

การศึกษาพอลิเมอร์ผสมและการเตรียมเส้นใยระหว่าง พอลิไตรเมทิลีน
เทเรฟทาเลทและพอลิแลคติกแอซิด

STUDY OF POLYMER BLENDS AND FIBER PREPARATION
BETWEEN POLYTRIMETHYLENE TEREPHTHALATE (PTT)
AND POLYLACTIC ACID (PLA)



ศิริดา ภาติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาพอลิเมอร์ผสมและการเตรียมเส้นใยระหว่าง พอลิไตรเมทิลีน
เทเรฟทาเลทและพอลิแลคติกแอซิด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพอลิเมอร์ผสมและการเตรียมเส้นใยระหว่าง พอลิไตรเมทิลีน เทเรฟทาเลทและพอลิแลคติกแอซิด Study of Polymer Blends and Fiber Preparation Between Polytrimethylene Terephthalate (PTT) and Polylactic Acid (PLA)
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวศิรดา ภาดี
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์นที ศรีสวัสดิ์, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....	ประธานกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)
.....	กรรมการ (อาจารย์จूरรัตน์ ประสาร, Ph.D.)
.....	กรรมการ (อาจารย์กุลวดี สังข์สนิท, Ph.D.)
.....	กรรมการ (อาจารย์นที ศรีสวัสดิ์, ปร.ด.)
.....	กรรมการ (อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด, Ph.D.)

วันที่ 6 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพอลิเมอร์ผสมและการเตรียมเส้นใยระหว่างพอลิไตรเมทิลีนเทเรฟทาเลทและพอลิแลคติกแอซิด
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวศิรดา ภาดี
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์นที ศรีสวัสดิ์, ปร.ค.
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

ปัจจุบันพอลิเมอร์ย่อยสลายทางชีวภาพได้รับความสนใจจากนักวิจัยอย่างมาก เนื่องมาจากประการแรก ความกังวลในเรื่องของปัญหาสิ่งแวดล้อม และประการที่สองความตระหนักที่ว่าทรัพยากรปิโตรเลียมของเรามีจำกัด พอลิไตรเมทิลีนเทเรฟทาเลท (PTT) และพอลิแลคติกแอซิด (PLA) จัดอยู่ในกลุ่มของพอลิเมอร์จากแหล่งชีวภาพ ซึ่ง PTT มีสมบัติยืดหยุ่น และมีความต้านทานแรงดึงสูง จึงถูกนำมาใช้ในงานด้านสิ่งทอ ในขณะที่ PLA นั้นมีสมบัติค่อนข้างเปราะ การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PTT/PLA และทดลองเตรียมเส้นใยจาก PTT/PLA

พอลิเมอร์ผสม PTT/PLA เตรียมได้โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ ที่อัตราส่วน ร้อยละ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80, 10/90 และ 0/100 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการขึ้นรูปเส้นใยด้วยเทคนิคการปั่นแบบหลอมเหลว ทำการทดสอบ สมบัติทางความร้อน สมบัติการไหล สมบัติความหนืด ความต้านทานต่อแรงดึง และการหดตัวของเส้นใย

การศึกษาพบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวมีความแตกต่างกัน และส่งผลต่อค่าความหนืด เมื่อปริมาณของ PLA ที่เติมลงไปเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนืดของพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA มีแนวโน้มลดลง เส้นใยยาวของพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA ในอัตราส่วน 90 : 10 สามารถม้วนเก็บได้อย่างต่อเนื่อง ค่าความต้านแรงดึงของเส้นใยที่เตรียมไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่การยืดตัวมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากสมบัติของ PTT ดังนั้นการผสม PTT/PLA ในปริมาณที่เหมาะสมทำให้สามารถผลิตเส้นใยยาว สำหรับใช้ใน งานสิ่งทอได้

คำสำคัญ : พอลิไตรเมทิลีนเทเรฟทาเลท พอลิแลคติกแอซิด เทคนิคการปั่นแบบหลอมเหลว
เส้นใยต่อเนื่อง

Thesis Title	Study of Polymer Blends and Fiber Preparation between Polytrimethylene Terephthalate (PTT) and Polylactic Acid (PLA)
Name-Surname	Miss Sirada Padee
Program	Materials Engineering
Thesis Advisor	Mr. Narongchai O-Charoen, Ph.D.
Thesis Co-advisor	Mr. Natee Srisawat, Ph.D.
Academic Year	2013

ABSTRACT

In the present, biodegradable polymer have attracted attention of researcher due to firstly environmental problem concerns, and secondly the realization that our petroleum resources are finite. Polytrimethylene terephthalate (PTT) and Polylactic acid (PLA) are classified as the bio-based polymer. PTT are high elastic property and tensile strength, it can be used for textile while PLA has brittle properties. The aims of this research are to study the prepared of polymer blends between PTT/PLA and how to make the continuous fiber from the blends.

PTT/PLA blends were prepared by a twin-screw extruder at PTT/PLA blend ratios of 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80, 10/90 and 0/100. The PTT/PLA blends was melt-spun in to the continuous fiber from by melt spinning technique. Technical properties for example differential scanning calorimeter and then for the flow properties for example melt flow, rheology and the last properties is physical properties for example fiber shrinkage testing.

The study found that the polymers melting temperature is very different and effect viscosity. When the amount of PLA added to the increases the viscosity of the polymer blends decreased. The continuous fiber from the PTT/PLA blends in the ratio 90 : 10 can roll continued. The tensile strength of the fibers can not change too much but tend to higher elongate due to the properties of PTT in the blend. Therefore the appropriate ratio of PTT/PLA blends can produce the continuous fibers for textile industry.

Keywords : polytrimethylene terephthalate, polylactic acid, melt spinning, continuous fiber

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของ ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ ดร.นที ศรีสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาวสุปรีย์ ดร.กุลวดี สังข์สนิท กรรมการสอบ และดร.จวีร์รัตน์ ประสาร ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณความอนุเคราะห์ด้านทุนวิจัย วัสดุ เครื่องมือในการทำวิจัย และเครื่องมือวิเคราะห์ จากฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการปิโตรเลียมและปิโตรเคมี สถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี บริษัทการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย จำกัด (มหาชน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ และครอบครัว ที่สนับสนุนทั้งกำลังใจและกำลังทรัพย์ ทุกท่านที่มีส่วนให้ความสนับสนุนช่วยเหลือ รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ด้วย สำหรับคุณความดีอันเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศิรดา ภาดี



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่	
1 บทนำ.....	13
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	14
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	15
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	15
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 เอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	54
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	57
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ.....	57
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	58
3.3 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT.....	61
3.4 การเตรียมเส้นใยผสม PLA/PTT.....	65
4 ผลการทดลอง.....	72
4.1 ผลการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT.....	72
4.2 ผลการศึกษาการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ผสมและเส้นใยผสมของ PLA/PTT.....	79
5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	88
5.1 สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	88

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
รายการอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	92
ประวัติผู้เขียน.....	122



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของ PLA ที่ผลิตเพื่อการค้า.....	20
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของ Aromatic Polyester.....	23
ตารางที่ 2.3 สมบัติของ PTT ที่ผลิตเพื่อการค้า.....	25
ตารางที่ 2.4 สมบัติที่สำคัญบางประการของเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในการผลิตเส้นใย.....	26
ตารางที่ 2.5 สภาวะในการอครีคเส้นใย PTT.....	27
ตารางที่ 2.6 สมบัติต่างๆของเส้นใย PTT เส้นใย PET และ PA6,6.....	29
ตารางที่ 2.7 สมบัติบางประการของเส้นใยต่างๆ.....	30
ตารางที่ 2.8 World Man-Made Fiber Production.....	31
ตารางที่ 2.9 Capacities for Polyester and Polyamide Fibers in 1984.....	35
ตารางที่ 2.10 Spinning Techniques.....	37
ตารางที่ 2.11 The Glass Temperatures, Melt-Crystallization Temperatures, and Melting Temperatures of PTT/PLA.....	55
ตารางที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	57
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	57
ตารางที่ 4.1 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT.....	74
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA / PTT ที่ อุณหภูมิ 250 °C.....	75
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ของเม็ดพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA /PTT.....	76
ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของเส้นใยผสม PLA/PTT.....	84
ตารางที่ 4.5 การหดตัวของเส้นใยผสม PTT/PLA.....	85

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 กระบวนการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ.....	13
รูปที่ 2.1 กระบวนการสังเคราะห์ PLA.....	17
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ PLA.....	18
รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิต PLA โดยไม่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์.....	19
รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบโครงสร้างของ Polyester: PET, PTT และ PBT.....	23
รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์ 1,3-Propanediol จาก Ethylene Oxide.....	24
รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์ 1,3-Propanediol จาก Acrolein.....	24
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ Polytrimethylene Terephthalate (PTT).....	24
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง (Tenacity) กับความเร็วในการปั่นเส้นใยของ PTT POY.....	28
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการยืดตัวกับความเร็วในการปั่นเส้นใย PTT.....	28
รูปที่ 2.10 World Fiber Production Trends.....	31
รูปที่ 2.11 Regional Distribution of Man-Made Fibers in 1992.....	32
รูปที่ 2.12 Classification of Textile Fibers.....	33
รูปที่ 2.13 Uses of Synthetic Fibers.....	34
รูปที่ 2.14 Polymer in Powdered or Chip form can be Fed Directly to Melt-Spinning Equipment.....	39
รูปที่ 2.15 Conventional Spinning Plant.....	39
รูปที่ 2.16 Longitudinal Cross-Section of Spinneret Holes Showing Streamlining of Polymer flow.....	40
รูปที่ 2.17 Spinneret Hole (orifice) Cross-Section and Its Relation to The Fiber Cross-Section	40
รูปที่ 2.18 Stress-Strain Curve of Polyester Spun at Various Take-Up Velocities.....	44
รูปที่ 2.19 Schematic Illustration of Wet Spinning Process.....	44
รูปที่ 2.20 Dry Spinning Process.....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.21 Molecular Orientation Before and After Drawing Process.....	46
รูปที่ 2.22 Orientation Increase Progressively Up to About 6,000 m/min.....	48
รูปที่ 2.23 General Structural Model of a Drawn Fiber.....	49
รูปที่ 2.24 Basic Requirements of Hot Drawing.....	51
รูปที่ 2.25 DSC Thermograms forThe PTT/PLA Blends.....	54
รูปที่ 2.26 Cold Crystallization; DSC.....	56
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	59
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่.....	60
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบด้วยเครื่อง Compression Molding	61
รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index).....	62
รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความหนืด (Rheology Testing).....	63
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง(Tensile Strength).....	65
รูปที่ 3.7 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว (Single Screw Extruder: ThermoHaake® PolyDrive)	66
รูปที่ 3.8 เครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Hills:Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine).....	67
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการม้วนเก็บเส้นใยที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใย สององค์ประกอบ.....	67
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter,DSC).....	68
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบสมบัติการหดตัวของเส้นใย (%Shrinkage).....	69
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความแข็งแรงตามความยาวของเส้นใย (Tenacity) และทดสอบค่าการยืดตัวของเส้นใย (Elongation).....	70
รูปที่ 4.1 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมหลังจากการบด.....	72
รูปที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC).....	73

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบแสดงค่า Young's Modulus ของเม็ดพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT...	76
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบแสดงค่า Tensile Strength ของเม็ดพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT.....	77
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบแสดงค่า Stress at Break ของเม็ดพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PTT	77
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT.....	78
รูปที่ 4.7 แสดงพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT ที่ออกมาจาก Spinneret ที่ผ่านกระบวนการ ขึ้นรูปแบบหลอมเหลว ที่อุณหภูมิ 270 °C ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว Single Screw Extruder.....	80
รูปที่ 4.8 เส้นใยตกอิสระ (Free fall) ที่ได้จากการขึ้นรูปเส้นใยแบบหลอมเหลว ที่อุณหภูมิ 250 °C ด้วยเครื่อง Single Screw Extruder.....	81
รูปที่ 4.9 การขึ้นรูปเส้นใยผสม PLA/PTT ด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Hills:Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine).....	83
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของเส้นใยผสม (Tenacity) ของ PLA/PTT...	86
รูปที่ 4.11 ค่าการยืดตัวของเส้นใย (Elongation) ของ PLA/PTT.....	87

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

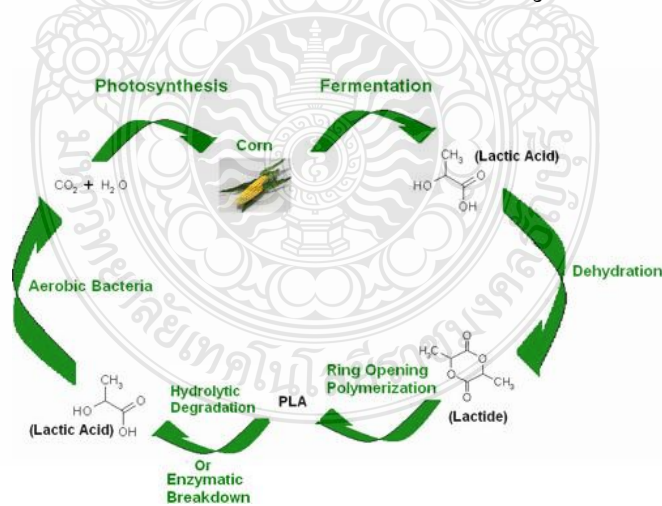
ASTM	มาตรฐานการทดสอบของประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society of Testing and Materials)
°C	องศาเซลเซียส
DSC	ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning calorimeter)
g	กรัม
MFI	ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index)
m/min	เมตรต่อนาที
PLA	พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA)
PTT	พอลิไตรเมทิลีนเทเรฟทาเลท (Polytrimethylene Terephthalate, PTT)
T	อุณหภูมิ
T_g	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature)
T_m	อุณหภูมิหลอมตัวผลึก (Crystalline Melting Temperature)
μm	ไมโครเมตร
%wt	ร้อยละโดยน้ำหนัก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง จนเกิดปัญหามลพิษต่างๆ ต่อมา มีผู้วิจัยหลายท่านได้ศึกษาค้นคว้าพลาสติกชนิดใหม่ ๆ ที่ไม่เกิดมลภาวะหลังจากการใช้งานแล้ว ซึ่งพลาสติกเหล่านั้นเรียกว่า พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พลาสติกชีวภาพเป็นพลาสติกที่ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติและสามารถย่อยสลายได้ ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ วัสดุธรรมชาติที่นำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพมีหลายชนิดส่วนใหญ่จะได้มาจากพืช เช่น เซลลูโลส (Cellulose) คอลลาเจน (Collagen) เคซีน (Casein) พอลิเอสเทอร์ (Polyester) แป้ง (Starch) และ โปรตีนจากถั่ว (Soy Protein) เป็นต้น ซึ่งแป้งเป็นวัสดุธรรมชาติที่นิยมนำมาผลิตพลาสติกชีวภาพมากที่สุดเพราะหาได้ง่าย มีปริมาณมากและราคาถูก เนื่องจากสามารถผลิตแป้งได้จากพืชหลายชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง มันเทศ มันสำปะหลัง เป็นต้น สำหรับประเทศไทยพืชที่นิยมนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกชีวภาพ คือ ข้าวโพดและมันสำปะหลัง เนื่องจากเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีปริมาณมากและราคาถูก พลาสติกชีวภาพเมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตได้



รูปที่ 1.1 กระบวนการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ [1-2]

ในปัจจุบันความสนใจในการศึกษาพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพมีเพิ่มมากขึ้น ในส่วนของการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ได้มีการสังเคราะห์สารใหม่ขึ้นมาที่สามารถสลายตัวได้ด้วยจุลินทรีย์ (Biodegradable) พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบันคือ Polylactic Acid (PLA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มของ พอลิเอสเทอร์ (Polyester) ปัจจุบันการใช้งาน PLA ในกลุ่มของผลิตภัณฑ์สิ่งทอประเภทเส้นใยมีเพิ่มมากขึ้น เช่น นำไปผสมกับไหม ฝ้าย หรือขนสัตว์ ก่อนที่จะนำไปพัฒนากระบวนการตกแต่งสำเร็จเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์สิ่งทอพลาสติกชีวภาพให้มีสมบัติที่ดีเหมาะกับการใช้งาน เส้นใยพอลิเอสเทอร์ชนิดที่มีการผสมพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติคือ พอลิแลคติกแอซิด (PLA) และ พอลิไตรเมทิลีนเทเรฟทาเลท (PTT) ซึ่งมีสมบัติที่สามารถนำไปใช้งานอุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมเกี่ยวเนื่องได้ PLA เป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดประเภทพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ PLA มีลักษณะใส มีความมันวาวสูง ซึ่งอาจขึ้นอยู่กับสารเติมแต่งด้วย PLA มีสมบัติทางกลที่ดี และสามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับพอลิเมอร์พื้นฐานทั่วไปที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก

เส้นใย PTT ปัจจุบันมีการพัฒนาทั้งการผลิตและการใช้งาน และเริ่มเป็นที่นิยมในการใช้งานสิ่งทอมากขึ้น เป็นเส้นใยที่ได้จากพอลิเมอร์ในกลุ่มของพอลิเอสเทอร์ ด้วยสมบัติที่โดดเด่น ทั้งความแข็งแรง ความยืดหยุ่น มีความทนทานต่อสภาวะต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ซึ่งเน้นสมบัติที่ดีเช่นเดียวกับ PET และมีสมบัติความยืดหยุ่นที่ดีใกล้เคียงกับเส้นใยในลอน ประกอบกับสารตั้งต้นของ PTT คือ Propanediol ก็ได้จากวัตถุดิบจากธรรมชาติเช่นเดียวกับ PLA อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของการใช้งานของ PTT นั้นก็คือการผลิตที่ยังมีปริมาณจำกัด แต่ปัจจุบันก็ได้มีหลายบริษัทเริ่มให้ความสนใจและมีการผลิตมากขึ้น โดย PTT ที่มีการผลิตเป็นเชิงอุตสาหกรรมคือในกลุ่มบริษัท Shell Chemical ในชื่อการค้า Corterra® และในกลุ่มบริษัท DuPont ในชื่อการค้า Sorrona®

ดังนั้นทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้คือ PLA และ PTT โดยนำมาผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี และได้เส้นใยจากพอลิเมอร์ผสมเพื่อประยุกต์ในการใช้งานด้านสิ่งทอและอุตสาหกรรมเกี่ยวเนื่อง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PTT
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PTT
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการเตรียมเส้นใยจาก PLA/PTT
- 1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติของเส้นใย PLA/PTT

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PTT ที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80, 10/90 และ 0/100 (%wt) จากการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin Screw Extruder) ที่อุณหภูมิ 270 °C จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปทำการทดสอบสมบัติดังนี้

1. สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)
2. สมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสม (Melt Flow Index , MFI) ASTM D1238
3. สมบัติความหนืดของพอลิเมอร์ผสม (Rheometer Testing)
4. สมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile Strength) ASTM D 638

1.3.2 ศึกษาการเตรียมเส้นใยผสมจาก PLA/PTT ด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single Screw Extruder) เพื่อศึกษาแนวโน้มในการผสม และทำการขึ้นรูปเส้นใยผสม PTT/PLA ด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Hills:Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine) จากนั้นทำการทดสอบสมบัติของเส้นใยผสมดังนี้

1. สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter,DSC)
2. สมบัติการหดตัวของเส้นใย (Fiber Shrinkage Testing) ASTM D 5104-02
3. สมบัติทางกล ค่าความแข็งแรงของเส้นใยและค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของเส้นใย ด้วยเครื่อง Intron ASTM D 3822-01

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1 ทราบสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมจาก PLA/PTT
- 1.4.2 ทราบสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมและเส้นใยผสมจาก PLA/PTT
- 1.4.3 เส้นใยของพอลิเมอร์ผสมจาก PLA/PTT เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานสิ่งทอ

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นในการเตรียม พอลิเมอร์ วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.5.2 ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT

1.5.3 ทดสอบเม็ดพอลิเมอร์ผสมของ PLA/PTT เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของพอลิเมอร์

ผสม

1.5.4 ศึกษาการเตรียมเส้นใยผสมโดยการขึ้นรูปเส้นใยจาก PLA/PTT

1.5.5 ทดสอบสมบัติเชิงกลของเส้นใยผสม PLA/PTT

1.5.6 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการวิจัย



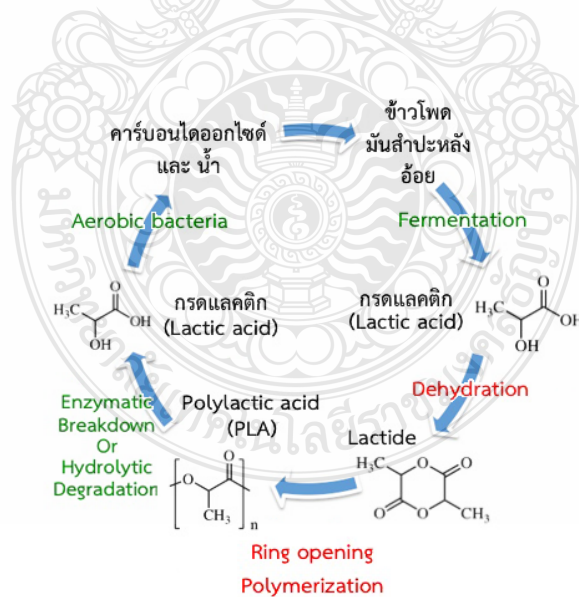
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA)

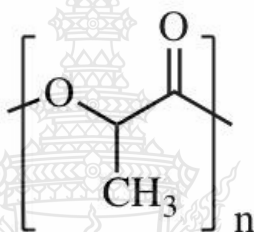
พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) สามารถย่อยสลายได้ เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายหลังจากการใช้งาน ผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ ได้ในธรรมชาติ (Renewable Resource) เช่น ผลิตมาจากพืช เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดยการบดหรือโม้พืชนั้นให้ละเอียดเป็นแป้งแล้วใช้เอนไซม์ย่อยแป้งให้ เป็นน้ำตาลกลูโคส ผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) โดยใช้แบคทีเรีย *Lactobacillus Brevis* ได้ผลผลิตเป็น กรดแลคติก (Lactic Acid) ผ่านกระบวนการทางเคมีได้ Lactide มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน แล้วจึงนำไปผ่าน กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) กลับในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยน โครงสร้างได้เป็นพอลิเมอร์



รูปที่ 2.1 กระบวนการสังเคราะห์ PLA [3]

1. โครงสร้างของ PLA

พอลิแลคติกแอซิดสังเคราะห์ขึ้นจากกรดอัลฟาไฮดรอกซี (α -Hydroxy Acids) หน่วยย่อยหรือมอนอเมอร์ของพอลิแลคติกแอซิด คือกรดแลคติก หรือมีชื่อทางเคมีคือ 2-ไฮดรอกซีโพรพิโอนิกแอซิด (2-Hydroxypropionic Acid) กรดแลคติกมีไอโซเมอร์สองรูปแบบ คือแบบดี และแอล ซึ่งเป็นอเนนชิโอเมอร์ (Enantiomer) ที่มีความว่องไวต่อแสง (Optical Active) ต่างกัน กล่าวคือ มีสูตรเคมีเหมือนกันแต่จัดเรียงตัวในสามมิติไม่เหมือนกันและบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ในทิศทางต่างกัน ในธรรมชาติส่วนใหญ่พบในรูปแบบแอล-ไอโซเมอร์ หรือพบในรูปแบบของผสมระหว่างแอล และ ดี ไอโซเมอร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.2

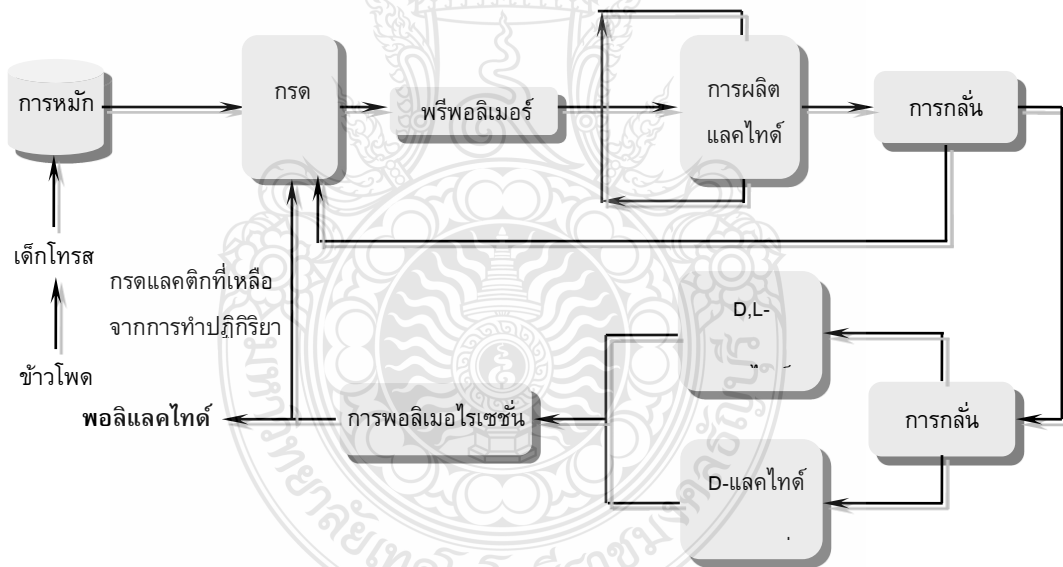


รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ PLA [3]

2. วัตถุดิบและเทคโนโลยีในการผลิต PLA

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ วัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ ได้แก่ พืชผลทางการเกษตรจำพวกแป้ง เช่น ข้าวโพด มันฝรั่ง มันสำปะหลัง ข้าวสาลี ข้าว เป็นต้น เนื่องจากกระบวนการควบแน่นเป็นปฏิกิริยาที่มีสมดุล (Equilibrium Reaction) ซึ่งการกำจัดน้ำที่ได้ระหว่างการสังเคราะห์เป็นสายโซ่ยาวพอลิเมอร์ออกให้หมดจึงเป็นเรื่องยาก จึงส่งผลถึงข้อจำกัดของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ ถึงแม้ว่าบริษัท Mitsui Toatsu Chemicals ได้คิดค้นและจดสิทธิบัตรกระบวนการกลั่นแบบ Azeotropic โดยอาศัยสารละลายที่มีจุดเดือดสูงช่วยผลักดันการกำจัดน้ำที่ได้ออกไปเพื่อให้ได้ PLA น้ำหนักโมเลกุลสูงแล้วก็ตาม แต่ต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง ดังนั้นในปัจจุบันการผลิต PLA โดยส่วนมากแล้วจะเตรียมจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน โดยการเปิดวง บริษัท Cargill Dow LLC ได้พัฒนาและจดสิทธิบัตรกระบวนการผลิต PLA ที่ต่อเนื่อง และต้นทุนการผลิตต่ำ โดยเริ่มจากปฏิกิริยาการควบแน่นแบบต่อเนื่องของกรดแลคติกเพื่อผลิตพรีพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนัก

โมเลกุลต่ำ (Low Molecular Weight PLA Prepolymer) จากนั้นผลิตพรีพอลิเมอร์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแลคไทด์โดยการเร่งปฏิกิริยาจากสารประกอบดีบุก (Tin Catalysis) ซึ่งจะถูกทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นภายใต้สุญญากาศ และจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันจากการเปิดวงโดยการเร่งปฏิกิริยาจากสารประกอบดีบุก (ได้แก่ ทินออกไซด์) จะได้ PLA โมเลกุลสูงเป็นผลิตภัณฑ์ และจากการควบคุมกระบวนการพอลิเมอไรเซชันจากการเปิดวง จึงสามารถผลิต PLLA ซึ่งได้จากการพอลิเมอไรเซชันของ L-แลคไทด์ บริสุทธิ์ โดย PLLA จะมีสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลที่ดีกว่า PLA ที่ได้จากการพอลิเมอไรเซชันของ D,L-แลคไทด์ และเนื่องจากไม่มีการใช้สารละลายอินทรีย์ กระบวนการนี้จึงมีต้นทุนการผลิตต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแล้วแลคไทด์ที่เหลือจะถูกกลั่นออกมาภายใต้สุญญากาศและนำกลับไปใช้อีก กระบวนการผลิต PLA โดยไม่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิต PLA โดยไม่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ [4]

3. สมบัติของ PLA

PLA มีลักษณะใส และมีความแวววาวสูง ใส ซึ่งอาจขึ้นอยู่กับสารเติมแต่งด้วย PLA มีสมบัติทางกล และสามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับพอลิเมอร์พื้นฐานทั่วไปที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก PLA สามารถเก็บกลิ่น และรสชาติได้ดี มีความต้านทานต่อน้ำมัน และไขมันสูง ในขณะที่ก้ำช็อกชิจเงิน ก้ำคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ดี มีความคงทนต่อการกระแทก (Impact Strength) ต่ำ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PVC ที่ไม่มีการเติมสารเสริมสร้างพลาสติก และความแข็ง ความคงทนต่อการกระแทก และความยืดหยุ่น ใกล้เคียงกับ PET นอกจากนี้ PLA ยังมีสมบัติใกล้เคียงกับ PS และสามารถนำไปดัดแปรให้มีสมบัติใกล้เคียงกับ PE หรือ PP ดังนั้น PLA จึงสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติพื้นฐานทั้งด้านการขึ้นรูปและการใช้งานได้เช่นเดียวกับพลาสติกโอเลฟินส์ที่ผลิตจากระบวนการทางปิโตรเคมี

ตารางที่ 2.1 สมบัติของ PLA ที่ผลิตเพื่อการค้า [4]

สมบัติ	NatureWork® PLA	Biomer® L9000
ความหนาแน่น (g/cm ³)	1.24	1.25
Tg (°C)	56.7 - 57.9	n/a
Tm (°C)	140 - 152	n/a
HDT (°C)	40 - 45 (amorphous) 135 (crystalline)	n/a
Tensile strength (MPa)	53	70
Elongation (%)	6	2.4
Flexural Modulus (MPa)	350 - 450	3,600

4. การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

PLA สามารถย่อยสลายได้ดีในโรงหมักขยะอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 60 °C ขึ้นไป แต่จะไม่ย่อยสลายทันทีที่อุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจาก PLA มีอุณหภูมิ T_g ใกล้เคียง 60 °C โดยขั้นตอนแรก PLA จะถูกย่อยสลายไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ และกรดแลคติกโดยการไฮโดรไลซิสซึ่งเกิดขึ้นภายใน 2 สัปดาห์ สารประกอบและกรดแลคติกที่ได้จะถูกย่อยต่อไปโดยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยการ *metabolisation* อย่างรวดเร็วไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ

5. การนำไปใช้งาน

PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติหลากหลายทำให้สามารถนำไปประยุกต์เป็นพลาสติกมูลค่าเพิ่มต่างๆหลายด้าน ได้แก่

1) ด้านการแพทย์ เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) สามารถเข้ากับเนื้อเยื่อ (Biocompatible) และสามารถถูกดูดซึม (Bioresorbable) ได้โดยระบบชีวภาพ (Biological System) ในร่างกาย จึงทำให้ PLA เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงสำหรับงานทางการแพทย์ และถูกนำมาใช้ทางด้านนี้มานานกว่า 2 ทศวรรษ เช่น ไหมเย็บแผล (Sutures) ตัวเย็บแผล (Staples) วัสดุปิดแผล (Wound Dressing) อุปกรณ์ฝังในร่างกาย (Surgical Implants) อุปกรณ์สำหรับยึดกระดูก (Orthopedic Fixation Devices) วัสดุสำหรับนำพาหรือปลดปล่อยตัวยา ซึ่งสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2) ด้านการเกษตร เช่น ภาชนะปลูกพืช วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ยตามช่วงเวลาที่กำหนด

3) ด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง ภาชนะบรรจุอาหาร ขวดน้ำ ถูพลาสติก กล่องโฟม ฟิล์มสำหรับหีบห่อ เม็ดโฟมกันกระแทก ตัวเคลือบภาชนะกระดาษ

4) ด้านเส้นใย และแผ่นผ้าแบบ Non-Woven เช่น ผลิตภัณฑ์อานามัย ผ้าอ้อมสำเร็จรูป เสื้อผ้าและเครื่องนุ่งห่ม เส้นใยสำหรับบรรจุในเครื่องนอน

5) ด้านยานยนต์ เช่น อุปกรณ์ลดแรงกระแทก (Bumpers) แผ่นรองพื้น (Floor Mats) และอุปกรณ์ตกแต่งภายใน

6) ด้านอิเล็กทรอนิกส์ และการสื่อสาร เช่น ชิ้นส่วนประกอบในโทรศัพท์เคลื่อนที่ ชิ้นส่วนประกอบในคอมพิวเตอร์ แผ่นซีดี

7) อื่นๆ เช่น อุปกรณ์เครื่องเขียน บัตรพลาสติก ผลิตภัณฑ์ใช้ในบ้านเรือน
สารเคลือบกระดาษ สารยึดติด ท่อพลาสติกชั่วคราว

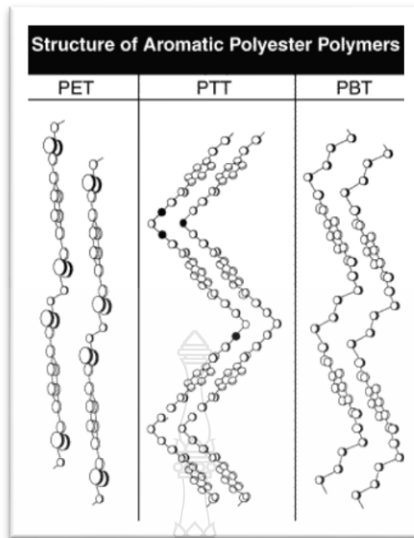
2.1.2 พอลิไตรเมทิลีน เทเรฟทาเลท (Polytrimethylene Terephthalate): PTT

PTT เป็นพอลิเอสเตอร์แบบสายโซ่ตรงที่มีวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 PTT ถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกในปีค.ศ. 1941 ในช่วงปลายทศวรรษ 1960 บริษัท Shell ได้พยายามทำการผลิตเชิงพาณิชย์ (Commercialization) แต่ไม่ประสบความสำเร็จเนื่องจากราคาที่สูงของสารตั้งต้น คือ PDO ซึ่งผลิตผ่านกระบวนการไฮเดรชันของอะโครลีน (Acrolein) จนกระทั่งในทศวรรษ 1990 บริษัท Shell ได้ใช้กระบวนการที่ลดต้นทุนมากขึ้น ที่เรียกว่า การไฮโดรฟอร์ไมเลชันอย่างต่อเนื่อง (Continuous Hydroformulation) ของเอทิลีนออกไซด์ (Ethylene Oxide) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่และในปีค.ศ. 1999 ได้ผลิต PTT ในเชิงการค้า ภายใต้ชื่อทางการค้า Corterra®

1. โครงสร้างของ PTT

พอลิเมอร์จากแหล่งชีวภาพมีความหมายที่กว้างเพราะอาจรวมถึงพอลิเมอร์ที่ได้จากแหล่งธรรมชาติโดยตรงเช่น พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) โปรตีน (Protein) หรือยางธรรมชาติ (Natural Rubber) เป็นต้น พอลิเมอร์ที่สามารถสังเคราะห์ได้จากมอนอเมอร์ (Monomer) หรือเป็นพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จากกระบวนการทางชีวภาพ ดังรูปที่ 2.4

Polytrimethylene Terephthalate (PTT) เป็น Aromatic Polyester ชนิดหนึ่งซึ่งผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์แบบ Polycondensation ที่มีวัตถุดิบคือ 1,3-Propanediol และ Terephthalic Acid ซึ่ง PTT เป็นหนึ่งของ Aromatic Polyester ที่มีการขายในเชิงการค้า ดังแสดงในตารางที่ 2.2

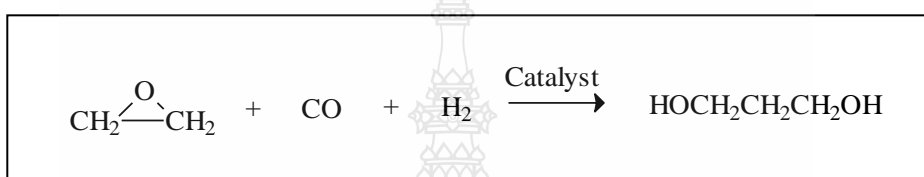


รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบโครงสร้างของ Polyester: PET, PTT และ PBT [4]

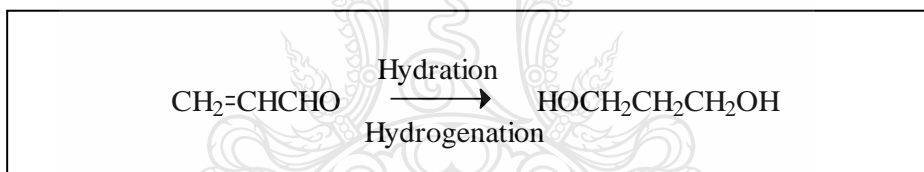
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของ Aromatic Polyester [4]

Aromatic Polyester	สารตั้งต้นในการผลิต Aromatic Polyester	
	n-methylene glycols	PTA(Terephthalic Acid)
PET	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{HO}-\text{C}-\text{C}-\text{OH} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ <p>Ethylene Glycol</p>	
PTT	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \\ \text{HO}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{OH} \\ \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ <p>1,3-Propane Diol</p>	
PBT	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ \text{HO}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{OH} \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$ <p>1,4-Butane Diol</p>	

PTT ได้ถูกสังเคราะห์เป็นครั้งแรกโดย Whinfield และ Dickson แห่ง Caligo Printing Ink. (ค.ศ. 1941) แต่การผลิตในเชิงอุตสาหกรรมนั้นยังไม่ได้เป็นที่สนใจมากนักเป็นเพราะต้นทุนการผลิตของ 1,3-Propanediol ที่เป็นมอนอเมอร์ของ PTT ยังสูงอยู่ แต่ในไม่นานมานี้ Shell Chemical ได้มีการพัฒนาการผลิตมอนอเมอร์ตัวนี้ที่มีต้นทุนในการผลิตที่สามารถผลิตและคุ้มค่าในเชิงอุตสาหกรรมได้ซึ่งมีพื้นฐานจาก Hydroformylation ของ Ethylene Oxide ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และการสังเคราะห์แบบ Hydrogenation จาก Acrolein ดังรูปที่ 2.6

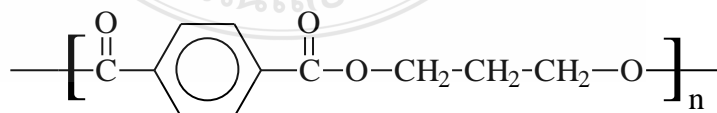


รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์ 1,3-Propanediol จาก Ethylene Oxide [4]



รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์ 1,3-Propanediol จาก Acrolein [4]

จากนั้นจึงนำ Propanediol ไปทำการ Polycondensation กับ Terephthalic Acid หรือ Dimethyl Terephthalate จะได้ PTT ต่อไป ซึ่งโครงสร้างของ PTT ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ Polytrimethylene Terephthalate (PTT) [4]

2. สมบัติของ PTT

สมบัติของ PTT เป็นการรวมกันระหว่างสมบัติทางกายภาพของ PET (ความทน ความแข็ง ความเหนียว และความร้อน) และสมบัติด้านการขึ้นรูปของพอลิบิวทิลีนเทอเรพทาเลต (PBT) (อุณหภูมิสำหรับการหลอมเหลวต่ำ การเกิดผลึกอย่างรวดเร็ว และ Circle Time ที่เร็วกว่า PET) [5] นอกจากนี้ยังมีความคล้ายคลึงกับพอลิเอไมด์ (PA 6,6) และ PP ในการใช้งานด้านเส้นใย และพอลิคาร์บอเนต (PC) ในการใช้งานด้านการหล่อขึ้นรูป PTT ยังมีสมบัติทางกายภาพของ PET และสมบัติด้านการขึ้นรูป (เส้นใยและฟิล์ม) บางประการที่คล้าย PLA และเซลโลเฟน

PTT มีความแข็งแรงและเหนียวมาก มีความสามารถในการคืนตัวที่ดีกว่า PET และ PBT (Elastic Recovery) และอยู่ในช่วงเดียวกันในลอน [6] PTT มีอุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting Temperature, T_m) $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิสภาพคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature T_g) ประมาณ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งต่ำกว่า PET ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปจึงต่ำกว่า ฟิล์ม PTT มีความสามารถในการแพร่ผ่านของไอน้ำต่ำ PTT มีความต้านทานต่อการเปื้อน มีความต้านทานแสง UV ดีเยี่ยม [7] และการเกิดประจุไฟฟ้าสถิตต่ำ ดังนั้นจึงเหมาะสมในการผลิตเป็นพรม และยังพบว่า PTT มีความนุ่ม (มากกว่า PA และ PET) ซึ่งเป็นสมบัติที่ต้องการในการนำมาผลิตเครื่องนุ่งห่ม

ตารางที่ 2.3 สมบัติของ PTT ที่ผลิตเพื่อการค้า [8]

สมบัติ	Corterra® PTT
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.34
T_g ($^{\circ}\text{C}$)	51
T_m ($^{\circ}\text{C}$)	230
Tensile Strength (cN/dtex)	3.4 - 3.7
Elongation at break (%)	36 - 42
Initial Young's Modulus (cN/dtex)	23
Moisture Regain	0.4
Boil Shrinkage	14

3. การนำไปใช้งาน [9]

การพัฒนา PTT เพื่อนำไปใช้ประโยชน์มักจะอยู่ในส่วนของเส้นใย (สิ่งทอ พรม และเครื่องนุ่งห่ม) และบรรจุภัณฑ์หีบห่อ (ได้แก่ ฟิล์ม) เป็นหลัก ในขณะที่ PET ยังคงเป็นที่นิยมในการผลิตขวดสำหรับเครื่องดื่มที่มีการอัดก๊าซ (Carbonated Beverage) PTT ถูกคาดว่าจะนำไปใช้แทน PET ในงานด้านเส้นใยบางส่วน เช่นเดียวกับฟิล์มสำหรับหีบห่อต่างๆ และสิ่งของอื่น เช่น ฟิล์มเอกซ์เรย์ เทปแม่เหล็ก (สำหรับเครื่องเสียง วีดีโอ และคอมพิวเตอร์) และป้ายฉลาก

4. สมบัติของเส้นใย PTT

PTT นั้นง่ายต่อการอัดรีด แต่ต้องมีกระบวนการทำแห้งก่อนเช่นเดียวกับ Polyethylene Terephthalate (PET) เพื่อให้การผลิตอัดรีดได้อย่างต่อเนื่อง และได้สมบัติของเส้นใยที่ดี สมบัติที่สำคัญของ PTT และเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่นที่สำคัญในการผลิตเป็นเส้นใยสิ่งทอ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติที่สำคัญบางประการของเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในการผลิตเส้นใย [9]

สมบัติ	PTT	PET	Nylon 6	Nylon 6,6	PP
Melting Point °C	228	265	220	265	168
Glass transition °C	45-65	80	40-87	50-90	-17 to -4
Density (g/cm ³)	1.33	1.40	1.13	1.14	0.91
%Water absorption (24 hours)	0.03	0.09	1.9	2.8	-
%Water absorption (14 days)	0.15	0.49	9.5	8.9	< 0.03

PTT นั้นสามารถที่จะทำการอัดรีดหรือปั่นออกมาเป็นเส้นใยในลักษณะต่างๆทั้งเส้นใยและเส้นด้าย ดังเช่น POY (Partially Orientation Yarn), SDY (Spin-Drawn Yarn) และ UDY (Undrawn Yarn) อย่างไรก็ตามการอบแห้งเป็นขั้นตอนที่สำคัญเช่นเดียวกับ PET และ PA (Nylon) ซึ่งต้องมีการทำให้เม็ด PTT แห้งก่อนนำไปทำการอัดรีดและปั่นเป็นเส้นใย แต่รายละเอียดการปฏิบัติมีความแตกต่างอยู่บ้างกับ PET ซึ่งในการทำแห้งพอลิเมอร์ PTT นั้นจะต้องให้ความชื้นอยู่ไม่เกินกว่า 30 ppm Moisture Content ซึ่งรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.5

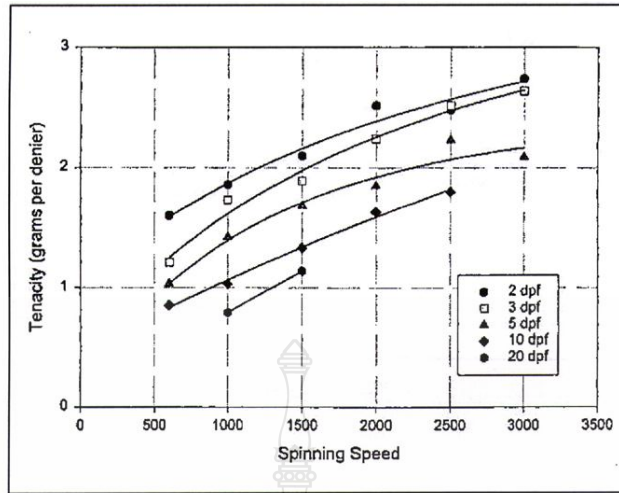
ตารางที่ 2.5 สภาวะในการอัดรีดเส้นใย PTT [9]

ลักษณะ	สภาวะในการอัดรีด
Drying	<ul style="list-style-type: none"> - No crystallization step - Closed-loop hot air dryer - 130 °C for a 4 hour residence time - Dew point much lower than -40°C - Dry to less than 30 ppm for best performance - 13 x molecular sieve as a desiccant, with regular maintenance
Extrusion	<ul style="list-style-type: none"> - Typical melt temperature from 245-265°C - Various extruder zone settings to achieve proper melt temperature

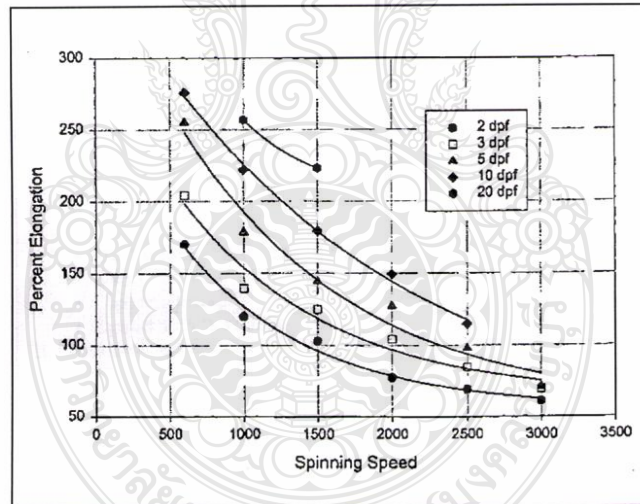
โดยทั่วไปอุณหภูมิในการอัดรีดจะต่ำกว่าการอัดรีดของ PET อยู่ 30 °C อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่ใช้ในการอัดรีดจะอยู่ระหว่าง 245-265 °C การอัดรีดอุณหภูมิที่สูงกว่า 265 °C จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ได้ และเครื่องอัดรีดแบบปกติที่ใช้กับ PET, PA 6, PA 66 สามารถใช้ได้กับ PTT

เส้นใยสิ่งทอชนิด POY ชนิด Untexturized Yarn/Filament, SDY, และ POY นั้นสามารถผลิตได้จาก Spin-Draw Machine ในการผลิตแบบปกติเช่นเดียวกับการผลิต PET และ PTT ชนิด POY นั้นสามารถปั่นได้จากเครื่องทั้งที่มีและไม่มี Godets ที่ความเร็วจาก 2,500 ถึง 5,000 m/min

รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง (Tenacity) และการยืดตัว (Elongation) กับความเร็วในการปั่นเส้นใย (Spinning Speed) สำหรับ POY ของ PTT โดยการผลิตที่ไม่ใช้ Godets ซึ่งจะพบว่าเมื่อความเร็วในการปั่นเส้นใยสูงขึ้นความแข็งแรงของเส้นใย (Tenacity) จะสูงขึ้น โดยเส้นใยที่มีความละเอียดของเส้นใยใหญ่กว่าจะมีความแข็งแรงที่มากกว่า และในรูปที่ 2.9 ความสามารถในการยืดตัว ณ จุดขาด จะลดลง เมื่อความเร็วในการปั่นเส้นใยสูงขึ้น ในขณะที่เส้นใยที่มีขนาดของเส้นใยใหญ่กว่าจะมีความสามารถในการยืดตัว ณ จุดขาดที่ต่ำกว่า



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง (Tenacity) กับความเร็วในการปั่นเส้นใยของ PTT POY [9]



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการยืดตัวกับความเร็วในการปั่นเส้นใย PTT [9]

เส้นใย PTT สามารถย้อมด้วยสีกระจาย (Disperse Dyes) ได้เช่นเดียวกับ PET แต่สามารถย้อมได้ในอุณหภูมิเดือดปกติ โดยปราศจากการใช้สารตัวพา (Carrier) ซึ่งแตกต่างจากเส้นใย PET เป็นเพราะโครงสร้างโมเลกุลที่เปิดมากกว่า อย่างไรก็ตามก็สามารถย้อมในสถานะที่มีความดันได้

ตารางที่ 2.6 สมบัติต่างๆของเส้นใย PTT เส้นใย PET และ PA 6,6 [9]

สมบัติ	PTT (Solo®)	PET	PA 6,6
Tensile strength (g/d)	3.8-4.2	4.2-5.0	4.7-5.1
Elongation (%)	36-42	30-38	32-44
Initial modulus (g/d)	26	110	35
Elastic recovery -20%- (%)	88	29	62
Density	1.34	1.38	1.14
Water content (%)	0.4	0.4	4.5
Boiling water shrinkage (%)	14	7	13
Melting point (°C)	230	254	253
Glass transition (°C)	45-65	70-80	50-90
Weatherability	Almost not decrease in strength	Almost no decrease in strength	Some decrease in strength and sometimes yellowing happens
Yellow resistance (Nox-BHT, vanillin, heat dry)	Almost no yellowing	Almost no yellowing	Sometimes yellowing happens

PTT สามารถปั่นเป็นเส้นใยที่เป็น Bicomponent (Side By Side) ระหว่าง PTT กับ PET ได้เพื่อทำให้เกิดรอยหยัก (Crimp) เพราะความสามารถในการหดตัวของเส้นใยที่แตกต่างกัน ทำให้เส้นใยมีเนื้อฟูที่ยังรักษาลักษณะเดิมของเส้นใยอยู่ และเส้นใย Bicomponent ในลักษณะ Core-Sheath ก็สามารถผลิตได้เช่นเดียวกัน

เส้นใย PTT ได้แสดงสมบัติและลักษณะที่โดดเด่นกว่าเส้นใยพอลิเอสเตอร์เดิม ทั้งการยืดตัวและความนุ่มของเส้นใย และเส้นใย PTT ยังมีความแข็งแรงของเส้นใยที่ดี มีความคงทนต่อสี ย้อม และความคงทนต่อคลอรีนได้ดี สมบัติของเส้นใย PTT และเส้นใยชนิดอื่นที่สำคัญมีดัง
ตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สมบัติบางประการของเส้นใยต่างๆ [9]

สมบัติ	PTT	PET	Nylon	Acrylic	Spandex
Softness	++	-	+	+	N/A
Stretch/recovery	+	-	+/-	-	++
Bulk	++	-	+/-	+	N/A
Abrasion	+	+	++	-	--
Stain resistance	++	++	-	+/-	--
Wash fastness	++	++	-	+/-	--
Light fastness	+	+	-	++	--
Static resistance	++	++	-	-	N/A
Color intensity	+/-	-	+	++	--
Cost	+/-	++	+/-	+	--

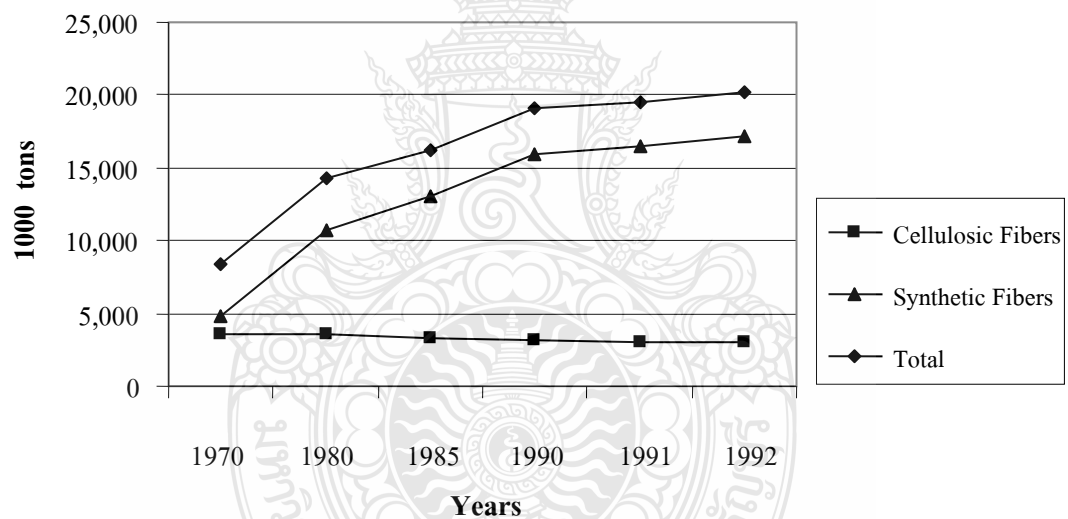
Remark: ++ best, + better, +/- average, - poor, -- poorest

2.1.3 การผลิตเส้นใยสังเคราะห์ และการทดสอบ

การผลิตเส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic Fiber Forming) เป็นกระบวนการที่มีการพัฒนาตั้งแต่ ค.ศ. 1930 ในห้องปฏิบัติการของ DuPont จนทำให้มีการผลิตเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงสงครามโลก เนื่องจากสมบัติที่เด่นของเส้นใยสังเคราะห์ และสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ทดแทนการใช้เส้นใยธรรมชาติเดิมๆ ดังเช่น ขนสัตว์ ฝ้าย ป่าน และไหม ตารางที่ 2.8 และรูปที่ 2.10 แสดงถึงปริมาณการผลิตของเส้นใยสังเคราะห์เปรียบเทียบกับ การผลิตของเส้นใยเซลลูโลสที่มาจากธรรมชาติ

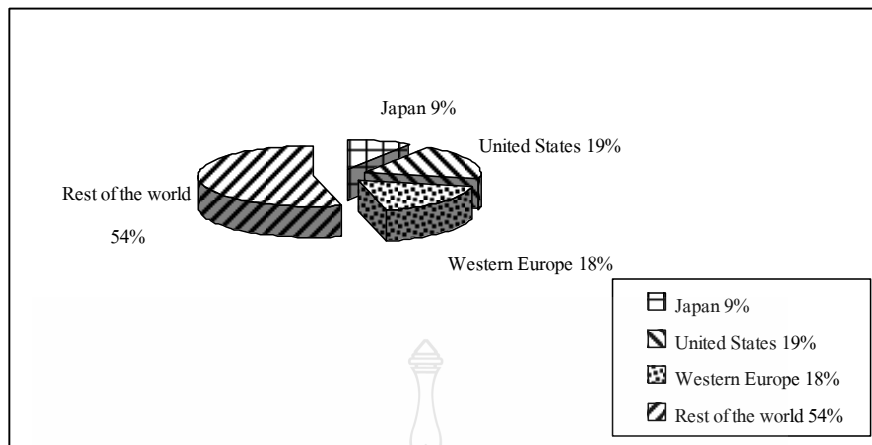
ตารางที่ 2.8 World Man-Made Fiber Production [10]

Years	Cellulosic Fibers		Synthetic Fibers		Total	
	1,000 Tons	%	1,000 Tons	%	1,000 Tons	%
1970	3,585	43	4,809	57	8,394	100
1980	3,522	25	10,779	75	14,301	100
1985	3,234	20	13,025	80	16,259	100
1990	3,216	17	15,885	83	19,101	100
1991	3,057	16	16,499	84	19,556	100
1992	3,022	15	17,217	85	20,240	100



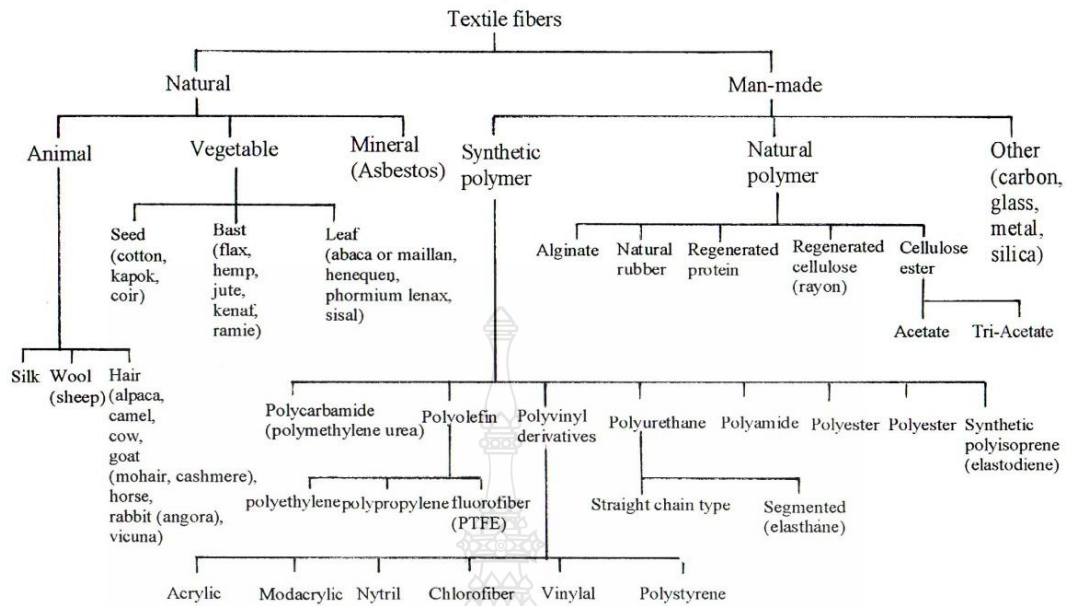
รูปที่ 2.10 World Fiber Production Trends [10]

จากรูปที่ 2.11 จะเห็นว่าการผลิตของเส้นใยสังเคราะห์กันอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เป็นพื้นที่ทางฝั่งเอเชีย



รูปที่ 2.11 Regional Distribution of Man-Made Fibers in 1992 [10]

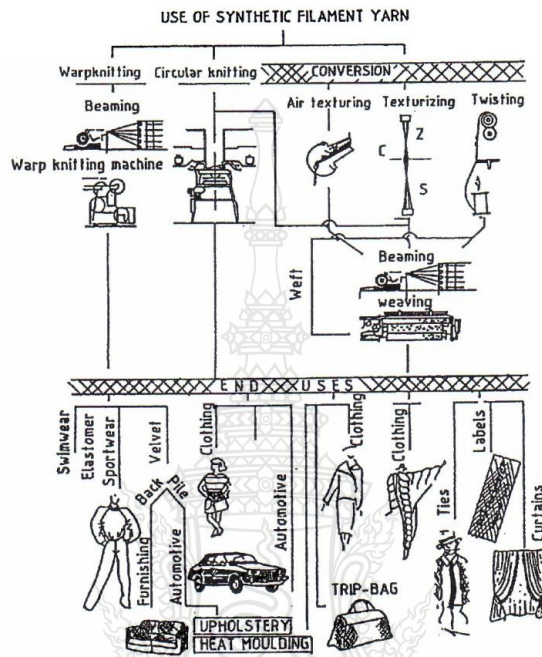
ตามแผนภูมิการแบ่งแยกประเภทเส้นใยที่ได้รับการยอมรับคือจาก Textile Institute ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งเส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic Fibers) เป็นส่วนหนึ่งของเส้นใยประดิษฐ์ (Man-Made Fibers) โดยเส้นใยประเภทอื่นจะเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติที่ได้จากแหล่งจากธรรมชาติ ดังเช่น เศษฝ้ายหรือเยื่อไม้ (เยื่อกระดาษ) เส้นใยสังเคราะห์ได้จากการปรับเปลี่ยนจากสสารที่จากการสังเคราะห์ (Synthesis or Building up) ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยสังเคราะห์ก็แตกต่างกันไปแต่ละเส้นใย เช่น เส้นใยไนลอน (Polyamides), พอลิเอสเตอร์ (Polyester), และพอลิโอเลฟิน (Polyolefins: ซึ่งมักเป็น Polypropylene) ซึ่งเป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่สำคัญและมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางและมักมีการทำเท็กซ์เจอร์ด้วย



รูปที่ 2.12 Classification of Textile Fibers [11]

เส้นใยสังเคราะห์ทั้งหมดถูกผลิตเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous Filament) จากการผลิตแบบหลอมเหลวแล้วดันผ่านรูเล็กที่เรียกว่าสปินเนอร์เรท (Spinnerets) อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีการผลิตเส้นเป็นเส้นใยสั้นและเปลี่ยนสภาพเป็นเส้นใยสิ่งทอใช้งานเส้นใยสั้นทั่วไป เส้นใยสังเคราะห์ที่ได้ถูกนำไปใช้ในรูปเส้นด้ายตรง (Flat Yarn) และเส้นด้ายยาวต่อเนื่องที่เป็นเท็กซ์เจอร์ (Textured Continuous Filament Yarn) ในสัดส่วนใกล้เคียงกัน เส้นด้ายใยสังเคราะห์หลายเส้นที่ยาวต่อเนื่อง (Synthetic Continuous Multifilament Yarn) ลักษณะจะเป็นเส้นตรงเรียงตัวตามยาวของความยาวของเส้นด้ายเกือบทั้งหมด โดยมีเกลียวเล็กน้อยหรือมีการทำปมบ้าง (Twist and Intermingling) ซึ่งจะมีลักษณะที่แน่นและมันลื่น อย่างไรก็ตามก็มีหลายวิธีการที่ทำให้เส้นด้ายเกิดมีลักษณะที่เป็นเท็กซ์เจอร์ มีความฟูและยืดตัวได้ (Bulk and Stretch) ด้วยวิธีการเหล่านี้ทำลายการเรียงตัวของเส้นใยและลักษณะที่ตรง ทำให้มีลักษณะเหมือนกับที่ช่วยการปั่นเส้นใยสั้น

การใช้งานเส้นด้ายใยสังเคราะห์ (Synthetic Filament Yarn) มีหลากหลายโดยครอบคลุมทั้ง เสื้อผ้า (Clothing) ผ้าสำหรับเครื่องตกแต่งบ้าน (Furnishing Fabrics) และผ้าเชิงเทคนิค (Technical Fabrics) ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 Uses of Synthetic Fibers [11]

อย่างไรก็ตามในแต่ละเส้นใยสังเคราะห์นั้นจะมีลักษณะเฉพาะตัวในการใช้งาน จากตารางที่ 2.9 จะแสดงถึงการใช้งานของเส้นใยพอลิเอสเตอร์และไนลอน (พอลิเอไมด์) ในลักษณะต่างๆ เส้นใยทั้งสองจะมีลักษณะและสมบัติที่เฉพาะตัว ดังจะเห็นได้ว่าเส้นใยพอลิเอสเตอร์นั้นเหมาะในงานสิ่งทอ ในขณะที่ไนลอนนั้นเหมาะในงานเชิงเทคนิคและการใช้งานเชิงอุตสาหกรรมเนื่องจากสมบัติความแข็งแรงและการให้ตัวที่สูง (High Tenacity and Resilience)

ตารางที่ 2.9 Capacities for Polyester and Polyamide Fibers in 1984 [11]

Proportion % of World Capacities for Man-made Fibers, 1984							
	Textile Continuous Filament Yarn	Industrial Continuous Filament Yarn	Bulked Continuous Filament Yarn	Cotton- type Staple	Wool- type Staple	Carpet- type Staple	Fiber Fill
Polyester	51	8	0	56	23	5	99
Polyamide	39	35	94	1	4	49	0

1. ลักษณะของเส้นใยสังเคราะห์โดยทั่วไป

เส้นใยสังเคราะห์โดยมาก (ยกเว้นบางประเภทเช่น เส้นใยแก้ว เป็นต้น) เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ ที่ประกอบจากชิ้นจาก โมเลกุลใหญ่ซึ่งมีหน่วยที่ซ้ำๆกันในความยาวของโมเลกุล โมเลกุลหนึ่งๆมีหน่วยซ้ำกันมากถึงพันหรือหมื่นหน่วย ซึ่งเป็น โมเลกุลใหญ่ที่เรียกว่าเป็น Macromolecules หรือ สายโซ่โมเลกุล (Chain Molecules)

พอลิเมอร์มีการนำไปใช้งานในผลิตภัณฑ์หลายรูปแบบ เช่น ชิ้นงานพลาสติก ที่ผ่านการขึ้นรูปจากพอลิเมอร์ ซึ่งก็มีลักษณะที่แตกต่างกับเส้นใย โดยลักษณะของพอลิเมอร์ที่สำคัญที่แตกต่างในรูปเส้นใยคือ การเรียงตัวของโมเลกุลตามความยาวของเส้นใย ซึ่งทำให้เป็นสมบัติที่แตกต่างกันในแต่ละด้านของชิ้นงานที่เรียกว่า Anisotropic ดังนั้นจึงทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงที่แตกต่างกันในแต่ละด้าน (ความยาวกับทางขวาง) สมบัติความแข็งแรงของเส้นใย เป็นผลจากการรวมตัวของสายโซ่โมเลกุล เช่น ลักษณะของ สายโซ่โมเลกุลเอง, ส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline Region) และส่วนที่เป็น ออสัญฐาน (Noncrystalline Region) ตลอดจนการจัดเรียงตัวของแต่ละส่วน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของพอลิเมอร์ภายใต้สภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสม ดังนี้

ความเป็นระเบียบ (Regularity): สายโซ่โมเลกุลต้องเป็น Uniform ของส่วนประกอบทางเคมี และ Stereochemicalform

รูปร่างและปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัน (Shape and Interaction): รูปร่างของสายโซ่โมเลกุลต้องทำให้เกิดหรือสนับสนุนให้เกิดการสัมผัสใกล้ชิดกันหรือชิดติดกัน ซึ่งจะทำให้เกิดพันธะ

หรือแรงดึงคู่ระหว่างกันที่แข็งแรงพฤติกรรมนี้ได้จาก สายโซ่โมเลกุล ที่ตรงโดยไม่มีหมู่แขนงที่ใหญ่ (No Bulky Side Groups) หรือไม่ก็มีหมู่แขนงที่เป็นระเบียบตามความยาวของสายโซ่ของโมเลกุล (Backbone Chain)

ความยาวที่ซ้ำกัน (Repeat length): การเกิดผลึกจะลดลงเมื่อเพิ่มความยาวของหน่วยที่ซ้ำกัน (ความยาวของ Repeating Unit ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การเกิดผลึกได้ยากขึ้น)

ทั้งโครงสร้างเคมี และการผลิตทางกายภาพ จะเป็นตัวการกำหนดสมบัติทางกลของเส้นใย ดังเช่น ความแข็งแรง ณ จุดขาด (Breaking Strength), ความสามารถในการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break), ความต้านทานต่อการเสียรูป (Resistance to Deformations), การคืนตัวจากการยืดตัว (Recovery from Imposed Strains) ดังตัวอย่างเช่นความแข็งแรงนั้นเป็นฟังก์ชันของน้ำหนักโมเลกุล หากน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์มีค่าต่ำกว่าค่าหนึ่งๆ (ประมาณ 5,000 สำหรับไนลอนและพอลิเอสเตอร์) พอลิเมอร์จะไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ หากมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าค่านี้เล็กน้อยจะทำให้ได้เส้นใยที่ไม่แข็งแรง ในขณะที่น้ำหนักโมเลกุลที่สูงขึ้นความแข็งแรงของเส้นใยก็จะสูงขึ้นด้วย เส้นใยที่ค้าขายกันปกติ (Commercial Fibers) จะได้จากพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10,000 หรือสูงกว่า อย่างไรก็ตามหากมีน้ำหนักโมเลกุลสูงเพียงอย่างเดียวอาจไม่ทำให้ความแข็งแรงสูงได้ การเรียงตัวของโมเลกุล (Orientation) ก็เป็นส่วนที่สำคัญด้วยที่ต้องพิจารณา

2.1.4 เทคนิคในการปั่นเส้นใย (Spinning Technique)

ในการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ การปั่นเส้นใยจะรวมถึงแต่การอัดรีด (Extrusion) และการขึ้นรูปเส้นใย (Fiber Formation) ด้วยเหตุที่พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติจะเกิดการเสียดสภาพได้ง่ายในสถานะความร้อนสูงที่จุดหลอมเหลว ซึ่งทำให้สถานะที่เหมาะสมในการปั่นเส้นใยต้องทำในรูปแบบที่เป็นสารละลายเท่านั้น ซึ่งสามารถแยกได้เป็น 2 วิธีคือ การปั่นเส้นใยแบบเปียก (Wet Spinning) และการปั่นเส้นใยแบบแห้ง (Dry Spinning) ซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิม ก่อนที่จะมีการพัฒนามาเป็นวิธีการปั่นแบบหลอมเหลว (Melt Spinning) ดังนั้นสามารถแยกการปั่นเส้นใยได้เป็น 2 กลุ่มคือการปั่นแบบหลอมเหลว และการปั่นแบบสารละลาย (การปั่นแบบเปียก และแบบแห้ง) ซึ่งเส้นใยแต่ละประเภทจะมีการปั่นเส้นใยที่แตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2.10 โดยการปั่นแบบหลอมเหลวเป็นเทคนิคที่เป็นที่นิยม และคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์จะคุ้มค่ามากที่สุด แต่ก็สามารถใช้ได้กับพอลิ

เมอร์ที่สามารถอ่อนลอมตัวได้ที่อุณหภูมิที่ซึ่งไม่ทำให้โครงสร้างหรือสมบัติเปลี่ยนไป ส่วนการปั่นแบบแห้ง สารละลายพอลิเมอร์ที่มีตัวทำละลายกับพอลิเมอร์จะถูกอัดรีดผ่านสปินเนอร์เร็ทแล้วผ่านไปยังส่วนที่ทำให้ตัวทำละลายเกิดการระเหยออกจากเส้นใยขณะปั่น ทำให้เส้นใยแข็งตัว ส่วนการปั่นแบบเปียกนั้นสารละลายพอลิเมอร์ จะถูกอัดรีดผ่านสปินเนอร์เร็ทผ่านไปอย่างของของเหลวที่ไม่ใช่ตัวทำละลาย (Non-Solvent) เส้นใยก็จะเกิดการตกตะกอน โดยอาจจะเป็นได้ทั้งที่ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (เปลี่ยนสภาพทางกายภาพ) และเกิดปฏิกิริยา เกิดการกลับสู่สภาพเดิม (Regenerate) ดังเช่นการเกิดเป็นเกลือ

ตารางที่ 2.10 Spinning Techniques [12]

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, Centifugal Spinning, Electrostatic Spinning, Gel Spinning และ Tack Spinning

1. การปั่นแบบหลอมเหลว (Melt Spinning)

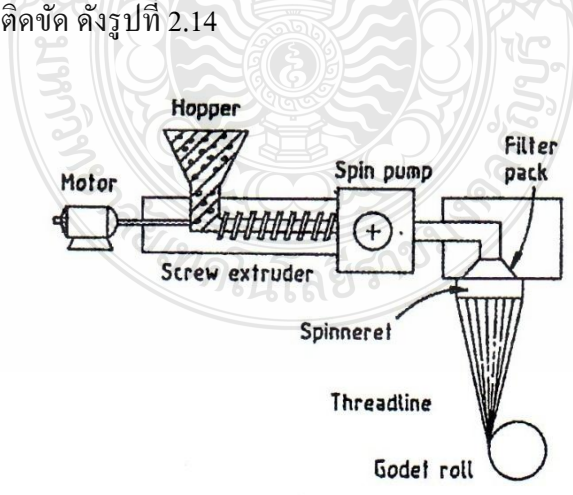
การปั่นแบบหลอมเหลวได้ถูกพัฒนาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 เพื่อในการผลิตเส้นใยไนลอน 6 และไนลอน 6,6 และปัจจุบันก็นำมาผลิตเส้นใยอยู่หลายประเภทในช่วงต้นจะเรียกว่าเป็น Grid Spinning โดยเป็นที่นิยมมากในการผลิตเส้นใยไนลอนและพอลิเอสเตอร์ ในกระบวนการผลิตนี้ Grid จะประกอบด้วยท่อเหล็กหรือแท่งเหล็กที่ร้อน (ด้วยไฟฟ้า หรือวิธีอื่น) เพื่อให้เม็ดชิพเกิดการหลอมตัวแล้วตกลงสู่อ่างหลอมเหลว แล้วจะถูกปั่นผ่านไปยังรูเล็กๆ แล้วทำให้แข็งตัวเป็นเส้นใย และเพื่อไม่ให้เกิดการเสื่อมและเกิดการพอลิเมอร์ไรซ์เพิ่มขึ้นไปอีกของพอลิเมอร์อาจต้องมีการหล่อด้วยก๊าซที่เฉื่อย (ปราศจากออกซิเจน) ซึ่งก็คือก๊าซไนโตรเจน โดยเฉพาะกับไนลอน

ในช่วงหลังของการพัฒนาที่มีการปรับเปลี่ยนการหลอมตัวพอลิเมอร์โดยอาศัยเกลียวหนอน (Extrusion Screw) ทำให้เกิดการหลอมตัวและทำให้เกิดความดันให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านไปยังสปินเนอร์เรท ดังรูปที่ 2.15 ซึ่ง Extruder ตัวเดียวกันยังสามารถแบ่งไปสู่สายการผลิตได้หลายตัวได้ ดังรูปที่ 2.16

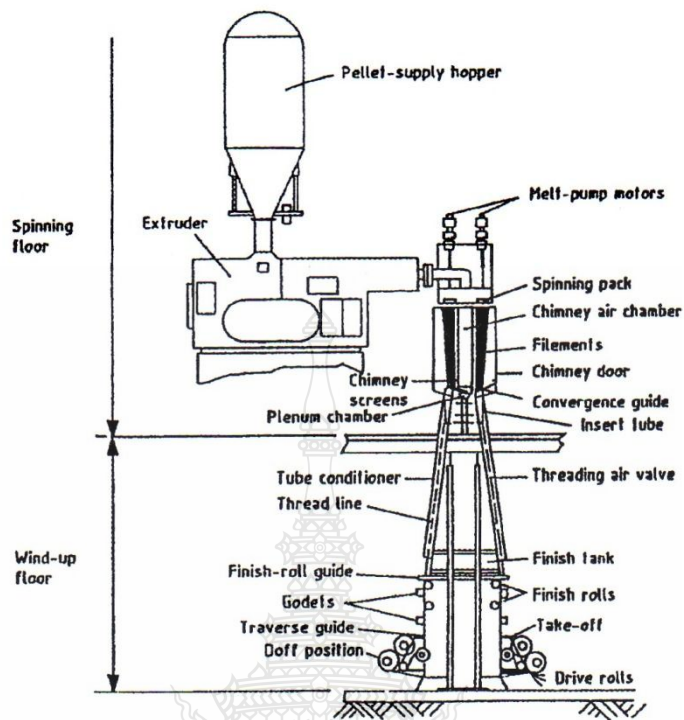
เส้นใยพอลิเอสเตอร์และไนลอนปัจจุบันจะมีการใช้วิธีการปั่นแบบหลอมเหลวแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะไม่ทำให้พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ทำให้แข็งตัวเป็นเม็ดชิพ แต่จะส่งผ่านพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านไปยัง Manifold แล้วส่งไปยังส่วนการปั่นเลยโดยตรง โดยการปั่นนี้ส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งก็คือ Metering Gear Pump เพื่อควบคุมการไหลของพอลิเมอร์ที่คงที่สู่ส่วนกรองและผ่านสปินเนอร์เรทใน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

ก่อนที่พอลิเมอร์หลอมจะผ่านไปยังสปินเนอร์เรทต้องมีการกรองเพื่อกำจัดอนุภาคแปลกปลอม วัสดุใหญ่หรือพอลิเมอร์ที่ไม่ได้รับการหลอมตัว (Gel Particle) เพราะจะทำให้เกิดการอุดตันรูสปินเนอร์เรทได้ หรือหากผ่านรูไปได้ อาจทำให้มีขนาดของเส้นใยที่ไม่ได้ตามต้องการ และอนุภาคก็อาจแสดงเป็นจุดบกพร่องทำให้เส้นใยอ่อนแอได้

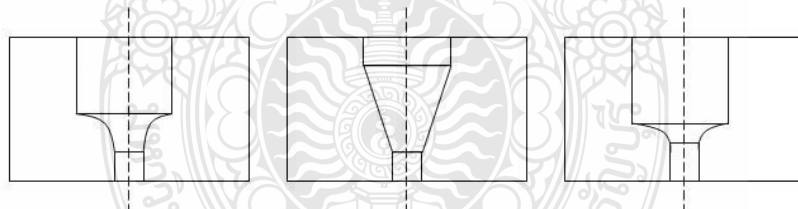
เมื่อผ่านส่วนกรองแล้วพอลิเมอร์ก็ผ่านไปยังสปินเนอร์เรท ซึ่งเป็นแผ่นโลหะบาง มีรูเล็กจำนวนมากตามจำนวนเส้นใยที่ต้องการ โดยการนำผ่านนั้นอาจต้องใช้ความดันจาก Extruder มากถึง 20 เมกะปาสคาล เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกของรูสปินเนอร์เรทมีตั้งแต่ 175-750 ไมโครเมตร ส่วนมากมักเล็กกว่าความหนาของแผ่นสปินเนอร์เรท ซึ่งในกรณีของปั่นแบบหลอมเหลวนี้จะประมาณ 3 – 10 มิลลิเมตร โดยทางเข้ารูจะกว้างกว่าแล้วแคบเข้าเพื่อให้การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลอย่างไม่ติดขัด ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 Polymer in Powdered or Chip form can be Fed Directly to Melt-Spinning Equipment [12]



รูปที่ 2.15 Conventional Spinning Plant [12]



รูปที่ 2.16 Longitudinal Cross-Section of Spinneret Holes Showing Streamlining of Polymer Flow [12]

จำนวนรูจะมีตั้งแต่รูเดียวไปจนถึงหลายพันรูต่อหนึ่งแผ่นสปินเนอร์เรท ในการผลิตเส้นใยยาวมักมีจำนวนสิบหรือไม่กี่จำนวนร้อย แต่ในการผลิตเส้น Tow เพื่อตัดเส้นใยยาวเป็นเส้นใยสั้นจะมีจำนวนหลายร้อยไปจนถึงเป็นพันรู และรูปร่างรูมีตั้งแต่รูกลมไปจนถึงหลายรูปร่าง เป็น Profile หรือ มีรูกลวง (Hollow) ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติที่พิเศษที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.18

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 2.17 Spinneret Hole (Orifice) Cross-Section and Its Relation to The Fiber Cross-Section [12]

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_o/V) ซึ่ง V_o คือความเร็วในการอัดรีดเฉลี่ย (Mean Extrusion Velocity)

$$\text{Linear density} = \frac{A\rho W_p V_o}{V} \quad (2.1)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของรู (ตารางมิลลิเมตร)

ρ คือ ความถ่วงจำเพาะของพอลิเมอร์หลอมเหลว ณ อุณหภูมิการอัดรีด (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

W_p คือ สัดส่วนโดยน้ำหนัก (Weight Fraction) ของพอลิเมอร์ ในส่วนที่ออกมาจากรู (Extrudate) ขณะที่ออกจากรูสปินเนอร์เรท, ซึ่งสำหรับการปั่นแบบหลอมเหลว $W_p = 1$

พอลิเมอร์หลอมเหลวจะถูกอัดผ่านรูสปินเนอร์เร็ท ถูกรีดลดขนาดลงด้วยแรงที่ได้รับจากการม้วนเก็บ พร้อมกันอุณหภูมิของ 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

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

กรรมวิธีการปั่นแบบหลอมเหลวสามารถแบ่งได้ตามระดับของการเรียงตัวของโมเลกุล (Degree of Molecular Orientation) ในเส้นใยที่ปั่นได้ โดยทำการม้วนเก็บด้วยความเร็ว (ความเร็วในการปั่นเส้นใย) ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 1,500 จนถึง 6,000 เมตรต่อนาที หรือมากกว่า โดยให้สัญลักษณ์ 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 ความหนืด จากการปั่นเส้นใยจะทำให้มี Tension ใน Threadline เพียงเล็กน้อย และพบว่า

Tension ที่ใช้ในการม้วนเก็บเส้นใยจะเท่ากับ Rheological Force ที่ต้องการในการปั่นเส้นใย ผลที่ได้คือ Tension ในการปั่นเส้นใยสามารถทำให้การปั่นเป็นไปได้อย่างต่อเนื่องคงที่ ภายใต้อัตรา Tension ที่มีผลต่อพอลิเมอร์หลอมเหลวนี้ทำให้พอลิเมอร์ในเส้นใยจะเกิดการเรียงตัวในเส้นใยเพียงเล็กน้อย ต่างกันเส้นใยที่ได้รับจากการปั่นที่ความเร็วนี้จะมีลักษณะเป็น Amorphous มีความแข็งแรงเล็กน้อย ยืดตัวได้มาก และต้องลดขนาดถึง 3.5-5.0 เท่าจากขนาดเดิมเพื่อให้เส้นใยนี้เหมาะสมกับการใช้งาน

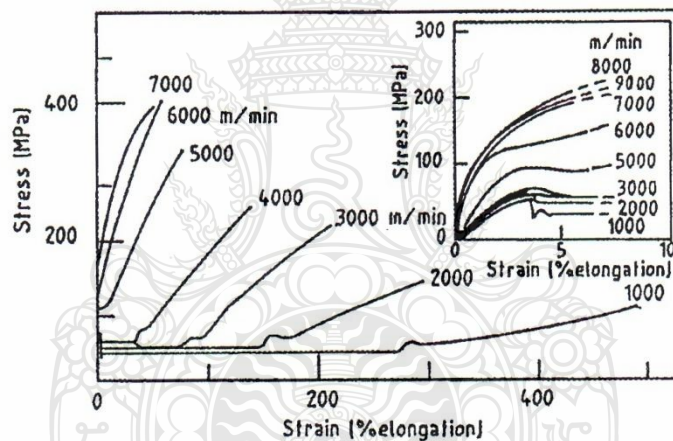
MOY Spinning Process ด้วยความต้องการประสิทธิภาพการผลิตที่มากขึ้นจึงมีการใช้ความเร็วที่สูงขึ้นคือ MOY Spinning ความเร็วที่ใช้ออยู่ระหว่าง 1,500 – 2,5000 เมตรต่อนาที ความหนืด จากการปั่นเส้นใยจะทำให้มี Tension ใน Threadline เพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน แต่ก็มีแรงฝืดจากอากาศ (Air Drag) ต่อ Threadline ร่วมด้วย ผลคือ Tension ในการปั่นเส้นใยที่มากจะทำให้การลดขนาดของเส้น Threadline ได้รวดเร็ว และ โมเลกุลของพอลิเมอร์เริ่มมีสมบัติที่เป็น 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 มีการผลิต เครื่องเท็กเจอร์ (Simultaneous Draw Texturing) จึงทำให้มีความคิดในการพัฒนาเป็น POY โดยความเร็วที่ใช้ในการปั่นนี้จะอยู่ระหว่าง 2,500 ถึง 4,000 เมตรต่อนาที ด้วยแรงฝืดจากอากาศ (Air Drag) และ ความหนืด จะทำให้เกิด Tension ใน Threadline เพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามระยะทางที่ห่างจากสปินเนอร์เร็ท 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 และแม้ว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) เปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆกับความเร็วในการปั่นเส้นใย แต่การเปลี่ยนแปลงนี้ก็เป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะส่งผลต่อสมบัติการไหล (Rheological Properties) และ อัตราการเป็นผลึก (Crystallization Rate) ต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนสูง

ความเร็วในการปั่นเส้นใย 4,000 ถึง 6,000 เมตรต่อนาที ความเป็นผลึกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และการเรียงตัวใน Amorphous ก็เพิ่มขึ้น

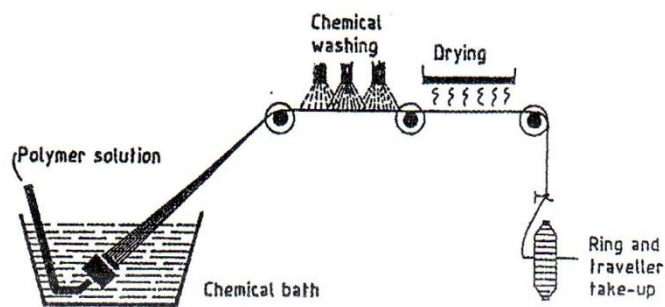
FOY Spinning Process ความเร็วใกล้เคียงหรือมากกว่า 6,000 เมตรต่อนาที ทั้งแรงเสียดอากาศ (Air Drag) และ ความหนืด (Inertial) ยังเป็นตัวเด่นในการทำให้เกิด Tension ใน Threadline สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, อัตราการเย็นตัว และ Radial Temperature Gradient ก็ยังคงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในความเร็วในการปั่นนี้เวลาในการทำให้เกิดผลึกสั้น และการเกิดผลึกก็สามารถทำให้เกิดการยับยั้งได้ ดังตัวอย่าง ความแข็งแรงของเส้นใย (Tenacity) จะลดลงในการปั่นด้วยความเร็วที่มากเกินไป คือมากกว่า 6,500 เมตรต่อนาที และพร้อมกับกรรมวิธีการปั่นก็ยากเพราะทำให้ Threadline ขาดได้ง่าย ดังเช่นรูปที่ 2.18 แสดงถึง Stress-Strain Curves สำหรับพอลิเอสเตอร์ปั่นที่ความเร็วหมุนเก็บต่างๆ



รูปที่ 2.18 Stress-Strain Curve of Polyester Spun at Various Take-Up Velocities [12]

2. การปั่นแบบเปียก (Wet-Spinning)

ในกระบวนการผลิตแบบเปียกนี้ สารละลายจะถูกอัดรีดสู่อ่างเคมีซึ่งจะเกิดการตกตะกอนหรือการกลับคืนมา (Regenerate) จากเส้นใยที่มีลักษณะคล้ายเจลจนเป็นของแข็ง (Gel-Like to Solid Filament) ทั้งตัวทำละลายที่เป็นน้ำ (Aqueous Solvent) และสารอินทรีย์ (Organic Solvent) สามารถใช้สำหรับการปั่นแบบเปียก รูปที่ 2.19 เป็นแบบร่างของกรรมวิธีการปั่นเปียก

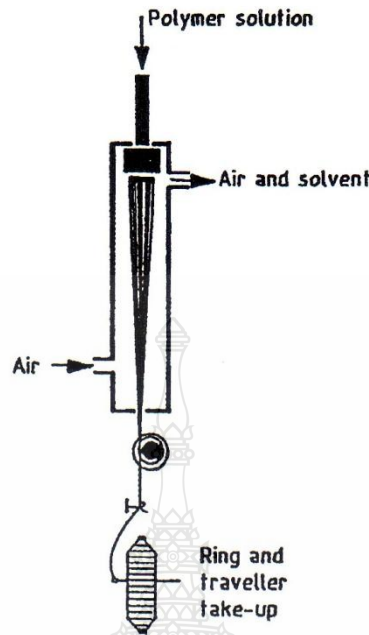


รูปที่ 2.19 Schematic Illustration of Wet Spinning Process [12]

อัตราการลดขนาดที่เส้นใยเมื่อออกจากกรูสปินเนอร์เร็ท โดยปราศจากการขาดของการปั่นแบบเปียกช้ากว่าในการปั่นแบบหลอมเหลวและการปั่นแบบแห้ง การปั่นแบบเปียกแยกได้เป็น 2 วิธีกว้างๆดังนี้คือ ระบบ Solvent/Non-Solvent และ Chemical Reaction เพื่อสารละลายและการตกตะกอนของพอลิเมอร์ โดยเส้นใยอะคริลิกและโมดาคริลิกจะใช้วิธีแรก ส่วนเส้นใยวิสคอสจะใช้วิธีที่ 2

3. การปั่นแบบแห้ง (Dry-Spinning)

การปั่นแบบแห้งจะทำการอัดรีดสารละลายพอลิเมอร์ผ่านสปินเนอร์เร็ทสู่ก๊าซร้อนหรืออากาศร้อน เพื่อที่ทำให้ตัวทำละลายในสารละลายพอลิเมอร์ออกมาทำให้เปลี่ยนไปเป็นเส้นใย 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 2.20 Dry Spinning Process [12]

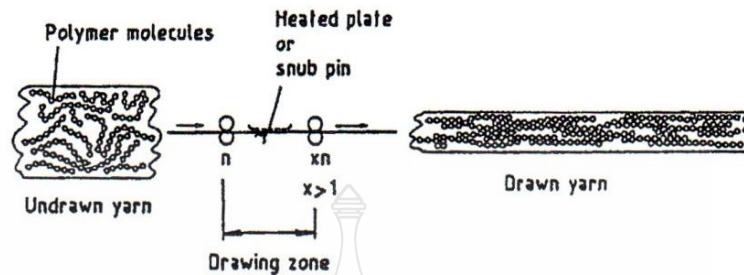
4. การปั่นด้วยวิธีอื่น

วิธีที่มีการใช้กันมากขึ้นคือ การผลิตเส้นใยจากแผ่นฟิล์ม (เส้นใยขนาดใหญ่) เป็นเพราะว่าทางเศรษฐศาสตร์จะคุ้มค่าที่สุดทั้งกรรมวิธีการผลิตและผลิตภัณฑ์มีความหลากหลาย วิธีการนี้จะมีการอัดรีดออกมาเป็นแผ่นโดยใช้ Slit Die ขึ้นรูปเป็นแผ่นซีท จากนั้นจะทำให้เป็นเส้นใยได้หลายเครื่องมือ โดยพื้นฐานเส้นใยจะผลิตโดยการยืดตัวและการเรียงตัวฟิล์ม แล้วทำการตัดแยกออกให้เป็นเส้นใย ปัจจุบันเส้นใยพอลิพลอพิวลิโนใช้วิธีการนี้ในการผลิต (ผลิตเป็นเส้นใยแล้วนำมาทอเป็นกระสอบ เป็นต้น)

5. การลดขนาด (Drawing)

เส้นใยสิ่งทอทั้งหมด (ทั้งเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์) มีลักษณะที่เป็นพื้นฐานที่มีโมเลกุลเป็นลักษณะที่ยาวเหมือนที่เป็นเส้นใยและทั้งที่อัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่มาก เส้นใยประกอบจากโมเลกุลมากมายมารวมกันทั้งเรียงตัวกัน เชื่อมกัน แบบทางต่อหาง ตลอดความยาวของเส้นใยดังรูปที่ 2.21 เพื่อที่จะให้มีสมบัติดังเป็นเส้นใยจำเป็นต้องมีการทำให้เส้นใยมีการเรียงตัวมากขึ้นตามความยาวของเส้นใย เมื่อทำให้โมเลกุลเกิดการเรียงตัวกันสูงขึ้น (Orientation or Alignment) ทำให้เกิดพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลที่อยู่ใกล้กันสูงขึ้น อันเป็นผลทำ

ให้ความแข็งแรงของเส้นใยเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่การยืดตัวลดลง โดยแรงที่ทำให้เส้นใยเกิดการยืดตัวแรงจะเกิดการถ่ายเทกันไประหว่าง โมเลกุลที่พาดเกี่ยวกัน (Overlap) ตามความยาวของเส้นใย

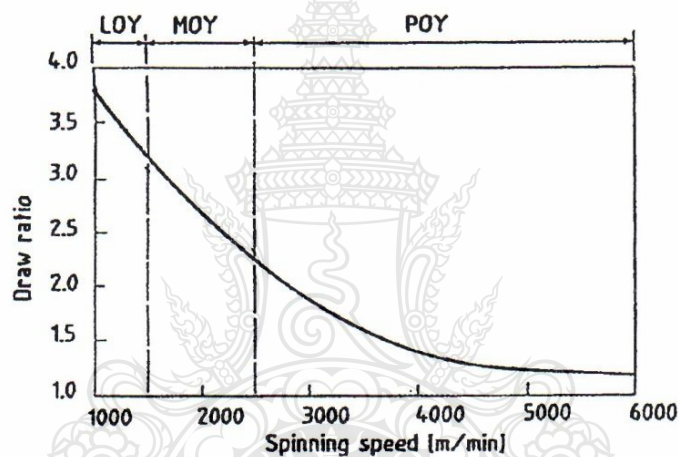


รูปที่ 2.21 Molecular Orientation before and after Drawing Process [12]

เส้นใยที่ได้รับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นแบบหลอมเหลว แบบแห้ง และแบบเปียก นั้นง่ายต่อการเสียรูป (Deform) การยืดตัวสูง (High Elongation) และบางกรณีการยืดตัวสูง (High Shrinkage) ขณะที่ได้รับความร้อน ซึ่งทำให้ยังไม่เหมาะในการใช้งานเป็นเส้นใยหากยังไม่ได้ผ่านกระบวนการลดขนาด (Drawing Operation) การลดขนาดเส้นใยมีทั้งที่เป็นแบบเย็น (Cold Drawing) และแบบร้อน (Hot Drawing) โดยทำให้การยืดตัวที่ไม่สามารถกลับคืนได้ และทำให้เกิดการเรียงตัวของโมเลกุล มีการพัฒนาเป็นโครงสร้างเส้นใยขนาดเล็ก (Fiber-Fine Structure) โมเลกุลเกิดการเรียงตัวตามความยาวของเส้นใยสูงขึ้น (High Orientation) โดยทำให้เกิดมีผลึกสูง (High Degree of Crystallinity) โดยการเรียงตัวนั้นจะเกิดขึ้นทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่ไม่เป็นผลึก ผลที่ได้ก็คือทำให้ความแข็งแรงตามยาวสูงขึ้น (Tensile Strength) และการยืดตัวเมื่อจุดขาดลดลง (Elongation at Break)

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

การผลิตเส้นด้ายใยยาวต่อเนื่อง (Continuous Filament Yarn) การเรียงตัวของเส้นด้ายขึ้นอยู่กับความเร็วของการม้วนเก็บเส้นใย (ความเร็วของการปั่นเส้นใย) ปกติแล้วความเร็วใช้ อยู่ประมาณ 1,500 เมตรต่อนาที ในการผลิตเส้นใย LOY และมากกว่า ประมาณ 2,500 เมตรต่อนาที ในการผลิตเส้นใย POY การเรียงตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงประมาณ 6,000 เมตรต่อนาที ดังรูปที่ 2.22 อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปการปั่นเส้นด้ายด้วยความเร็วสูงจะทำให้เกิดการเรียงตัวของสายโซ่ โมเลกุลน้อยกว่าเมื่อมีการลดขนาดในขณะที่เป็นเส้นด้ายแล้ว (Mechanical Drawing) เพราะเหตุจาก อุณหภูมิของเส้นด้าย (Spinline) ขณะปั่นนั้นเกิดการคลายตัวของสายโซ่โมเลกุลที่เกิดการเรียงตัวแล้ว (ซึ่งสำคัญมาก) ดังนั้นจึงทำให้เกิดการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลนั้น โดยรวมน้อยลง

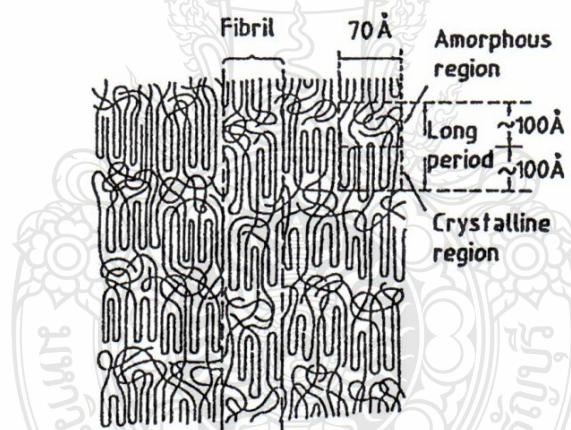


รูปที่ 2.22 Orientation Increase Progressively Up to About 6,000 m/min [12]

ผลิตภัณฑ์เส้นใยที่มีการจัดเรียงตัวต่ำต้องทำการลดขนาดที่อัตราการลดขนาด (Draw Ratio) ประมาณ 4-7 เพื่อผลิตเป็น FOY (Fully Oriented Yarn) การลดขนาดนั้นสามารถทำได้ ทั้งแบบแยกขั้นตอน และแบบขั้นตอนเดียว สำหรับแบบแยกขั้นตอนนั้นเส้นด้ายจะถูกม้วนเข้า Bobbin แล้วจึงนำมาผ่านกระบวนการลดขนาด แบบขั้นตอนเดียวทำดั่งเป็นที่ทราบกันในระบบ Spin-Draw Process โดยเส้นด้ายจะถูกม้วนเก็บด้วยความเร็วต่ำแล้วผ่านไปยังส่วนที่ทำการลดขนาด ทำให้เกิดการเรียงตัวของโมเลกุล และสุดท้ายก็ทำการม้วนเก็บด้วยความเร็วสูง (อาจมากถึง 6,000

เมตรต่อนาที) เส้นด้าย POY มักทำการปั่นด้วยความเร็ว 2,500 ถึง 4,000 เมตรต่อนาที และลดขนาดในกระบวนการต่อไป เช่น Draw Texturing หรือ Draw Warping

รูปจำลองโครงสร้างปกติของเส้นใยจะเป็นดังรูปที่ 2.23 นำเสนอโดย Dortmans ซึ่งมีอยู่ 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีการเรียงตัว (ส่วนที่เป็นระเบียบ, Crystalline) และส่วนที่ไม่มีการเรียงตัว (ส่วนไม่เป็นระเบียบ, Amorphous) เราจะเห็นได้ว่าโมเลกุลหลายๆจะเป็นส่วนหนึ่งทั้งที่เป็นผลึกและไม่เป็นผลึก 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 2.23 General Structural Model of A Drawn Fiber [12]

เส้นด้ายที่ไม่ได้ผ่านการลดขนาด (Undrawn Yarn) จะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างมีนัยสำคัญถ้ามีการเก็บเป็นเวลานาน การเปลี่ยนแปลงของ Morphology ดังเช่น การเกิดผลึกเพิ่ม (Further Crystallization), การเปลี่ยนแปลงการดูดซึมความชื้นกับความชื้นสัมพัทธ์ และบางครั้ง การดูดซึมสารตกแต่ง (Spin Finish) เข้าสู่เส้นด้ายอาจเกิดขึ้น ดังนั้นแล้วเป็นสิ่งสำคัญมากในการเก็บของ

เส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการลดขนาดในสภาวะที่ควบคุม โดยทั่วไปเส้นด้ายที่มีการเรียงตัวสูงจะมีความอ่อนไหวต่อสภาวะการเก็บน้อย

1) การลดขนาดแบบไม่ใช้ความร้อน (Cold Drawing)

เส้นใยที่มีการเรียงตัวต่ำของพอลิเมอร์บางตัวแสดง ซึ่งเส้นใยได้รับแรงที่มากเพียงพอทำให้เกิดการยืดตัวที่ไม่สามารถกลับคืนได้ มีความยาวมากขึ้นกว่าความยาวเดิมหลายเท่าโดยการเกิดจุดที่เรียกว่า Neck โดยพฤติกรรมนี้เกิดที่อุณหภูมิใกล้ T_g ของพอลิเมอร์ ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่านี้แรงดึงที่สูงจะทำให้เส้นใยพอลิเมอร์เกิดลักษณะเปราะโดยไม่เกิดการลดขนาด ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g การลดขนาดจะเกิดขึ้นที่แรงดึงต่ำได้และยังได้เส้นใยที่ดี Uniform และไม่เกิด Neck

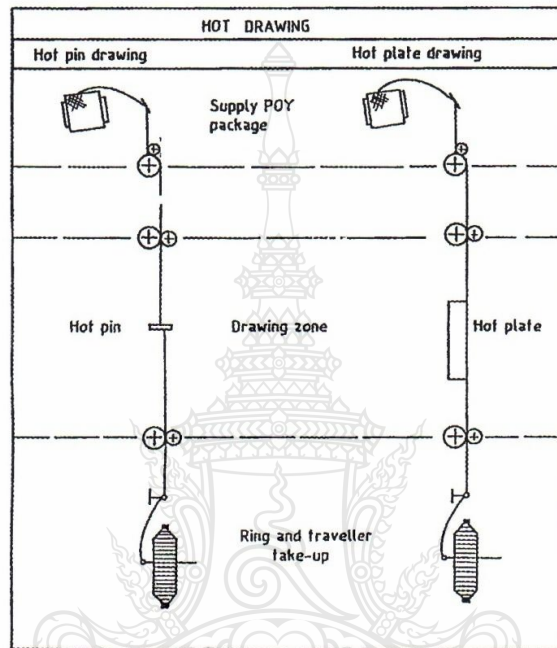
เส้นใยไนลอน 6,6 มี T_g ที่ $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ที่ 100 % RH) สามารถลดขนาดได้โดยไม่ต้องให้ความร้อน โดยผ่านเส้นใยไปยังเข็ม (Pin) ซึ่งเรียกว่า 'Snubbing Pin' ซึ่งจัดวางอยู่ระหว่างลูกกลิ้ง ซึ่งเข็มจะเป็นจุดที่เกิดการลดขนาด (Draw Point) และทำหน้าที่จับความร้อนที่เกิดขึ้น เข็มนี้มักผลิตจาก Titanium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

2) การลดขนาดแบบใช้ความร้อน (Hot Drawing)

ความแตกต่างระหว่างการลดขนาดแบบไม่ใช้ความร้อนและแบบใช้ความร้อนคือการทำให้เกิดจุดลดขนาดที่คงที่สม่ำเสมอ โดยในการลดขนาดแบบไม่ใช้ความร้อน จุดลดขนาดจะเกิดโดยแรงดึงที่เพิ่มขึ้นๆ ด้วยการพันเส้นด้ายรอบๆ เข็ม เป็นตำแหน่งของการเกิดการลดขนาด ส่วนในการลดขนาดแบบใช้ความร้อนนั้นจุดเกิดการลดขนาดจะเกิดโดยลูกกลิ้งที่ถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าจุด T_g ของเส้นใยที่จะทำการลดขนาด หลังจากการลดขนาดเส้นใยจะผ่านไปยังแผ่นร้อน (Hot Plate) เพื่อให้การลดขนาดมีความสม่ำเสมอ และกำจัดารลดขนาดที่ยังค้างอยู่ โดยการทำให้เกิดผลึก (Crystallization) รูปที่ 2.24 แสดงอุปกรณ์พื้นฐานในการลดขนาดแบบใช้ความร้อนที่ใช้ใน Draw Twisting

มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตเครื่องมือต่างๆ ที่สูงขึ้นทำให้สามารถขั้นตอนผลิตที่ต้องทำมาไว้ด้วยกัน Draw Warping (ทำให้เส้นใยเกิดรอยหยักพร้อมลดขนาด) และ Draw Texturing (ทำเท็กซ์เจอร์พร้อมลดขนาด) โดยทำกับเส้นด้าย POY โดยการทำให้เท็กซ์เจอร์มักทำด้วยวิธี

False-Twist Texturing Technique และปัจจุบันก็มีการพัฒนาเป็นระบบ Spin-Draw-Texturing พร้อมในกระบวนการเดียว โดยมักทำกับเส้นใยที่มีขนาดกลางจนถึงขนาดใหญ่และมักทำเป็นระบบ Hot-Fluid-Jet-Texturing



รูปที่ 2.24 อุปกรณ์พื้นฐานทุกระบบ Hot Drawing [12]

2.1.5 สารตกแต่งและการใช้งาน (Spin Finish and Its Application)

สารที่ใช้ตกแต่งมีชื่อเรียกอยู่หลายชื่อ เช่น Spin Finish, Spinning Finish, Dressing, Treating Agent, Spinning Lubricant, Coating Fiber Finish, Processing Agent, Textile Treating Agent, Textile Treating Composition, Conditioning Agent ซึ่งได้รับการออกแบบด้วยสารเคมีใกล้เคียงกัน เช่น เพื่อให้สมบัติผิวเส้นใยมีสมบัติ Antistatic (โดยใช้ Antistatic Lubricant) ซึ่งจะมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วย

สมบัติของเส้นใยขึ้นอยู่กับปัจจัย เช่น สมบัติของพอลิเมอร์เองและกรรมวิธีการผลิตเส้นใย โดยทั่วไปเส้นใยยาวจะถูกเปลี่ยนไปเป็นเส้นด้ายแล้วผลิตเป็นผ้า อย่างไรก็ตามสิ่งที่ต้องปฏิบัติ

ก็จะต้องนำสารตกแตงนั้นออกก่อนที่จะนำเส้นใยนั้นไปย้อมสี เพราะสารนั้นจะเป็นสาเหตุทำให้สีไม่สามารถติดเส้นใยได้ หรือผลที่ได้ไม่สม่ำเสมอ

การขาดของเส้นใยและเส้นด้ายขณะที่ผลิตเส้นใยและทั้งที่การผลิตเส้นด้ายและฝ้ายนั้นก็เนื่องมาจากเหตุผลหนึ่งคือ Tension ที่มากเกินไป แรงยึดติดกันระหว่างเส้นด้าย และการสึกหรอของผิวเส้นด้าย ซึ่งปัญหาเหล่านี้เป็นเหตุจากความฝืด (Friction) ไฟฟ้าสถิตย์ (Static Electricity) การสึกหรอของผิว (Surface Wear) การหล่อลื่นผิวต่ำ (Boundary Lubrication) และการใช้สารเคมี (Chemical Attack)

การผลิตสามารถทำให้ดีขึ้นได้โดยการใช้สารตกแตง โดยการผสมสารประกอบเคมีที่มีทั้งสารหล่อลื่นเพื่อลดความฝืด ซึ่งเป็น Long-Chain Aliphatic Ester ใช้ร่วมกับ Emulsifier เป็นสารละลาย, สารป้องกันการไฟฟ้าสถิตย์ (Antistatic Agent) เพื่อลดการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้นได้กับเส้นใยและเส้นด้ายขณะการผลิตผ่านเครื่องมือต่างๆ, สารกำจัดแบคทีเรีย (Bactericide), สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Antioxidant) และ สารเพิ่มความทนทานต่อความร้อน (Thermal Stabilizing Agent) เพื่อลดการก่อตัวของการตกติดของเรซินบนเครื่องและเส้นด้ายเอง

สารตกแตงโดยทั่วไปจะถูกใช้ในระหว่างการปั่นเส้นใยก่อนการม้วนเก็บ เพื่อลดแรงเสียดสีกับตัวนำเส้นด้าย (Guide), เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างเส้นใยยาว (Interfilament Cohesion) และปลดปล่อยไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้น โดยในสารตกแตงของแต่ละบริษัทจะมีสูตรที่เป็นสูตรเฉพาะแตกต่างกัน ไม่เป็นที่เปิดเผยกันนัก แต่สมบัติที่ต้องการนั้นมีดังนี้

การหล่อลื่น (Lubricant): สารหล่อลื่นเป็นสิ่งจำเป็นในการลดสัมประสิทธิ์ความฝืดระหว่างผิวเส้นใยกับโลหะ (Fiber-to-Metal Surface) เพื่อป้องกันและทำให้ลดลงของการเกิดการขัดสีของเส้นใย และเป็นผลทำให้ความตึง (Tension) ไม่แปรปรวนระหว่างการผลิต

ควบคุมไฟฟ้าสถิตย์ (Antistatic Control): สารหล่อลื่นต้องมีสมบัติป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ ทำให้ปลดปล่อยประจุทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิต

แรงยึดเหนี่ยว (Cohesion): แรงยึดเหนี่ยวที่คงที่เป็นสิ่งสำคัญ เพราะการการที่เกิดการหล่อลื่นที่มากเกินไป ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เส้นใยเกิดการไถล (Slippage) ทำให้ลูกด้ายที่ม้วนเก็บนั้นเป็นรูปร่างที่ดี และไม่มีผลต่อการผลิตขั้นต่อไป

ด้านทานต่อการออกซิเดชัน (Oxidation Resistance): หลังจากการใช้สารหล่อลื่น เส้นใยจะถูกเก็บเป็นเวลาพอสมควรเพื่อรอกระบวนการต่อไป ซึ่งสารหล่อลื่นต้องมีสมบัติด้านทานต่อการเปลี่ยนสีของเส้นด้าย การเกิดแบคทีเรีย และการก่อเกิดสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อสัมผัสกับออกซิเจน ดังนั้นสมบัติการต้านทานต่อการออกซิเดชันจึงสำคัญ

ควบคุมความหนืด (Controlled Viscosity Range): ความหนืดต่ำมากๆ เป็นสาเหตุหนึ่งที่สนับสนุนแรงฝืดระหว่างเส้นใยที่ต่ำลง และหากว่าความหนืดสูงมาก ก็จะทำให้มีแรงฝืดที่มากเกินไป

ด้านทานการสึกหรอ (Corrosion Resistance): เส้นมีการสัมผัสกับผิวโลหะมาก ระหว่างการผลิต พร้อมทั้งการเกิดสนิมเป็นผลทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องจักรที่มีราคาสูงได้ และหากมีการสะสมสนิมในเส้นใยก็จะสามารถมีผลต่อการย้อมสีได้ด้วย

เม็ดสี (Color): สารหล่อลื่นควรมีสีขาวและไม่เกิดการเหลืองขณะการผลิตหรือการเก็บเส้นด้าย

สมบัติอื่นที่ต้องการของสารตกแต่งดังเช่น Scourability, Nonallergenic and Nontoxic, Odour Resistance, Product Stability และ Nonvolatillity

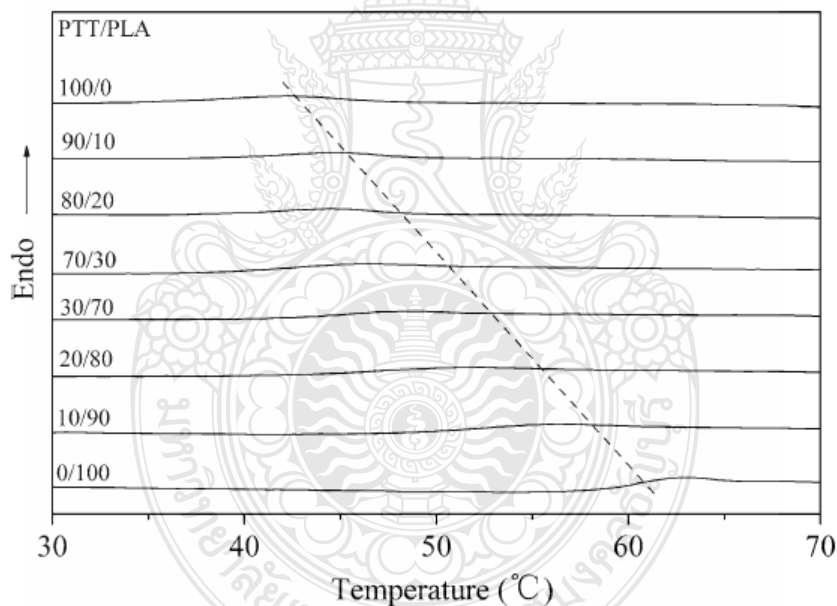
สารตกแต่งที่ใช้ในเส้นด้ายใยยาวต่อเนื่อง (Continuous Filament Yarns) ใช้ทั้งแบบ 100% แบบ Emulsion และสารละลาย ซึ่งทั้งหมดจะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย โดยนำสู่เส้นด้ายโดยเครื่องมือทั้งที่เป็นระบบคล้ายการขับน้ำมันของตะเกียงหรือลูกกลิ้ง แต่ที่นิยมจะเป็นการใช้ลูกกลิ้งเซรามิก โดยมีส่วนหนึ่งแช่ในสารตกแต่งแล้วลูกกลิ้งก็นำสารตกแต่งขึ้นมาสัมผัสกับเส้นด้ายที่เคลื่อนที่ผ่านกันแบบตรงข้ามกัน แต่ก็มีข้อเสียบ้างเพราะสารที่นำสู่เส้นด้ายจะไม่คงที่มากนัก ซึ่งเป็นข้อเสียสำคัญของอุปกรณ์นี้ ปัจจุบันก็มีการใช้สเปรย์ละอองไอของสารตกแต่งสู่เส้นใย แต่ก็ยังมีข้อเสียบ้างคือการสูญเสียสารตกแต่งมากเกินไปและยังไปตกติดบนเครื่องมืออื่นมาก และอุปกรณ์ที่ได้รับการใช้งานมากขึ้นคือการใช้ตัวนำเซรามิกรูปตัว V (V-Shaped Ceramic Guide) ซึ่งนำสารตกแต่งโดยปั๊มเล็กๆ ที่สามารถควบคุมปริมาณสารได้ดี

เส้นใยสังเคราะห์ที่ผลิตได้จำเป็นต้องมีกระบวนการต่อเนื่องเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย ดังเช่น การทำให้คงรูปด้วยความร้อน (Heat Setting) และการผ่อนคลายตัวด้วยความร้อนต่อเส้นใย (Thermal Relaxation) ทำให้เกิดการคงรูป (Dimensional Stability) การทำเกลียว (Twisting) และการ

ทำปม (Intermingling) ทำให้แรงยึดเหนี่ยวเป็นเส้นด้ายดีขึ้น, การทำเท็กซ์เจอร์ทำให้เส้นใย/เส้นด้ายมีเนื้อพองฟูมากขึ้น และการทำรอยหยิก (Crimping) และผ่าน ไปตัดเส้นใยให้มีความยาวสั้น ใกล้เคียงกับเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งสำคัญมากเพื่อนำเส้นใยนี้ไปใช้ร่วมกับเส้นใยธรรมชาติ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hantao Zouc และคณะ [13] ทำการศึกษาการผสมระหว่าง PLA/PTT โดยกระบวนการ melt blending ซึ่งปรากฏว่า PLA ผสมกับ PTT ได้ดี โดย เป็นการผสมแบบเข้ากันได้ โดยสามารถดูได้จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PTT ดังแสดงในรูปที่ 2.25 จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PTT นั้นมี T_g เพียง 1 ค่าเท่านั้นนั้นแสดงให้เห็นว่า PLA และ PTT นั้นสามารถผสมเข้ากันได้ดี



รูปที่ 2.25 DSC Thermograms for The PTT/PLA Blends [13]

นอกจากนั้นการเพิ่มปริมาณ PTT จะช่วยทำให้ค่า T_g ของพอลิเมอร์ผสมลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ PTT มากขึ้นจะช่วยลด T_g ของ PLA ทำให้ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม กล่าวคือการทำ T_g ลดลงจะช่วยเพิ่มสมบัติการยืดตัวของ PLA ให้มาก

ขึ้น นอกจากนั้นการเพิ่ม PLA เท่ากับว่าการเกิดผลึกของ PTT มีแนวโน้มลดลงเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2.11 ซึ่งดูได้จากค่า H_m มีแนวโน้มที่ลดลง ทั้งนี้มาจากสาเหตุที่โครงสร้างส่วนที่เป็นอสัณฐานของ PLA กีดขวางการเกิดผลึกของ PTT

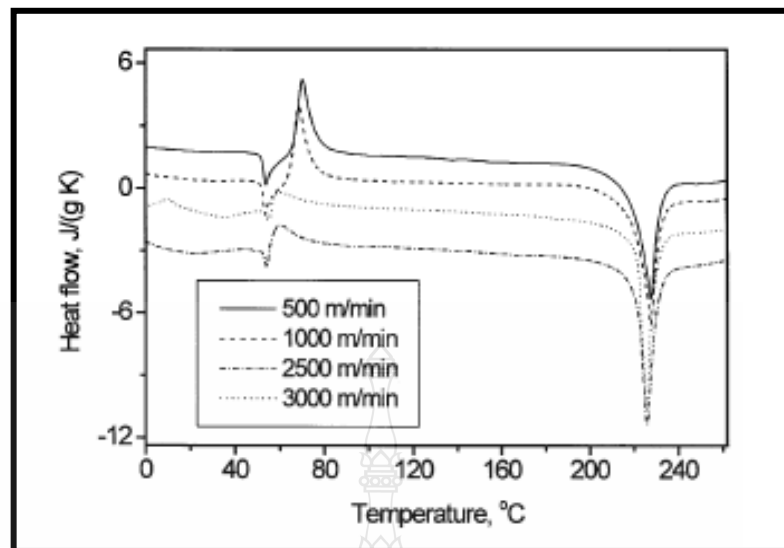
ตารางที่ 2.11 The Glass Temperatures, Melt-Crystallization Temperatures, and Melting

Temperatures of PTT/PLA [13]

Table 1 The glass temperatures, melt-crystallization temperatures, and melting temperatures of PTT/PLA blends

Sample	From quenched scans		From cooling scans		From heating scans	
	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_{mc} (°C)	ΔH_{mc} (J/g)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)
PTT	45.0	85.0	169.7	48.4	227.0	52.2
90/10	45.2	91.0	166.5	43.3	224.1	48.5
80/20	45.8	95.5	162.5	43.0	218.7	45.6
70/30	46.2	99.0	157.8	39.6	213.9	41.3
30/70	49.1	109.2	154.3	14.8	211.5	19.3
20/80	50.6	113.4	151.0	11.0	210.2	14.2
10/90	54.5	118.0	149.0	4.9	207.5	8.3
PLA	62.0	–	–	–	–	–

J.S. Grebowicz และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของเส้นใย Undrawn PTT โดยได้นำพอลิเมอร์ PTT ผ่านกระบวนการปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลว โดยเปลี่ยนความเร็วจาก 500-5000 m/min พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงวิเคราะห์โดยใช้ Thermo-Mechanical Analyzer (TMA) ที่แรงและการยึดตัวคงที่ โดยโครงสร้างของเส้นใยจะวิเคราะห์โดย Birefringence, Density, Wide-Angle X-Ray Diffraction (WAXD) และ Differential Scanning Calorimetry; (DSC) จากการศึกษาพบว่า Complex Thermo-Mechanical Behavior ทั้งการยึดตัวและการหดตัวของเส้นใย การหดตัวสูงสุด กับความเร็วในการปั่นเส้นใย สามารถอธิบายโครงสร้างของเส้นใยเริ่มต้นกับเส้นใยที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เกิดขึ้น ด้วยการเพิ่มขึ้นความเร็วในการดึง (Take-Up Speed) การเรียงตัวของโมเลกุลและความเป็นผลึกของเส้นใยเพิ่มสูงขึ้น เส้นใยที่ปั่นด้วยความเร็วต่ำจะ Crystallize เมื่อถูก Heat สูงกว่า T_g ผลที่ได้นี้เป็น Cold Crystallization ที่ตรวจสอบโดย DSC ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 Cold Crystallization; DSC [14]

R. Kotek, D.W. Jung และ B. Smith [15] ได้ศึกษาพฤติกรรมของ PTT ที่ผลิตด้วยความเร็วในการผลิตเส้นใย 2000 ถึง 6000 เมตรต่อนาที ได้ศึกษาทั้งความแข็งแรงของเส้นใย, สมบัติด้านแสง (Birefringence), Sonic Modulus, สมบัติเชิงความร้อน (DSC), สมบัติการย้อม (Dyeing Properties) และผลของการกักร่อนด้วยด่าง (Alkaline Hydrolysis) ผลที่ได้นั้นพบว่า เส้นใย PTT ที่ผลิตได้จะมีความแข็งแรงที่สูงขึ้น, Sonic Modulus สูงขึ้น แต่ความสามารถในการยัดตัวลดลง เมื่อความเร็วในการผลิตเส้นใยสูงขึ้น โดยเทียบกับสมบัติเชิงความร้อนที่ได้จาก DSC ส่วนผลที่ได้จากการย้อมด้วยสีดีสเพิร์ท (Disperse Dye) C.I. Disperse Blue 56 เส้นใยสามารถย้อมได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเดือด โดยได้ทำการทดลองย้อมที่ 65 และ 75 °C

J. Ramiro, J.I. Equiazabal and J. Nazabal [16] ได้ศึกษาผลของการทำ Reprocessing โดยทำ Extrusion จำนวน 4 รอบ โดยใช้ Corterra 509200 จาก Shell Chemical ใช้ Twin Screw Extrusion ในแต่ละครั้งจะให้เป็นเม็ด แล้วจึงนำไปทำการขึ้นรูปด้วย Injection Molding แล้วนำมาทดสอบทั้งด้านกายภาพ และโครงสร้าง ผลของการ Reprocess ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของ PTT ลดลง แต่โครงสร้างทางเคมีไม่เปลี่ยนแปลงและ PTT เกิดการเหลืองเกิดขึ้น Crystallinity เพิ่มขึ้นเล็กน้อย Specific Volume ของ Amorphous Phase เพิ่มขึ้นเล็กน้อย Young' Modulus ลดลงเล็กน้อย และ Yield

Stress ก่อนข้างคงที่ และ Break Tensile และ Impact Properties ลดลง อย่างไรก็ตาม PTT ยังคง Ductile แม้ว่าผ่านการ Extrude ถึง 4 รอบ ซึ่งอธิบายได้ว่า Molecular Weight ที่สูงกว่า Critical Molecular Weight ที่มีผลต่อการ Entanglement ซึ่งเป็นตัววัดการ Reprocess ที่เหมาะสมได้

Jing Wu และคณะ [17] ได้ทำการคำนวณ Mesophase Percentage ของพอลิเมอร์เส้นใย PTT จาก 2D Wide-Angle X-ray Scattering Pattern โดยที่เส้นใย PTT ผลิตจากการม้วนเก็บเส้นใยที่ความเร็ว 970 ถึง 4185 เมตรต่อนาที ผลที่ได้คือ Mesophase Percentage เพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วม้วนเก็บ 2550 เมตรต่อนาที และจะลดลงเมื่อม้วนเก็บเส้นใยด้วยความเร็วสูงขึ้น ซึ่งเป็นเพราะเกิด Crystalline Phase กับเส้นใยขณะการผลิตเกิดจาก Stress-Induced Crystallization ที่มีความเร็วม้วนเก็บที่ 3050 ถึง 4185 เมตรต่อนาที ซึ่งลักษณะนี้ก็เกิดขึ้นกับ PET ด้วยเช่นเดียวกัน



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัย แบ่งออกเป็นวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ พร้อมด้วยแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ขั้นตอนวิธีการในการเตรียมชิ้นงาน การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมและเส้นใยผสม

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

3.1.1 วัสดุ

ตารางที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุ	เกรด/ชื่อทางเคมี	บริษัท
1.พอลิไตรเมทิลีน เทเรฟทาเลท(Polytrimethylene Terephthalate): PTT	509200	ประเทศจีน
2.พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA)	2003D	(Nature works, LLC, USA)

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือ	บริษัท/รุ่น
1.เครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนคู่ (Twin Screw Extruder)	(Brabender D-47055 Duibury, Germany)
2.เครื่องทดสอบการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลลอริเมทรี	NETZSCH รุ่น DSC 200 F3

(Differential Scanning Calorimetry)	
3.เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index, MFI)	XRL-400A ผลิตจากประเทศจีน
4.เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Rheometer)	Gemini 200HR nano(Malvern Instruments)
5.เครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว (Single Screw Extruder: ThermoHaake® PolyDrive)	ประเทศเยอรมัน
6.เครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Hills:Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine)	LBS-100
7.เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)	
8.เครื่องทดสอบความแข็งแรงตามความยาวของเส้นใย (Tenacity) และทดสอบค่าการยืดตัวของเส้นใย	Instron
9.เครื่องทดสอบสมบัติการหดตัวของเส้นใย (%Shrinkage)	

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นในการเตรียม พอลิเมอร์ วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

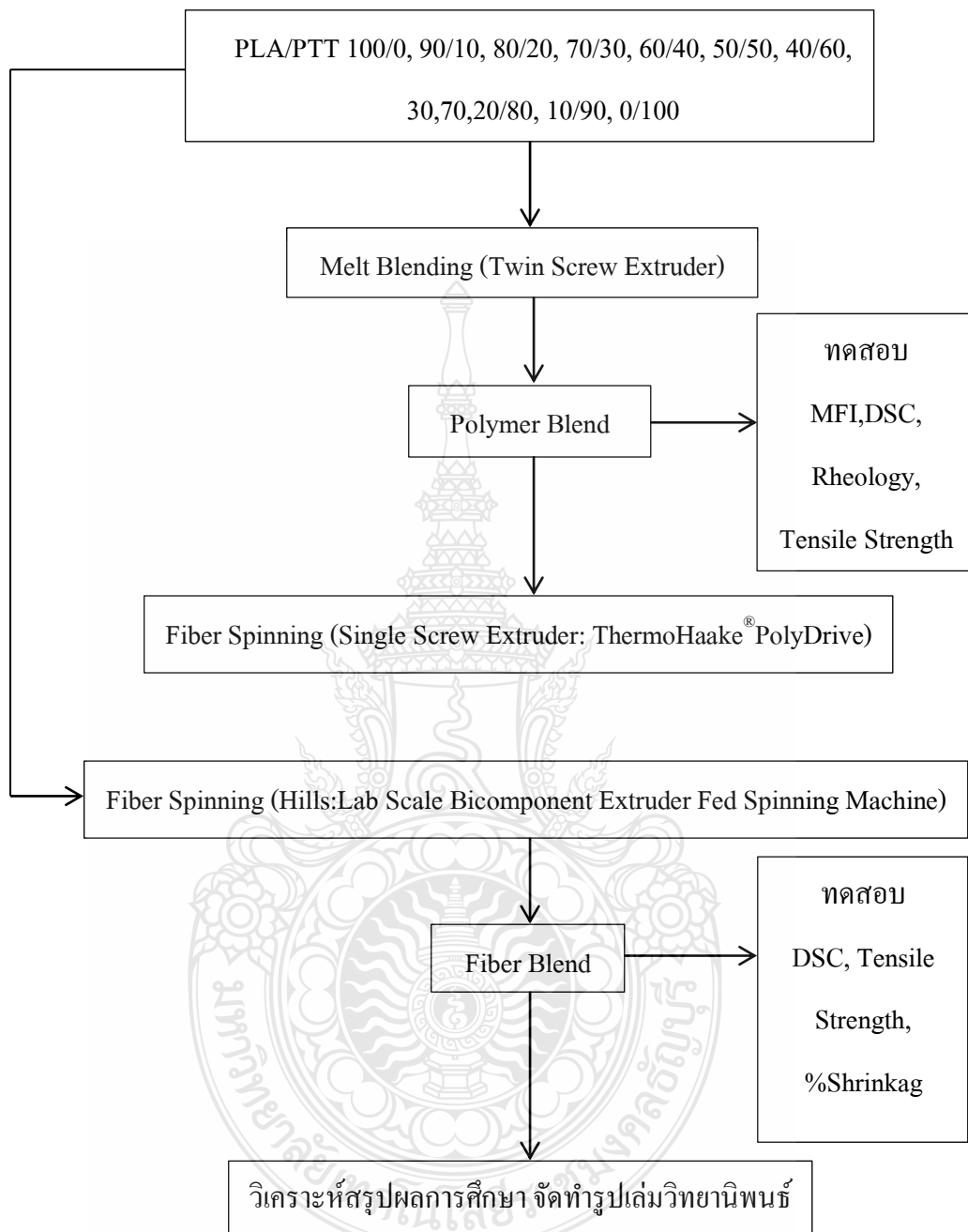
3.2.2 ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PTT

3.2.3 ทดสอบเม็ดพอลิเมอร์ผสมของ PLA/PTT เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ผสม

3.2.4 ศึกษาการเตรียมเส้นใยผสมโดยการขึ้นรูปเส้นใยระหว่าง PLA/PTT

3.2.5 ทดสอบสมบัติเชิงกลของเส้นใยผสมของ PLA/PTT

3.2.6 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการวิจัย

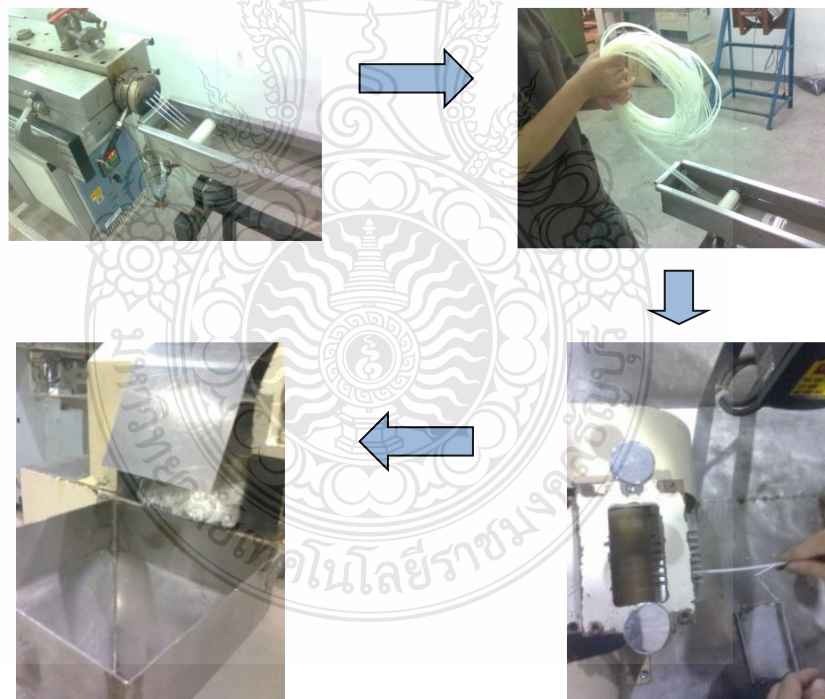


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.3 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT

3.3.1 ขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (Twin Screw Extruder)

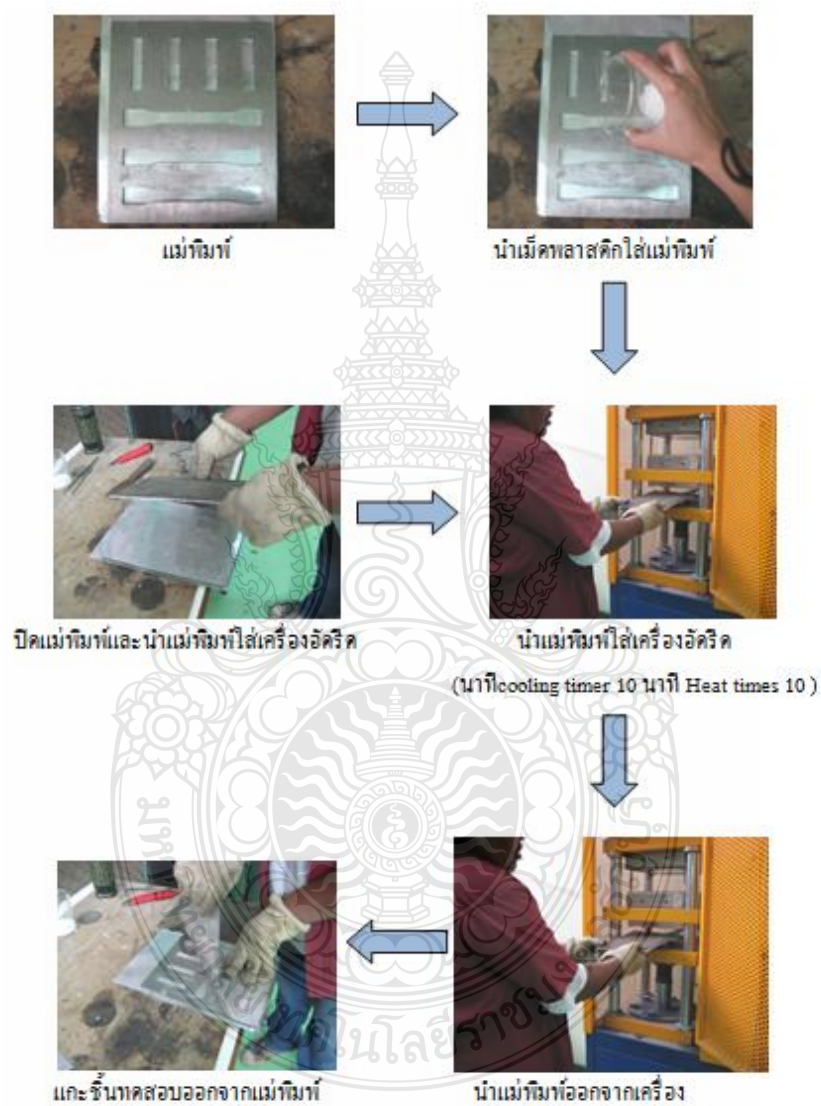
มีขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (Twin Screw Extruder): Brabender รุ่น D-47055 Duibury (ประเทศเยอรมัน) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 mm จำนวน 4 รู เตรียมเม็ดพลาสติกพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PTT เพื่อนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (Twin Screw Extruder) โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PTT ที่อัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 และ 0/100 (%wt) ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ 270 °C ความเร็วรอบสกรู 80 รอบต่อนาที และตัดเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องตัดพลาสติก (Cutter) ที่ความเร็ว 50 รอบต่อนาที โดยก่อนการอัดรีดเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (Twin Screw Extruder) จะทำการอบเม็ดพอลิเมอร์ผสมเพื่อขจัดความชื้นที่ 80 °C อย่างน้อยเป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีขั้นตอนแสดงการอัดรีดดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่

3.3.2 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบ

นำพอลิเมอร์ตัวอย่าง มาทำการอัดขึ้นรูป (Compression) เป็นแผ่นทดสอบที่อุณหภูมิ 210 °C, Preheat Time 10 นาที, Full Pressure 10 นาที และ Cooling Time 10 นาที ซึ่งการเตรียมในแต่ละครั้งจะได้ชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบ Tensile และ Impact ในการเตรียมครั้งเดียว ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบด้วยเครื่อง Compression Molding

3.3.3 ขั้นตอนการทดสอบเม็ดพอลิเมอร์ผสม

1. ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)

เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้สำหรับวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่จำเป็นสำหรับการทำให้ตัวอย่างและสารอ้างอิงมีอุณหภูมิสูงขึ้น ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ : ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) DSC 200 F3 ของ NETZSCH

วิธีการทดสอบ

1. ทดสอบพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการอัดรีด Twin Screw Extruder โดยมีตัวอย่าง คือ PLA/PTT ที่อัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 และ 0/100 (%wt)

2. โดยการเตรียมตัวอย่างละ 5-10 มิลลิกรัม

3. อัตราการเพิ่มความร้อน 10 °C/min จากอุณหภูมิ 30 °C จนถึง 250 °C โดยการรักษาอุณหภูมิที่ 250 °C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัด Thermal History แล้วลดความร้อน 10 °C/min จากอุณหภูมิ 250 °C ลงมาจนถึง 30 °C แล้วทำการวิเคราะห์ผลที่ได้

2. ทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index, MFI)



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow Index)

เครื่องมือที่ใช้: Melt Flow Indexer รุ่น XRL-400A ผลิตจากประเทศจีน

วิธีการทดสอบ

1. นำเม็ด พอลิเมอร์ผสม ที่ได้รับการผสม (Compounded) มาแล้วนั้น ไปทำการทดสอบการไหล เพื่อหาค่า Melt Flow Index ที่อุณหภูมิ 210 °C ที่น้ำหนักกดเท่ากับ 2.16 Kg โดยค่า MFI (Melt Flow Rate) ที่ได้ระบุเป็นน้ำหนักของพอลิเมอร์ภายในเวลา 10 นาที

2. จากเครื่อง Melt Flow Indexer คือ Melt Flow Index (Melt Flow Rate) จะได้รับการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3. ทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ทางรีโอโลยี (Rheology Testing)

เป็นการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุภายใต้อิทธิพลของความเค้น โดยการวิเคราะห์ลักษณะของการไหลของพอลิเมอร์ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการผลิตและขึ้นรูปจะเป็นตัวชี้วัดถึงความสามารถในการผลิต



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความหนืด (Rheology Testing)

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ : เครื่องทดสอบความหนืด (Rheometer : Gemini 200HR nano(Malvern Instruments))

สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ

- ความหนาของตัวอย่าง: 1 mm
- หัววัด: แผ่นขนาน (Parallel Plate) 2.5 cm
- เทคนิค: Shear Rate Sweep Test
- อุณหภูมิ: 270 °C
- อัตราเฉือน: 0.1-100 R/S

4. ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)

การทดสอบการต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของเม็ดพอลิเมอร์โดยมาตรฐาน ASTM D 638 โดยการทดสอบเป็นการทดสอบสมบัติด้านทางแรงดึงตามยาว โดยการทดสอบจะนำชิ้นงานทดสอบที่ได้รับการขึ้นรูปเป็น Drum Bell จากนั้นทำการจับยึดที่ Clamp แล้วมีการยืดตัวอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วที่ใช้ในการดึงคือ 50 mm/min

เป็นการดึงขึ้นตัวอย่างทดสอบจนขาดออกจากกัน ในขณะเดียวกันจะมีการบันทึกแรงที่ใช้ในการดึง และระยะยืดของชิ้นตัวอย่างทดสอบด้วยเครื่องบันทึก เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง เมื่อดึงขึ้นตัวอย่างที่มีสมบัติแข็งแรงอย่างต่อเนื่องจนเกิดการแตกหัก ผลจากการวัดแรงดึงที่กระทำต่อชิ้นตัวอย่าง ณ ตำแหน่งที่เกิดการแตกหัก เรียกว่าความเค้นสูงสุด (Ultimate Tensile Stress) หรือความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) แสดงดังรูปที่ 3.7

วิธีการทดสอบ

1. นำชิ้นงานคัมเบล มาติดหมายเลขแต่ละชิ้นงานทดสอบให้ชัดเจน วัดความกว้างและความหนาของชิ้นงานที่นำมาทดสอบ โดยทำการวัดค่า 3 ช่วง คือ ช่วงต้น ช่วงกลาง และ ช่วงปลาย บันทึกค่าที่ได้เพื่อใช้ในการคำนวณ

2. ทำการวัด Gauge Length แล้วทำเครื่องหมายแสดงช่วงของ Gauge Length ไว้

3. นำชิ้นงานคัมเบลที่เตรียมไว้ไปทดสอบแรงดึง โดยใช้ความเร็วในการดึง 10 cm/min และ Lode cell ขนาด 100 นิวตัน

4. บันทึกข้อมูล Tensile Strength Young's Modulus และ Percent Strain at Break และทำการทดสอบเช่นเดิมกับทุกชิ้นงาน ตัวอย่างละ 3 ชิ้น

5. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง หาคความสัมพันธ์เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน



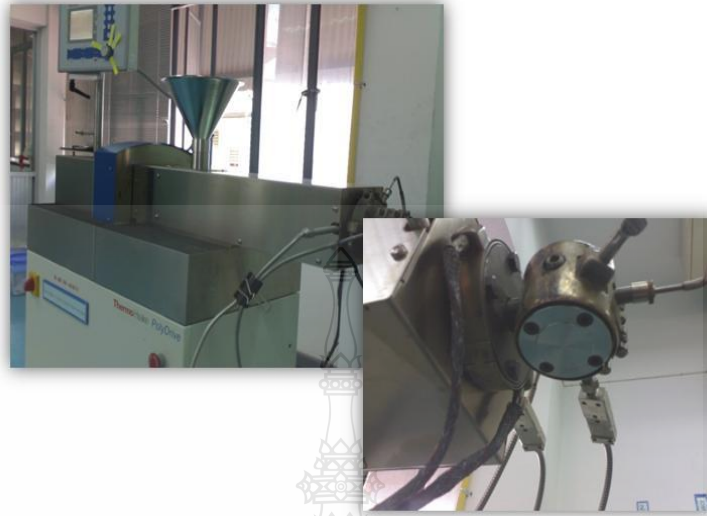
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง(Tensile Strength)

3.4 การเตรียมเส้นใยผสม PLA/PTT

3.4.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปเส้นใย PLA/PTT

1. การขึ้นรูปเส้นใยแบบหลอมเหลวจากพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว (Single Screw Extruder: ThermoHaake® PolyDrive)

พอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ได้นำมาทำการขึ้นรูปเส้นใยด้วยเครื่องอัดรีดเส้นใยขนาดทดลอง ด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยชนิดอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว (Single Screw Extruder: ThermoHaake® PolyDrive) เพื่อศึกษาลักษณะของเส้นใยที่สามารถขึ้นรูปได้ โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 270 °C ความเร็วรอบสกรู 8 รอบต่อนาที ทำการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/ PTT ที่อัตราส่วนการผสมที่ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)



รูปที่ 3.7 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว (Single Screw Extruder: ThermoHaake® PolyDrive)

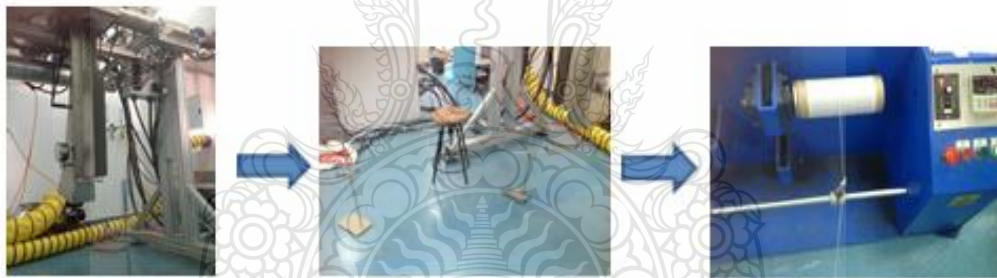
2. การขึ้นรูปเส้นใยผสม PLA/PTT ด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ

(Hills:Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine)

ทำการขึ้นรูปเส้นใยที่ได้จากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PTT ที่อัตราส่วนผสม 100/0, 10/90, 20/80, 30/70, 40/60, 50/50 และ 0/100 (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Hills:Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine) รุ่น LBS-100 ดังภาพ 3.9 โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 270 °C ด้วยความเร็วรอบสกรู 8 รอบต่อนาที และทำการม้วนเก็บเส้นใยที่ความเร็วในการม้วนเก็บที่ 50, 100, 150 m/min ดังรูปที่ 3.10 ก่อนทำการขึ้นรูปเส้นใยด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Hills:Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine) นั้นจะต้องอบเม็ดพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT แต่ละอัตราส่วนที่เตรียมไว้ทั้งหมด 7 ตัวอย่างอบเพื่อขจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 80 °C อย่างน้อยเป็นเวลา 4 Hr



รูปที่ 3.8 เครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Hills:Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine)



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการม้วนเก็บเส้นใยที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ

3.4.2 การทดสอบเส้นใยผสม PLA/PTT

1. ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)

เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้สำหรับวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่จำเป็นสำหรับการทำให้ตัวอย่างและสารอ้างอิงมีอุณหภูมิสูงขึ้นภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ : ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) DSC 200 F3 ของ NETZSCH

วิธีการทดสอบ

1. ทดสอบพอลิเมอร์ที่ PLA/PTT ที่อัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ 0/100, 10/90, 20/80, 30/70, 40/60, 50/50 และ 100/0 (%wt)
2. โดยการเตรียมตัวอย่างละ 5-10 มิลลิกรัม
3. อัตราการเพิ่มความร้อน 10 °C/min จากอุณหภูมิ 30 °C จนถึง 250 °C โดยการรักษาอุณหภูมิที่ 250 °C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัด Thermal History แล้วลดความร้อน 10 °C/min จากอุณหภูมิ 250 °C ลงมาจนถึง 30 °C แล้วทำการวิเคราะห์ผลที่ได้

2. ทดสอบสมบัติการหดตัวของเส้นใย (Fiber Shrinkage Testing)



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบสมบัติการหดตัวของเส้นใย (%Shrinkage)

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ : Boiling Shrinkage ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 5104-02

วิธีการทดสอบ

1. นำเส้นใยที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Hills:Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine) ดังรูปที่ 3.16 มาตัดแล้วผูกให้เป็นปมหัวท้ายโดยให้มีระยะห่างระหว่างปม 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

$$\% \text{ Shrinkage} = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100 \quad (3.1)$$

L_0 = ความยาวของเส้นใยก่อนดัม

L_1 = ความยาวของเส้นใยหลังดัม

3. ทดสอบสมบัติเชิงกลของเส้นใยโดยทดสอบความแข็งแรงตามความยาวของเส้นใย (Tenacity) และทดสอบค่าการยืดตัวของเส้นใย (Elongation)



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความแข็งแรงตามความยาวของเส้นใย (Tenacity) และทดสอบค่าการยืดตัวของเส้นใย (Elongation)

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ : Instron ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 3822-01

วิธีการทดสอบ

1. เตรียมเส้นใยที่ได้จากการม้วนเก็บทำการทดสอบตัวอย่างละ 5 ครั้ง
2. ใช้ Load Cell ขนาด 25 กิโลนิวตัน
3. ตั้งระยะห่างระหว่างปากจับเส้นด้ายด้านบนและด้านล่าง (Gauge Length) 250 มิลลิเมตร ± 3 มิลลิเมตร
4. ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวจับเส้นด้าย 30 มิลลิเมตรต่อนาที

5. ทำการปรับเครื่องทดสอบแรงดึงให้อยู่ในตำแหน่งศูนย์ (Set Zero)

6. ยึดเส้นใยด้วยปากจับเส้นใยและขึ้นทดสอบซึ่งต้องอยู่ในแนวกึ่งกลางระหว่างขอบด้านในของปากจับเส้นใยทั้งสองด้าน ทำการยึดเส้นใยให้แน่น โดยเส้นใยต้องมีความสม่ำเสมอตลอดเส้น (ในการยึดเส้นใยจะต้องไม่มีแรงดึงมาเกี่ยวข้อง)

7. เปิดเครื่องทดสอบ โดยเครื่องจะทำการดึงเส้นใยไปจนกระทั่งเส้นใยขาดเครื่องจะหยุดทำงาน จากนั้นบันทึกค่าของแรงดึงและค่าการยืดตัวของเส้น



บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT

4.1.1 ผลจากการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่

(Twin Screw Extruder)

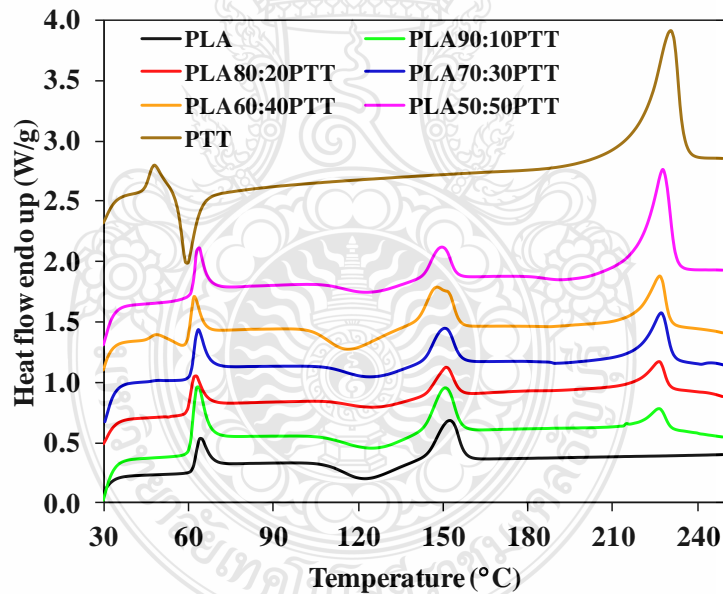
จากการอัดรีดพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PTT ที่อัตราส่วนการผสมที่ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80, 10/90, และ 0/100 (%wt) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (Twin Screw Extruder) โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 270 °C พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน PLA ในปริมาณที่มากนั้น PLA เกิดการเสื่อมสภาพ มีสีเหลือง แต่เมื่อลดอุณหภูมิในการหลอมเหลวลง ทำให้ PTT เกิดการแข็งตัวไม่สามารถหลอมเหลวได้เนื่องจาก อุณหภูมิที่ใช้คือ 210 °C ต่ำเกินไป จึงทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกมาไม่เป็นเส้น แต่มีลักษณะเป็นก้อนกระจุก ทำให้ไม่สามารถเข้าเครื่องตัดเม็ดให้ทำขนาดเม็ดพอลิเมอร์ทั่วไปได้ จึงนำไปบด เพื่อให้ได้ขนาดที่เล็กทำเม็ดพอลิเมอร์ทั่วไป แล้วนำเม็ดที่ได้จากการบดไปทดสอบสมบัติ และพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมหลังจากการบด

4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT ที่อัตราส่วนการผสมที่ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, และ 0/100 (%wt) พบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสม (รูปที่ 4.2) แสดงให้เห็นชัดเจนว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเข้าหากัน แสดงว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT เป็นการผสมกันแบบไม่เข้ากัน เนื่องจากอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดต่างกันค่อนข้างมาก ค่าความเป็นผลึก (%Crystallinity) ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของ PTT มีผลทำให้ PLA เกิดผลึกได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเป็นผลึกของ PTT ลดลง เมื่อมีปริมาณของ PLA เพิ่มมากขึ้น [13]



รูปที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT

Sample	PLA			PTT		
	T_m (°C)	T_c (°C)	% X_c	T_m (°C)	T_c (°C)	% X_c
PLA100%	152.6	-	18.2	-	-	-
PLA90/10PTT	151.0	88.0	19.5	226.6	189.1	7.8
PLA80/20PTT	151.4	92.7	21.9	226.5	186.0	11.7
PLA70/30PTT	150.5	95.3	20.6	227.1	185.3	23.8
PLA60/40PTT	148.1	94.7	22.9	226.9	182.1	26.2
PLA50/50PTT	149.7	95.7	13.4	227.9	182.0	51.0
PTT100%	-	-	-	230.7	183.7	80.9

4.1.3 ผลการทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม (Melt Flow Index , MFI)

ผลการทดสอบสมบัติดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PTT ที่อัตราส่วนการผสมที่ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80, 10/90, และ 0/100 (%wt) เนื่องจากต้องทดสอบที่อุณหภูมิสูงถึง 250 °C เพื่อให้ PTT หลอมเหลว ทำให้พบว่าในสูตรที่มี PLA ผสมอยู่ในปริมาณที่มากขึ้น จะมีค่า MFR สูงมาก โดยเฉพาะ สูตรที่ทำการผสม PLA/PTT ที่อัตราส่วนการผสม 100/0, 90/10 และ 80/20 (%wt) มีค่า MFR สูงถึง 94.97, 97.25 และ 81.24 (g/10min) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการเสื่อมสภาพของ PLA ทำให้ดัชนีการไหลสูงขึ้นอย่างผิดปกติ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 [18]

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA / PTT ที่อุณหภูมิ 250°C

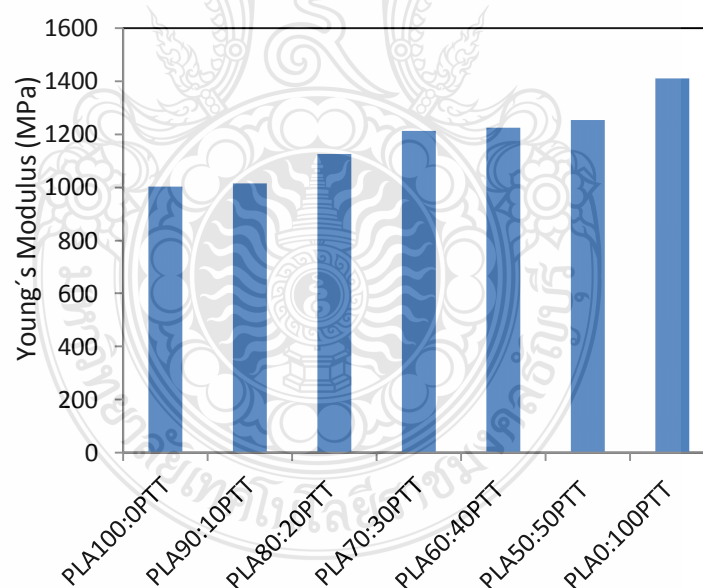
วัสดุที่ใช้ทดสอบ	Melt Temp (°C)/ Load (kg)	น้ำหนัก (g)	MFR (g/10 min)
PLA100/0PTT	250/2.16	1.083	94.97
PLA90/10PTT	250/2.16	1.621	97.25
PLA80/20PTT	250/2.16	1.354	81.24
PLA70/30PTT	250/2.16	1.094	65.64
PLA60/40PTT	250/2.16	1.025	61.49
PLA50/50PTT	250/2.16	0.999	59.93
PLA40/60PTT	250/2.16	0.825	49.50
PLA30/70PTT	250/2.16	0.828	49.68
PLA20/80PTT	250/2.16	0.82	49.20
PLA10/90PTT	250/2.16	0.647	38.82
PLA0/100PTT	250/2.16	0.681	40.86

4.1.4 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)

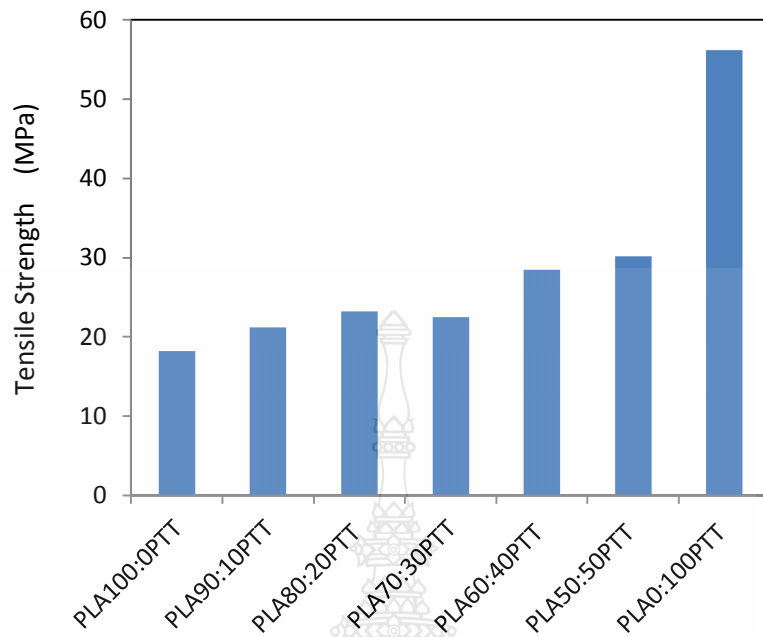
ในการเตรียมตัวอย่างระหว่าง PLA กับ PTT พบปัญหา กล่าวคือ อุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดต่างกันค่อนข้างมาก ในการขึ้นรูปด้วย Hot Compression จึงทำได้ยากมาก โดยการขึ้นรูป PTT ต้องใช้อุณหภูมิถึง 270 °C ทำให้ PLA ที่ผสมอยู่เกิดการเสื่อมสภาพอย่างเห็นได้ชัด ทั้งสีและกลิ่น ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำที่ 210 °C เพื่อรักษาสภาพของ PLA จะพบว่า PTT ไม่หลอมเหลว จากตารางการทดสอบที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า สมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PTT มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ PLA เพิ่มขึ้น เนื่องจากในการเตรียมชิ้นงาน ต้องเตรียมที่ 270 °C จึงทำให้ PLA ได้เริ่มเสื่อมสภาพ ทำให้สมบัติทางกลที่ได้ออกมาไม่ดีเท่าที่ควร ดังรูปที่ 4.3, 4.4 และรูปที่ 4.5 [19]

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ของเม็ดพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA / PTT

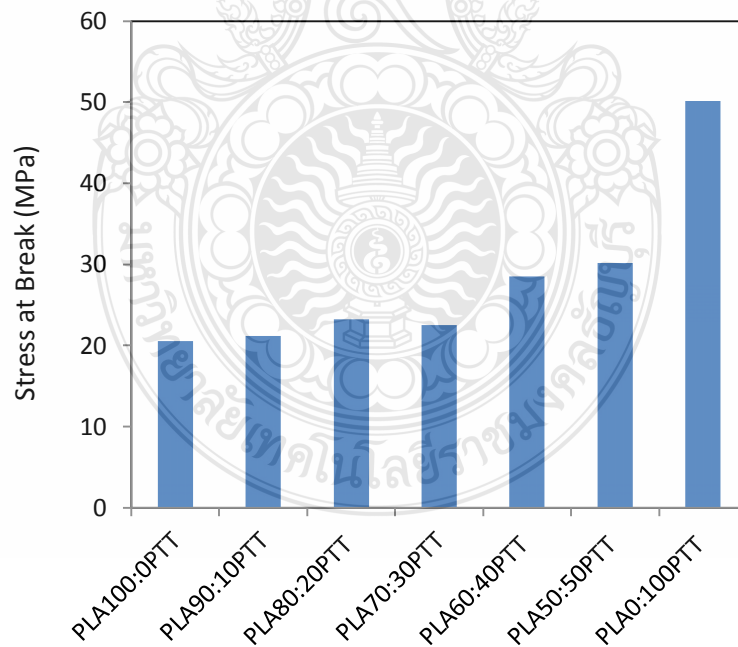
Sample	Young's Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Stress at Break (MPa)
PLA100:0PTT	1002	18.2	20.5
PLA90:10PTT	1015	21.2	21.2
PLA80:20PTT	1125	23.2	23.2
PLA70:30PTT	1214	22.5	22.5
PLA60:40PTT	1226	28.5	28.5
PLA50:50PTT	1254	30.2	30.2
PLA0:100PTT	1412	56.2	50.12



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบแสดงค่า Young's Modulus ของเม็ดพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT



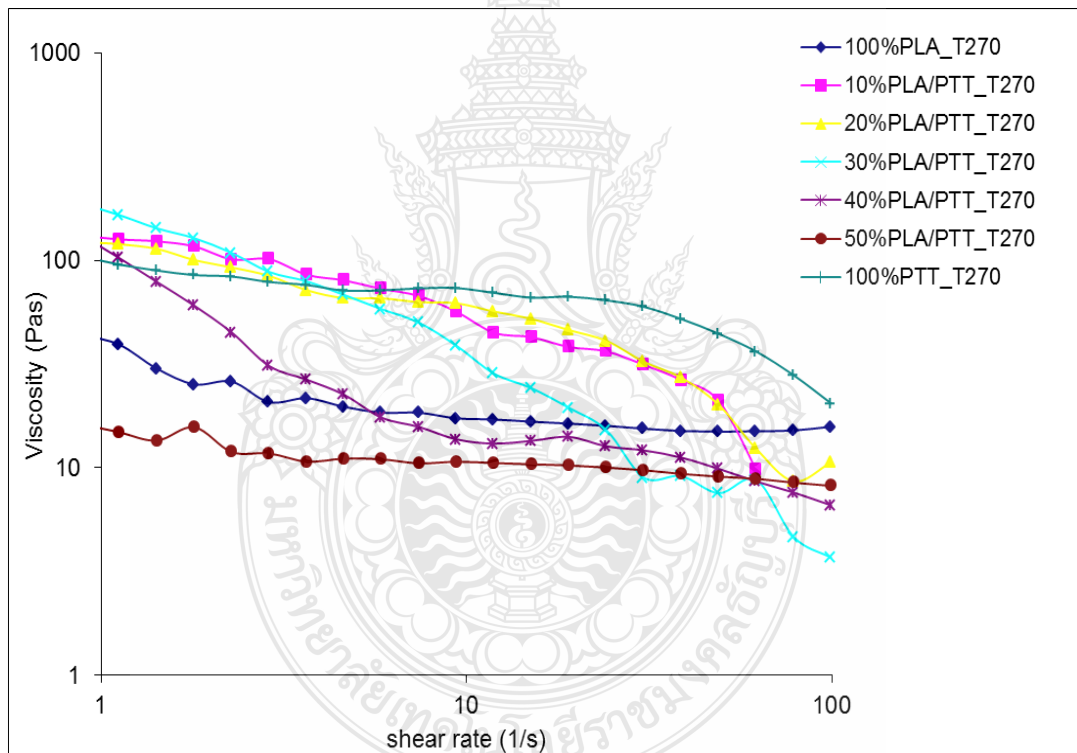
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบแสดงค่า Tensile Strength ของเม็ดพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบแสดงค่า Stress at Break ของเม็ดพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PTT

4.1.5 ผลการทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ (Rheology Testing)

จากการทดสอบพบว่า ที่อุณหภูมิการทดสอบ 270 °C PLA มีค่าความหนืดน้อยกว่า PTT โดยที่ปริมาณ PLA ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณการผสม PLA มากกว่า 20 %wt พบว่า ค่าความหนืดมีแนวโน้มลดลงค่อนข้างมาก และลักษณะกราฟเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น (Shear Rate:1-100 1/s) ค่าความหนืดมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง (ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน: พฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียนแบบน้ำ) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถควบคุมขนาดของเส้นใยได้ ดังนั้นการ PLA ใน PTT เพื่อขึ้นรูปเป็นเส้นใยจึงไม่ควรผสมเกิน 20 %wt ดังแสดงดังรูปที่ 4.6 [20]



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT

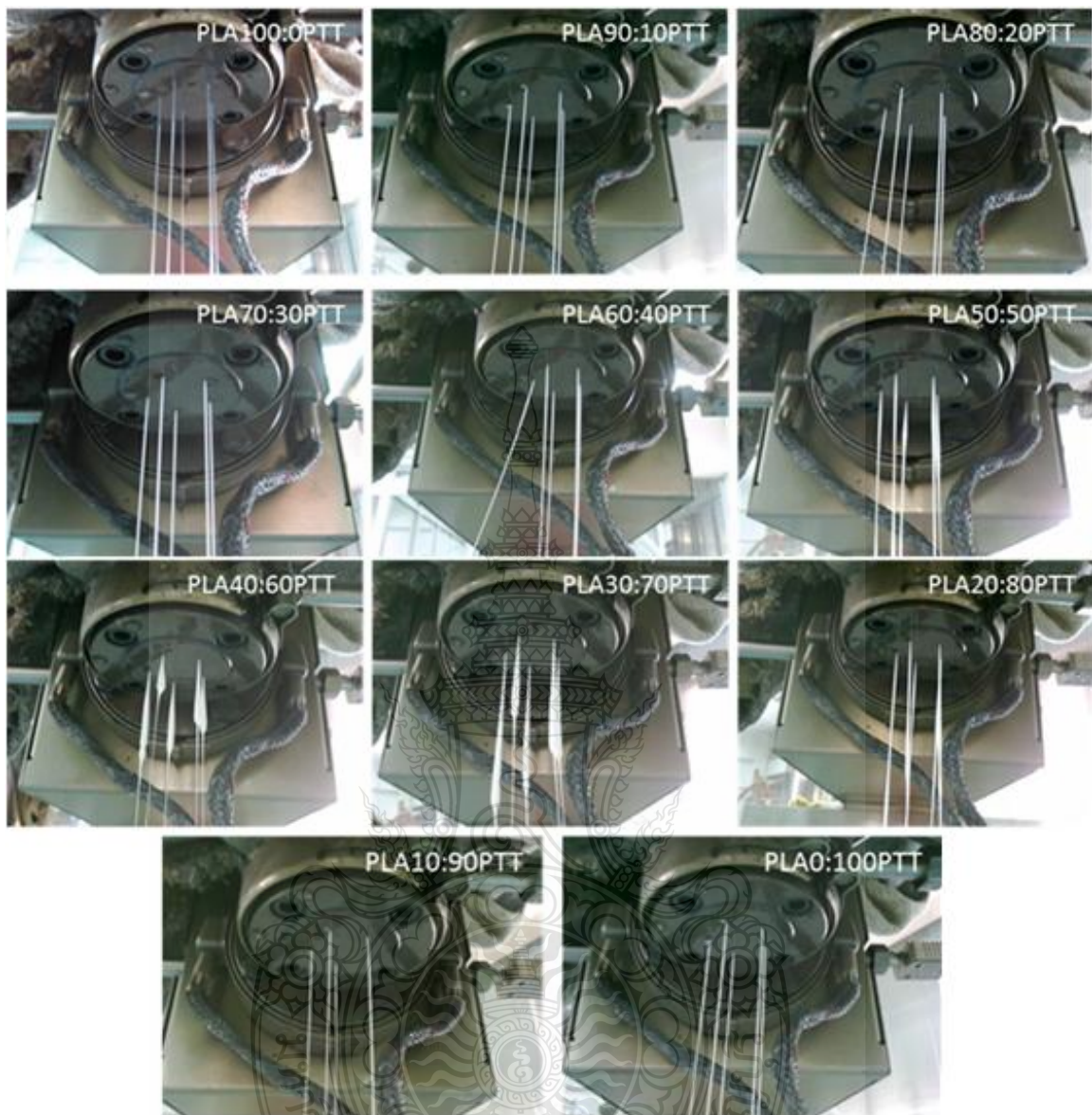
4.2 ผลการศึกษาการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ผสมและเส้นใยผสมของ PLA/PTT

4.2.1 ผลจากการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวเดี่ยว

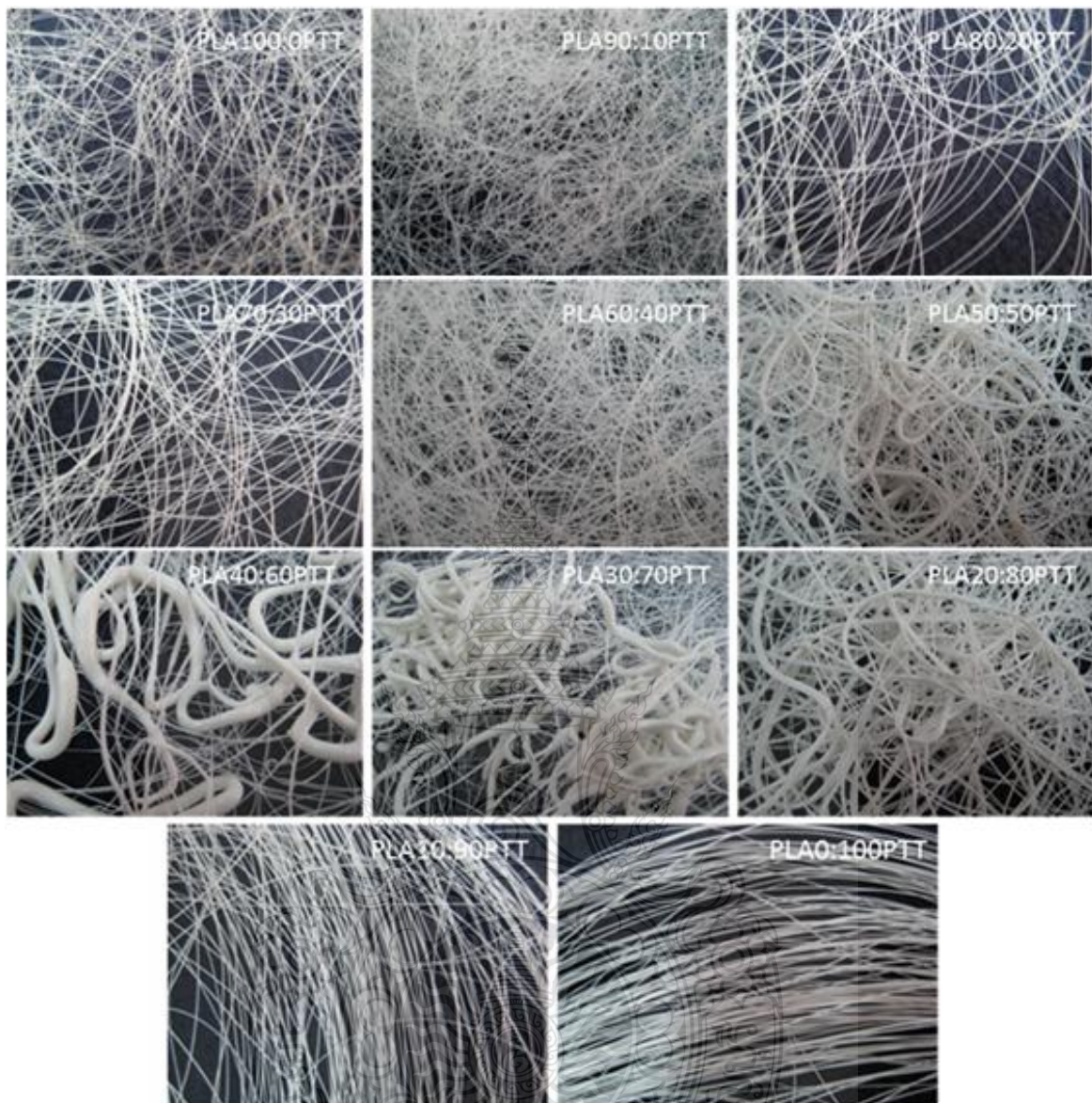
(Single Screw Extruder: ThermoHaake®)

หลังจากได้เม็ดพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT ที่อัตราส่วนการผสมที่ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80, 10/90 และ 0/100 (%wt) จากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (Twin Screw Extruder) ได้นำมาทำการขึ้นรูปเส้นใยด้วยเครื่องอัดรีดเส้นในขนาดทดลอง ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวเดี่ยว (Single Screw Extruder: ThermoHaake®) เพื่อศึกษาลักษณะของเส้นใยที่สามารถขึ้นรูปได้ โดยสภาวะและเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ของผลการขึ้นรูปแบบหลอมเหลวของเม็ดพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PTT แสดงดังรูปที่ 4.7

จากการขึ้นรูปเส้นใยของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PTT ที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80, 10/90 และ 0/100 (%wt) ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวเดี่ยว (Single Screw Extruder: ThermoHaake®) นั้นพบว่า ไม่สามารถม้วนเก็บได้ เนื่องจากเส้นใยที่ได้ออกมาจากการอัดรีด มีลักษณะไม่ราบเรียบ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้สูงเกินไปทำให้ PLA เกิดการเสื่อมสภาพ พอลิเมอร์ผสมเกิดการไหลอย่างรวดเร็วทำให้ไม่เป็นเส้นที่ราบเรียบและสวยงามเหมือน PTT 100% ทำให้ไม่สามารถนำเส้นใยไปทดสอบสมบัติได้ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 พอลิเมอร์ผสม PLA/PTT ที่ออกมาจาก Spinneret ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบหลอมเหลว ที่อุณหภูมิ 270 °C ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว Single Screw Extruder



รูปที่ 4.8 เส้นใยตกอิสระ (Free Fall) ที่ได้จากการขึ้นรูปเส้นใยแบบหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 270 °C ด้วยเครื่อง Single Screw Extruder

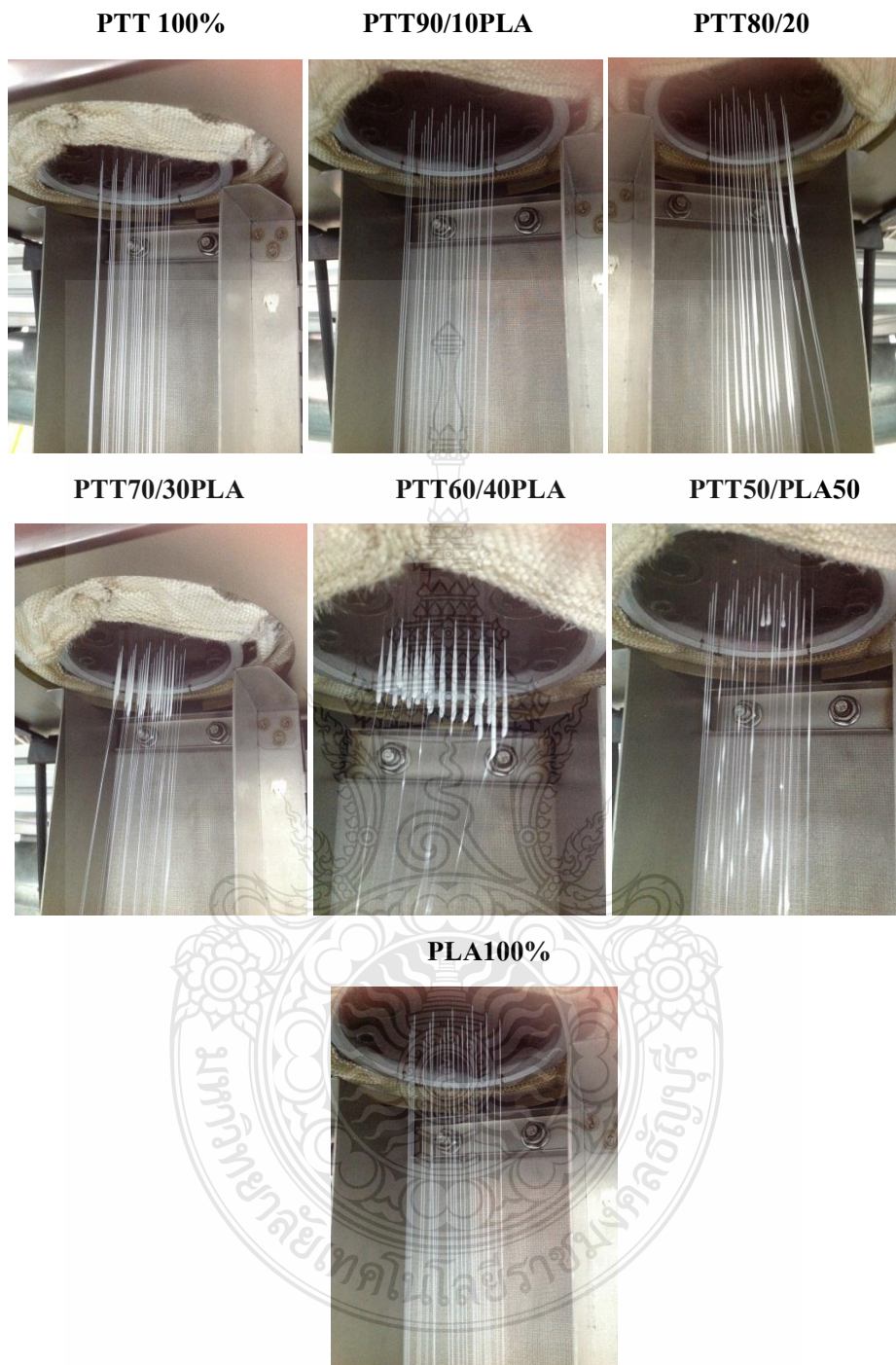
4.2.2 ผลจากการขึ้นรูปเส้นใยผสม PLA/PTT ด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Hills:Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine)

จากการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT ที่อัตราส่วน 0/100, 10/90, 20/80, 30/70, 40/60, 50/50 และ 100/0 (%wt) ด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Hills:Lab Scale

Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine) ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมที่ 270 °C ความเร็วรอบสกรู 8 rpm/min แต่ในการขึ้นรูปเส้นใยจากพอลิเมอร์ PLA 100% (%wt) นั้นขึ้นรูปที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 230 °C เนื่องจาก ไม่สามารถขึ้นที่อุณหภูมิของกระบวนการขึ้นรูปที่ 270 °C ได้ เนื่องจาก พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีอุณหภูมิในการหลอมเหลว T_m ต่างกันมาก

พบว่า พอลิเมอร์ที่ PTT 100% จะมีลักษณะการขึ้นรูปเส้นใยที่ออกมาจาก Spinnerate แบบราบรื่น ลักษณะของเส้นใยจะออกมาเป็นเส้นที่สวยงาม เส้นใยมีลักษณะชุ่ม มันเงาเล็กน้อย สามารถม้วนเก็บเส้นใยที่ความเร็ว 50, 100, 150 m/min ได้ และที่พอลิเมอร์ผสมที่ PLA/PTT 10/90 (%wt) การขึ้นรูปที่ออกมานั้นสามารถทำได้ดังเช่น PTT 100% (%wt) เช่นกัน แต่ที่พอลิเมอร์ผสมที่ PLA/PTT 20/80 (%wt) นั้น เส้นใยที่ได้ออกมาจาก Spinerate นั้น เกิดการขาดเป็นช่วงๆ เนื่องจากมีปริมาณของ PLA เพิ่มขึ้น สามารถม้วนเก็บได้ ที่ 50 และ 100 m/min เท่านั้น ที่ 150 m/min ไม่สามารถม้วนเก็บได้

และพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณของ PLA เพิ่มลงใน PTT ที่ 30/70, 40/60 และ 50/50 (%wt) นั้น พบว่า ไม่สามารถอัดรีดออกมาเป็นเส้นใยได้ เกิดการอัดรีดเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่อง เนื่องจาก อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปสูงมาก ทำให้ PLA เกิดการเสื่อมสภาพ จึงไม่สามารถอัดรีดออกมาเป็นเส้นใยได้ ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การขึ้นรูปเส้นใยผสม PLA/PTT ด้วยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Hills:Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine)

4.2.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของ PTT ที่ประมาณ 227 °C และ PLA มีอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ 150 °C โดยที่อุณหภูมิการหลอมเหลวของเส้นใยผสมแสดงถึงค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวของ PLA และ PTT อย่างเด่นชัดและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเข้าหากัน นอกจากนี้ค่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของเส้นใยผสมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน แสดงว่าเส้นใยผสม PTT/PLA เป็นเส้นใยผสมที่ไม่เข้ากัน (Immiscible Blend) ค่าความเป็นผลึก (% Crystallinity) ของ PLA ในเส้นใยผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงว่า PTT มีผลทำให้ PLA สามารถเกิดผลึกได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเป็นผลึกของ PTT ลดลง เมื่อปริมาณ PLA ในเส้นใยผสมเพิ่มมากขึ้น แสดงว่า PLA ขัดขวางการเกิดผลึกของ PTT ทำให้ PTT ในเส้นใยผสมเกิดผลึกลดลง และอาจส่งผลให้เส้นใยผสมมีค่าความแข็งแรงของเส้นใยต่ำ ดังตารางที่ 4.4 [13-21-22]

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของเส้นใยผสม PLA/PTT

Sample	T_m (°C)		T_g (°C)		%Crystallinity	
	PLA	PTT	PLA	PTT	PLA	PTT
PLA100%	148.8	-	57.9	-	30.4	-
PLA10/90PTT	-	227.8	-	43.4	-	42.3
PLA20/80PTT	148.8	227.8	-	42.6	3.6	39.7
PLA30/70PTT	152.7	226.8	58.3	43.6	4.6	39.3
PLA40/60PTT	150.4	226.6	58.1	42.4	5.9	39.7
PLA50/50PTT	151.2	226.5	58.2	43.6	7.5	39.3
PTT100%	-	227.8	-	52.5	-	43.0

4.2.4 ผลการทดสอบสมบัติการหดตัวของเส้นใย (Fiber Shrinkage Testing)

จากการทดสอบการหดตัวของเส้นใยผสมแสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าการหดตัวของเส้นใยผสม ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 270 °C เส้นใย PLA ที่ขึ้นรูปได้ เกิดการหดตัวสูงสุด (47.7%) เมื่อเปรียบเทียบกับ PTT (11.4%) ในทางกลับกันพบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง (10, 20 % wt) PLA/PTT ค่าการหดตัวมีแนวโน้มลด (0.7-4.4 % Shrinkage) อาจเนื่องมาจาก การขึ้นรูป 100% PLA ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ไม่สามารถควบคุมขนาดของ เส้นใย PLA ให้เป็นไปตามอัตราการป้อนเนื้อได้ (Throughput Rate) เนื่องจากความหนืดที่ต่ำเกินไป (พอลิเมอร์มีลักษณะการไหลที่ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราไหล) ซึ่งสังเกตได้จากความเร็วหมุนเก็บที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการหดตัวของ 100% PLA (47.7-47.4 % Shrinkage) ในขณะที่ เส้นใยพอลิเมอร์ผสม และ 100% PTT มีแนวโน้มค่าการหดตัวลดลง [15]

ตารางที่ 4.5 การหดตัวของเส้นใยผสม PTT/PLA

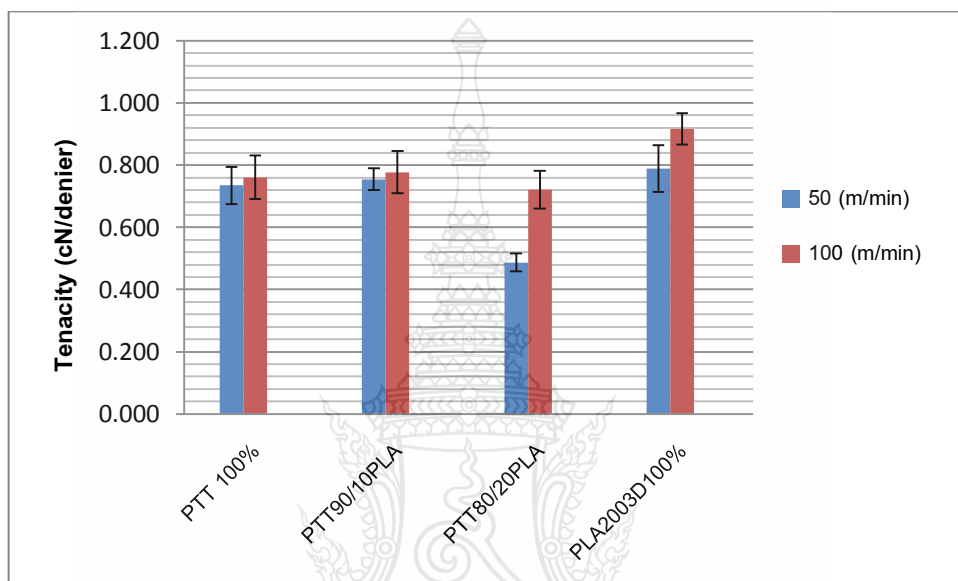
Sample	% Shrinkage (50 m/min)	% Shrinkage (100 m/min)
PLA100%	47.7	47.4
PLA10/90PTT	0.7	0.4
PLA20/80PTT	4.4	2.4
PTT100%	11.4	9.7

4.2.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงของเส้นใยผสม PLA/PTT ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรง (Tensile Strength) [23]

1. ผลการทดสอบความแข็งแรง (Tenacity) ของเส้นใยผสม PLA/PTT

จากการทดสอบสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PTT พบว่า 10% PLA/ 90% PTT ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใย มีแนวโน้มมากกว่า 100% PLA อีกทั้งความเร็วในการดึงยึดที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (จาก 50 เป็น 100 m/min)

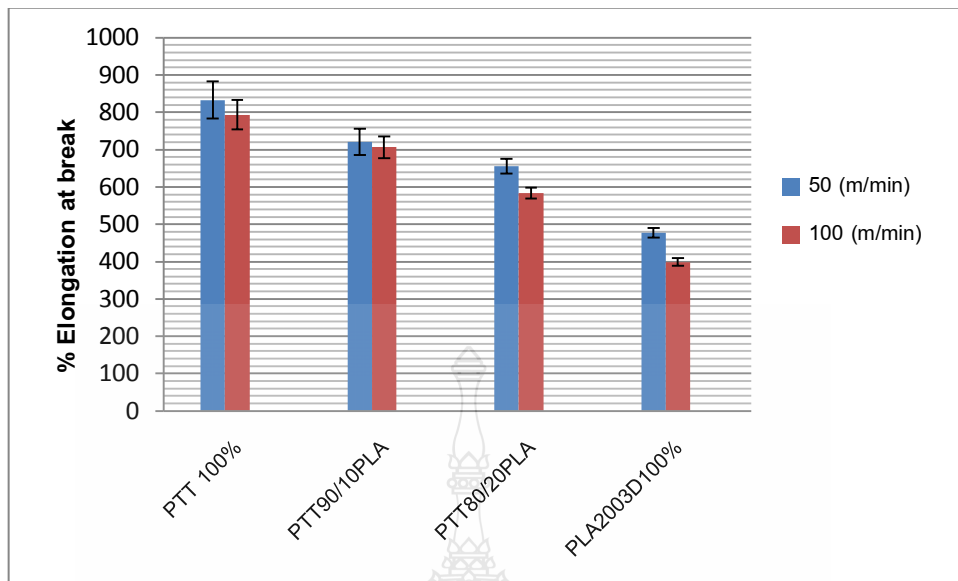
ในขณะที่เดียวกันพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการผสม PLA ใน PTT เป็น 20% (%wt) ทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใยลดลงค่อนข้างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด อีกทั้งการผสม 20% PLA ส่งผลทำให้ % Crystalline ลดลงถึง 7.7 % ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของเส้นใย ทำให้เส้นใยที่ขึ้นรูปได้มีความต้านทานต่อแรงดึงลดลง ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของเส้นใยผสม (Tenacity) ของ PLA/PTT

2. ผลการทดลองค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของเส้นใย (Elongation) ของ PLA/PTT

ค่าการยืดตัวของเส้นใย จากผลการทดลองพบว่า เส้นใย PLA มีการยืดตัวได้น้อยกว่าเส้นใย PTT ทำให้เส้นใยพอลิเมอร์ผสมมีการยืดตัวได้ลดลงเมื่อเทียบกับเส้นใย PTT เมื่อปริมาณ PLA ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น โดยที่ค่าการยืดตัวของเส้นใยผสมลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วในการม้วนเก็บจาก 50 m/min เพิ่มขึ้นเป็น 100 m/min ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ค่าการยืดตัวของเส้นใย (Elongation) ของ PLA/PTT



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

5.1.1 สรุปผลจากการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PTT พบว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติในการหลอมเหลวต่างกันค่อนข้างมาก ทำให้อัตราส่วนผสมที่มีปริมาณของ PLA ในปริมาณที่มากกว่า 20% (%wt) นั้น การผสมทำได้ยาก

5.1.2 สรุปผลจากการศึกษาสมบัติเม็ดพอลิเมอร์ผสมพบว่า พอลิเมอร์ผสม PLA/PTT นั้นผสมกันแบบไม่เข้ากัน (Immiscible Blend) ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณของ PLA มากกว่า 20 %wt นั้น สมบัติของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง

5.1.3 สรุปผลจากการเตรียมเส้นใยผสม PLA/PTT พบว่าเมื่อปริมาณของ PLA เพิ่มมากขึ้นเป็น 30, 40 และ 50% (%wt) พบว่าเส้นใยผสมไม่สามารถม้วนเก็บได้

5.1.4 สรุปผลจากการศึกษาสมบัติเส้นใยผสม PLA/PTT พบว่าเส้นใย PTT 100% ยังคงมีค่าความแข็งแรงและการยืดตัวที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA 100% เห็นได้ว่าเส้นใยผสม PLA/PTT มีความแข็งแรง แต่เมื่อให้แรงดึงไประยะหนึ่งจะเกิดการขาดของเส้นใย แสดงว่าเส้นใยมีความเปราะเนื่องจากมี PLA ผสมอยู่

ดังนั้น การนำ PLA ผสมกับ PTT ในปริมาณที่เหมาะสมนั้น ทำให้สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยยาว และสามารถนำไปใช้งานในด้านสิ่งทอได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาพอลิเมอร์ผสมและเส้นใยผสมของ PLA/PTT เพื่อให้ได้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมและสมบัติของเส้นใยผสมเป็นแนวทาง เพื่อให้ได้ปริมาณของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังนั้นควรมีการใช้พอลิเมอร์ชนิดอื่นมาผสมกัน เช่น PLA/PBS, PLA/PBT และ PLA/PBSA เป็นต้น นำมาผสมกันเพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดี

และแก้ไขปัญหาคือ อุณหภูมิในการขึ้นรูปของ PLA/PTT ต่างกันค่อนข้างมาก มีส่วนทำให้เกิดความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้ ควรมีการใช้พอลิเมอร์ที่มีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกันเพื่อให้พอลิเมอร์ทั้งสองเกิดความเข้ากันได้มากขึ้นกว่านี้



รายการอ้างอิง

- [1] จุฬากานต์ บุญมี. 2555. พลาสติกชีวภาพ ทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม. วรสารสิ่งแวดล้อมปีที่ 16 เล่มที่ 2 [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.eric.chula.ac.th/journal/ej/v16y2555/no2/article3.pdf>
- [2] เขาวพา สุวัตติ. 2554 พลาสติกชีวภาพ วรสารเพื่อการวิจัยและพัฒนา องค์การเภสัชกรรม. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.gpo.or.th/rdi/html/RDINewsYr18No4/1.pdf>.
- [3] ไบโอบพลาสติก. 2012 พลาสติก PLA (Polylactic acid)[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://enchemcom1po.wordpress.com/bioplastics-pla-poly-lactic-acid>.
- [4] P. Gruber, M. O'Brien, "Polylactides Natureworks® PLA In: Doi Y, Steinbüchel A, editors. Biopolymers in 10 volumes, volume 4, polyesters III applications and commercial products. Weinheim", Wiley-VCH (ISBN 3-527-30225-5). pp.235-49, 2002.
- [5] Shell "New TP Polyester Family Challenges Nylon, PET and PBT" (SC:2589-97), 1997.
- [6] M. Houck, R. Huff, P. Lowe, R. Menold, "Poly(trimethylene terephthalate): A "New" Type of Polyester Fibre. Forensic Science Communications" July 2001.
- [7] DuPont plans, "commercial bio-manufacture of PTT" Website of British Plastics and Rubber, Caterham, England, 2013.
- [8] Shell Chemicals, "Corterra PTT" [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.swicofil.com/ptt.html>
- [9] U. Thiele, "The Polyester Resin Family PET, PBT, PTT, PEN and Modified Polyester - Latest Stage of Development" Global Conference on, 2001.
- [10] European Man-made Fibres Association. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.cirfs.org/KeyStatistics/WorldManMadeFibresProduction.aspx>
- [11] Textile fibers classification images. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://pics4.this-pic.com>.
- [12] ความรู้และเทคนิคลยสิ่งทอ. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://www2.mtec.or.th/th/research/textile/textile_sci.html
- [13] Z. Hantao, Y. Changhai, W. Luoxin, X. Weilen, "Crystallization, hydrolytic degradation, and mechanical properties of poly(trimethylene terephthalate)/poly(lactic acid) blends," Polym. Bull., 64: pp. 471-481, 2010.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [14] J.S. Grebowicz, H. Brown, H. Chuah, J.M. Olvera, A. Wasiak, P. Sajkiewicz, and A. Ziabicki, "Deformation of Undrawn Poly(trimethylene terephthalate) (PTT) Fibers," *Polymer*, Vol. 42, pp. 7153-7160, (2001).
- [15] R. Kotek, D.W. Jung and B. Smith, "Effect of High-Speed Spinning of Physical Properties and Dyeing Kinetic of PTT Filaments," *Chemical Fibers International*, Vol. 51, pp.204-206, 2001.
- [16] J. Ramiro, J.I. Equiazabal, J Nazabal, "Effect of Reprocessing on the Structure and Mechanical Properties of Poly(trimethylene terephthalate)," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 86, pp. 2775-2780, 2002
- [17] J. Wu, J.M. Schultz, "Calculation of mesophase percentage of polymer fibers from 2D wide-angle X-ray scattering patterns", *Polymer* 43, 6695–6700, 2002.
- [18] ปิ่นสุภา ปิติรักษัสกุล. 2545. "การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์." กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [19] H.W.Xiuzhi Sun, P. Seib, "Effects of Starch Moisture on properties of Wheat Starch/poly (Lactic Acid) Blend Containing Methylene-diphenyl Disocyanate," *Journal of polymers and the Environment*, Vol.10, No.4, October, 2002
- [20] ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพและชาคริต สิริสิงห์. 2544. "พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและการนำไปใช้งาน." กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [21] B.M.P.Ferreira, C.A.CZavaglia, E.A.R.Duek. "Films of PLLA/PHBV Thermal morphological and mechanical characterization," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol 86.Issue 11, pp 2898-2906, 2002.
- [22] L.Zhang, C. xiong, X. deng, "Miscibility, crystallization and morphology of poly (β -hydroxybutyrate)/(d,-lactide) blends *Polymer*," Volume 37, Issue 2, Pages 241, 1996
- [23] D.S. Rosa, C.G.F. Guedes, C.M.O. liveira, M.I Felisberti, "Processing and Properties of Mixtures of PHB-V with Post-consumer LDPE," *J Polym Environ* 16:230-240, (2008).

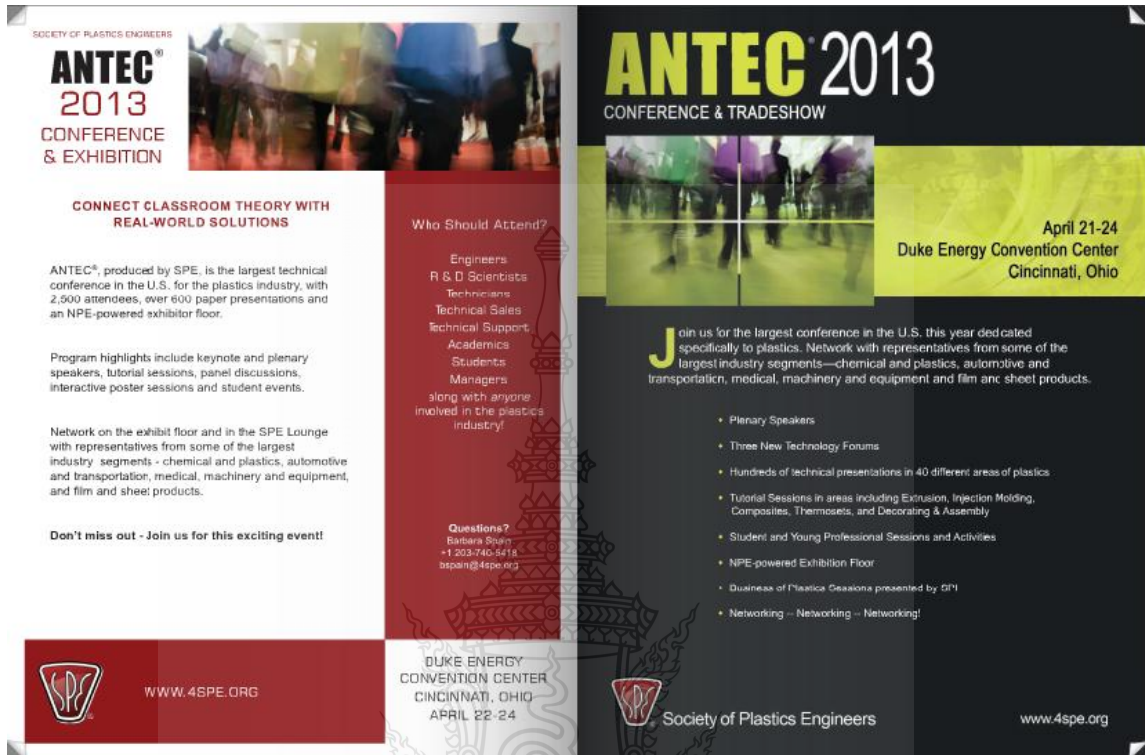
ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ (National and International Conferences)

1. Sirada Padee, Supaphorn Thumsorn, Jessada Wong On, Prayoon Surin, Chiyaprek Apawet, Tirapong Chaichalermwong, Narin Kaabbuathong, Narongchai O-Charoen, Natee Srisawat, “Preparation of Poly(Lactic Acid) and Poly(Trimethylene Terephthalate) Blend Fibers for Textile Application” Energy Procedia 34 (2013) 534 – 541.
2. Sirada Padee, Supaphorn Thumsorn, Jessada Wong On, Prayoon Surin, Chiyaprek Apawet, Tirapong Chaichalermwong, Narin Kaabbuathong, Narongchai O-Charoen, Natee Srisawat, “Preparation of Poly(Lactic Acid) and Poly(Trimethylene Terephthalate) Blend Fibers for Textile Application” (10th EMSES 2012), Sunee grand Hotel, Ubon-ratchathani, Thailand, December 5-8, 2012.
3. Sirada Padee, Narongchai O-Charoen¹, Natee Srisawat, Supaphorn Thumsorn, “Development on properties of novel polymer blend Fiber between Poly(trimethylene terephthalate) and Poly(lactic acid)”, Proceeding, Industrial Engineering Network Conference 2013 (IE NETWORK 2013), The Royal Cruise Hotel, Chonburi, Thailand, October 16-18, 2013, accepted.

ผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ (National and International Conferences)



ANTEC[®] 2013
CONFERENCE & EXHIBITION

CONNECT CLASSROOM THEORY WITH REAL-WORLD SOLUTIONS

ANTEC[®], produced by SPE, is the largest technical conference in the U.S. for the plastics industry, with 2,500 attendees, over 600 paper presentations and an NPE-powered exhibitor floor.

Program highlights include keynote and plenary speakers, tutorial sessions, panel discussions, interactive poster sessions and student events.

Network on the exhibit floor and in the SPE Lounge with representatives from some of the largest industry segments - chemical and plastics, automotive and transportation, medical, machinery and equipment, and film and sheet products.

Don't miss out - Join us for this exciting event!

Who Should Attend?

Engineers
R & D Scientists
Technicians
Technical Sales
Technical Support
Academics
Students
Managers

along with anyone involved in the plastics industry!

Questions?
Barbara Sharp
+1 202 740 5418
bspain@4spe.org

ANTEC[®] 2013
CONFERENCE & TRADESHOW

April 21-24
Duke Energy Convention Center
Cincinnati, Ohio

Join us for the largest conference in the U.S. this year dedicated specifically to plastics. Network with representatives from some of the largest industry segments—chemical and plastics, automotive and transportation, medical, machinery and equipment and film and sheet products.

- Plenary Speakers
- Three New Technology Forums
- Hundreds of technical presentations in 40 different areas of plastics
- Tutorial Sessions in areas including Extrusion, Injection Molding, Composites, Thermosets, and Decorating & Assembly
- Student and Young Professional Sessions and Activities
- NPE-powered Exhibition Floor
- Business of Plastics Sessions presented by SPI
- Networking – Networking – Networking!

DUKE ENERGY CONVENTION CENTER CINCINNATI, OHIO APRIL 22-24

Society of Plastics Engineers www.4spe.org



ANTEC Plenary Speakers

Monday, April 22 | 11:15 a.m. - 12:30 p.m.
(Immediately following the SPE Annual Business Meeting)



Fractal Structuring in Polymer Processing

Han Meijer
Professor of Mechanical Engineering & Materials Technology
Eindhoven University of Technology

For a multitude of high-end applications such as photovoltaics and membranes for fuel cells or gas separation, creating large internal surfaces via fractal structuring during polymer processing can result in unique possibilities for enhancing performance. Structuring is possible even in processing techniques like injection molding, inspired by microfluidic processes, an optimized spring-and-springing coating layer is realized on the parting surface of a mold. Different geometries are used to multiply, rotate, and add stratified structures. After the obvious structuring of a number of parallel layers, attention is focused on layers perpendicular to the product surface. A combination of the two allows complex hierarchical fractal structures to be obtained.

Han Meijer is full professor in Polymer Technology at the Eindhoven University of Technology (TU/e), The Netherlands. He received his Ph.D. degree from the University of Twente in 1980, and then joined DSM research, where he was active in the areas of basic research, polymer processing modeling and explorative research. In 1985, he became visiting professor at Tu/e in the department of Polymer Chemistry and Technology in the area of Applied Rheology. In 1989, he became full professor in Polymer Technology in the Fundamental Mechanics group of the department of Mechanical Engineering. Over the years, he supervised more than 60 Ph.D. students. His present interests include structure development during flow and structure-property relations, micro-technology and microfluidics, micro-mechanics, modeling of polymer processing and design in polymers, and America's Cup sailing.

Monday, April 22 | 5:30 p.m. - 6:15 p.m.



New Polymer Materials Developed in SINOPEC

Dr. Jinliang Qiao
Vice President
SINOPEC Beijing Research Institute of Chemical Industry

This presentation will give a brief introduction on new polymer materials developed in SINOPEC Beijing Research Institute of Chemical Industry, including new polyolefin materials, new polymer nanocomposites and new conductive polymer composites. In addition to industrialized polymer materials, fundamental research also will be included.

Dr. Jinliang Qiao was born in Beijing and has been working with SINOPEC since 1985. Currently, he is the Vice President of SINOPEC Beijing Research Institute of Chemical Industry. Dr. Qiao has published more than 100 papers, and is credited for over 60 patents.

Tuesday, April 23 | 11:15 a.m. - 12:15 p.m.



Abundant U.S. Shale Gas Supplies are Revitalizing the Plastics Industry

Dwight N. Tozer
Vice President, Adhesion Industry Business
ExxonMobil Chemical Company

The enormous increase in domestic natural gas production is spurring a manufacturing renaissance in the U.S., particularly for energy-intensive industries like the chemical and plastics businesses. ExxonMobil's Outlook for Energy to 2040 indicates that the chemicals subsector of industrial energy demand will be the fastest-growing area over the next 25 years, with demand growing more than 50 percent, largely due to increased demand for plastics and other advanced products. An abundant, competitive natural gas supply in the U.S. provides a very strong foundation for increasing economic output, opening up new and valuable opportunities in many regions and sectors of the economy, including industrial sectors such as steel, auto manufacturing, and plastics. Expanded natural gas production is allowing chemical and plastics manufacturers to create jobs and increase sales to domestic and global markets. The shale gas advantage comes in the form of lower cost energy, increased supply security, creation of new jobs and enhanced global competitiveness.

Dwight Tozer is vice president of the Adhesion Industry Business of ExxonMobil Chemical Company in Houston, Texas. Mr. Tozer joined the company in 1991 as a design engineer before working in a series of supervisory, corporate analyst and operations management roles in England, New Jersey, Texas and California. In 2004, Mr. Tozer was appointed technical manager at ExxonMobil's Joliet Refinery in Illinois. He was named process manager of the Baytown Refinery in Texas in 2006. Mr. Tozer was then appointed Plant Jerome Refinery manager in Notre-Dame-de-Croix, France in 2008. Mr. Tozer moved to Houston to serve as vice president of the global Adhesion Industry Business unit in July 2012. Mr. Tozer received a master's degree in chemical engineering from the University of California, Berkeley, and a master's of business administration from Columbia University.

Wednesday, April 24 | 11:15 a.m. - 12:15 p.m.



Driving Innovation in the Wire and Cable Industry

Gregory J. Lampert
Executive Vice President, President & CEO, The Americas
General Cable North America

The wire and cable manufacturing industry designs, manufactures, and distributes cable products by extruding metallic or fiber optic material and covering them with some form of polymer jacket. The global market is valued at \$185B. Specific requirements for wire and cable products vary greatly based on the extensive diversity of applications which use them. Primary industry drivers are energy related legislation and investments, infrastructure spending, construction cycles, industrial activities, and emerging markets and population growth. General Cable, a Fortune 500 company headquartered in Highland Heights, Kentucky, is a leader in the design, development, manufacturing, marketing, and distribution of copper, aluminum, and fiber optic wire and cable products for the energy infrastructure, construction, metal, telecommunications and original equipment manufacturer markets. Mr. Lampert's presentation will provide an overview of the state of the wire and cable industry, key business indicators and market trends for the near future. General Cable's approach to technology innovation to drive new products and applications, new material advances such as low smoke zero halogen compounds and lead free compounds, General Cable's commitment to green products through the 17 Free™ Perform and new product launches to establish leadership in the growing Renewables Energy segment.

Mr. Lampert is Executive Vice President, President, and Chief Executive Officer of General Cable North America. He is responsible for all of the North American business and functional organizations including sales, technology, manufacturing, supply chain, information technology, and human resources. Mr. Lampert joined General Cable in 1998 and has worked in a number of capacities, including product management, sales, and business team leadership. Prior to joining General Cable, he held engineering and commercial management positions with The Dow Chemical Company and Celanese Corporation. He holds a Bachelor of Science degree in Chemical Engineering from the University of Cincinnati and has a Master's degree in Strategy, Finance, and Marketing from the University of Chicago.



Thermal Analysis and Tutorial Session

1:30

Tutorial Session

Thermal Analysis of Polymers: Overview and Developing Trends

Kevin P. Menard

2:30

Thermal Endurance and the Thermal Degradation Kinetics of a Polypropylene/wood Composite in an Inert and Oxidative Atmosphere

1596599 | Elkin Cardona, ICIPC

A commercial wood polypropylene composite was developed using a twin screw extruder. Thermal endurance of the compound was assessed under oxidative and inert atmospheres by using conventional thermogravimetric analysis; the thermal endurance of PP is higher in an inert atmosphere, while the thermal endurance of wood powder is very similar in both atmospheres. In contrast, the thermal endurance of the wood polypropylene composite is higher in air. The activation energy results showed that the values obtained by conventional TGA had the same order of magnitude as values obtained from Modulated TGA. Fourier transformed infrared, electron microscopy was done to evaluate the chemical and physical interaction of materials in the final compound.

3:00

Thermal and Crystallization Behavior of Poly(Lactic Acid) and Poly(Trimethylene Terephthalate) Blend Fibers

1592097 | Sirada Padee, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Biodegradable poly(lactic acid) (PLA) and poly(trimethylene terephthalate) (PTT) blend fibers were prepared in this study. PLA and PTT were blended in a twin screw extruder with varied contents of PTT 0-50 wt%. The PLA/PTT blend fibers were prepared by melt spinning technique. Thermal properties and crystallization behavior of PLA/PTT blends were investigated. PLA fiber was glossy and transparent while PTT fiber was opaque. The spinning of PLA/PTT blends fiber was difficult due to the difference in melting characteristic of PLA and PTT. However, the PLA/PTT blend fiber was successfully spun at PTT content of 10 wt% with the barrel temperature of 250 °C and would be suitable for textile application.

3:30

Use of DSC, DMA and TG-GCMS in the Study of Epoxy Materials

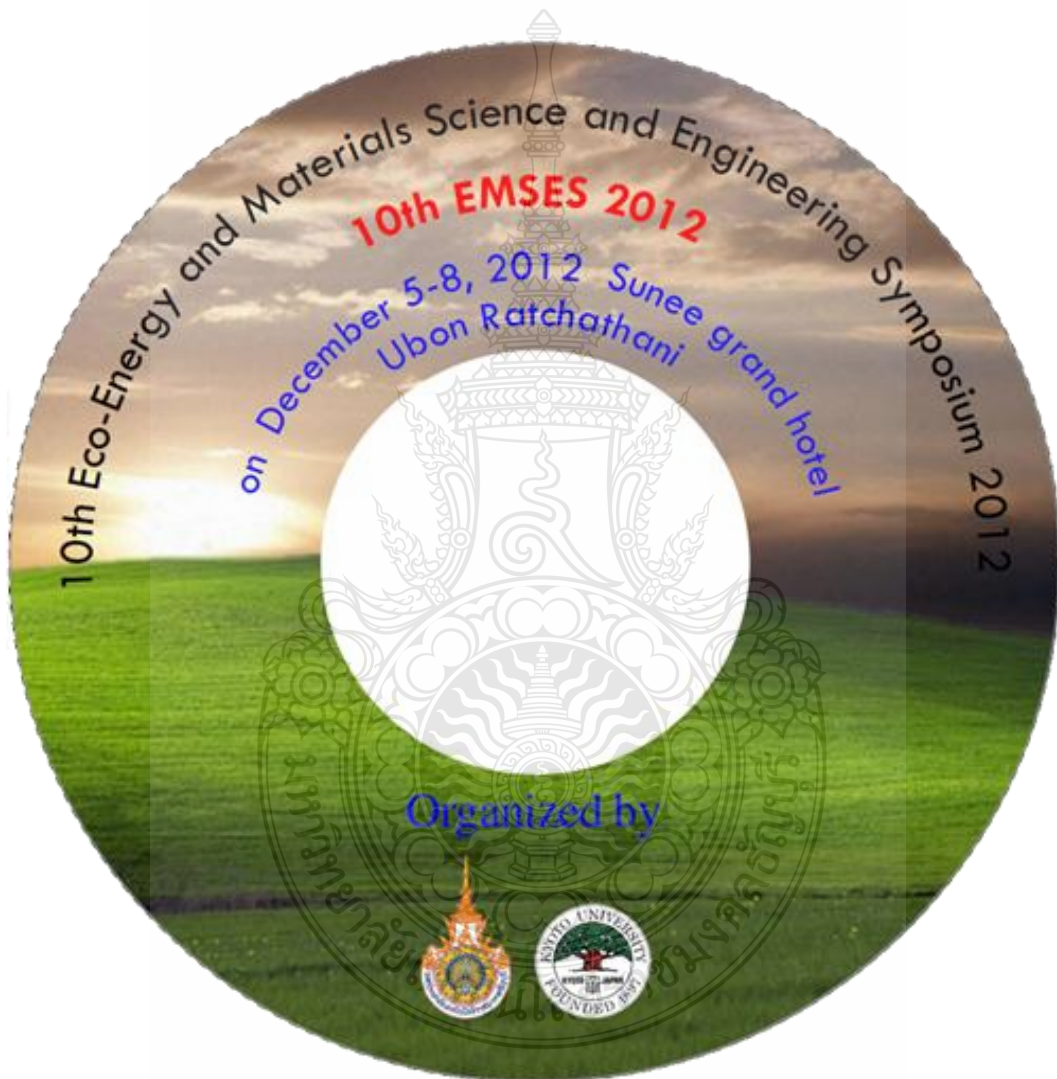
1609741 | Kevin Menard, PerkinElmer

Three commercial epoxies samples were characterized by dynamical mechanical analysis (DMA), differential scanning calorimetry (DSC), Thermogravimetric analysis (TGA) and TG-GCMS to investigate differences in curing and final properties. The materials showed similar responses in curing and final properties but one showed a much greater weight loss after curing than the others. This could be identified by TG-GCMS. Model system studies suggest that the use of excess amines can lead to adverse effects.



10th EMSES 2012

on December 5-8, 2012 **Sunee grand hotel, Ubon-ratchathani**



10th EMSES 2012

International Scientific Advisory Committee:

General Chair:

Assoc.Prof.Dr. Namyoot SONGTHANAPITAK RMUTT, Thailand

General Co-Chair:

Prof. Dr. Kiyoshi YOSHIKAWA Kyoto Uni., Japan

Asst.Prof.Dr. Panpetch CHININTORN RMUTT, Thailand

Organizing Chair:

Asst. Prof. Dr.Somma PIVSA-ART RMUTT, Thailand

Prof. Dr. Takeshi YAO Kyoto Uni., Japan

Organizing Co-Chair:

Prof. Dr. Hideaki OHGAKI Kyoto Uni., Japan

International Scientific Committees:

Prof. Dr. Susumu YOSHIKAWA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr. Phadungsak RATTANADECHO TU, Thailand

Prof. Dr. Shiro SAKA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr. Hitomi OHARA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr.-Ing. Habil Ingo STADLER FH Koeln, Germany

Prof. Dr. Young S. CHAI Korea

Prof. Dr. Nipon TANGTHAM KU, Thailand

Prof. Dr. Masayoshi OKUBO Osaka Uni, Japan

Prof. Dr. Somchai WONGWISES KMITL, Thailand

Prof. Dr. Nadarajah MITHULANANTHAN UQ, Australia

Prof. Dr. Yukio OGATA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr. Yuichi ANADA Hokkaido Info. Uni., Japan

Prof.Dr. Narongrit SOMBATSOMPOP KMUTT, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Bandit FUNGTAMMASAN KMUTT, Thailand

Assoc. Prof. Dr. K. Srinivas REDDY IIT-Madras, India

Assoc. Prof. Dr. David Jan COWAN IUPUI, USA

Assoc. Prof. Dr. Per B ZETTERLUND Australia

Assoc. Prof. Dr. Vijit KINNARES KMITL, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Yoshikazu SUZUKI Japan

Assoc. Prof. Dr. Thawatch KERDCHEUN RMUTI, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Wakin PIYARAT SWU, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Seiichi KAWAHARA Nakaoga Uni., Japan

Assoc.Prof.Dr. Kawee SRIKULKIT CU, Thailand

Asst. Prof. Dr. Somchai HIRANVAROMDOM RMUTT, Thailand

Asst. Prof. Dr. Wanchai SUBSINGHA RMUTT, Thailand

Asst. Prof. Dr. Thanapong SUWANNASRI KMUTNB, Thailand

Asst. Prof. Dr. Napaporn PHUANGPORNPIITAK KU, Thailand

Asst. Prof. Dr.Boonrit PRASARTKAEW RMUTT, Thailand

Asst.Prof.Dr.Supakit SUTTIRUENGWONGSU, Thailand

Asst. Prof. Dr.Vallop PHUPA RMUTP, Thailand

Asst.Prof.Dr.Pramook UNAHALEKHAKA RMUTSB, Thailand

10th EMSES 2012

Dr.Arthit Sode-Yome	EGAT, Thailand
Dr. Sei-ichi AIBA	Japan
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Dr. Yuttana KAMSUWAN	RMUTT, Thailand
Dr. Jakkree SRINONCHAT	RMUTT, Thailand
Dr. Chatchai SOPPAPITAKSAKUL	RMUTT, Thailand
Dr. Pinit SRITHORN	RMUTI, Thailand
Dr. Uthen KAMNAN	RMUTL, Thailand
Dr. Cattariya SUWANNASRI	KMUTNB, Thailand
ASEAN Committee:	
Prof. Dr. YoyokWahyuSubroto	UGM,Indonesia
Prof. Dr. WegaTRISUNAYANTI	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Tumiran	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Jun LI	NYU, Singapore
Prof. Dr. INTHAN	ITB, Indonesia
Prof. Dr. Khamphone NANTHAVONG	NOL, Laos
Prof. Dr. Kampui SOUTHISOMBHAT	NOL, Laos
Prof. Dr. Yew Wei LEONG	NYU, Singapore
Prof. Dr. Nguyen Minh TAN	HU, Vietnam
General Secretary:	
Asst.Prof.Dr.Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
Dr. Sumonman NIAMLANG	RMUTT, Thailand
Technical Program Chair:	
Asst.Prof.Dr.Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
Area: Energy Technology(ET)	
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr.Boonrit PRASARTKAEW	RMUTT, Thailand
Dr. Sathapron THONGWIK	RMUTT, Thailand
Dr. Nathabhat PHANKONG	RMUTT, Thailand
Area: Environmental and Social Impact(ES)	
Dr. Nithiwat CHOOSAKUL	RMUTT, Thailand
Area: Nanotechnology and Materials Science(NM)	
Dr. Sorapong PAVASUPREE	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Kitipong KIMAPONG	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Sirichai TORSAKUL	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Warunee ARIYAWIRIYANANT	RMUTT, Thailand
Area: Energy Economic and Management(EM)	
Assoc.Prof.Dr. Natha KUPTHASTHIEN	RMUTT, Thailand
Dr. Surin NGAEMNGAM	RMUTT, Thailand
Dr. Pimnapat IEMSOMBOON	RMUTT, Thailand
Area: New Energy Technology(NT)	
Dr. Boonyang PLANGKLANG	RMUTT, Thailand
Area: Nuclear Technology(NU)	
Asst.Prof.Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand

10th EMSES 2012

Exhibition Chair:

Dr. Amnoiy REUNGWAREE RMUTT, Thailand
Dr. Winai CHANPENG RMUTT, Thailand

Local Arrangement Chair

Dr. Sorapong PAVASUPREE RMUTT, Thailand
Dr. Natee SRISAWAT RMUTT, Thailand

Registration and Finance Chair

Dr. Sumonman NIAMLANG RMUTT, Thailand
Dr. Supaporn THOMSORN RMUTT, Thailand
Weeraporn PIVSA-ART RMUTT, Thailand

Publicity Chair

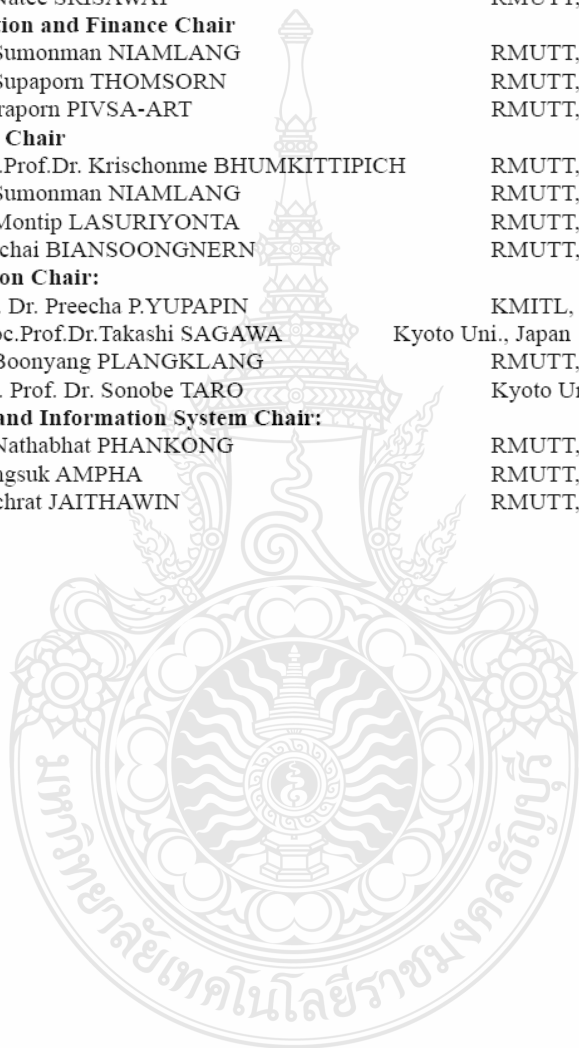
Asst.Prof.Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH RMUTT, Thailand
Dr. Sumonman NIAMLANG RMUTT, Thailand
Dr. Montip LASURIYONTA RMUTT, Thailand
Somchai BIANSONGNERN RMUTT, Thailand

Publication Chair:

Prof. Dr. Preecha P.YUPAPIN KMITL, Thailand
Assoc.Prof.Dr.Takashi SAGAWA Kyoto Uni., Japan
Dr. Boonyang PLANGKLANG RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Sonobe TARO Kyoto Uni., Japan

Website and Information System Chair:

Dr. Nathabhat PHANKONG RMUTT, Thailand
Phongsuk AMPHA RMUTT, Thailand
Deachrat JAITHAWIN RMUTT, Thailand



CONTENT

NM06	Microstructural arrangement and densification of GDC10-3YTZ solid solutions <i>S. Wattanasiriwech, T. Jindapetch, and D. Wattanasiriwech</i>	106
NM07	Kinetic Study of Poly(L-lactic acid) Pre-polymers Synthesis in a 2-Steps Direct Polycondensation Process <i>Sumonnan Niamlang, Weraporn Pivsa-Art, Nutchapon Santipatee, Supawat Watcharasuwanseree, Tossamon Wongbong and Sommai Pivsa-Art</i>	107
NM09	Effect of Metal Additives on the Hydrogenation of Carbon Dioxide over Nickel Catalyst Prepared by Sol-gel Method <i>Hisanori Ando</i>	108
NM10	Effects of Fuel Contents and Surface Modification on the Sol-Gel Combustion $Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{1.95}$ Nanopowder <i>Darunee Wattanasiriwech and Suthee Wattanasiriwech</i>	109
NM11	Mechanical Properties of Bamboo Charcoal Reinforced PLA Composites <i>Prahyaporn Limparungsee Putimin Uawongsuwan, Weraporn Pivsa-Art and Hiroyuki Hamada</i>	110
NM12	Preparation of Poly(lactic acid) and Poly(trimethylene terephthalate) Blend Fibers for Textile Application <i>S. Padee, J. Wong On, P. Surin, C. Apawet, T. Chaichalermwong, S. Thumsorn, N. Kaabbuathong, N. O-Charoen and N. Srisawat</i>	111
NM13	Poly (lactic acid)/Polycaprolactone Blends Compatibilized with	112



10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering
(EMSES2012)

Preparation of Poly(lactic acid) and Poly(trimethylene terephthalate) Blend Fibers for Textile Application

Sirada Padee^a, Supaphorn Thumsorn^{a*}, Jessada Wong On^b, Prayoon Surin^b,
Chiyaprek Apawet^b, Tirapong Chaichalermwong^a, Narin Kaabbuathong^c,
Narongchai O-Charoen^a, and Natee Srisawat^a

^aFaculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, 12110, Thailand

^bFaculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology, Wangmai, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand

^cPTT Research and Technology Institute, Phra Nakhon Si Ayutthaya 13170, Thailand

Abstract

Biodegradable poly(lactic acid) (PLA) and poly(trimethylene terephthalate) (PTT) blend fibers were prepared in this study. PLA and PTT were blended in a twin screw extruder with varied contents of PTT 0-50 wt%. The PLA/PTT blend were melt spun into fiber by melt spinning technique. Thermal properties and crystallization behavior of PLA/PTT blends were investigated. PLA fiber was glossy and transparent while PTT fiber was opaque. The spinning of PLA/PTT blends fiber was difficult due to the difference in melting characteristic of PLA and PTT. However, the PLA/PTT blend fiber was successfully spun at PTT content of 10 wt% with the barrel temperature of 250 °C and would be suitable for textile application.

© 2013 The Authors. Published by Elsevier B.V.

Selection and peer-review under responsibility of COE of Sustainable Energy System, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT)

Keywords: poly(lactic acid), poly(butylene succinate), melt spinning, miscibility, crystallinity

1. Introduction

Plastic materials are widely applied for various kinds of industries due to their high specific strength and light weight. However, general plastic materials have been synthesized from petrochemical resources, which now are running out and make the environmental problems due to their non biodegradability. Therefore, in the present day, biodegradable plastics are promising benefited for environmental friendly materials. Poly(lactic acid) (PLA) is now available and has been an attractive biodegradable plastic. It exhibits high strength, clarity and biodegradability. However, PLA is brittle, which is a limitation for applying in textile industry. For improving the ductility and flexibility of PLA, it has been adding with plasticizers such as polyethylene glycol or triacetine [1-2] or blending with polymers such as biodegradable polyester i.e. poly(butylene succinate) (PBS), poly(butylene succinate-co-adipate) (PBSA) or natural rubber [3-6].

PLA fiber is great interested for biological and medical application, which was reviewed by Gupta et al [7]. Du et al [8] studied on structure and properties of commercial PLA fiber producing in China, which their results were useful for further applied PLA fiber in the industries. Sawada et al [9] modified PLA fiber with enzymatic treatment. They summarized that the enzymatic treatment caused the hydrolysis of PLA fiber resulting in the reduction in fiber strength. Reddy et al [10] prepared PLA and polypropylene (PP) blend fibers in order to improve the biodegradability, dyeability and resistance to hydrolysis. PLA in PLA/PP blends fiber had better resistance to hydrolysis and dyeable with disperse dyes. However, there is still less information about PLA blends fiber for development in textile application.

Poly(trimethylene terephthalate) (PTT) is an aliphatic polyester, which is synthesized from 1,3-propanediol that derived from renewable resources such as corn sugar [11]. PTT has been widely used in textile applications. Their properties exhibit superior strength and excellent dyeability [12-14]. Blending PLA with PTT would develop a new material for textile applications.

In this research, PLA and PTT blends fibers were prepared by melt spinning process. Thermal properties and crystallization behavior of PLA:PTT blends fiber were investigated upon the effect of PLA:PTT blend ratio. Mechanical properties of the blends were elucidated from compression molded specimens.

2. Experimental

2.1 Materials and fabrication

Poly(lactic acid) (PLA) (Grade 3051D) was supplied by NatureWorks LLC, USA. The melt flow rate was 10-30 g/10 min. Poly(trimethylene terephthalate) (PTT) was purchased from the company in China. The melt flow rate was 20 g/10 min. The ratios between PLA:PTT blends were varied from 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 and 50:50. The neat PLA and PTT were also prepared as controlled. Table 1 tabulates the composition of PLA and PTT in the blends and the sample designation.

Table 1. PLA/PTT Blend compositions.

PLA contents (wt%)	PTT contents (wt%)	PLA:PTT Sample designation
100	0	PLA
90	10	PLA90:10PTT
80	20	PLA80:20PTT
70	30	PLA70:30PTT
60	40	PLA60:40PTT
50	50	PLA50:50PTT
0	100	PTT

PLA and PTT were dried in an oven at 80 °C for at least 8 hours before compounding in a twin screw extruder (KEDSE 20/40, Brabender, Germany). The barrel temperature was set at 190-250 °C with a screw speed of 80 rpm. After pelletized, PLA:PTT blends were dried before fiber preparation. PLA, PTT and their blends were melt-spun by a single screw extruder (ThermoHaake, Germany) equipped with multifilament spinneretes. The barrel temperature was set at 200-250 °C with a screw speed of 50 rpm.

Neat polymer and the PLA:PTT blends were compression molded at temperature set of 250 °C for mechanical properties investigation.

2.2. Characterization

Thermal properties and crystallization behavior of PLA, PTT and the blends were investigated by a differential scanning calorimeter (NETZSCH, DSC 200 F3) at temperature range of 30-270 °C at a heating and a cooling rate of 10 °C/min under nitrogen atmosphere. The DSC melting and cooling thermograms were recorded for analysis. The crystallinity of polymer was calculated from the following equation.

$$\%X_c = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_{f100}} \quad (1)$$

Where X_c = Degree of crystallinity
 ΔH_f = Heat of fusion of polymer
 ΔH_{f100} = Heat of fusion of 100% polymer
 Crystallization

ΔH_{f100} of PLA was 93 J/g [15] and ΔH_{f100} of PTT was 104 J/g [16].

Tensile properties of the compression molded specimens were carried out according to ASTM D638 by an Instron universal testing machine (Instron5560). The extension rate was 10 mm/min.

3. Results and Discussion

3.1. Thermal Properties of PLA/PTT Blends

Fig. 1 and 2 depict DSC results of melting and cooling thermograms of neat PLA, neat PTT and PLA:PTT blends, respectively. The melting curve of PLA exhibited three steps changing including the step of glass transition temperature (T_g) of PLA at around 62.8 °C followed by the exothermic peak of cold crystallization (T_{cold}) around 122 °C and the melting temperature (T_m) peak of PLA at 152.6 °C. The cold crystallization appeared in PLA melting thermogram indicated that PLA was difficult to crystallize hence the crystallization was occurred during the melting process [17]. On the other hand, the DSC thermogram of PTT showed three steps of changing including the step of T_g at 46.2 °C, exothermic peak of T_{cold} at around 60 °C and T_m peak of PTT at 230 °C. The cold crystallization of PTT was corresponded to melt-quench of PTT [18]. The heating thermograms of PLA:PTT blends exhibited the step of changing with both PLA and PTT in the blends. Two melting temperatures in the heating thermograms of the blends were related to the melting characteristic of PLA and PTT, which indicated that PLA and PTT were immiscible. However, intensities of melting peaks of PLA and PTT in the blends were decreased depend on the PLA and PTT compositions in the blends.

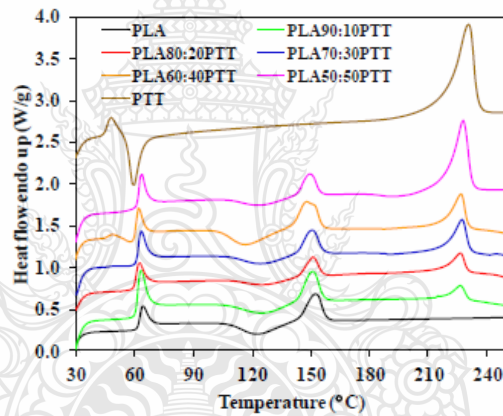


Fig. 1. DSC melting thermograms of PLA, PTT and their blends.

Fig. 2 illustrates DSC cooling thermograms of neat polymers and the blends, which represented to crystallization temperature (T_c) of the polymer. There was no T_c in the PLA thermogram, which indicated that PLA was difficult to crystallize. PTT cooling peak of T_c is clearly seen at temperature around 184 °C. Blending PLA with PTT would promote crystallization of PLA, which indicated by the exothermic peak of PLA crystallization in the blends at around 90-95 °C as shown in Fig. 2. The peak intensity of PLA can be clearly seen when blending with PTT 10-30 wt% then the intensity decreased when adding PTT at higher contents. On the contrary, the peak intensity of PTT decreased when blending with PLA. It was attributed to PTT would act as a nucleating site for PLA crystallization while PLA retarded the crystallization of PTT. Therefore, in the blends, PLA crystallinity would be enhanced where as PTT crystallinity was diminished [19].

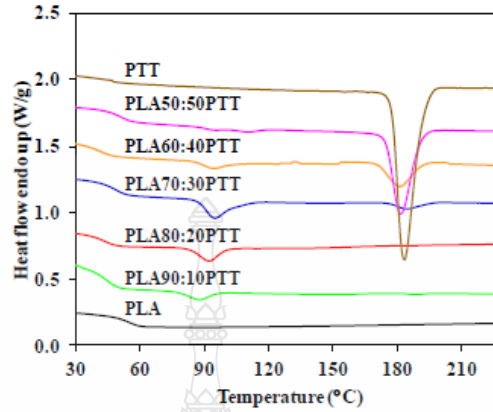


Fig. 2. DSC cooling thermograms of PLA, PTT and their blends.

Thermal properties and the crystallinity of neat polymers and the blends are tabulated in Table 2. T_m values of both PLA and PTT in the blends decreased when increasing either PTT or PLA fraction in the blends. The declination of T_m was due to decreasing of crystal size of PLA or PTT in the blends [20]. From the results, T_c of PLA in the blends increased when increasing PTT contents. Likewise, T_c of PTT in the blends also increased at a lower PLA contents. It was due to PTT would enhance crystallization of PLA, which resulting in increasing PLA crystallinity. However, PLA might hinder PTT crystallization, which resulting in the reduction of PTT crystallinity.

Table 2. Thermal properties of PLA, PTT and their blends.

Samples	PLA			PTT		
	T_m (°C)	T_c (°C)	% X_c	T_m (°C)	T_c (°C)	% X_c
PLA	152.6	-	18.2	-	-	-
90:10	151.0	88.0	19.5	226.6	189.1	7.8
80:20	151.4	92.7	21.9	226.5	186.0	11.7
70:30	150.5	95.3	20.6	227.1	185.3	23.8
60:40	148.1	94.7	22.9	226.9	182.1	26.2
50:50	149.7	95.7	13.4	227.9	182.0	51.0
PTT	-	-	-	230.7	183.7	80.9

3.2. PLA/PTT blends fiber

PLA, PTT and their blends fibers were melt-spun by melt spinning process. The melt spinning of the blends fiber was difficult due to the difference on the melting characteristic of PLA and PTT. The processing temperature was set up at 250 °C for melting PTT while PLA was degraded at this temperature. Figure 5 shows photographs of melt-spun PLA, PTT and the blend fibers. PLA fiber was clear, glassy and brittle while PTT fiber was opaque and soft. The PLA/PTT blends fibers were not smooth, which was attributed to the immiscibility of PLA and PTT in the blends. It can be noted that PLA:PTT blend fiber was successfully spun at PTT content of 10 wt%.

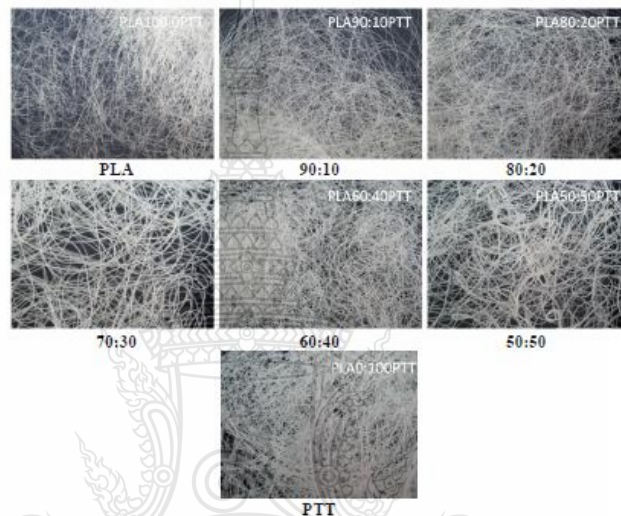


Fig.3 Photographs of PLA, PTT and their blends fibers.

3.3. Mechanical properties of PLA/PTT blends

Mechanical properties of PLA, PTT and their blends are presented in Fig. 4 and 5 for tensile modulus and tensile strength, respectively. PTT exhibited the highest tensile modulus at 1.4 GPa while tensile modulus of PLA was around 1.0 GPa as shown in Fig. 4. Tensile modulus of the blends increased with increasing PTT contents, which was due to the stiffness of PTT. However, the tensile modulus of PLA:PTT blends were low due to degradation of PLA when fabricated the blends at the processing temperature of 250 °C. Tensile strength of the blends slightly increased when increasing PTT contents in the blends as shown in Fig. 5. However, tensile strength of the blends was low, which due to the PLA degradation and an immiscibility between PLA and PTT in the blends.

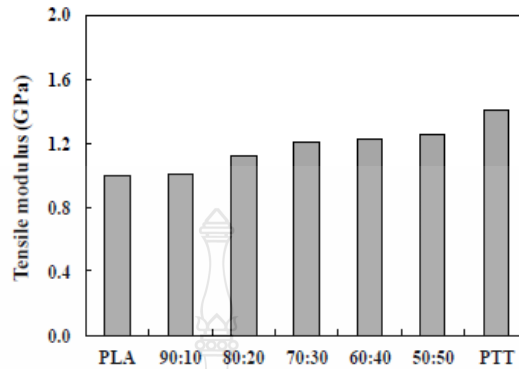


Fig. 4 Tensile modulus of PLA, PTT and their blends.

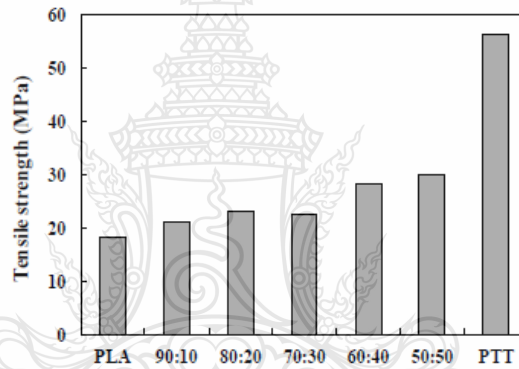


Fig. 5 Tensile strength of PLA, PTT and their blends

4. Conclusions

Thermal properties and crystallization behavior of PLA:PTT blends fibers were clarified in this study. The incorporation of PTT enhanced crystallization of PLA in PLA:PTT blends, which then improve crystallinity of PLA in the blends. The melting characteristic of PLA and PTT in the blends was an important factor in order to selecting processing temperature for spinning PLA/PTT blend fiber. In this study, the PLA/PTT blend at 90/10 ratio could be melt-spun into fibers at the barrel temperature of 250 °C. It can be noted that tensile properties of the PLA/PTT blends increased when increasing PTT contents, which also would apply PLA/PTT blends fiber for textile industry.

Acknowledgements

The authors are gratefully thanks PTT Research and Technology Institute, PTT Public Company Limited for supporting research fund.

References

- [1] Li H and Huneault MA. Effect of nucleation and plasticization on the crystallization of poly(lactic acid). *Polymer*, 2007; 48: 6855-6866.
- [2] Ljungberg N, Andersson T and Wesslen B. Film extrusion and film weldability of poly(lactic acid) plasticized with triactin and tributyl citrate. *J Appl Polym Sci.*, 2003; 88: 3239-3247.
- [3] Harada M, Ohy T, Iida K, Hayashi H, Hirano K and Fukuda H. Increased impact strength of biodegradable poly(lactic acid)/poly(butylene succinate) blend composites by using isocyanate as a reactive processing agent. *J Appl Polym Sci.*, 2007; 106:1813-1820.
- [4] Wang R, Wang S and Zhang Y. Morphology, rheological behaviour, and thermal stability of PLA/PBS/POSS composites. *J Appl Polym Sci.*, 2009; 113: 3095-3102.
- [5] Signori F, Coltelli MB and Bronco S. Thermal degradation of poly(lactic acid) (PLA) and poly(butylenes adipate-co-terephthalate) (PBAT) and their blends upon melt processing. *Polym Degrad Stab.*, 2009; 94: 74-82.
- [6] Bitinis N, Verdejo R, Cassagnau P and Lopez-Manchado MA. Structure and properties of polylactide/natural rubber blends. *Mater Chem Phys.*, 2011; 129: 823-831.
- [7] Gupta B, Revagade N and Hilborn J. Poly(lactic acid) fiber: An overview. *Prog Polym Sci.*, 2007; 32: 455-482.
- [8] Du Z, Xu Y and Yu W. Characterization of structure and properties of polylactic fiber. *J Appl Polym Sci.*, 2012; 125: E149-E157.
- [9] Sawada K, Urakawa H and Ueda M. Modification of polylactic acid fiber with enzymatic treatment. *Text. Res. J.*, 2007; 77: 901-905.
- [10] Reddy N, Nama D and Yang Y. Polylactic acid/polypropylene polyblend fibers for better resistance to degradation. *Polym Degrad Stab.*, 2008; 93: 233-241.
- [11] Kurian JV. A new polymer platform for the future-Sorona® from corn derived 1,3-propanediol. *J Polym Environ.*, 2005; 13: 159-167.
- [12] Chuah HH. Orientation and structure development in poly(trimethylene terephthalate) tensile drawing. *Macromolecules*, 2001; 34:6985-6993.
- [13] Lyoo WS. et al. Effect of zone drawing on the structure and properties of melt-spun poly(trimethylene terephthalate) fiber. *J Appl Polym Sci*, 2001; 81: 3471-3480.
- [14] Abe T, Azuma Y and Matsuo T. Poly(trimethylene terephthalate) fiber. U.S. Patent 6,495,254, 2002.
- [15] Martin O and Avérous L. Poly(lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multiphase system. *Polymer*, 2001; 42: 6209-6219.
- [16] Zhang J. Study of poly(trimethylene terephthalate) as an engineering thermoplastics. *J Appl Polym Sci.*, 2004; 91:1657-1666.
- [17] Wu D, Wu L, Wu L, Xu B, Zhang Y and Zhang M. Nonisothermal cold crystallization behaviour and kinetics of polylactide/clay nanocomposites. *J Polym Sci Part B.*, 2007; 45:1100-1113.
- [18] Chen Z, Luo J and Yan S. Crystal structure and thermal behaviour of cold-crystallized poly(trimethylene terephthalate). *Colloid Polym Sci.*, 2012; DOI 10.1007/s00396-012-2786-8, 1-10.
- [19] Huang JW, Hung YC, Wen Y-L, Kang C-C and Yeh M-Y. Polylactide/nano- and micro-scale silica composite film. II. Melting behaviour and cold crystallization. *J Appl Polym Sci.*, 2009; 112: 3149-3156.
- [20] Fomes TD and Paul DR. Crystallization behaviour of nylon 6 nanocomposites. *Polymer*, 2003; 44: 3945-3961.





IE Network 2013

Green Productivity and Innovation



Login

Username

Password

- MAIN MENU**
- [หน้าหลัก](#)
 - [หลักการและเหตุผล](#)
 - [คณะกรรมการ](#)
 - [คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ](#)
 - [พิจารณาบทความ](#)
 - [ข่าวประชาสัมพันธ์](#)
 - [ติดต่อเรา](#)
- Paper Submission**
- [ระบบลงทะเบียนออนไลน์](#)
 - [ศาลงทะเบียน](#)
- Destination Guides**
- [สาขาวิชาในการประชุม](#)
 - [กำหนดการสำคัญ](#)
 - [แนวทางการส่งบทความ](#)
 - [สถานที่จัดการประชุม](#)
- Link**
- [Session Welding](#)
- Past Conference**
- [IE Network 2013](#)
 - [Past IE Network](#)

Green Productivity and Innovation

SHARE

สารจากประธานข่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2556

ภาคีวิชาชีพวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล มีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่ได้รับเกียรติเป็นเจ้าภาพจัดการประชุมวิชาการข่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรมประจำปี 2556 (IE Network Conference 2013: IENET 2013) ร่วมกับมหาวิทยาลัยศิลปากร และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ภาคีวิชาชีพวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ขอเชิญชวนนักวิชาการ นักวิจัย อาจารย์ นักศึกษา และผู้ที่สนใจ เข้าร่วมประชุม เพื่อแลกเปลี่ยนความรู้ ประสบการณ์ ในการทำวิจัย อันจะก่อให้เกิดการพัฒนาวิจัยอย่างต่อเนื่อง ที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถทางการแข่งขันอย่างยั่งยืน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกรรณ กิ่งผดุง
 หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล



IE Network 2013


ประกาศเลื่อนวันประกาศผลการพิจารณาบทความฉบับสมบูรณ์

เป็นวันที่ 23 สิงหาคม 2556

egienet2013@mahidol.ac.th

ShinyStat
 Today visits 92
 Tot. visits 13291



 Login

บรรจพร เรืองไพศาล
[User]

Logout

USER MENU

- [ส่งไฟล์บทความ](#)
- [การจัดการ บทความ](#)
- [การจัดการ บทความ](#)
- [บทความฉบับตีพิมพ์](#)
- [แก้ไขข้อมูลส่วนตัว](#)

MAIN MENU

- [หน้าหลัก](#)
- [หลักการและเหตุผล](#)
- [คณะกรรมการ](#)
- [คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ](#)
- [พิจารณาบทความ](#)
- [ข่าวประชาสัมพันธ์](#)
- [ติดต่อเรา](#)

Paper Submission

- [ระบบลงทะเบียนออนไลน์](#)
- [ค่าลงทะเบียน](#)

Destination Guides

- [สาขาวิชาในการประชุม](#)
- [กำหนดการสำคัญ](#)
- [แนวทางการส่งบทความ](#)
- [สถานที่จัดการประชุม](#)

Link

- [Session Welding](#)

Past Conference

- [IE Network 2013](#)
- [Past IE Network](#)
- [Session Welding](#)
- [Download](#)

ผู้ทรงคุณวุฒิทางวิศวกรรมอุตสาหกรรมจากมหาวิทยาลัยต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. รศ.ดร.จิตรา รุ่งกิจการพานิช
2. ผศ.ดร.มานพ เรียวเดชะ
3. ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. ผศ. ดร.กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เดชะเมธีกุล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

1. ผศ.ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน
2. ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง
3. ดร.นันทวิภา จันทร์ศรี
4. ดร.เพ็ญสุดา พันธุ์คำ
5. ดร.รัฐดิกร พัฒนพิบูล
6. อ.จักรินทร์ กลั่นเงิน

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

1. รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล
2. รศ.ดร.ชนนาค กฤตวรกาญจน์
3. รศ.ดร.นิวิท เจริญใจ
4. รศ.ดร.วิมลีน เหล่าศิริถาวร
5. รศ.ดร.อภิชาติ โสภางค์
6. ผศ.ดร.ศักดิ์เกษม ระมิงค์วงศ์
7. ผศ.ดร.กรกฎ ไบบัวเทศ ทิพย์วงศ์
8. ผศ.ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์
9. ผศ.ดร.รุ่งจิตร์ ชมภูอินทร์
10. ผศ.ดร.วิมลย์ วรธนัจฉริยา
11. ผศ.ดร.อรุณพล สมุทรศิลป์
12. ดร.วชิระ นาคเขียว
13. ดร.วริษา วิสิทธิ์พานิช
14. ดร.อนันท์ ไชยจรรุณิชา

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

1. รศ.ดร.จิรัชย์ พุทธกุลสมศรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

1. รศ.ดร.เดือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์
2. รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์
3. รศ.วชิระ มีทอง
4. ผศ.ดร.สุขสันต์ พรหมบุญพงศ์
5. ผศ.ดร.อภิเนษนา อุดมศักดิ์กุล
6. ผศ.ดร.เจริญชัย โขมพิตราภรณ์
7. ผศ.ดร.ธนัญญา วสุศรี
8. ผศ.ดร.อิศรทัต พึ่งอัน
9. ผศ.เฉลิมเกียรติ จิระรุ่งเสถียร



Today visits 93
Tot. visits 22536

สปอนเซอร์



TM

THERMAL MECHANICS
Welding Cutting Automation

KISTLER
measure. analyze. innovate.

QES
Assuring you our very best, ALWAYS!



10. ผศ.เชิดพงษ์ จอมเดช
11. ผศ.เจริญ สุนทราวาณิชย์
12. ดร.ปภัศร ชัยวัฒน์
13. ดร.ชอแก้ว จตุรานนท์
14. อ.ณรงค์ งามอรุณโชติ
15. อ.อาวุธ สนใจยุทธ
16. อ.มงคล สันระวัฒน์
17. อ.ภัทธีรา ม้วนจัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1. ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์
2. ผศ.ดร.กุศล พิมาพันธุ์ศรี
3. ผศ.ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์
4. ผศ.ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิตร
5. ดร.ธนसार อินทรกำธรชัย
6. ดร.วราพจน์ มีถม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1. รศ.ดร.วัลย์ลักษณ์ อัศวินรงค์
2. รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ
3. รศ.ดร.ฤดี มาสุจินทร์
4. รศ.ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต
5. ผศ.ดร.ชุมพล ยวงโย
6. ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล
7. ดร.พลชัย โชคดีป्राยานกุล
8. ดร.พีชณัฐ กิตติปัญญางาม
9. ดร.วิภู ศรีสืบสาย
10. ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

1. ผศ.ดร.นนทโชติ อุดมศรี
2. ผศ.จักรินทร์ นามหิม
3. ผศ.ราพีง เจริญยศ
4. ดร.สมพงษ์ พิริยานนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุโขทัยธรรมาราช

1. รศ.พகามาต ผจญแก้ว
2. รศ.สุภาวดี ธีรธรรมากร
3. รศ.สุกัญญา ภูสีม่วง
4. รศ.ศุภกัญญา เรียบเลิศศิริ
5. ดร.แหวบุญ เข้มแสงสิงขร
6. อ.กรรณิการ์ ยิ้มนาค
7. อ.จิราบุษ บุคดีจัน
8. อ.บุญชัย วสิษฐพิสวัสดิ์
9. อ.ภูมิ เจือศิริภักดี
10. อ.อิทธิเดช มุลมั่งมี

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

1. ผศ.ดร.ปัญญา พิทักษ์กุล
2. ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์
3. ดร.สมหญิง งามพรประเสริฐ
4. ดร.สัทเนห์ รัฐวิบูลย์
5. อ.วุฒิศรณ จรรย์ต้นดีเวทย์

เครื่องเชื่อมไฟฟ้า ลองเวล



คุณภาพทนทาน บริการสุดยอดเยี่ยม



6. อ.อรดี พฤติศรีภยเนนพ
7. ผศ.ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์

มหาวิทยาลัยนครพนม

1. ดร.มัทธิต บุญขาว
2. ดร.วิชัย พัฒนพล
3. อ.จุจภาภา นันทโพธิ์เดช

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

1. ดร.วีระยุทธ สุดสมบูรณ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

1. ดร.จิรวัดณ์ วิมุตติสุขวิริยา

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

1. รศ.ดร.วิชัย แหวนเพชร
2. ผศ.ดร.ประถม บุญไชยอภิสิทธิ์
3. ผศ.อวยชัย วงศ์รัตน์
4. ดร.อนันตกุล อินทรผดุง
5. อ.ชาญชัย วิลลิสุด
6. อ.พีเชษฐ รัตนบุญทวี
7. อ.ภาสุระ อังกุลานนท์
8. อ.ลักขณา ฤกษ์เกษม
9. อ.อรมน บินทอง

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

1. อ.ธณิดา โชนงนุช
2. อ.อลงกรณ์ เมืองไหว

มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

1. อ.เปรมชัย มูลหล้า

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

1. ผศ.ดร.ชูชาติ พยอม
2. ผศ.ดร.ถวัลย์กานต์ พวงไพฑูริย์
3. ผศ.ดร.นิคม ฉนขุนทด

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

1. อ.ทิวรัตน์ ศรีราตรี
2. อ.วสันต์ พลั้วพันธ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

1. ดร.กันต์ อินทวงศ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1. ดร.จงกล ศรีธ

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

1. ผศ.ดร.กฤษดา พิศลยบุตร
2. ผศ.นุกูล อุบลมาน
3. ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์

มหาวิทยาลัยมหิดล

1. รศ.ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย
2. รศ.ศุภชัย นาทะพันธ์
3. ผศ.ดร.กนกวรรณ กิ่งผดุง
4. ผศ.ดร. ดร.ธนกรณ์ แน่นหนา
5. ผศ.ดร.วเรศรา วีระวัฒน์
6. ผศ.ดร.สรนาถ ไธฏ
7. ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย
8. ดร.จิรพรรณ เสี่ยงโรคาพาธ
9. ดร.มงคล เพ็ญวิบูลย์
10. ดร.รณชัย ศีโรเวฐนุกูล
11. ดร.ศุภชัย ราชภูริศิริ
12. อ.กัญจน์ คณาธารทิพย์
13. อ.ดวงยศ สุภักดิ์
14. อ.ธนา สาตรา
15. อ.นพกร ภูระยา
16. อ.พิมพ์วิมลชัย สุตะโตตร
17. อ.สิทธิพันธุ์ ตักทวารุพันธ์

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

1. ผศ.เสริมสุข บัวเจริญ

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

1. รศ.ธนรัตน์ แต้วัฒนา
2. ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์
3. ผศ.ดร.พิลดา หวังพานิช
4. ผศ.รศ.ดร.กิตติปัญญาพัฒน์
5. ดร.ถิรพงษ์ คงประเสริฐ
6. ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ
7. ดร.วราธร ปัญญางาม
8. ดร.สิริเดช ชาตินิยม

มหาวิทยาลัยศิลปากร

1. ผศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร
2. ผศ.จันทร์เพ็ญ อุนร์ดนานนท์
3. ผศ.วันชัย ดีลากวีวงศ์
4. ดร.กัญจนา ทองสนธิ
5. ดร.คณิศ พลอยดามัย
6. ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม
7. ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์
8. อ.กวินทร สัยเจริญ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

1. รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล
2. รศ.สมชาย ชูโถม
3. รศ.วันดา รัตนมณี
4. ผศ.ดร.กลางเดือน โทษนา

-
5. ผศ.ดร.ธเนศ รัตน์วิไล
 6. ผศ.ดร.นภิสพร มิ่งมงคล
 7. ผศ.ดร.รัชชานา สีนธาวลัย
 8. ผศ.ดร.สุภาพรพรณ ไชยประพิทธิ์
 9. ผศ.ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์
 10. ผศ.ดร.อุจน์ สังขพงศ์
 11. ผศ.เจริญ เจตวิจิตร
 12. ผศ.พิเชษฐ ตระการชัยศิริ
 13. ผศ.สงวน ตั้งโพธิ์ธรรม
 14. ผศ.ดร.ประกาศ เมืองจันทร์บุรี

มหาวิทยาลัยสยาม

1. รศ.ดร.วันชัย ธิจิราวิช
2. รศ.ศันสนีย์ สุภาภา
3. ผศ.ดร.เฉลิมเกียรติ วงศ์วินทร์
4. ผศ.ดร.รัฐาณี รุ่งแทนคุณ
5. ผศ.ดร.อาทิตย์ โสตร์โยม
6. อ.ถวัลย์ พุฒยงกูร
7. อ.ธีรชนนท์ แคนเขต
8. อ.ปณิศา คินดี
9. อ.พงศ์พัฒน์ เพชรรุ่งเรือง
10. อ.วิมลพรรณ คงสมบูรณ์

มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

1. รศ.ดร.สถาพร อมรสวัสดิวัฒนา
2. ผศ.ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร
3. ผศ.ดร.ชนะ เยี่ยงกมลสิงห์
4. ดร.วิวัฒน์ชัย พฤษภานนท์

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

1. ดร.นิตากร สมสุข
2. อ.จิตลดา หมายมั่น
3. อ.วรลักษณ์ เสถียรรังสฤษฏ์
4. อ.อรอุมา กอสนาน

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

1. รศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส
2. ผศ.ดร.ศศิธร ภูนิคม
3. ผศ.ดร.นลิน เพียรทอง
4. ผศ.ดร.บุษสรา เกรียงกรกฎ
5. ผศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ
6. ผศ.ดร.สมบัติ สิ้นธุเชาวน์
7. ดร.จรายพร แสนทวีสุข
8. ดร.ธารชดา พันธุ์นิกุล
9. ดร.สัณฑ์ โอฟ้าพิริยกุล

โรงเรียนนายเรืออากาศ

1. น.อ.สุทธิ ศรีบูรพา
2. น.ท.ปัญญาธิกรักษ์ โภคัลวัฒน์

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

1. ผศ.ดร.ณัฐพล ลิ่มจิระจรัส
2. ผศ.ดร.พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์
3. ผศ.ดร.วราคม เนินน้อย
4. ผศ.ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ
5. ดร.กรกฎ เหมสถาปิตย์
6. ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนวงษ์
7. ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

1. ผศ.ดร.สุพัฒตรา เกษราพงศ์
2. ผศ.ชาลิต มณีศรี
3. ดร.อัศวิน วงศ์วิวัฒน์
4. อ.จักรพันธ์ กัณหา
5. อ.ธนิศ ศรีวะรมย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

1. ดร.วิจิตรสวัสดิ์ สุขสวัสดิ์ ณ อยุธยา
2. อ.ธนกฤต โชติภาววิศ
3. อ.ธนิดา สุนาร์ักษ์
4. อ.พัฒน์พงษ์ แสงหัดถวิวัฒนา
5. อ.พรเทพ แก้วเชื้อ
6. อ.วรินทร์ เกียรติคุณกุล
7. อ.อรณิชา อนุชิตชาญชัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1. รศ.ดร.ณัฐรา ศุภดิษฐ์เรียม
2. ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์
3. ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล
4. ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง
5. ผศ.นฤฤทธิ์ คชฤทธิ์
6. ผศ.ไพฑูรย์ พูลสุขโข
7. ผศ.ไพฑูรย์ แยมเผื่อน
8. ผศ.ศุภเอก ประมูลมาก
9. ผศ.ศรีโร จาตุภิญโญ
10. ผศ.สมศักดิ์ แกนทอง
11. ผศ.สุรัตน์ ตรีวานพงษ์
12. ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ
13. ดร.ชัยยะ ปราณีเดพลกรัง
14. ดร.ระพี กาญจนะ
15. อ.วราญา วัฒนจิตศิริ

มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

1. รศ.ดร.ไพโรจน์ เนียมมณี
2. ผศ.วิษณุ บัวเทศ

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

1. รศ.นิตยา สวัสดิพงษ์
2. ผศ.สุทัศน์ จันบัวลา
3. ดร.ชาติ หิชะ
4. ดร.ชรินทร์ กุลเศรษฐ์ณัฐลี
5. ดร.สิรวลภ เรืองช่วย คู่ประกาย

การประชุมวิชาการหน่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2556 16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา ชลบุรี
ข้อมูลเกี่ยวกับกลุ่มบทความ

- MAT012 การประยุกต์ใช้พีแอลซีสำหรับการควบคุมเครื่องทดสอบแรงดึง
เดชา สุขมา ประภวต หงษาชาติ เอกสิทธิ์ ชนินทรภูมิ และ ศิริพงศ์ ลัมพาภวัฒน์
- MAT013 การเตรียมวัสดุแผ่นวัสดุผสมที่เตรียมจากต้นรูปภาชนะและพอลิแลคติกแอซิด
เกียรติชัย อ่ำคลองธรรม และ สุนทร มุลทา
- MAT014 การสร้างตู้เย็นอนุรักษ์พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์และแผ่นทำความเย็น
พิทักษ์ พนาวัน ประยูร สุรินทร์ และ เจษฎา วงษ์อ่อน
- MAT015 อิทธิพลของกระบวนการผลิตที่มีผลต่อสมบัติของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดและ
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต
ลลิตา จอมแปง ณรงค์ชัย โอเจริญ นที ศรีสวัสดิ์ และ สุภาภรณ์ ทุมสอน
- MAT016 การพัฒนาสมบัติของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไตรเมทิลีนเทเรฟทาเลทและ
พอลิแลคติกแอซิด
ศิรดา ภาที ณรงค์ชัย โอเจริญ นที ศรีสวัสดิ์ และสุภาภรณ์ ทุมสอน
- MAT017 เส้นใยสององค์ประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต
เอกตินัย จันทร์ศรี ณรงค์ชัย โอเจริญ และ นที ศรีสวัสดิ์
- MAT018 การเพิ่มผลผลิตและประสิทธิภาพสายการผลิต ตของการประกอบรถยนต์โดยใช้ระบบการผลิต
แบบเพิ่มมูลค่า กรณีศึกษา : โรงงานผลิตรถยนต์อุตสาหกรรมการประกอบรถยนต์แห่งหนึ่ง
ชัยพลฤกษ์ อากาเวท และ ประยูร สุรินทร์
- MAT019 การใช้รีไซเคิลเพทเป็นสารเพิ่มเนื้อในการขึ้นรูปแบบหมุน
ปริญญา แกมณี และ ณรงค์ชัย โอเจริญ
- MAT020 ผลกระทบของกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตทผสมถ่านกัมมันต์โดยการปั่นเส้นใย
ด้วยไฟฟ้าสถิต สำหรับการดูดซับสารอินทรีย์
วัฒนา กลิ่นสุคนธ์ นที ศรีสวัสดิ์ จุริรัตน์ ประสาร และ สรพงษ์ ภาสุปรีย์
- MAT021 ผลกระทบของการเติมพอดเตอร์ สโตนในพอลิโพรพิลีนต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการลามไฟ
วัชรวิ จันฎ อำนวย ลาภเกษมสุข และ สรพงษ์ ภาสุปรีย์
- MAT022 การหาวัสดุทำเฟืองที่ผ่านกระบวนการชุบผิวแข็งที่มีขีดจำกัดความล้าสูงสุด
ณรงค์เดช พัฒนไพบูลย์ และ กิตติภักดิ์ รัตน์จันทร์
- MAT023 การศึกษาผลกระทบของเครื่องมือขึ้นรูปต่อความหยาบผิวของแผ่นสแตนเลส SUS 304
ด้วยวิธีขึ้นรูปแบบลูกโซ่
สุนทร สิทธิสกุลเจริญ พัตรทิมล สุวรรณกาญจน์ และ ชลธิชา นุชพงษ์

การพัฒนาสมบัติของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไตรเมทิลีนเทเรฟทาเลท
และพอลิแลคติกแอซิด

Development on properties of novel polymer blend Fiber between
Poly(trimethylene terephthalate) and Poly(lactic acid)

ศิรดา ปาดี¹ ณรงค์ชัย โอเจริญ^{1*} นที ศรีสวัสดิ² สุภาภรณ์ ทุมสมอน²

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

²ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

E-mail: O-charoen1@hotmail.com

Sirada Padee¹ Narongchai O-Charoen^{1*} Natee Srisawat² Supaphorn Thumsom²

¹Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University
of Technology Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand

²Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand

E-mail: o-charoen1@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการผสมพอลิไตรเมทิลีนเทเรฟทาเลท (PTT) และพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่อัตราส่วนของ PTT/PLA ที่ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 0/100 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนคู่ จากนั้นทำการขึ้นรูปเส้นใยด้วยเทคนิคการขึ้นรูปเส้นใยแบบหลอมเหลว ที่อัตราการหมุนเก็บเส้นใย 50 และ 100 m/min ซึ่งสามารถขึ้นรูปเส้นใย PTT/PLA ได้ถึงอัตราส่วน PTT/PLA ที่ 80/20 จากนั้นทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อสมบัติของเส้นใย PTT/PLA จากการทดสอบ พบว่า ค่าความเป็นผลึกของ PTT ลดลง เมื่อปริมาณ PLA ในเส้นใยเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการหดตัวของเส้นใย PTT/PLA ลดลง ขณะที่ค่าการยืดตัว และความแข็งแรงของเส้นใย (tenacity) ลดลง เนื่องจาก PLA เกิดการเสื่อมสภาพ ค่า tenacity ของเส้นใย PTT/PLA มีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน PTT/PLA ที่ 90/10 ที่อัตราการหมุนเก็บเส้นใย 50 m/min

คำหลัก ความเป็นผลึก, ความแข็งแรงของเส้นใย, พอลิเมอร์ผสม, การเสื่อมสภาพ

Abstract

PTT and PLA were blended in a twin screw extruder at PTT/PLA blend ratios of 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 and 0/100. The PTT/PLA blends were melt-spun into fibers by melt spinning technique. It can be noted that the PTT/PLA blends fibers were successfully spun fibers at PLA contents up to 20 wt%. The effect of blend ratios on properties of polymer blends and fibers was investigated. From the results, crystallinity of PTT decreased when increasing PLA contents in the blends fibers. Therefore, shrinkage of the blends fibers was decreased while elongation and tenacity of the blends fibers decreased. The 90/10 blend fiber exhibited the optimum tenacity at take up speed of 50 m/min.

Keywords: crystallinity, tenacity, polymer blend, degradation

1. บทนำ

พอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic Acid, PLA) เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นพลาสติกที่สังเคราะห์จากวัสดุธรรมชาติ PLA เป็นพอลิเมอร์กลุ่มพอลิเอสเทอร์ มีลักษณะใส มีความแข็งแรงสูง สามารถย่อยสลายได้ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถนำไปใช้งานขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น งานบรรจุภัณฑ์ และวัสดุทางการแพทย์ และมีแนวโน้มที่นำมาใช้ทดแทนพลาสติกที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี [1-4] อย่างไรก็ตาม PLA เป็นพอลิเมอร์ที่เปราะ และมีเสถียรภาพต่อความร้อนต่ำ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานของ PLA เช่น งานทางด้านสิ่งทอ การปรับปรุงข้อเสียดของ PLA ได้แก่ การเตรียมเป็นเส้นใยของพอลิเมอร์ผสม การปรับปรุงโครงสร้างหรือปรับปรุงผิวหน้าทางเคมี หรือการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูป [5-8]

Reddy และคณะ [5] ศึกษาการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ พอลิพรอพิลีน (PP) จากการศึกษาพบว่า PLA และ PP สามารถเข้ากันได้ บางส่วน เส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PP ที่เตรียมได้ สามารถย่อยได้ด้วยวิธี Disperse และมีสมบัติทนต่อการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้น

บริษัท NatureWorks LLC ผลิต polydilactide-based fiber (Ingeo™) ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานสิ่งทอเฉพาะทาง [1]

Kenawy และคณะ [8] ทำการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่าง poly(ethylene-co-vinylacetate) กับ PLA ผ่านกระบวนการปั่นเส้นใยแบบไฟฟ้าสถิต โดยใช้ tetracycline hydrochloride เป็นตัวทำลาย เส้นใยนาโนของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ นำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์นำส่งยา

พอลิไตรเมทิลีนเทเรฟทาเลท (polytrimethyl terephthalate, PTT) เป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มของพอลิเอสเทอร์ สมบัติที่โดดเด่นของ PTT คือ มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูง นิยมใช้งานทางด้านสิ่งทอ อย่างไรก็ตาม PTT มีข้อจำกัด ได้แก่ การผลิตที่ยังมีปริมาณน้อย และไม่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ [9-11]

Wu และคณะ [10] ศึกษาโครงสร้างและสมบัติของเส้นใย PTT ที่ได้จากกระบวนการปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลวด้วยความเร็วสูง (high-speed melt spun technique) โดยทำการปรับความเร็วรอบในการหมุนเก็บเส้นใยที่ 0.5-8 km/min จากการศึกษาพบว่า เส้นใย PTT มีการจัดเรียงตัวสูงสุดที่ความเร็วในการหมุนเก็บ 3 และ 4 km/min และเส้นใยจะมีลักษณะโครงสร้างแบบอสัณฐานที่ความเร็วในการหมุนเก็บต่ำ ขณะที่ความแข็งแรงของเส้นใย และการยืดตัว มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนเก็บเส้นใย

Zou และคณะ [11] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PTT และ PLA และศึกษาสมบัติด้านการเกิดผลึก สมบัติเชิงกล และการย่อยสลายด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส จากการศึกษาพบว่า PTT และ PLA เป็นพอลิเมอร์ผสมที่สามารถเข้ากันได้ ในโครงสร้างที่เป็นแบบอสัณฐาน PTT และ PLA มีการเกิดผลึกที่แยกจากกัน โดยที่ความแข็งแรงดึง และการยืดตัวที่จุดขาดลดลง เมื่อปริมาณ PLA เพิ่มขึ้น จากงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PTT กับ PLA มีการย่อยสลายโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้น

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพัฒนาเส้นใยจาก PTT และ PLA โดยเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PTT และ PLA (PTT/PLA) และศึกษาผลของสัดส่วนของพอลิเมอร์ผสมและความเร็วรอบในการหมุนเก็บเส้นใย ที่มีต่อสมบัติของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PTT/PLA เพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านสิ่งทอต่อไป

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 วัสดุ

1. PLA เกรด 2003D (NatureWorks, LLC, USA.)
2. PTT เกรด 509200 จากบริษัทในประเทศจีน

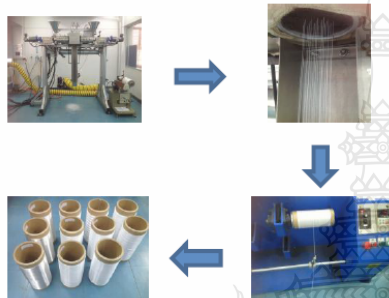
2.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PTT/PLA

นำ PTT และ PLA อบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PTT กับ PLA (PTT/PLA) ที่อัตราส่วน PTT/PLA 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 และ 0/100 wt% ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนคู่ (Brabender D-47055 Duibury Twin Screw Extruder, Germany) ที่อุณหภูมิ 270 °C

ความเร็วรอบ 100 rpm

2.3 การขึ้นรูปเส้นใย

ทำการขึ้นรูปเส้นใยของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PTT/PLA โดยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Hills:Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine) รุ่น LBS-100 ดังรูปที่ 1 อุณหภูมิในการขึ้นรูป 270 °C ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย 50 และ 100 m/min



รูปที่ 1 การขึ้นรูปเส้นใยโดยเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Hills:Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine)

3. การทดสอบ

ทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Capillary Rheometer อุณหภูมิการทดสอบ 270 °C

ทดสอบสมบัติทางความร้อนของเส้นใยพอลิเมอร์และเส้นใยของพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry: NETZSCH DSC 200 F3 อุณหภูมิการทดสอบ 30-300 °C อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min

ทดสอบการหดตัวของเส้นใย (Fiber Shrinkage Testing) ด้วยเทคนิค Boiling shrinkage ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 5104-02

ทดสอบสมบัติสมบัติทางกลของเส้นใยผสมระหว่าง PTT/PLA ด้วยเครื่อง Instron ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 3822-01

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการเตรียมพอลิเมอร์ผสม และขึ้นรูปเส้นใย

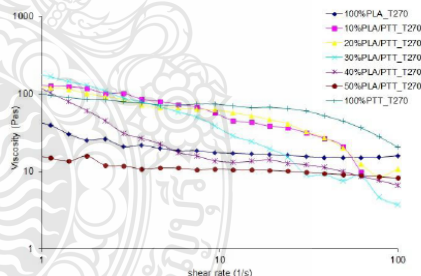
การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม ต้องใช้อุณหภูมิการขึ้นรูป

ที่ 270 °C ส่งผลให้ PLA เกิดการเสื่อมสภาพ พอลิเมอร์ผสมที่ออกจากหัวตายเกิดการบวมและจับตัวเป็นก้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ PLA ในพอลิเมอร์ผสม จึงต้องเก็บตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมที่หัวตาย และนำไปบิดเพื่อขึ้นรูปเส้นใยต่อไป

จากการขึ้นรูปเส้นใย PLA ที่อุณหภูมิการหลอมเหลวที่ 230 °C เส้นใยที่ได้มีลักษณะใส มีความมันเงาสูง สามารถม้วนเก็บเส้นใย ที่รอบของการม้วนเก็บ 50 และ 100 m/min โดยที่การขึ้นรูปเส้นใย PTT และ เส้นใยจากพอลิเมอร์ผสมของ PTT/PLA ที่อุณหภูมิ 270 °C สามารถขึ้นรูปเส้นใย PTT ได้ เส้นใยลักษณะขุ่น ไม่มี ความมันเงา และสามารถขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA ได้ที่อัตราส่วน PLA ไม่เกิน 20 wt% ที่รอบของการม้วนเก็บ 50 และ 100 m/min

4.2 ผลการทดสอบสมบัติการไหล

รูปที่ 2 แสดงสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA จากการทดลอง พบว่า PLA มีค่าความหนืดต่ำกว่า PTT ทำให้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่ออัตราส่วนของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมสามารถไหลได้ง่าย เนื่องจาก PLA เกิดการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 2 แสดงอัตราการไหลของพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA

4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางความร้อนของเส้นใยพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA จากผลการทดลอง ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) และค่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PTT และ PLA โพลีเอสเตอร์พอลิเมอร์และเส้นใยพอลิเมอร์ผสม มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่าพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA เป็นพอลิเมอร์ผสมแบบไม่เข้า

กัน (immiscible blend) [5] จากการคำนวณค่าความเป็นผลึก (% crystallinity) พบว่า ค่าความเป็นผลึกของ PLA ในเส้นใยพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง แสดงว่า PTT ชัดขวางการเกิดผลึกของ PLA [11] ขณะที่ความสามารถเกิดผลึกได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเป็นผลึกของ PTT มีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณ PLA ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น แสดงว่า PLA ชัดขวางการเกิดผลึกของ PTT เช่นกัน ทำให้ PTT ในพอลิเมอร์ผสมเกิดผลึกลดลง และอาจส่งผลให้เส้นใยของพอลิเมอร์ผสมมีค่าความแข็งแรงของเส้นใยต่ำลงได้ [11]

ตารางที่ 1 สมบัติทางความร้อนของเส้นใยพอลิเมอร์และเส้นใยพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA

Sample	Tm(°C)		Tg(°C)		%Crystallinity	
	PTT	PLA	PTT	PLA	PTT	PLA
PTT 100%	227.8	-	42.5	-	43.0	-
PTT90/10PLA	227.8	-	43.4	-	42.267	-
PTT80/20PLA	227.8	148.8	42.6	-	39.672	3.689
PTT70/30PLA	226.8	152.7	43.6	58.3	39.267	4.608
PTT60/40PLA	226.6	150.4	42.4	58.1	39.771	5.997
PTT50/50PLA	226.5	151.2	43.6	58.2	39.228	7.546
PLA2003D100%	-	148.0	-	57.9	-	30.366

4.5 ผลการทดสอบสมบัติการหดตัวของเส้นใย

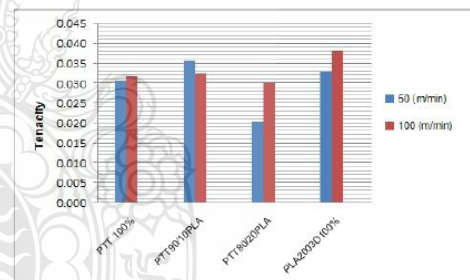
ผลการทดสอบการหดตัวของเส้นใยพอลิเมอร์และเส้นใยของพอลิเมอร์ผสมแสดงดังตารางที่ 2 จากผลการทดลอง พบว่า เส้นใย PLA มีค่าการหดตัวที่สูง แสดงว่าเกิดการหดตัวได้ง่าย ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพของ PLA ในเส้นใย เมื่อขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่ค่าการหดตัวของเส้นใยพอลิเมอร์ผสม มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับค่าการหดตัวของเส้นใย PTT ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่ลดลง เมื่อปริมาณ PLA ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้น [11] เมื่อพิจารณาค่าการหดตัวของเส้นใยที่อัตราการม้วนเก็บต่างกัน พบว่าที่อัตราเร็วในการม้วนเก็บเพิ่มขึ้น ค่าการหดตัวของเส้นใย PTT และเส้นใยพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากเส้นใยเกิดการจัดเรียงตัวได้น้อย ที่ความเร็วในการม้วนเก็บสูง [11] จึงมีแนวโน้มในการหดตัวที่ลดลง โดยที่เส้นใยพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA ที่อัตราส่วน 90/10 มีค่าการหดตัวที่ต่ำที่สุดที่อัตราการม้วนเก็บเส้นใย 100 m/min

ตารางที่ 2 การหดตัวของเส้นใยผสม PTT/PLA ที่อัตราการม้วนเก็บเส้นใย 50 และ 100 m/min

Sample	% Shrinkage 50 (m/min)	% Shrinkage 100 (m/min)
PTT 100%	11.4	9.7
PTT90/10PLA	0.7	0.4
PTT80/20PLA	4.4	2.4
PLA2003D100%	47.7	47.4

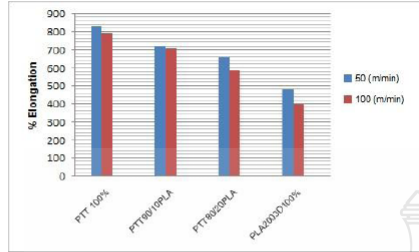
4.6 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของเส้นใยและเส้นใยพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA

รูปที่ 3 แสดงค่าความแข็งแรงของเส้นใย (tenacity) ในเส้นใยพอลิเมอร์และเส้นใยพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA จากรูปที่ 5 พบว่า ค่า tenacity ของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของ PLA ซึ่งเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพของ PLA โดยที่ค่า tenacity ของเส้นใย PTT/PLA สูงสุดอยู่ที่อัตราส่วน PTT/PLA ที่ 90/10 ที่อัตราการม้วนเก็บเส้นใยที่ 50 m/min



รูปที่ 3 ความแข็งแรงของเส้นใย PTT, PLA และเส้นใยพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA

รูปที่ 4 แสดงค่าการยืดตัวของเส้นใยพอลิเมอร์และเส้นใยพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA จากผลการทดลอง พบว่า เส้นใย PLA มีการยืดตัวได้ดี ขณะที่เส้นใย PTT มีการยืดตัวต่ำ จากรูปที่ 4 จะเห็นว่า เส้นใยพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA มีการยืดตัวได้น้อยลง เมื่อปริมาณ PLA ในเส้นใยพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าการยืดตัวของเส้นใยผสมลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วในการม้วนเก็บจาก 50 m/min เพิ่มขึ้นเป็น 100 m/min [11]



รูปที่ 4 ค่าการยืดตัวของเส้นใย PTT, PLA และเส้นใยพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA

5. สรุป

งานวิจัยนี้สามารถขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PTT/PLA ได้ที่ปริมาณ PLA ไม่เกิน 20 wt% และอัตราการม้วนเก็บเส้นใย 50 และ 100 m/min ปริมาณความเป็นผลึกของ PLA และ PTT ในเส้นใยพอลิเมอร์ผสม มีค่าลดลง แสดงว่า PLA และ PTT ชัดขวางกันเกิดผลึกของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง และส่งผลให้ความแข็งแรงและการยืดตัวของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมลดลง นอกจากนี้การขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ผสมที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ PLA ในเส้นใยนั้นเกิดการเสื่อมสภาพ และส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง ผลจากงานวิจัยนี้ เส้นใยพอลิเมอร์ผสม PTT/PLA ที่อัตราส่วน 90/10 และอัตราการม้วนเก็บเส้นใย 50 m/min มีค่าความแข็งแรงและสมบัติทางความร้อนที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านสิ่งทอต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการปิโตรเลียมและปิโตรเคมี สถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี ปตท. บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

เอกสารอ้างอิง

[1] Nampoothiri, K.M., Nair, N.R., and John, R. 2010. An Overview of the Recent Developments in Polylactide (PLA) Research. *Bioresource Technology*, 101: 8493-8501.
[2] Lunt, J. 1998. Large-scale production, properties

and commercial applications of polylactic acid polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 59:145-152.

[3] Drumright, R.E., Gruber, P.R. and Henton, D.E. 2000. *Poly(lactic acid) Technology*. *Advanced Materials*, 12:1841-1846.
[4] Byun, Y., Kim, Y.T. and Whiteside, S. 2010. Characterization of an Antioxidant Poly(lactic acid) (PLA) Film Prepared with α -tocopherol, BHT and Polyethylene Glycol Using Film Cast Extruder. *Journal of Food Engineering*, 100: 239-244
[5] Reddy, N., Nama, D. and Yand, Y. 2008. Poly(lactic acid)/Polypropylene Polyblend Fibers for Better Resistance to Degradation. *Polymer Degradation and Stability*, 93: 233-241.
[6] Gupta, B., Revagade, N. and Hilborn, J. 2007. Poly(lactic acid) fiber: An Overview. *Progress in Polymer Science*, 32: 455-482.
[7] Rasal, R.M., Janorkar, A.V. and Hirt, D.E. 2010. Poly(lactic acid) modifications. *Progress in Polymer Science*, 35: 338-356.
[8] Kenawy, E., *et al.* 2002. Release of Tetracycline Hydrochloride From Electrospun Poly(ethylene-co-vinylacetate), Poly(lactic acid), and a Blend. *Journal of Controlled Release*, 81: 57-64.
[9] Wu, J., *et al.* 2001. In Situ Study of Structure Development During Continuous Hot-Drawing of Poly(trimethylene terephthalate) Fibers by Simultaneous Synchrotron Small- and Wide-angle X-ray Scattering. *Polymer*, 42: 7161-7170.
[10] Wu, G., Li, H., Wu, Y. and Cuculo, J.A. 2002. Structure and Property Studies of Poly(trimethylene terephthalate) High-speed Melt Spun Fibers. *Polymer*, 43: 4915-4922.
[11] Zou, H., Yi, C., Wang, L. and Xu, W. 2010. Crystallization, Hydrolytic Degradation, and Mechanical Properties of Poly(trimethylene terephthalate)/Poly(lactic acid) Blends. *Polymer Bulletin*, 64: 471-481.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวศิรดา ภาดี
วัน เดือน ปีเกิด	11 กรกฎาคม 2530
ที่อยู่	256 หมู่ 11 บ้านพลูทอง ตำบล ท่าสุค อำเภอ เมือง จังหวัด เชียงราย 57100
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ แขนงการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	ผู้ช่วยนักวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	086-1809981
E-Mail	Siradaaom@hotmail.com

