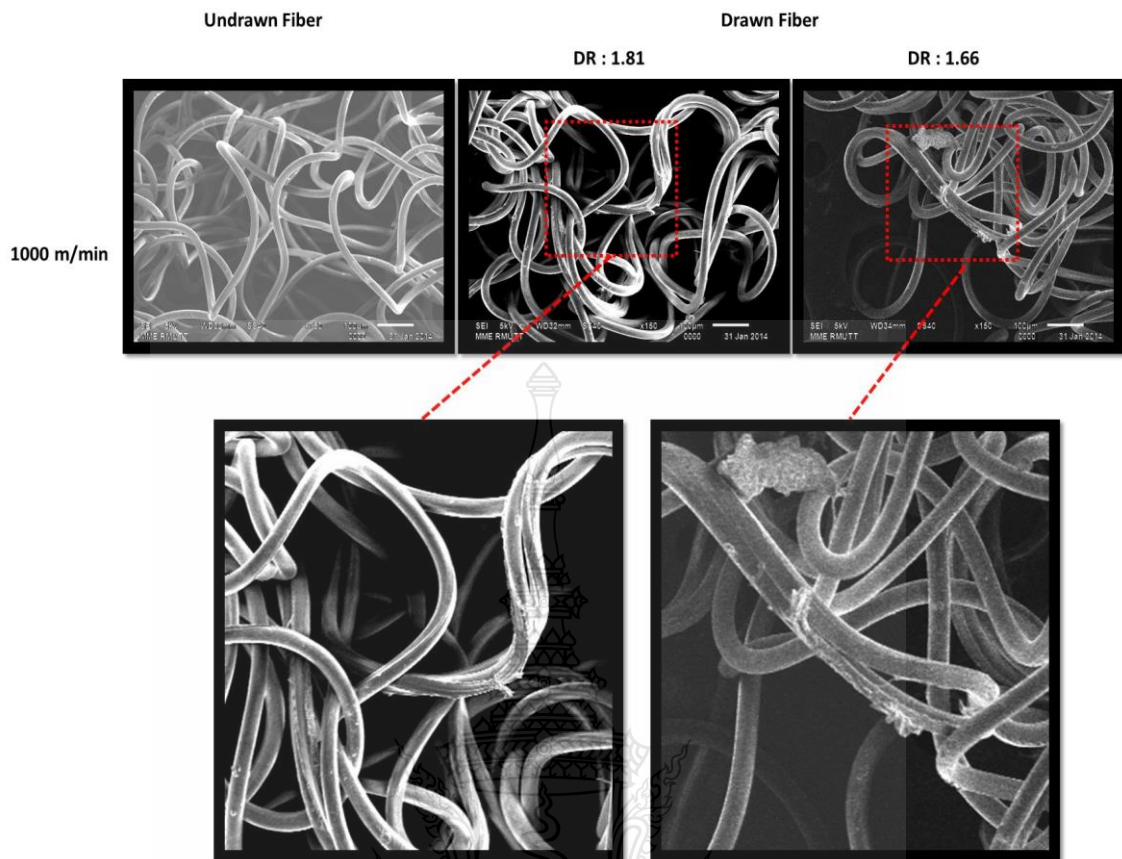
รูปที่ 4.7 ลักษณะเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านลูกกลิ้งลดขนาด



รูปที่ 4.8 เทคนิค SEM กำลังขยาย 150 เท่า เส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านการลดขนาดและไม่ผ่านการลดขนาด ที่ความเร็วหมุนเก็บ 500 m/min



รูปที่ 4.9 เทคนิค SEM กำลังขยาย 150 เท่า เส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านการลดขนาดและไม่ผ่านการลดขนาด ที่ความเร็วหมุนเก็บ 750 m/min



รูปที่ 4.10 เทคนิค SEM กำลังขยาย 150 เท่า เส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านการลดขนาดและไม่ผ่านการลดขนาด ที่ความเร็วหมุนเก็บ 1,000 m/min

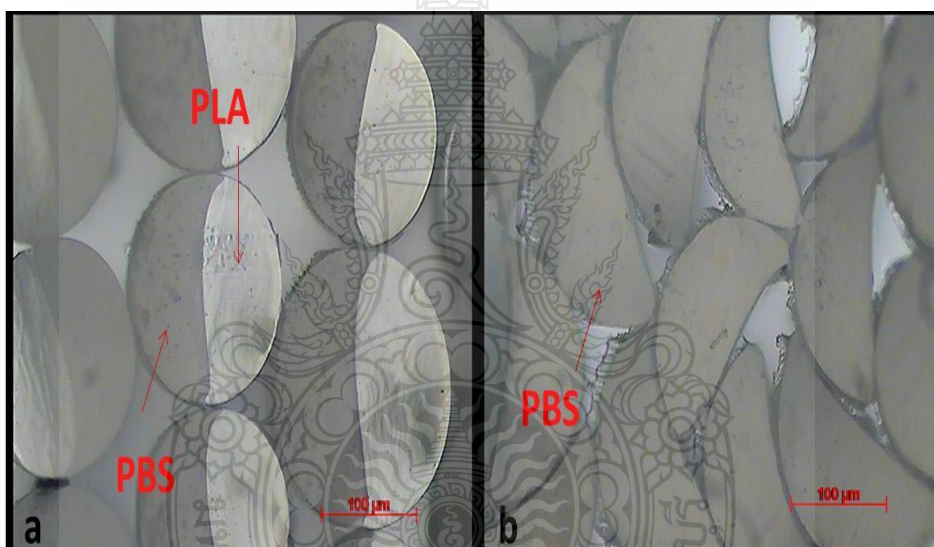
4.2.3 การทดสอบลักษณะการติดกันของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

จากผลการทดสอบโดยใช้สารละลาย Tetrahydrofuran (C_4H_8O) เพื่อที่จะละลายเฟสของ PLA ออกพบว่าเมื่อแช่เส้นใยสององค์ประกอบทิ้งไว้ในสารละลาย 1 ชั่วโมงแล้วซึ่งน้ำหนักได้ค่าดังตารางที่ 4.5 ซึ่งค่าน้ำหนักที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลาย Tetrahydrofuran (C_4H_8O) สามารถละลายเฟสที่เป็นส่วนของ PLA ได้ จากตัวอย่างเส้นใยที่ละลายส่วนที่เป็น PLA ออกแล้วจะเหลือเฉพาะส่วนของ PBS แล้วจึงนำมาศึกษาลักษณะการติดกันของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS พบว่าลักษณะของการติดกันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่ได้รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันโดยดูได้จากลักษณะของพื้นผิวหน้าสัมผัสของส่วนที่เป็น PBS หลังจากละลายส่วน PLA ออกจะมีลักษณะเรียบไม่มีรูพรุน แสดงให้เห็นถึงการไม่ได้รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์สองชนิด ทำให้เมื่อได้รับแรงจากการลดขนาด เส้นใยจะเกิดความเสียหาย เกิดการแยกออกจากกันระหว่าง PLA และ PBS โดยดู

ได้จากรูปที่ 4.11 เป็นรูปภาพตัดขวางของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ก่อนและหลัง PLA ถูกละลายออกด้วยสารละลาย และรูปที่ 4.12 แสดงรูปจากเทคนิค SEM ที่แสดงถึงลักษณะของผิวหน้าสัมผัสของของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS โดยที่ส่วนของ PLA ได้ถูกละลายออกด้วยสารละลาย

ตารางที่ 4.5 น้ำหนักของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ก่อนและหลังถูกละลาย

| ตัวอย่างทดสอบ | ก่อนถูกละลาย(กรัม) | หลังถูกละลาย(กรัม) |
|---------------|--------------------|--------------------|
| PLA | 0.1 | 0 |
| PBS | 0.1 | 0.094 |
| PLA/PBS | 0.1 | 0.0473 |

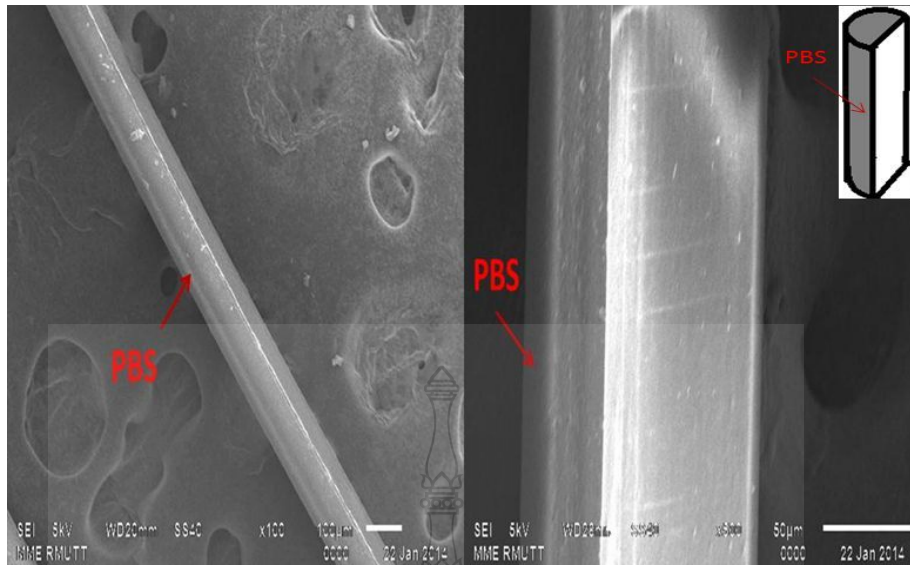


(a) เส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ก่อนถูกทำละลาย

(b) เส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS หลังถูกทำละลาย

รูปที่ 4.11 ภาคนตัดขวางของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS จากกล้องจุลทรรศน์(OM)

กำลังขยาย 10 เท่า



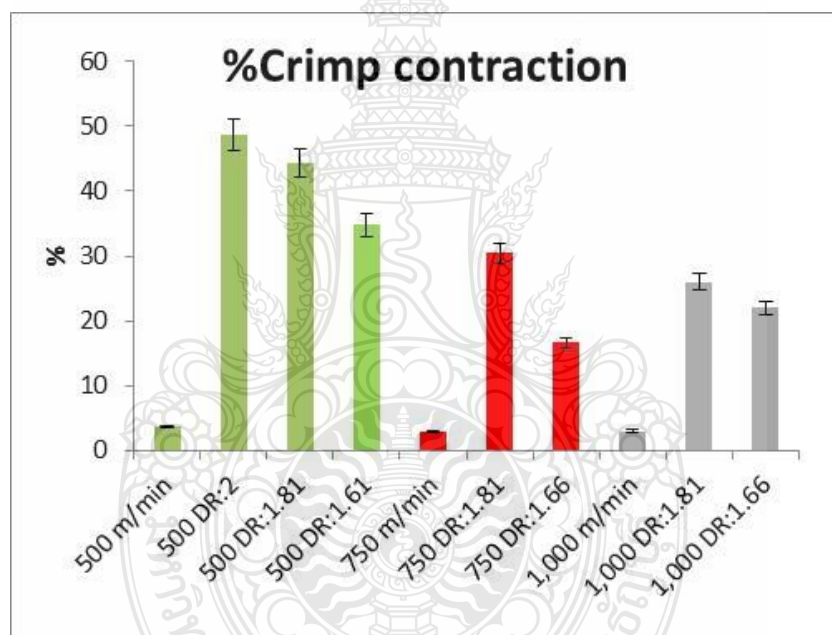
รูปที่ 4.12 เทคนิค SEM ของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS หลัง PLA ถูกละลาย
ด้วยสารละลายที่กำลังขยาย 100 และ 500 เท่า

4.2.4 ผลทดสอบการคืนตัวของรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Contraction, %CC)

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.6 เป็นตารางแสดงการหาค่าการคืนตัวของรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Contraction, %CC) พบว่าเส้นใยสององค์ประกอบที่ผ่านการลดขนาดจะมีความพองฟูมากกว่าเส้นใยสององค์ประกอบที่ไม่ผ่านการลดขนาดในทุกความเร็วของการม้วนเก็บ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการลดขนาดจะพบว่าค่าการคืนตัวของรอยหยิกในเส้นใยจะมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกความเร็วของการม้วนเก็บซึ่งที่ความเร็วในการม้วนเก็บ 500 เมตรต่อนาที มีการคืนตัวของรอยหยิกในเส้นใยมากที่สุดทำให้มีแนวโน้มที่จะได้เส้นใยสององค์ประกอบที่มีความพองฟูมากที่สุด ดังรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.6 การคืนตัวของรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Contraction, %CC)

| Sample | Crimp Contraction (%CC) |
|------------|-------------------------|
| 500 m/min | 3.6 |
| DR:2 | 48.7 |
| DR:1.81 | 44.3 |
| DR:1.61 | 34.8 |
| 750 m/min | 2.9 |
| DR:1.81 | 30.4 |
| DR:1.61 | 16.6 |
| 1000 m/min | 3 |
| DR:1.81 | 26 |
| DR:1.61 | 22 |



รูปที่ 4.13 ค่าการคืนตัวของรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Contraction, %CC)

4.2.4 ผลการทดสอบลักษณะรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Characteristic)

จากผลการทดสอบค่าความยาวของรอยหยิกของเส้นใย (Crimp Length, L) พบว่าลักษณะความยาวของรอยหยิกในเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ไม่ผ่านการลดขนาด ค่าความยาวต่อรอยหยิกในเส้นใยมีความเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความเร็วในการม้วนเก็บจาก 500, 750 และ 1,000 เมตรต่อนาทีตามลำดับ สำหรับเส้นใยสององค์ประกอบที่ผ่านการลดขนาด ที่ความเร็วม้วนเก็บ 500 เมตรต่อนาที

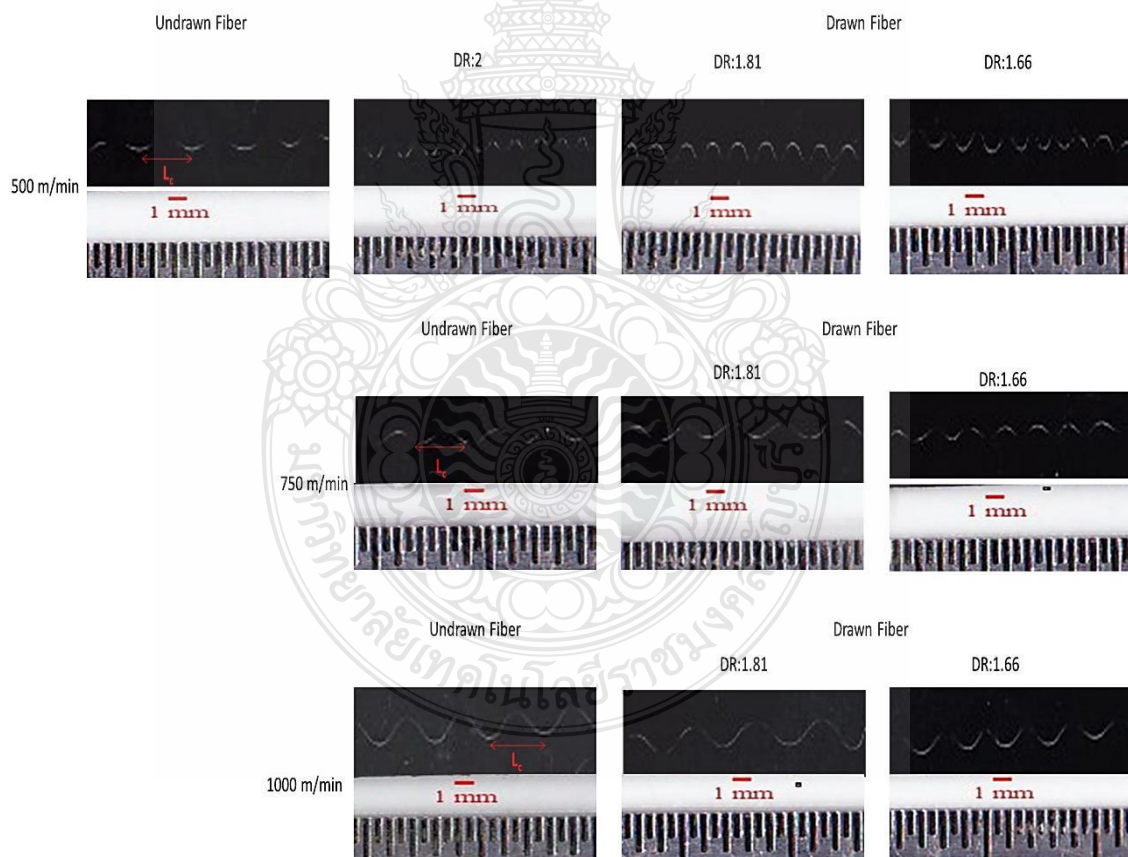
L_c มีค่าลดลงเมื่ออัตราการลดขนาดเพิ่มขึ้น แต่ที่ความเร็วในการม้วนเก็บที่ 750 และ 1,000 เมตรต่อนาที พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการลดขนาด ลักษณะความยาวของรอยหยิกจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการลดขนาดและความเร็วม้วนเก็บซึ่งเกิดจากที่สภาวะดังกล่าว เส้นใยสององค์ประกอบเกิดการเสียดสีเนื่องจากแรงดึง ทำให้สูญเสียความสามารถในการคืนตัวจึงทำให้เส้นใยสององค์ประกอบมีแนวโน้มที่จะมีลักษณะความยาวของรอยหยิกเพิ่มขึ้น โดยลักษณะของรอยหยิก แสดงในรูปที่ 4.14 จากค่าความยาวของรอยหยิกในเส้นใยสามารถนำไปคำนวณหาค่าความถี่ของรอยหยิกในเส้นใยต่อหนึ่งความยาว (Crimp Frequency, C_f) จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ถ้าค่า L_c มีค่ามากกว่า C_f จะมีค่าน้อยได้ผลดัง ตารางที่ 4.7 ในกรณีที่ค่า C_f มีค่ามากสามารถบอกได้ว่าเส้นใยจะมีความหยิกน้อยกว่าเส้นใยมีแนวโน้มที่จะเรียบ [22] และจากตารางที่ 4.8 แสดงค่าความถี่ของรอยหยิกของเส้นใยชนิดสัตว์ทั่วไป จะเห็นได้ว่าเส้นใยสององค์ประกอบที่ขึ้นรูปได้ที่ความเร็วในการม้วนเก็บ 500 เมตรต่อนาทีในทุกอัตราส่วนการลดขนาดจะมีค่าความถี่ของรอยหยิกมากกว่าเส้นใยชนิดสัตว์โดยทั่วไป แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบดังกล่าวจะได้เส้นใยที่มีความละเอียดของการพองฟูมากกว่าเส้นใยชนิดสัตว์ทั่วไป

ตารางที่ 4.7 ค่าการทดสอบลักษณะรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Characteristic)

| Sample | Crimp Length(mm) | Crimp Frequency (10 mm,1 cm) |
|---------------|------------------|------------------------------|
| 500 m/min | 1.40 | 1.42 |
| 500 DR:2 | 0.74 | 2.68 |
| 500 DR:1.81 | 0.77 | 2.58 |
| 500 DR:1.66 | 0.75 | 2.64 |
| 750 m/min | 1.39 | 1.43 |
| 750 DR:1.81 | 1.34 | 1.49 |
| 750DR:1.66 | 0.88 | 2.25 |
| 1000 m/min | 1.42 | 1.40 |
| 1,000 DR:1.81 | 1.63 | 1.22 |
| 1,000 DR:1.66 | 1.19 | 1.67 |

ตารางที่ 4.8 ค่าความถี่ของรอยหยิกเส้นใยขนสัตว์ [23]

| Grades | Number of Crimps / Crimp Frequency (1 cm) |
|-------------|---|
| Very fine | 8.6 – 11.8 |
| Fine | 5.5 – 8.6 |
| 1/2 blood | 3.93 – 8.6 |
| 3/8 blood | 3.14 – 3.93 |
| 1/4 blood | 1.96 – 3.14 |
| Low quarter | 0.78 – 1.96 |
| Common | 0.39 – 0.78 |
| Braid | 0 – 0.39 |

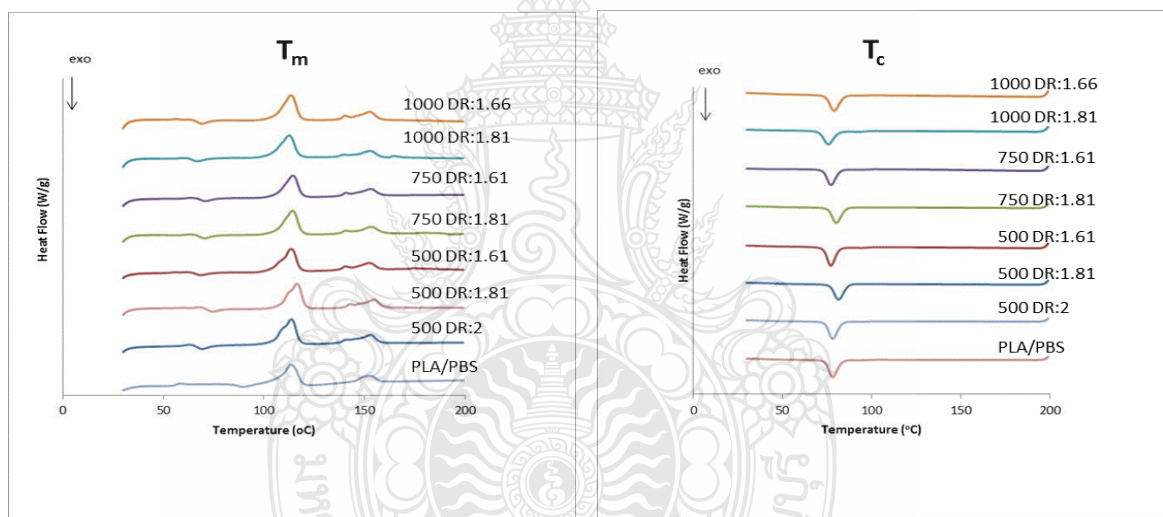


รูปที่ 4.14 ลักษณะความยาวของรอยหยิกในเส้นใย (Crimp Length) ที่ 500, 750 และ 1,000 เมตรต่ออนาทีที่อัตรา

การลดขนาดต่างกัน

4.2.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ของเส้นใยสององค์ประกอบที่ผ่านการลดขนาด

จากผลทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ดังรูปที่ 4.15 พบว่าการลดขนาดของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า T_m เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ PLA และ PBS โดยค่า T_m ของเส้นใยที่ผ่านการลดขนาดทุกอัตราส่วนใน Peak แรกเป็นส่วนของ PBS จะอยู่ที่ประมาณ 113-114 °C ใน Peak ที่สองเป็นส่วนของ PLA จะอยู่ที่ประมาณ 152-153 °C และมีค่า T_c อยู่ที่ประมาณ 76-80 °C เนื่องจากเส้นใยสององค์ประกอบ ที่มีลักษณะแบบซิดดิกันจะมีการแยก วัฏภาคและแบ่งขอบเขตของแต่ละองค์ประกอบอย่างชัดเจน ไม่ได้รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันจึงทำให้สมบัติทางความร้อนของเส้นใยสององค์ประกอบไม่มีความแตกต่างกันจากทั้ง PLA และ PBS



รูปที่ 4.15 สมบัติทางความร้อนจากเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์(DSC)

จากผลขึ้นที่เกิดขึ้นกับเปอร์เซ็นต์ผลึกของ PLA ได้มีผู้อธิบายไว้ว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ผลึก ที่สำคัญคือ ความหนาของชั้นผลึก ซึ่งมีส่วนสำคัญคือ ถ้าส่วนนี้มีความหนามากก็มีโอกาสที่จะมีเปอร์เซ็นต์ผลึกมาก เมื่อเส้นใยผ่านการลดขนาด ค่าเปอร์เซ็นต์ผลึกมีความเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นในส่วนของ PLA เมื่อเทียบกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการลดขนาด เกิดจากเมื่อ PLA ได้รับแรงดึง(อัตราความเครียด) และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ส่วนที่เป็นออสถฐานเคลื่อนที่ได้ง่ายมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลไปในแนวแรงดึงมีการซิดกันมากขึ้นทำให้มีโอกาสเกิดผลึกได้ง่ายขึ้น [5,12] แต่ในส่วนของ PBS มีค่าลดลง เมื่อ

เทียบกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการลดขนาด ซึ่งเป็นไปได้ว่า บริเวณที่เป็นผลึกใน PBS ถูกทำลาย สายโซ่ส่วนที่เรียงตัวชิดกัน ถูกลูกกลิ้งลดขนาดที่มีความร้อนและแรงดึงทำให้ โครงสร้างสายโซ่ขยายตัวหรือเกิดการขาด ทำให้บริเวณสายโซ่ที่มีการเรียงตัวชิดกัน เกิดบางลง [6,13] สำหรับอัตราการลดขนาดที่เพิ่มขึ้นค่าเปอร์เซ็นต์ผลึกของ PLA และ PBS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.9 เนื่องจากอัตราความเครียดที่เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิของลูกกลิ้งลดขนาดที่ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายและเกิดการเรียงตัวชิดกันได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.9 สมบัติทางความร้อนของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

| Sample | T _m (°C) | | T _c (°C) | | %Crystallinity(%X _c) | |
|--------------------------|---------------------|-------|---------------------|------|----------------------------------|------|
| | PLA | PBS | PLA | PBS | PLA | PBS |
| 50PLA:50PBS (Undrawn) | 152.4 | 113.5 | - | 82.4 | 18.2 | 62.3 |
| 500DR:2 | 153.1 | 113.6 | - | 78.6 | 30.9 | 58.8 |
| 500DR:1.81 | 154.8 | 116.4 | - | 82 | 29.7 | 59.6 |
| 500DR:1.66 | 152.5 | 113.6 | - | 77.7 | 22.6 | 55.5 |
| 750DR:1.81 | 153.5 | 114.2 | - | 80.6 | 24.6 | 56.2 |
| 750DR:1.66 | 153.2 | 114.4 | - | 77.8 | 23.9 | 51.5 |
| 1,000DR:1.81 | 152.6 | 113.4 | - | 79.5 | 30.3 | 59.3 |
| 1,000DR:1.66 | 152.8 | 112.6 | - | 76.2 | 21.8 | 55.6 |

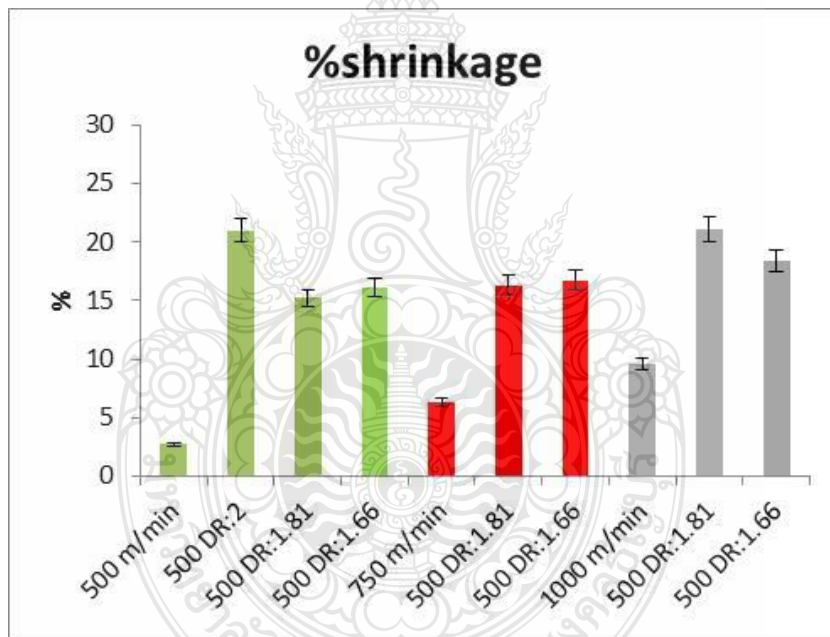
4.2.6 ผลการทดสอบสมบัติการหดตัวของเส้นใย (Fiber Shrinkage Testing)

จากการทดสอบการหดตัวของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS แสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่าการหดตัวของเส้นใย PLA100% จะมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มความเร็วในการม้วนเก็บ ส่วนการหดตัวของเส้นใยสององค์ประกอบ ที่ไม่ผ่านการลดขนาดมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเพิ่มขึ้นตามความเร็วม้วนเก็บ แต่เมื่อผ่านการลดขนาดเปอร์เซ็นต์การหดตัวของเส้นใยสององค์ประกอบ จะเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการลดขนาด ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อเส้นใยผ่านลูกกลิ้งลดขนาดที่มีทั้งอุณหภูมิและแรงดึง (อัตราความเครียด) สายโซ่โมเลกุลของเส้นใยสององค์ประกอบมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันทำให้สายโซ่เรียงตัวชิดกันมากกว่าจึงหดตัวได้มากกว่า และสำหรับความเร็วในการม้วนเก็บและอัตราการลดขนาดที่เพิ่มขึ้นค่าการหดตัว มีความเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยสามารถดูได้จากรูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าการหดตัวของเส้นใยสององค์ประกอบ ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าอุณหภูมิ

การลดขนาด, อัตราส่วนในการลดขนาดและความเร็วในการม้วนเก็บไม่สูงมากพอที่จะทำให้ โครงสร้างภายในโมเลกุลเปลี่ยนแปลงทำให้ค่าที่ได้มีความเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย[7,9]

ตารางที่ 4.10 การหดตัวของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

| Sample | % Shrinkage (500 m/min) | | | % Shrinkage (750 m/min) | | % Shrinkage (1,000 m/min) | |
|------------------|----------------------------|---------|---------|----------------------------|---------|------------------------------|---------|
| | DR:2 | DR:1.81 | DR:1.66 | DR:1.81 | DR:1.66 | DR:1.81 | DR:1.66 |
| PLA100% | 60.7 | | | 62.4 | | 61.5 | |
| PLA/PBS | 2.7 | | | 6.3 | | 9.6 | |
| Drawn PLA/PBS | 21 | 15.2 | 16.1 | 16.3 | 16.7 | 21.1 | 18.4 |

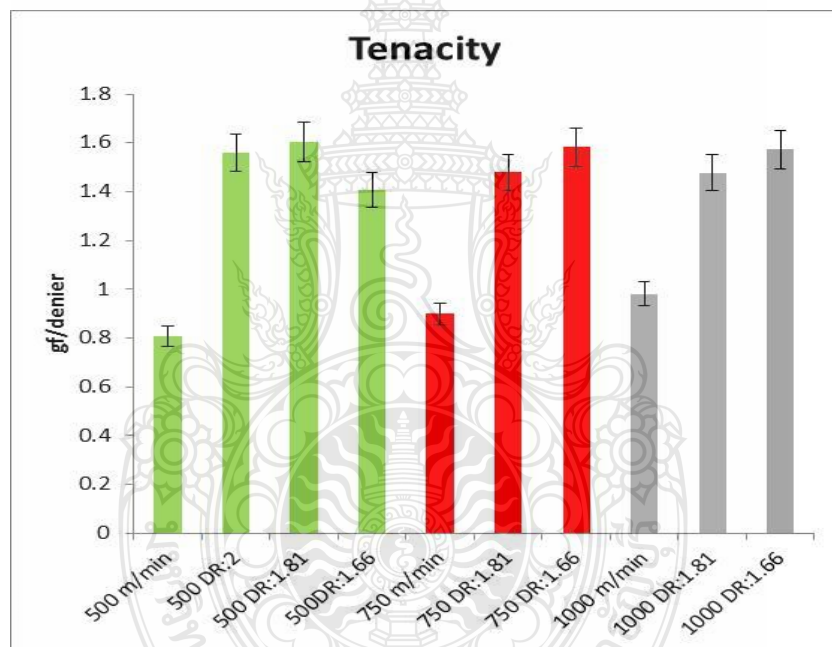


รูปที่ 4.16 ค่าการหดตัวในเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

4.2.7 ผลการทดสอบความแข็งแรงของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

1. ผลการทดสอบความแข็งแรง (Tenacity) ของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการม้วนเก็บจาก 500, 750 และ 1,000 เมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงของเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วของการม้วนเก็บ และเมื่อเส้นใยผ่านการลดขนาดจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการลดขนาดเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงของเส้นใยจะมี

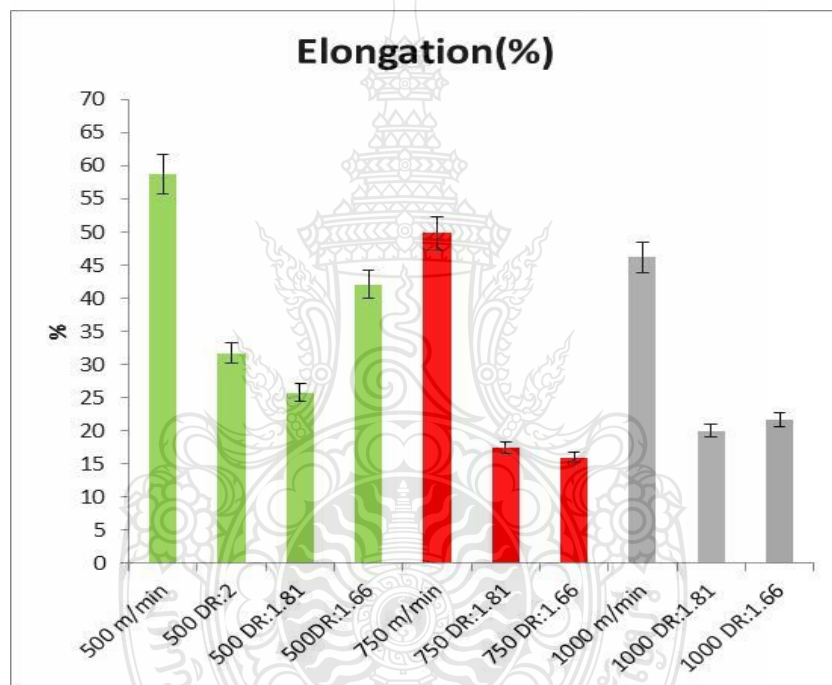
ค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นใยไม่ผ่านการลดขนาด สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดที่เพิ่มขึ้น ที่การม้วนเก็บเส้นใยด้วยความเร็ว 500 เมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงของเส้นใยสององค์ประกอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และที่ความเร็วในการม้วนเก็บ 750 เมตรต่อนาที พบว่าเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงมีค่าลดลงเล็กน้อย เช่นเดียวกับความเร็วในการม้วนเก็บที่ 1,000 ต่อนาที ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ค่าความแข็งแรงของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS มีค่าความแข็งแรงลดลงเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดเพิ่มขึ้นเกิดจาก เส้นใยสององค์ประกอบที่ถูกลดขนาดและม้วนเก็บที่ความเร็ว 750 และ 1,000 เมตรต่อนาที เส้นใยจะเกิดความเสียหาย ระหว่างองค์ประกอบของตัวเส้นใยคือ PLA และ PBS เกิดการแยกออกจากกัน [11] ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ทั้งนี้ความเสียหายที่เกิดจากการแยกออกจากกันของเส้นใยสององค์ประกอบจะเกิดที่อัตราส่วนการลดขนาดที่ 2 เท่า ของความเร็ว ม้วนเก็บ 500 เมตรต่อนาทีอีกด้วย



รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งแรงของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

2. ผลการทดลองค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ค่าการยืดตัวของเส้นใยสององค์ประกอบ จากผลการทดลอง พบว่าเมื่ออัตราส่วนการม้วนเก็บเพิ่มขึ้นจาก 500, 750 และ 1,000 เมตรต่อนาที ค่าการยืดตัวของ เส้นใยสององค์ประกอบมีค่าลดลงตามลำดับ แต่เมื่อผ่านการลดขนาด พบว่าเส้นใยที่ผ่านการลดขนาดค่าการยืดตัวจะลดลงเมื่อเทียบกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการลดขนาด ในทุกความเร็วของการม้วนเก็บ ซึ่งเกิดจากเมื่อเส้นใยผ่านการลดขนาด เส้นใยสององค์ประกอบในส่วน

ของ PBS มีลักษณะของความเป็นยาง เมื่อผ่านลูกกลิ้งลดขนาดที่มีทั้งอัตราความเร็วและอุณหภูมิทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น เกิดการขยายออกหรือการขาดของสายโซ่โมเลกุล ทำให้เมื่อนำไปทดสอบค่าการยืดตัวจึงมีค่าลดลงมากกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการลดขนาด สำหรับอัตราการลดขนาดที่เพิ่มขึ้นค่าการยืดตัวที่ความเร็วในการม้วนเก็บที่ 500 เมตรต่อนาที ในทุกอัตราส่วนการลดขนาดจะมีค่าการยืดตัวสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็ว 750 และ 1,000 เมตรต่อนาที ทุกอัตราส่วนการลดขนาด และจะสังเกตได้ว่าที่ความเร็ว 750 และ 1,000 เมตรต่อนาทีทุกอัตราส่วนการลดขนาด ค่าการยืดตัวมีความเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากองค์ประกอบบางส่วน of เส้นใยสององค์ประกอบเกิดความเสียหายจากการลดขนาดที่ความเร็วดังกล่าว [11]



รูปที่ 4.18 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบระหว่าง PLA และ PBS ลักษณะแบบ Side-by-Side ที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50 และม้วนเก็บที่ความเร็วต่างกันที่ 500, 750 และ 1,000 เมตรต่อนาทีและผลการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS แบบ Side-by-Side ที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50 โดยควบคุมขนาดเส้นใยเท่ากับ 100 ไมโครเมตร จากนั้นเส้นใยจะผ่านการลดขนาดที่อัตราส่วนต่างกันคือ 1.66, 1.81 และ 2.0 เท่าโดยที่มีความเร็วในการม้วนเก็บต่างกันที่ 500, 750 และ 1,000 เมตรต่อนาที ซึ่งผลการทดลองจะสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการทดลองการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS

สรุปผลจากการทดลองขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS แบบ Side-by-Side ที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50 พบว่าการขึ้นรูปเส้นใยที่อุณหภูมิสุดท้ายเท่ากับ (Melt Pump) 230 °C และควบคุมอัตราส่วนเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ 50 ต่อ 50 สามารถขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบลักษณะแบบ Side-by-Side และสามารถม้วนเก็บเส้นใยได้ ซึ่งจากลักษณะทางสัณฐานของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ขึ้นรูปได้พบว่าเส้นใยที่มีลักษณะการแบ่งขอบเขตผิวภาคของแต่ละองค์ประกอบเท่ากันอย่างชัดเจนตามอัตราส่วนการอัตราส่วน 50 ต่อ 50 โดยลักษณะการติดกันระหว่าง PLA และ PBS มีการติดกันอย่างแนบสนิทไม่มีลักษณะแยกจากกันในส่วนของการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่าสมบัติทางความร้อนของเส้นใยสององค์ประกอบไม่มีความแตกต่างจาก PLA และ PBS เนื่องจากเส้นใยสององค์ประกอบที่มีลักษณะแบบ Side-by-Side จะมีการแยกผิวภาคและแบ่งขอบเขตของแต่ละองค์ประกอบอย่างชัดเจนไม่ได้รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันจึงทำให้สมบัติทางความร้อนของเส้นใยสององค์ประกอบไม่มีความแตกต่างกันจากทั้ง PLA และ PBS เมื่อเส้นใยสององค์ประกอบที่ขึ้นรูปได้ผ่านการม้วนเก็บที่ความเร็ว 500, 750 และ 1,000 เมตรต่อนาทีตามลำดับจะเห็นว่าเส้นใยที่มีลักษณะพองฟูและหยิกงออย่างเห็นได้ชัดตามความเร็วในการม้วนเก็บที่เพิ่มขึ้นส่วนการทดสอบสมบัติเชิงกลของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS พบว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าการยืดตัวของเส้นใยสององค์ประกอบจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วในการม้วนเก็บซึ่งแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบส่วนที่เป็น PBS มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าการยืดตัวของเส้นใยสององค์ประกอบลักษณะแบบ Side-by-Side ที่อัตราส่วนพอลิเมอร์ 50 ต่อ 50

5.2 สรุปผลการทดลองขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ผ่านลูกกลิ้งลดขนาด

จากการทดลองขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS แบบ Side-by-Side ที่ผ่านลูกกลิ้งลดขนาดพบว่า ที่อัตราส่วนการลดขนาด 2 เท่า สามารถม้วนเก็บได้ความเร็วเดียวคือ 500 เมตรต่อนาที ซึ่งที่ความเร็วการม้วนเก็บ 750 และ 1,000 เมตรต่อนาทีไม่สามารถม้วนเก็บได้เนื่องจากเส้นใยเกิดการขาด เพราะความเร็วของลูกกลิ้งลดขนาดต่างกันมากเกินไป

โดยจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนลดขนาดที่เพิ่มขึ้นของการม้วนเส้นใยเก็บด้วยความเร็ว 500 เมตรต่อนาที เส้นใยมีแนวโน้มเกิดความพองฟูและหยิกงอเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนลดขนาดการทดสอบความแข็งแรงของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านการลดขนาดสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือ ค่าความแข็งแรงตามความยาวของเส้นใยและค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของเส้นใย

1. ผลการทดสอบความแข็งแรงของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านการลดขนาดพบว่าเมื่ออัตราส่วนลดขนาดเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงของเส้นใยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นใยไม่ผ่านการลดขนาด สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดที่เพิ่มขึ้นที่การม้วนเก็บเส้นใยด้วยความเร็ว 500 เมตรต่อนาที ค่าความแข็งแรงของเส้นใยสององค์ประกอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยที่ความเร็วในการม้วนเก็บ 750 และ 1,000 เมตรต่อนาที พบว่าเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงมีค่าลดลงเล็กน้อย

2. ผลการทดลองค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านการลดขนาด พบว่าเมื่ออัตราส่วนการม้วนเก็บเพิ่มขึ้นจาก 500, 750 และ 1,000 เมตรต่อนาที ค่าการยืดตัวของเส้นใยสององค์ประกอบมีค่าลดลงตามลำดับ แต่เมื่อเส้นใยผ่านการลดขนาด พบว่าค่าการยืดตัวจะลดลงเมื่อเทียบกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการลดขนาดในทุกความเร็วของการม้วนเก็บ สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดที่เพิ่มขึ้นค่าการยืดตัว ณ จุดขาดที่ความเร็วในการม้วนเก็บ 500 เมตรต่อนาที ในมีค่าการยืดตัวสูงสุดเมื่อเทียบกับที่ม้วนเก็บด้วยความเร็ว 750 และ 1,000 เมตรต่อนาที

สำหรับเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ผ่านการลดขนาดในทุกอัตราส่วนจากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนและทดสอบค่าการหดตัว พบว่าอัตราส่วนการลดขนาดที่เพิ่มขึ้นมีความเปลี่ยนแปลงต่อค่า T_m และ T_c และค่าการหดตัวของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS เพียงเล็กน้อย แต่ในการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ผลึกจะพบว่าอัตราส่วนการลดขนาดที่เพิ่มขึ้นผลึกในส่วน PLA และ PBS มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วการม้วนเก็บซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ผ่านลูกกลิ้งลดขนาด สายโซ่โมเลกุลของเส้นใยสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายจึงมีโอกาสนในการจัดเรียงตัวชิดกันมากขึ้นเนื่องมาจากอุณหภูมิลูกกลิ้งและอัตราความเครียดที่เกิดขึ้นในขณะที่เส้นใยผ่านการลดขนาด

5.3 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจกงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ลักษณะแบบ Side-by-Side ที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50 เพื่อให้ได้เส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่ย่อยสลายได้มีลักษณะของความพองฟูและหยิกงอได้ด้วยตัวเองโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการอื่นอีก ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นว่าเส้นใยสององค์ประกอบมีแนวโน้มที่จะพองฟูและหยิกงอเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการลดขนาด และจากงานวิจัยนี้สามารถนำสภาวะที่ใช้ขึ้นรูปไปปรับใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS ที่มีลักษณะแบบ Side-by-Side ที่อัตราส่วนพอลิเมอร์ต่างกันหรือสามารถขึ้นรูปเส้นใยที่มีรูปร่างลักษณะภาคตัดขวางในรูปแบบต่างๆได้

ปัญหาที่พบในงานวิจัยนี้คือการนำวัสดุพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้มาใช้ในกระบวนการทดลอง ควรจะเก็บรักษาวัตถุดิบในที่เก็บแบบปิดเพื่อให้พ้นจากปัจจัยที่จะทำให้วัตถุดิบเกิดการเสื่อมสภาพ เช่น แสงแดด, อากาศและความชื้นหรือแบคทีเรีย เชื้อราต่างๆ ซึ่งควรตรวจสอบว่าวัตถุดิบที่นำมาใช้มีระยะเวลาในการเก็บรักษามากน้อยเพียงใดเมื่อวัตถุดิบนั้นสัมผัสกับอากาศและความชื้น (เมื่อเปิดถุงบรรจุ) ในส่วนของกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบแบบ Side-by-Side ที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50 ปัญหาที่พบคือ ถ้าพอลิเมอร์ที่นำมาใช้มีสมบัติการไหลที่แตกต่างมากเมื่อเข้าสู่กระบวนการอัดรีด เส้นใยที่ถูกอัดรีดออกมาจะไปติดอยู่ที่หน้าสัมผัสของสปีนเนอร์ทำให้ไม่สามารถม้วนเก็บได้หรือถ้าม้วนเก็บได้ เมื่อนำเส้นใยมาดูภาคตัดขวางลักษณะวิภาคของพอลิเมอร์จะไม่สมมาตร/ไม่ได้สัดส่วนตามกำหนด มีลักษณะคล้ายเส้นพระจันทร์เกิดจากพอลิเมอร์ที่มีความหนืดน้อยจะไหลได้ดีกว่าพอลิเมอร์ที่มีความหนืดมาก ดังนั้นเมื่อเนื้อพอลิเมอร์ไหลออกมา ไหลออกจากรูสปีนเนอร์ส่วนที่ไหลง่ายจะเบี่ยงไปทางส่วนที่ไหลยากสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มหรือ ลดอุณหภูมิให้พอลิเมอร์มีอัตราการไหลที่ใกล้เคียงกันซึ่งสังเกตได้จากค่าความดันก่อนเข้า Melt Pump จะมีค่าใกล้เคียงกัน

รายการอ้างอิง

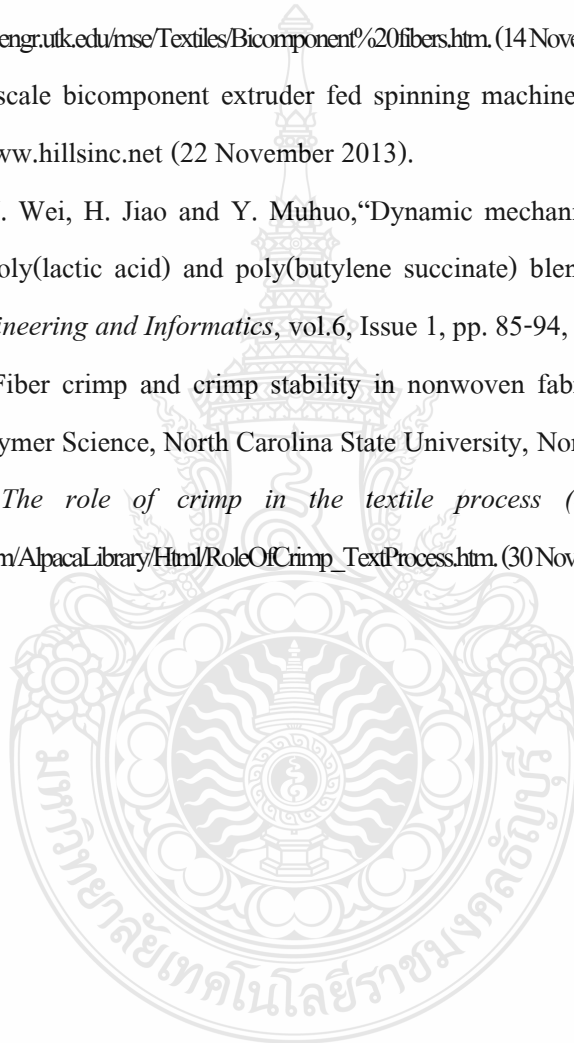
- [1] ชัยพฤษ อภาเวท, เจษฎา วงษ์อ่อน, นที ศรีสวัสดิ์ และ นรินทร กาบบัวทอง, “การศึกษาการปรับปรุงสมบัติความเหนียวของ PLA ด้วยการผสมกับPBS”. *การประชุมวิชาการรายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, พัทยา, ประเทศไทย, 20-21 ตุลาคม 2554.*
- [2] T. F. Cooke, “High Technology Fibers”, *In Handbook of Fiber Science and Technolog. Vol3*, M. Lewin and J. Preston, Eds., ed, New York: Marcel Dekker, 1996, pp. 247-284.
- [3] L.H. Sperling, “Graft and blocks”, *In recent advances in polymer blends*. L.H. sperling, Ed., ed, New York: Plenum Press, 1974
- [4] P. Chureerat, K. Wattana, R. Nanjaporn and S. Natee, “Self-crimped bicomponent fibers containing polypropylene/ethylene octane copolymer”. *Materials Review Letters*, vol. 91, pp. 232-234, October 2012.
- [5] J.K. Lee, K.H. Lee and B.S. Jin, “Structure development and biodegradability of uniaxially stretched poly(L-lactide)”. *European Polymer journal*, vol. 37, pp. 907-914, May 2001.
- [6] Z.H. Gan, H. Abe, H. Kurokawa and Y. Doi, “Solid-state microstructures, thermal properties, and crystallization of biodegradable poly(butylene succinate) (PBS) and its copolyesters”. *Biomacromolecules*, vol. 2, pp. 605–613, May 2001.
- [7] K. Takahashi, D. Sawai, T. Yokoyama, T. Kanamoto and S. H. Hyon, “Crystal transformation from the α - to the β -form upon tensile drawing of poly(L-lactic acid)”. *Polymer*, vol. 45, pp. 4969–4976, July 2004.
- [8] S. Lee and J.W. Lee, “Characterization and processing of Biodegradable polymey blends of poly(lactic acid) with poly(butylenes succinate adipate)”. *Korea-Australia Rheology Journal*, vol. 17, pp. 136-714, June 2005.
- [9] Q. Shi, M. Takasaki, H. Ito and T. Kikutani, “Structural Development and Properties of Melt Spun Poly(butylene succinate) and Poly(butylene terephthalate-co-succinate-co-adipate) Biodegradable fiber”. *International Polymer Processing*, Vol. 21, pp. 64-69, March 2006.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [10] A. Bhatia, R. Gupta, S. Bhattacharya and H.J. Choi, “Compatibility of biodegradable poly (lactic acid)(PLA) and poly(butylenes succinate)(PBS) blends for packaging application”. *Korea-Australia Rheology Journal*. Vol. 13, pp. 125-131, May 2007.
- [11] H. Feng, “An Investigation of the Interfacial Microstructure and Properties in Side-by-Side Bicomponent Polymer Fibers”. Master’s Thesis, Chemical Engineering, Department of Chemical and Biomolecular Engineering Faculty, North Carolina State University, North Carolina, 2010.
- [12] X. Zhang, K. Schneider, G. Liu, J. Chen, K. Brüning and D. Wang, “Structure variation of tensile-deformed amorphous poly(L-lactic acid): Effects of deformation rate and strain”. *Polymer*, vol. 52, pp. 4141-4149, August 2011.
- [13] Y. J. Phua, W. S. Chow, Z. A. Mohd Ishak, “Mechanical properties and structure development in poly(butylene succinate)/organo-montmorillonite nanocomposites under uniaxial cold rolling”. *Express Polymer Letters*, Vol.5, pp. 93–103, February 2011.
- [14] รุ่งนภา รักท้วม, วรมันต์ เมืองมนประเสริฐ, และอานันต์ สุกวิสัย, “ผลของพอลิเอทิลีนไกลคอลต่อพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต”. ปรินูญานินพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555
- [15] W. Fumei, G. Fei and X. Bugao, “Elastic strain of PTT/PET self-crimping fibers”. *JOURNAL OF ENGINEERED FIBERS AND FABRICS*, Vol. 8, Issue 2, 2013.
- [16] J. Lalita, T. Sopaphorn, W. Jessada, S. Prayoon, A. Chiyaprek, C. Tirapong, K. Narin, O. Narongchai and S. Natee, “Poly(lactic acid) and poly(butylene succinate) blend fibers prepared by melt spinning technique”. *Energy Procedia*, vol. 34, pp. 493-499, September 2013.
- [17] อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล, พอลิแลคติกแอซิดพอลิเอสเทอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้ Risk Assessment of Traction Battery Charging System in Warehouse, ฉบับที่ 77 ปีที่ 24 กรกฎาคม - กันยายน 2554 หน้า 99-108

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [18] นที ศรีสวัสดิ์. (ม.ป.ป.). กระบวนการผลิตพอลิเมอร์และการขึ้นรูปเส้นใย. เอกสารไม่ได้ตีพิมพ์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ, สาขาการผลิตเส้นใยสังเคราะห์.
- [19] R.H. Raghavendra, A. Dahiya and M. G. Kamath, Bicomponent fibers (*online*), 2004, Available: www.engr.utk.edu/mse/Textiles/Bicomponent%20fibers.htm. (14 November 2013).
- [20] H. Inc, Lab scale bicomponent extruder fed spinning machine model lbs (*online*), 2013, Available: www.hillsinc.net (22 November 2013).
- [21] E. Hassan, Y. Wei, H. Jiao and Y. Muhuo, "Dynamic mechanical properties and thermal stability of poly(lactic acid) and poly(butylene succinate) blends composite". *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, vol.6, Issue 1, pp. 85-94, March 2013.
- [22] B.K. Ina, "Fiber crimp and crimp stability in nonwoven fabric process". (Ph.D. Thesis, Fiber and Polymer Science, North Carolina State University, North Carolina, 2000.
- [23] M. Safley, *The role of crimp in the textile process* (*online*), 2011, Available: www.alpacas.com/AlpacaLibrary/Html/RoleOfCrimp_TextProcess.htm. (30 November 2013).



ภาคผนวก





ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

E. Junsri, N. O-charoen and N. Srisawat, “Bicomponent Fiber from Polylactic Acid (PLA) and Polybutylene Succinate (PBS)”. *Proceeding, Industrial Engineering Network Conference 2013 (IE NETWORK 2013)*, The Royal Cruise Hotel, Chonburi, Thailand, October 16-18, 2013, accepted.



ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล

ร่วมกับ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร

Proceedings
IE Network Conference 2013
Green Productivity and Innovation

16 - 18 ตุลาคม 2556

โรงแรม เอวัน เดอะ รอยัล กรุ๊ป พัทยา ชลบุรี



ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
การประชุมช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2556

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.จิตรา รุกิจการพานิช
ผศ.ดร.มานพ เรียวเดชะ

ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ. ดร.กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ผศ.ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน
ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง
ดร.นัฐธวีภา จันทร์ศรี

ดร.เพ็ญสุดา พันธุธิดำ
ดร.ฐิติกร พัฒนพิบูล
อ.จักรินทร์ กลั่นเงิน

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

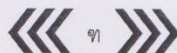
รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล
รศ.ดร.ชนนาถ กฤตวรกาญจน์
รศ.ดร.นิวิท เจริญใจ
รศ.ดร.วิมลีน เหล่าศิริถาวร
รศ.ดร.อภิชาติ โสภางค์
ผศ.ดร.ศักดิ์เกษม รมะมิ่งคังวงศ์
ผศ.ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์าวงค์

ผศ.ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์
ผศ.ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินไหว
ผศ.ดร.วิศสนัย วรจรนัจฉริยา
ผศ.ดร.อรรณพ สมทศุบัติ
ดร.วสุวัชร นาคเขียว
ดร.วริษา วิสิทธิ์พานิช
ดร.อนิรุท ไชยจรรวณิช

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์
รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒนา
รศ.วชิระ มีทอง
ผศ.ดร.สุสันต์ พรหมบุญพงศ์

ผศ.ดร.อภิรักษ์นา อุดมศักดิ์กุล
ผศ.ดร.เจริญชัย โขมพัฒนารักษ์
ผศ.ดร.ธัญญา วสุศรี
ผศ.ดร.อัครทัต พึ่งอัน





ผศ.เฉลิมเกียรติ จิระรุ่งเสถียร
 ผศ.เชิดพงษ์ จอมเดช
 ผศ.เจริญ สุนทราวาณิชย์
 ดร.ปภัศร ชัยวัฒน์
 อ.ภัทธีรา ม้วนจั่น

ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์
 อ.แบงก์ งามอรุณโชติ
 อ.อาวู สนใจยุทธ
 ผศ.มงคล สีนะวัฒน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์
 ผศ.ดร.กุลศ พิมาพันธุ์ศรี
 ผศ.ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์

ผศ.ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิตร
 ดร.ธนสาร อินทรกำธร์ชัย
 ดร.วรพจน์ มีถม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ดร.วิจิตรสวัสดิ์ สุขสวัสดิ์ ณ อยุธยา
 อ.ธนกฤต โชติภาวริศ
 อ.ธนิดา สุนารักษ์
 อ.พัฒนพงษ์ แสงหัตถ์วัฒนา

อ.พรเทพ แก้วเชื้อ
 อ.วรินทร์ เกียรติบุญกุล
 อ.อรณิชา อนุชิตชาญชัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ.ดร.ณฐา ศุปตัชเชียว
 ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์
 ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล
 ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง
 ผศ.นฤทธิ์ คชฤทธิ์
 ผศ.ไพฑูรย์ พูลสุขโข
 ผศ.ไพบุลย์ แยมเผื่อน
 ผศ.ศุภเอก ประมูลมาก

ผศ.ศรีโร จารุภิญโญ
 ผศ.สมศักดิ์ แก่นทอง
 ผศ.สุรัตน์ ตรียวนพงศ์
 ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ
 ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง
 ดร.ระพี กาญจนะ
 อ.วราญา วัฒนจิตศิริ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ผศ.ดร.นนทโชติ อุดมศรี

ผศ.จักรินทร์ น่วมทิม

ผศ.รพีพงศ์ เจริญยศ

ดร.สมพงษ์ พิริยานต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุโขทัยธรรมาธิราช

รศ.ผกามาศ ผจญแก่แก้ว

รศ.สุภาวดี อีธรรมมาร

รศ.สุณี ภูสีม่วง

รศ.ศุภณี เรียบเลิศหิรัญ

ดร.แหวงบุญ แยมแสงสังข์

อ.กรรณิการ์ ยี่ม่นาค

อ.จิรานุช บุตติจัน

อ.บุญชัย วลีธรรมพิสวัสดิ์

อ.ภูมิ เจือศิริภักดี

อ.อิทธิเดช มูลมั่งมี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดร.จงกล ศรีธรร

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.จิรัชย์ พุทธกุลสมศิริ

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

ผศ.ดร.ปัญญา พิทักษ์กุล

ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์

ดร.สมหญิง งามพรประเสริฐ

ดร.สัณห์ รัฐวิบูลย์

อ.วุฒิกกรณ์ จรรย์ตันติเวทย์

อ.อรดี พฤติศรีณนันท

ผศ.ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์

มหาวิทยาลัยนครพนม

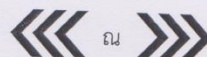
ดร.บัณฑิต บุญขาว

ดร.วิชัย พัฒนพล

อ.รุจาภา นันทโพธิ์เดช

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ผศ.เสริมสุข บัวเจริญ





มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

รศ.ดร.ไพโรจน์ เนียมนาค

ผศ.วิษณุ บัวเทศ

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ดร.วีระยุทธ สุดสมบูรณ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

ดร.จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

รศ.ดร.วิชัย แหวนเพชร

ผศ.ดร.ประณต บุญไชยอภิสิทธิ์

ผศ.อวยชัย วงศ์รัตน์

ดร.อนันตกุล อินทรผดุง

อ.ชาญชัย วัลลิสุต

อ.พิเชษฐ์ รัตนบุญทวี

อ.ภาสุระ อังกุสถานนท์

อ.ลักขณา ฤกษ์เกษม

อ.อรมน ปั่นทอง

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

อ.ธณิดา โชนงนุช

อ.อลงกรณ์ เมืองไหว

มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

อ.เปรมชัย มูลหล้า

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

รศ.นัยดา สวัสดิพงษ์

ผศ.สุทัศน์ จันทน์บัวลา

ดร.ชาติ ทีฆะ

ดร.ชนินทร์ กุลเศรษฐ์ชัยสิทธิ์

ดร.สิริวัลภ์ เรืองช่วย ตู้อประกาย

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

ผศ.ดร.ชูชาติ พยอม

ผศ.ดร.ณัฐกานต์ พวงโพธิ์ลัย

ผศ.ดร.นิคม ลนขุนทด



**มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี**

อ.ทิวารัตน์ ศรีราตรี

อ.वलันต์ พลัวพันธ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

ดร.กนต์ อินทวงศ์

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผศ.ดร.กฤษดา พิศลยบุตร

ผศ.นุกุล อุบลบาน

ดร.เลิศเลขา ณะชัยพันธ์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รศ.ธนรัตน์ แท้ววัฒนา

ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์

ผศ.ดร.พิลดา หวังพานิช

ผศ.รติรัตน์ กิตติปัญญาพัฒน์

ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ

ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ

ดร.วราธร ปัญญางาม

ดร.สิริเดช ขาตินิยม

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ผศ.ดร.สุพัฒตรา เกษราพงศ์

ผศ.ชวลิต มณีศรี

ดร.อัศวิน วงศ์วิวัฒน์

อ.จักรพันธ์ กัณหา

อ.ธนิน ศรีวะรมย์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล

รศ.สมชาย ชูโฉม

รศ.วนิดา รัตน์มณี

ผศ.ดร.กลางเดือน โทษนา

ผศ.ดร.ธเนศ รัตน์วิไล

ผศ.ดร.นภิสพร มีมิ่งคล

ผศ.ดร.รัฐชนา ลินธวาลัย

ผศ.ดร.สุภาพรรณ ไชยประพัทธ์

ผศ.ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์

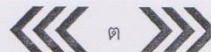
ผศ.ดร.อรุณ สังข์พงศ์

ผศ.เจริญ เจตวิจิตร

ผศ.พิเชษฐ ตระการชัยศิริ

ผศ.สงวน ตั้งโพธิธรรม

ผศ.ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุร





มหาวิทยาลัยสยาม

รศ.ดร.วันชัย ธิวัชรวิเศษ
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา
ผศ.ดร.เฉลิมเกียรติ วงศ์วนิทธิ
ผศ.ดร.รัฐวุฒิ ฐันทนคุณ
ผศ.ดร.อาทิตย์ โสทรโยม

อ.ณัฐพล พุฒยางกูร
อ.ธัชชนนท์ แคนเขต
อ.ปุณยิศา คินดี
อ.พงศ์พัฒน์ เพชรรุ่งเรือง
อ.วิมลพรรณ คงสมบูรณ์

มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

รศ.ดร.สถาพร อมรสวัสดิ์วัฒนา
ผศ.ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร

ผศ.ดร.ชนะ เยี่ยงกมลสิงห์
ดร.วัฒน์ชัย พงษ์กานนท์

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

ดร.นิศากร สมสุข
อ.จิตตดา หมายมั่น

อ.วรลักษณ์ เสถียรรังสฤษฏ์
อ.อรอุมา กอสนาน

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส
ผศ.ดร.คณิศร ภูนิคม
ผศ.ดร.นลิน เพียรทอง
ผศ.ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ
ผศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ

ผศ.ดร.สมบัติ สิ้นธุเชาวน์
ดร.จรรยาพร แสนทวีสุข
ดร.ธำชุตตา พันธนิกุล
ดร.สันต์ โอฬารพิริยกุล

โรงเรียนนายเรืออากาศ

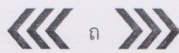
น.อ.สุทธิ ศรีบูรพา

น.ท.ปัญญารักษ์ โกศลวัฒน์

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ผศ.ดร.ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส
ผศ.ดร.พิศุทธิ์ พงษ์ชัยฤกษ์
ผศ.ดร.วราคม เนินน้อย
ผศ.ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ

ดร.กรกฎ เหมสถาปัตย์
ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์
ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรินทร์





สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ดร.วิภู ศรีสืบสาย

ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล

รศ.ดร.วัลย์ลักษณ์ อัครีรวงศ์

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

รศ.ดร.ฤดี มาสุจันทร์

รศ.ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต

ผศ.ดร.ชุมพล ยวงโย

ดร.พลชัย โชติปราชญ์กุล

ดร.พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม

ดร.อุดม จันทร์จรีสสุข

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร

ผศ.จันทร์เพ็ญ อนุรัตน์านนท์

ผศ.วันชัย สีลาแก้ววงศ์

ดร.กัญญา ทองสนธิ

ดร.คณศ พลอยदनัย

ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม

ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์

อ.กวิณธร สัยเจริญ

มหาวิทยาลัยมหิดล

รศ.ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย

รศ.ศุภชัย นาทะพันธ์

ผศ.ดร.กนกวรรณ กิ่งผดุง

ผศ.ดร. ดร.ธนกรณ์ แน่นหนา

ผศ.ดร.เวศรา วีระวัฒน์

ผศ.ดร.สรนาถ ไร่ภู

ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย

ดร.จิรพรรณ เสี่ยงโรคาพาธ

ดร.มงคล เทียนวิบูลย์

อ.สิทธิพันธุ์ ตันทวีรุฬห์

ดร.รณชัย ศิโรเวฐนกุล

ดร.ศุภชัย ราษฎร์ศิริ

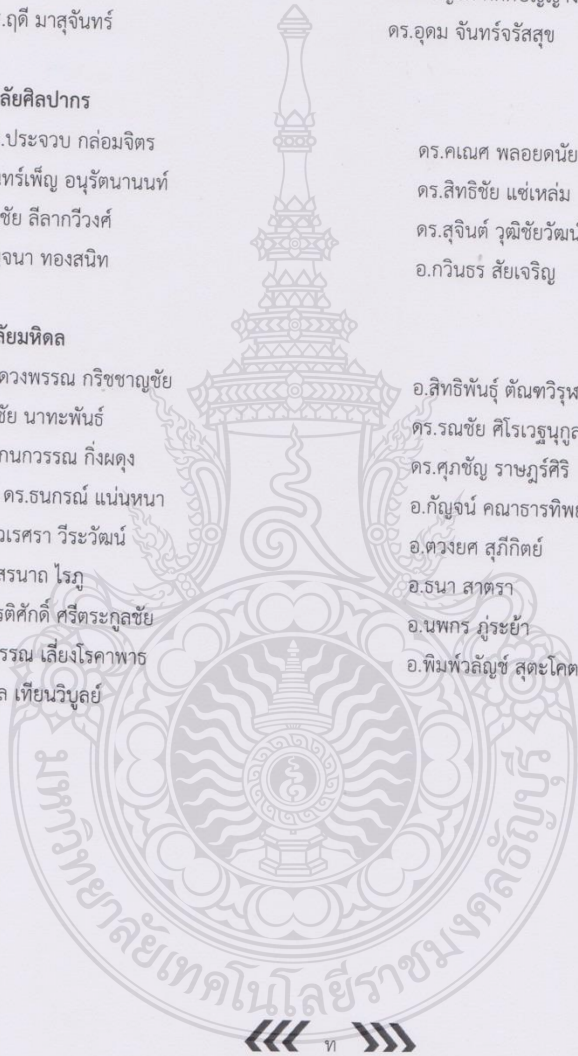
อ.กัญจน์ คณาธารทิพย์

อ.ดวงยศ สุภิกิตย์

อ.ธนา สาดตรา

อ.นพกร ภูระยา

อ.พิมพ์วัลย์ สุตตะโคตร





| | | |
|--------|---|-----|
| MAT016 | การพัฒนาสมบัติของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไตรเมทีลีนเทรฟทาเลทและพอลิแลคติกแอซิด <i>ศิรดา ภาคิ ฌรณค้ชัย โอิเจริญ นที ศรีสวัตตี และสุภกรรณ ฆนสม</i> | 94 |
| MAT017 | เส้นใยสององค์ประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต <i>เอกตนิย จันทรศริ ฌรณค้ชัย โอิเจริญ และ นที ศรีสวัตตี</i> | 95 |
| MAT018 | การเพิ่มผลผลิตและประสิทธิภาพสายการผลิตของการประกอบรถยนต์โดยใช้ระบบการผลิตแบบเพิ่มมูลค่า กรณีศึกษา : โรงงานผลิตอุตสาหกรรมการประกอบรถยนต์แห่งหนึ่ง <i>ชัยพฤกษ์ อากาเวท และ ประยูร สุรินทร</i> | 96 |
| MAT019 | การใช้รีไซเคิลเพทเป็นสารเพิ่มเนื้อใยการขึ้นรูปแบบหมุน <i>ปริญญา แกมนิล และ ฌรณค้ชัย โอิเจริญ</i> | 97 |
| MAT020 | ผลกระทบของกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตทผสมถ่านกัมมันต์โดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต สำหรับการดูดซับสารอินทรีย์ <i>วัฒนา กลินสุคนธ์ นที ศรีสวัตตี จูริรัตน์ ประสาร และ สรพงษ์ ภาสุปริย</i> | 98 |
| MAT021 | ผลกระทบของการเติมพอดเตอร์สโตนในพอลิโพรพิลีนต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการลามไฟ <i>วัชรี จันฎุ อำนวนย ลากเกษมสุข และ สรพงษ์ ภาสุปริย</i> | 99 |
| MAT022 | การหาวัสดุทำเฟืองที่ผ่านกระบวนการชุบผิวแข็งที่มีขีดจำกัดความล้าสูงสุด <i>ฌรณค้ชัย พัฒนไพบูลย์ และ กิตติภักุ รัตนจันทร</i> | 100 |
| MAT023 | การศึกษาผลกระทบของเครื่องมือขึ้นรูปต่อความหยาบผิวของแผ่นสแตนเลส SUS 304 ด้วยวิธีขึ้นรูปแบบลูกโซ่ <i>สุนทร สิทธิสกุลเจริญ พัตริพิมล สุวรรณกาญจน์ และ ชลธิชา นุชพงษ์</i> | 101 |
| MAT024 | การเตรียมแผ่นบางขนาดนาโนด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลและผลกระทบของการเติมแผ่นบางขนาดนาโนในพอลิแลคติกแอซิดต่อสมบัติเชิงกลและการดูดกลืนแสง <i>ธงไชย สมานทอง พงศธร เอี่ยมสอาด ปัฐพงษ์ मुखจัน วิษณุ เจริญณอม ธนกร วิรุฬหมงคล ฌรณค้ชัย โอิเจริญ และ สรพงษ์ ภาสุปริย</i> | 102 |
| MAT025 | ผลกระทบของสารเจือเงินอนุภาคนาโนที่มีต่อขนาดอนุภาคของเส้นใยนาโนทั้งสแตน ออกไซด์ที่ผลิตด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง <i>ณัฐธา ศักคีศิลาพร และ ปาพจน์ เจริญอภิบาล</i> | 103 |
| MAT026 | อิทธิพลของไนโอเบียมที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของโลหะผสมไทเทเนียม-ติบุก <i>จักรวัชร จันทรสมบัติ สิทธิร ไรจนนันต์ และ สุรศิษฐ์ ไรจนนันต์</i> | 104 |

เส้นใยสององค์ประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต Bicomponent Fiber from Polylactic Acid (PLA) and Polybutylene Succinate (PBS)

เอกทินัย จันทรศรี¹ ณรงค์ชัย โอเจริญ¹ นที ศรีสวัสดิ์²

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

²ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

E-mail: natee.s@en.mutt.ac.th

Ektinai Junsri¹ Narongchai O-Charoen¹ Natee Srisawat²

¹Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani

²Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani

E-mail: natee.s@en.mutt.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Bicomponent Fiber) จากพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ด้วยการขึ้นรูปให้เป็นลักษณะชิดติดกัน (Side-by-Side) ด้วยอัตราส่วน 50 : 50 สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้และเส้นใยมีลักษณะหยิกงอได้ด้วยตัวเอง (Self Crimping Fiber) โดยสมบัติของเส้นใยทั้ง PLA และ PBS ที่ขนาดและความเร็วหมุนเก็บเดียวกันกับการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (PLA/PBS) ได้รับการทดสอบสมบัติเส้นใยด้านต่างๆ คือ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และลักษณะของเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ การขึ้นรูปได้ใช้ความเร็วในการหมุนเก็บที่ต่างกัน 3 ระดับคือ 500, 750 และ 1,000 เมตรต่อนาที ผลการศึกษาพบว่า เส้นใย PLA มีความแข็งแรงตามยาวของเส้นใยเพิ่มขึ้นและมีการยึดตัวที่จุดขาดลดลง ส่วน PBS และเส้นใยสององค์ประกอบ (PLA/PBS) มีความแข็งแรงตามยาวของเส้นใยและการยึดตัวที่จุดขาดลดลง ตามความเร็วหมุนเก็บที่เพิ่มสูงขึ้น ส่วนการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวทั้งของ PLA และ PBS จากเส้นใยสององค์ประกอบ (PLA/PBS) ไม่มีความแตกต่างจากเส้นใยทั้ง PLA และ PBS ส่วนลักษณะของเส้นใยทางกายภาพโดยการทดสอบและเก็บภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าเส้นใยสององค์ประกอบ (PLA/PBS) มีลักษณะหยิกงอ โคน มีการพองฟู ซึ่งแตกต่างจากเส้นใยทั้ง PLA และ PBS ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงและเรียบ โดยความพองฟูของเส้นใยสององค์ประกอบจะมากขึ้นตามความเร็วหมุนเก็บที่สูงขึ้น

คำหลัก เส้นใยสององค์ประกอบ, เส้นใยพอลิแลคติกแอซิด, เส้นใยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, เส้นใยที่หยิกงอได้ด้วยตัวเอง

Abstract

Bicomponent fiber was spun from polylactic acid (PLA) and polybutylene succinate (PBS) in side-by-side profile with polymer ratio of 50:50. PLA and PBS also spun to fiber in same spinning speed. Spinning speed or take up speed that used in this study were 500, 750 and 1,000 m/min. The properties

of fibers were investigated in physical properties, thermal properties and morphology. Studied results found that PLA/PBS bicomponent fiber can produce crimps along fiber length during spinning. At highest spinning speed (1,000 m/min) crimp formation was highest. Whereas PLA and PBS fiber were flat and smooth. Thermal properties shown melting point of PLA and PBS in bicomponent fiber were same value with PLA and PBS fiber. Tensile strength of PLA fiber was increase with spinning speed, whereas the tensile strength of PBS and PLA/PBS decrease with spinning speed, elongation at break decrease.

Keywords: Bicomponent fiber, Polylactic acid fiber, Polybutylene succinate fiber, Self crimping fiber

1. บทนำ

พลาสติกย่อยสลายมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อทดแทนพลาสติกที่ใช้อยู่กันในปัจจุบัน พลาสติกย่อยสลายได้ที่นิยมใช้กันมาก คือ พอลิแลคติกแอซิด (PLA) และ พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (PBS) เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดพอลิเอสเตอร์ (Polyester) ผลิตจากกระบวนการหมักน้ำตาลให้เป็นกรดแลคติก (Lactic acid) จากนั้นจึงนำมาทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ผลิตเป็นเม็ดพลาสติก PLA โดยมีลักษณะทั่วไปคือ มีความใส ถ่ายเทความร้อนและความชื้นได้ดีเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆทั้งการฉีด การอัด การเป่าขึ้นรูป การอัดรีดเป็นเส้นใยและสามารถย่อยสลายได้ที่อุณหภูมิ 60 °C ขึ้นไป โดยขั้นตอนแรก PLA จะถูกย่อยสลายไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้และกรดแลคติกโดยการไฮโดรไลซิส เกิดขึ้นภายใน 2 สัปดาห์ สารประกอบและกรดแลคติกที่ได้จะถูกย่อยต่อไปด้วยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ส่วนพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (PBS) เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีสมบัติคล้ายกับ PLA แต่ PBS จะมีความยืดหยุ่นและสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่า ส่วนการย่อยสลายของ PBS เกิดขึ้นโดยเริ่มจากการย่อยสลายทางชีวภาพโดยผ่านกลไกของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นที่พื้นระเอสเทอร์ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของ PBS ลดลงและสามารถเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ต่อไป มีงานวิจัยระบุว่า PBS สามารถผสมกับ PLA เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความยืดหยุ่นได้ [1] ซึ่งพลาสติกย่อยสลายได้ทั้ง 2 ชนิดนี้ยังสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ [2] จึงเป็นประเด็นทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนาเป็นเส้นใยสององค์ประกอบ (Bicomponent fiber) ระหว่าง PLA กับ PBS ซึ่งการผลิตเส้นใยสององค์ประกอบในเชิงการค้าครั้งแรกนั้นถูกผลิตโดยบริษัท Du Pont ในปี ค.ศ. 1960

จุดประสงค์เริ่มแรกของเส้นใยสององค์ประกอบ คือ การทำให้เกิดเส้นใยที่ยืดหดได้ด้วยตัวเอง (self-crimping) [3] เส้นใยสององค์ประกอบเป็นเส้นใยพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบไปด้วยการแบ่งเป็นสององค์ประกอบในขอบเขตวิภาคที่แตกต่างกันค่อนข้างชัดเจน [4] เส้นใยสององค์ประกอบจะเกิดขอบเขตวิภาคที่มีอิสระจากกัน ทำให้สมบัติของแต่ละองค์ประกอบมีสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่น ซึ่งเส้นใยสององค์ประกอบสามารถขึ้นรูปได้ในลักษณะรูปแบบต่างๆ คือ sheath-core, side-by-side, layer-by-layer, islands-in-the-sea และ segmented pie เป็นต้น ซึ่งในการศึกษานี้ทำการศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยในลักษณะแบบชิดติดกัน (side-by-side) ที่อัตราส่วน 50 : 50 ทั้งนี้เพราะว่าการขึ้นรูปในลักษณะนี้มีโครงสร้างง่ายที่สุดจึงทำให้เกิดเส้นใยที่ยืดหดได้ด้วยตัวเองได้ง่าย [5] ซึ่งเป็นการลดขั้นตอนในการผลิตให้น้อยลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการเท็กซ์เจอร์

2. ขั้นตอนและการทดลอง

2.1 ขั้นตอนการขึ้นรูป

PLA ที่ใช้คือเกรด 3052D (Specific Gravity, (ASTM D792) = 1.24 g/cm³, Melt Flow Rate, (ASTM D1238) = 14 g/10min, T_m= 145 - 160 °C, T_g= 55 - 60 °C) จากบริษัท NatureWorks LLC product และเม็ด PBS เกรด FZ91PD (Density, (ISO 1183) = 1.26 g/cm³, Melt Flow Rate, (ISO 1133) = 5 g/10min, T_m= 115 °C) จากบริษัท Mitsubishi ก่อนการขึ้นรูป PLA และ PBS ถูกอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 12 ชั่วโมงก่อนการขึ้นรูป จากนั้นทำการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบด้วยเครื่อง Hills : Lab Scale bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model LBS-100 ใช้สปินเนอร์แบบ side-by-side ชนิด 24 รู มีเส้นผ่าน

ศูนย์กลางรูเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร โดยใช้สภาวะในการขึ้นรูปดังแสดงในตารางที่ 1 และม้วนเก็บเส้นใยด้วยความเร็ว 500, 750 และ 1000 m/min ตามลำดับ จากนั้นนำเส้นใยที่ได้ไปทดสอบ

ตารางที่ 1 สภาวะที่ใช้ขึ้นรูปเส้นใย

| Polymer | Ext-Zone 1 (°C) | Ext-Zone 2 (°C) | Spin Head (°C) | Melt pump (rpm) |
|---------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| PLA | 200 | 230 | 230 | 8 |
| PBS | 200 | 230 | 230 | 8 |
| PLA/PBS | 200 | 230 | 230 | 4/4 (PLA/PBS) |

3. การทดสอบสมบัติ

3.1 การทดสอบลักษณะทางสัณฐาน

ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยทดสอบจากเส้นใยที่ได้จากการตกอย่างอิสระ (free fall) หลังจากการอัดรีดจากสปินเนอร์ โดยมิตัวอย่างทั้งหมด 3 ตัวอย่างคือ PLA, PBS และ PLA/PBS จากนั้นนำตัวอย่างของเส้นใยทั้งหมดไปตัดตามแนวขวางด้วย Hills Microtone เพื่อที่จะดูลักษณะภาคตัดขวางของเส้นใย

3.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ทดสอบด้วยเทคนิคดีพีเพอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry, DSC) ทดสอบจากเส้นใยที่ได้จากการตกอย่างอิสระ หลังจากการอัดรีดจากสปินเนอร์ โดยมีตัวอย่างทั้งหมด 3 ตัวอย่างคือ PLA, PBS และ PLA/PBS โดยการเตรียมตัวอย่างละ 5-10 มิลลิกรัม อัตราการเพิ่มความร้อน 10 °C /min จากอุณหภูมิ 30 °C จนถึง 200 °C โดยการรักษาอุณหภูมิที่ 200 °C เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อกำจัด Thermal history แล้วลดความร้อน 10 °C /min จากอุณหภูมิ 200 °C ลงมาจนถึง 30 °C

3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบค่าความแข็งแรงตามความยาว (Tensile strength) ใช้เครื่องทดสอบจาก บริษัท Instron Preventive Maintenance โดยตัวอย่างทดสอบที่เป็นเส้นใยเดี่ยว ตามมาตรฐาน ASTM D3822 โดยเส้นใยทดสอบที่มีความยาว (Gauge Length) เท่ากับ 25 มิลลิเมตร และใช้ความเร็วของการดึง (Speed of Crosshead) เท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อนาที

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบลักษณะทางสัณฐาน

ผลการทดสอบลักษณะทางสัณฐาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์ จากเส้นใยที่ได้จากการตกอย่างอิสระ หลังจากการอัดรีดจากสปินเนอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1 และในรูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเส้นใยที่ผ่านการม้วนเก็บด้วยความเร็วต่างกัน

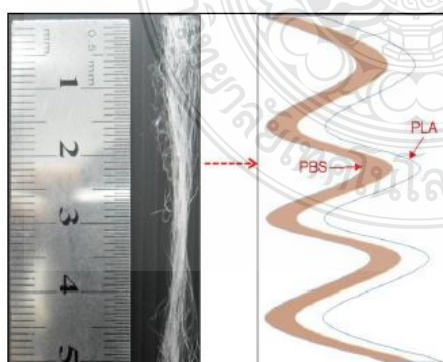


รูปที่ 1 แสดงลักษณะภาคตัดขวางของเส้นใยที่ตกแบบอิสระ (a) เส้นใย PLA (b) เส้นใย PBS (c) เส้นใยสององค์ประกอบ PLA / PBS (ลักษณะแบบชดัดกันที่อัตราส่วน 50:50)

จากรูปที่ 1 (a) แสดงภาคตัดขวางเส้นใย PLA (b) แสดงภาคตัดขวางเส้นใย PBS มีลักษณะกลม มีสีใส และเข้มตามลำดับ (c) แสดงภาคตัดขวางจากการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบลักษณะแบบชดัดกันที่มีอัตราส่วน 50 : 50 จะได้เส้นใยที่มีลักษณะการแบ่งขอบเขตวัฏภาคของแต่ละองค์ประกอบอย่างชัดเจน ตามอัตราส่วนการอัดรีดที่เท่ากัน (50 : 50) โดยที่ลักษณะการติดกัน ของส่วน PLA กับ PBS มีการติดกันอย่างแนบสนิทไม่มีลักษณะแยกจากกัน



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของเส้นใยที่ผ่านการม้วนเก็บที่ความเร็ว 500, 750 และ 1000 เมตรต่อนาที ตามลำดับ (a) PBS 500 m/min (b) PBS 750 m/min (c) PBS 1000 m/min (d) PLA 500 m/min (e) PLA 750 m/min (f) PLA 1000 m/min (g) PLA/PBS 500 m/min (h) PLA/PBS 750 m/min (i) PLA/PBS 1000 m/min

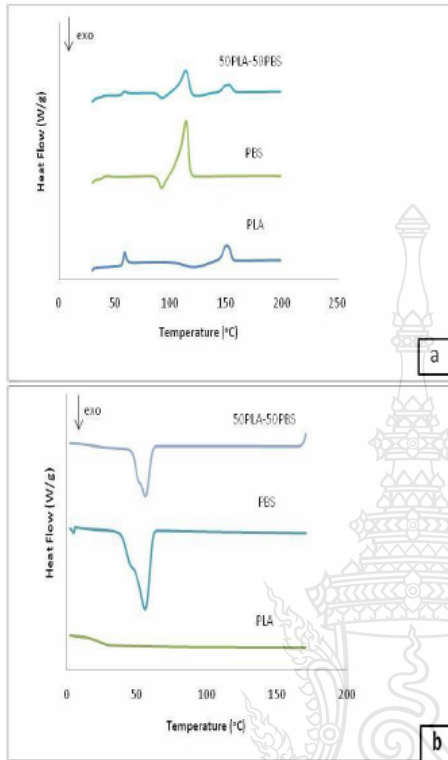


รูปที่ 3 แสดงการหยิกของเส้นใยสององค์ประกอบ

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการม้วนเก็บจาก 500, 750 และ 1000 เมตรต่อนาทีตามลำดับ ลักษณะของเส้นใยสององค์ประกอบของ PLA/PBS จะมีความฟองฟูและหยิกงอ อย่างชัดเจนตามความเร็วในการม้วนเก็บ เกิดจากการยึดตัวของพอลิเมอร์สองส่วนมีความแตกต่างกัน โดยที่ส่วนที่ยึดตัวได้น้อยกว่าจะแสดงเป็นส่วนด้านนอก ส่วนพอลิเมอร์ที่หดตัวได้ดีกว่าจะอยู่ด้านใน (รูปที่ 3) เส้นใยจึงมีลักษณะหยิกงอได้เองโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการอื่นอีก

4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

ผลการทดสอบด้วยเทคนิค ดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอรีเมตรี (Differential scanning calorimetry, DSC) จากรูปที่ 4 (a) แสดงกราฟของอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของ PLA, PBS และเส้นใยสององค์ประกอบของ PLA/PBS ที่อัตราส่วน 50 : 50 จะพบว่า PLA จะมีค่า T_m สูงกว่า PBS โดยที่ PLA มี Peak ของค่า T_m เท่ากับ $150.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ PBS มี Peak ของค่า T_m เท่ากับ $113.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วน T_m ของเส้นใยสององค์ประกอบของ PLA/PBS ที่อัตราส่วน 50 : 50 พบว่าค่า T_m เท่ากับ $152.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีความเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และรูปที่ 4 (b) แสดงกราฟของอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของ PLA, PBS และเส้นใยสององค์ประกอบของ PLA/PBS ที่อัตราส่วน 50 : 50 จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่า PLA ไม่เกิด Peak เนื่องจาก ในสภาวะเงื่อนไขของการทดสอบมีการให้อัตราการหล่อเย็น (Cooling rate) ที่เร็วเกินไปจนทำให้ไม่เห็นผลึกของ PLA ส่วนกราฟที่แสดงค่า T_c ของ PBS จะเกิด Peak ที่ $84.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะสังเกตว่ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับกราฟของเส้นใยสององค์ประกอบของ PLA/PBS ที่อัตราส่วน 50 : 50 ที่มีค่า T_c เท่ากับ $84.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากตารางที่ 2 เป็นตารางแสดงสมบัติทางความร้อนของ PLA, PBS และเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS สาเหตุที่สมบัติทางความร้อนของเส้นใยสององค์ประกอบไม่มีความแตกต่างจาก PLA และ PBS เนื่องจากเส้นใยสององค์ประกอบ ที่มีลักษณะแบบขิดติดกันจะมีการแยกวัฏภาคและแบ่งขอบเขตของแต่ละองค์ประกอบอย่างชัดเจน ไม่ได้รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันจึงทำให้สมบัติทางความร้อนของเส้นใยสององค์ประกอบไม่มีความแตกต่างกันจากทั้ง PLA และ PBS



รูปที่ 4 (a) แสดงกราฟ T_m ของ PLA, PBS และ PLA/PBS
(b) แสดงกราฟ T_c ของ PLA, PBS และ PLA/PBS

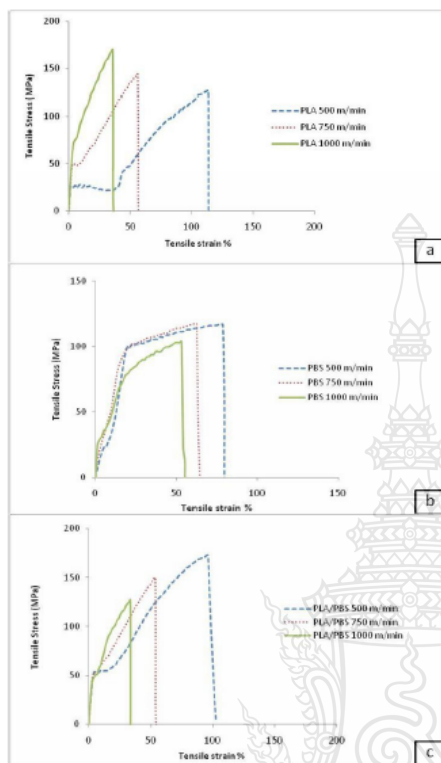
ตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางความร้อน

| Sample | T_m ($^{\circ}C$) first peak | Heat of fusion (J/g) first peak | Onset ($^{\circ}C$) first peak | T_m of fusion ($^{\circ}C$) first peak | Heat of fusion (J/g) first peak | Onset ($^{\circ}C$) first peak | T_c ($^{\circ}C$) first peak | T_c ($^{\circ}C$) |
|--------------------|---|--|---|---|--|---|---|--------------------------|
| PLA | - | - | - | 150.8 | 29.14 | 144.3 | - | - |
| PBS | - | - | - | 113.8 | 89.39 | 108.6 | 84.0 | - |
| PLA/PBS (50:50) | 113.5 | 40.63 | 106.6 | 152.4 | 9.584 | 144.8 | 84.5 | - |

4.3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงตามความยาว
(Tensile strength) จากกราฟรูปที่ 5 (a) แสดงค่าความ

แข็งแรงตามความยาวของ PLA ที่มีความเร็วในการม้วน
เก็บ 500, 750 และ 1000 เมตรต่อนาที ตามลำดับ จาก
ลักษณะของกราฟจะแสดงให้เห็นว่า ที่ความเร็วในการ
ม้วนเก็บ 500 และ 700 เมตรต่อนาที เมื่อ PLA ได้รับแรง
ในช่วงแรกเส้นใยจะมีการยืดตัวออกเล็กน้อยโดยดูได้จาก
ลักษณะความชันของกราฟ จากนั้นจะสามารถรับแรงได้
สูงสุดแล้วจึงขาด เป็นผลจากการม้วนเก็บที่ความเร็วนี้
เส้นใยยังมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน สายโซ่
โมเลกุลเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ แต่เมื่อเพิ่มความเร็วใน
การม้วนเก็บที่ 1000 เมตรต่อนาที จะสังเกตว่าลักษณะ
ของกราฟในช่วงแรก จะมีความชันมาก แสดงให้เห็นว่า
เส้นใยมีความสามารถในการรับแรงได้สูงและมีลักษณะ
การยืดตัวออกก่อนขาดน้อย ทำให้สามารถรับแรงได้สูง
กว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วในการม้วนเก็บที่ 500 และ
700 เมตรต่อนาที ซึ่งเกิดจาก เมื่อให้แรงตามทิศทาง
เรียงตัวของเส้นใยจะทำให้โครงสร้างสายโซ่โมเลกุลของ
เส้นใยสามารถเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันและมีความ
เป็นระเบียบมากขึ้น เป็นผลให้เส้นใยมีความแข็งแรง
เพิ่มขึ้น แต่การยืดตัวจะน้อยลง ส่วนรูปที่ 5 (b) แสดงค่า
ความแข็งแรงตามความยาวของ PBS ที่มีความเร็วในการ
ม้วนเก็บ 500, 750 และ 1000 เมตรต่อนาทีตามลำดับ
จากลักษณะของกราฟจะแสดงให้เห็นว่า PBS เมื่อได้รับ
แรงสูงสุดจะเกิดการยืดตัวออกก่อนแล้วจึงขาดเนื่องจาก
โครงสร้างของ PBS มีองค์ประกอบที่เป็นส่วนของยาง ซึ่ง
จากองค์ประกอบที่มีส่วนของยางนี้ ทำให้ค่าความแข็งแรง
ตามความยาวและค่าการยืดตัวมีค่าลดลงเนื่องจากยางมี
ความสามารถในการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลน้อย
เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA และจากกราฟรูปที่ 5 (c) แสดง
ค่าความแข็งแรงของเส้นใยสององค์ประกอบ PLA/PBS
จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่า ค่าความแข็งแรงตามความ
ยาวและค่าการยืดตัวของเส้นใยสององค์ประกอบจะมีค่า
ลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วในการม้วนเก็บ ซึ่งแสดงให้เห็น
ว่าองค์ประกอบส่วนที่เป็น PBS มีผลต่อค่าความแข็งแรง
ตามความยาวของเส้นใยสององค์ประกอบลักษณะแบบ
ซิดติดกันที่อัตราส่วนพอลิเมอร์ 50 : 50 และตารางที่ 3
เป็นตารางแสดงค่าความแข็งแรงของเส้นใยที่ผ่านการ
ม้วนเก็บด้วยความเร็วแตกต่างกัน



รูปที่ 3 กราฟแสดงค่าโมดูลัสของเส้นใย (a) เส้นใย PLA ที่ความเร็วในการปั่นเก็บ 500, 750 และ 1000 m/min (b) เส้นใย PBS ที่ความเร็วในการปั่นเก็บ 500, 750 และ 1000 m/min (c) เส้นใย PLA/PBS ที่ความเร็วในการปั่นเก็บ 500, 750 และ 1000 m/min

ตารางที่ 3 ค่าความแข็งแรงของเส้นใย

| ความเร็วในการปั่นเก็บ (m/min) | Diameter of fiber (µm) | Stress (MPa) | Strain (%) |
|-------------------------------|------------------------|--------------|------------|
| PLA 500 | 23.5 | 127.2 | 116.1 |
| PLA 750 | 21.5 | 144.3 | 60.2 |
| PLA 1000 | 20.0 | 170.0 | 48.1 |
| PBS 500 | 24.0 | 117.0 | 106.5 |
| PBS 750 | 21.6 | 117.3 | 74.0 |
| PBS 1000 | 19.9 | 103.9 | 55.3 |
| PLA/PBS 500 | 31.1 | 172.7 | 114.2 |
| PLA/PBS 750 | 28.0 | 150.2 | 68.6 |
| PLA/PBS 1000 | 26.1 | 127.1 | 41.5 |

5. สรุป

จากการศึกษาลักษณะพื้นฐานของเส้นใยพบว่าเส้นใย PLA และ PBS เมื่อปั่นเก็บด้วยความเร็ว 500, 750 และ 1000 เมตรต่อนาที ลักษณะเส้นใยจะมีความตรงเรียบ ส่วนเส้นใยสององค์ประกอบแบบลักษณะขีตติดกันของ PLA/PBS พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการปั่นเก็บเส้นใยจะมีความหยิกงอ และฟองฟู นุ่ม ตามความเร็วของการปั่นเก็บที่เพิ่มขึ้น ส่วนการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวทั้งของ PLA และ PBS จากเส้นใยสององค์ประกอบ (PLA/PBS) ไม่มีความแตกต่างกัน จากเส้นใยทั้ง PLA และ PBS จึงสรุปได้ว่าการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบแบบลักษณะขีตติดกันไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ และการทดสอบความแข็งแรงตามความยาวของเส้นใยพบว่า เส้นใย PLA มีความแข็งแรงตามยาวของเส้นใยเพิ่มขึ้นและมีการยึดตัวที่จุดขาดลดลง ส่วน PBS และเส้นใยสององค์ประกอบ (PLA/PBS) มีความแข็งแรงตามยาวของเส้นใยและการยึดตัวที่จุดขาดลดลง ตามความเร็วปั่นเก็บที่เพิ่มสูงขึ้น การขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบแบบลักษณะขีตติดกันระหว่าง PLA/PBS ที่อัตราส่วน 50 : 50 และปั่นเก็บด้วยความเร็ว 500, 750 และ 1000 เมตรต่อนาทีจะทำให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะหยิกงอ และฟองฟู เพิ่มขึ้นตามความเร็วในการปั่นเก็บ ซึ่งทำให้สามารถลดขั้นตอนและเวลาในการผลิตเส้นใยที่มีลักษณะแบบนี้ได้ ซึ่งอาจจะสามารถนำกระบวนการหรือสภาวะต่างๆที่ใช้ขึ้นรูปในลักษณะรูปแบบนี้ไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้

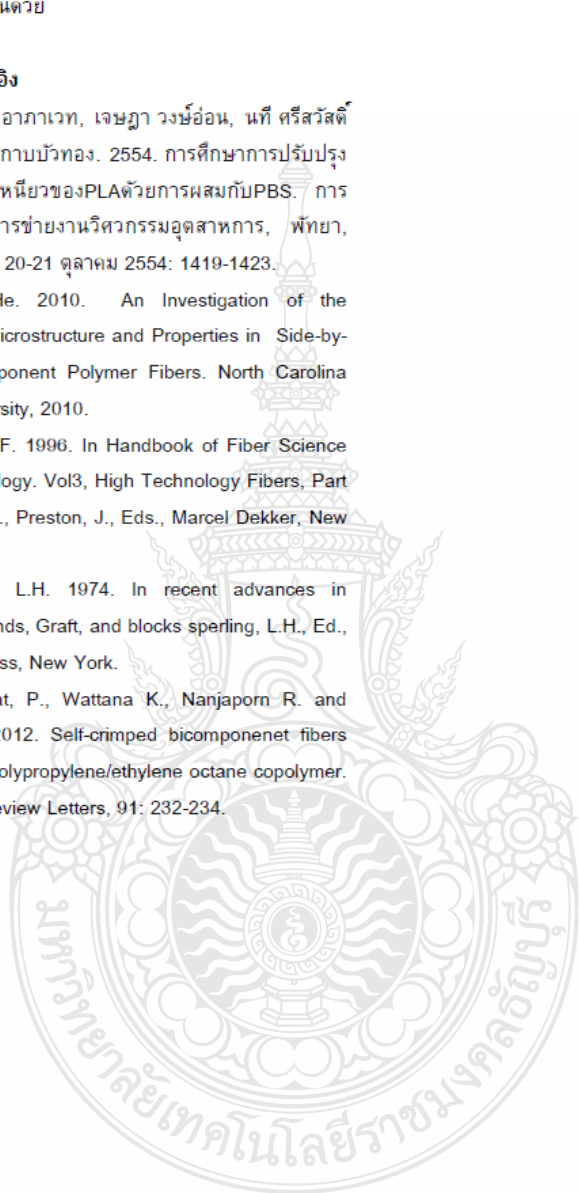
กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเส้นใยสององค์ประกอบระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ได้รับความอนุเคราะห์จากคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการและคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ ที่ได้ให้ข้อมูลและความรู้ ที่เกี่ยวข้องที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี และขอขอบคุณผู้ช่วยนักวิจัยทุกท่านที่ช่วยให้คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ ที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยจะนำความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปเผยแพร่ให้เกิด

ประโยชน์ได้สูงสุด หากมีข้อผิดพลาดประการใดผู้วิจัยขอ
อภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัยพฤษ อากาเวท, เจษฎา วงษ์อ่อน, นที ศรีสวัสดิ์ และ นรินทร์ กามบัวทอง. 2554. การศึกษาการปรับปรุงสมบัติความเหนียวของPLAด้วยการผสมกับPBS. การประชุมวิชาการรายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, พัทยา, ประเทศไทย, 20-21 ตุลาคม 2554: 1419-1423.
- [2] Feng, He. 2010. An Investigation of the Interfacial Microstructure and Properties in Side-by-Side Bicomponent Polymer Fibers. North Carolina State University, 2010.
- [3] Cook, T.F. 1996. In Handbook of Fiber Science and Technology. Vol3, High Technology Fibers, Part D. Lewin, M., Preston, J., Eds., Marcel Dekker, New York.
- [4] Sperling, L.H. 1974. In recent advances in polymer blends, Graft, and blocks sperling, L.H., Ed., Plenum Press, New York.
- [5] Chureerat, P., Wattana K., Nanjaporn R. and Natee, S. 2012. Self-crimped bicomponent fibers containing polypropylene/ethylene octane copolymer. Materials Review Letters, 91: 232-234.





การประชุมวิชาการช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2556

IE Network Conference 2013



ขอมอบเกียรติบัตรนี้ไว้เพื่อแสดงว่า

เอกัตินัย จันทรศรี ณรงค์ชัย โอเจริญ นที ศรีสวัสดิ์

ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิชาการในหัวข้อ

เส้นใยสององค์ประกอบระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซีทีเนต

ระหว่างวันที่ 16-18 ตุลาคม 2556

ณ โรงแรมเอวัน เดอะ รอยัล ครูซ พัทยา จังหวัดชลบุรี

นางสาว

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ กิ่งผุดง)

ประธานช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2556

PK

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร์)

ประธานช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2556

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายเอกคินัย จันทร์ศรี
วัน เดือน ปีเกิด 24 สิงหาคม 2532
ที่อยู่ 3/1 หมู่ 2 ตำบลวังหิน อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี 61180
การศึกษา
พ.ศ.2554 สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมสิ่งทอ แขนง การผลิตเส้นใยสังเคราะห์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน
พ.ศ.2554 – ปัจจุบัน ผู้ช่วยนักวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์ 086-3435824
อีเมล Ektinai.js@gmail.com

