

ผลกระทบของสภาวะการปั่นแบบหลอมเหลวที่มีต่อรูปร่างหน้าตัด  
สมบัติทางกลและการสะท้อนแสงของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด

EFFECTS OF MELT SPINNING CONDITIONS ON  
CROSS-SECTION FEATURES MECHANICAL AND  
REFLECTION PROPERTIES OF POLY(LACTIC ACID) FIBERS

นรรจงพร เรืองไพศาล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลกระทบของสภาวะการปั่นแบบหลอมเหลวที่มีต่อรูปร่างหน้าตัด  
สมบัติทางกลและการสะท้อนแสงของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด

นรรจงพร เรืองไพศาล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2556  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของสภาวะการปั่นหลอมที่มีต่อรูปร่างหน้าตัด สมบัติทางกล และการสะท้อนแสงของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด Effects of Melt Spinning Conditions on Cross-section Features Mechanical and Reflection Properties of Poly(Lactic Acid) Fibers
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวนรรจพร เรืองไพศาล
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีช์, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์นที ศรีสวัสดิ์, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....	ประธานกรรมการ
(อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิรัตน์ เล้าห์บุตรี, ปร.ด.)	
.....	กรรมการ
(อาจารย์กุลวดี สังข์สนธิ, Ph.D.)	
.....	กรรมการ
(อาจารย์นที ศรีสวัสดิ์, ปร.ด.)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีช์, Ph.D.)	

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

วันที่ 6 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของสภาวะการปั่นแบบหลอมเหลวที่มีต่อรูปร่างหน้าตัด สมบัติทางกลและการสะท้อนแสงของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวนรรจพร เรืองไพศาล
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์นที ศรีสวัสดิ์, ปร.ด.
ปีการศึกษา	2556

### บทคัดย่อ

พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลายในการนำไปใช้งานของพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ จึงมีการใช้เทคนิคปั่นแบบหลอมเหลวเพื่อขึ้นรูปเส้นใยด้วยหัวฉีดที่หน้าตัดแตกต่างกัน เพื่อเพิ่มหรือปรับเปลี่ยนสมบัติบางประการให้กับเส้นใยก่อนที่จะนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น พื้นที่ผิว ผิวสัมผัส และความมันเงา อย่างไรก็ตามมักพบปัญหาการขาดง่าย และยากที่จะคงรักษารูปร่างของหน้าตัดของเส้นใยให้มีหน้าตัดเหมือนกับหัวฉีดเส้นใยได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดด้วยกระบวนการปั่นหลอมต่อสมบัติทางกล สมบัติด้านการสะท้อนแสง และการติดสีของเส้นใย

เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดขึ้นรูปด้วยหัวฉีดเส้นใยที่มีหน้าตัดต่างกัน คือ แบบวงกลม (Circular) และแบบสี่แฉก (4-lobed) ตัวแปรที่ทำการศึกษาคืออุณหภูมิในการขึ้นรูป อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ และความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยที่แตกต่างกัน โดยทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (ASTM D 3822-01) การสะท้อนแสงและการติดสีของเส้นใย (CIELAB)

ผลการทดลองพบว่าเส้นใยที่ขึ้นรูปจากหัวฉีดเส้นใยหน้าตัดแบบวงกลมสามารถรักษารูปร่างตามลักษณะเดิมของหัวฉีดได้ในขณะที่เส้นใยที่ขึ้นรูปด้วยหัวฉีดแบบสี่แฉกจะปรากฏลักษณะหน้าตัดของเส้นใยที่หลากหลายขึ้นอยู่กับสภาวะการปั่นหลอม จากการวิเคราะห์ค่าบ่งชี้รูปร่าง (Shape factor) พบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อรูปร่างหน้าตัดของเส้นใยมากที่สุดคืออุณหภูมิ การขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำ 220 องศาเซลเซียส เส้นใยทั้งสองหน้าตัดแสดงสมบัติเชิงกลดี โดยเฉพาะเส้นใยที่ขึ้นรูปด้วยหัวฉีดแบบสี่แฉก พบว่าเส้นใยรูปร่างหน้าตัดแบบสี่แฉกที่ขึ้นรูปได้มีค่าบ่งชี้รูปร่างคล้ายกับหัวฉีดมากที่สุด ซึ่งบ่งบอกว่าเส้นใยที่สามารถรักษารูปร่างหน้าตัดแบบสี่แฉกของหัวฉีดไว้ได้ เส้นใยที่ได้มีสมบัติการสะท้อนแสงที่ดี เหมาะที่จะนำไปใช้งานสิ่งทอที่ต้องการผิวมันเงาได้

**คำสำคัญ:** เส้นใยพอลิแลคติกแอซิด การปั่นแบบหลอมเหลว เส้นใยแบบมีรูปร่างหน้าตัด

<b>Thesis Title</b>	Effects of Melt Spinning Conditions on Cross-section Features Mechanical and Reflection Properties of Poly(Lactic Acid) Fibers
<b>Name-Surname</b>	Miss Nanjaporn Roungpaisan
<b>Program</b>	Materials Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Sorapong Pavasupree, Ph.D.
<b>Thesis Co-advisor</b>	Mr. Natee Srisawat, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2013

## ABSTRACT

Poly(lactic acid, PLA) has been widely used for biodegradable plastic applications. Melt spinning technique of PLA fibers with varied cross-sectional shapes was used to improve some properties such as surface area, hand touch and luster. However, PLA fibers from this technique tend to easily break and difficult to make cross-section fibers with the same hole orifice. This research aimed to study the effects of spinning conditions on mechanical, fiber reflection and dyeing properties of PLA fibers.

PLA fibers were prepared by melt spinning process with two spinneret hole profiles (circular, and 4-lobed shapes). The spinning parameters included spinning temperatures, throughput rates, and fiber take up speeds were studied. The prepared fibers were tested by tensile strength (ASTM D 3822-01), reflection, and dyeing properties (CIELAB).

The results revealed that, circular PLA fibers could remain circular shapes resembling its original spinneret whereas 4-lobed PLA fibers exhibited variations in cross-sectional shapes with spinning conditions. The calculated shape factors indicated that the spinning temperature was a major factor that determined PLA fiber shape. At the spinning temperature of 220°C, both of the prepared fibers shapes showed good mechanical properties. The cross-sectional 4-lobed shape PLA fibers showed the similar shape to that of the original 4-lobed orifice. This spinning condition was therefore preferable to produce 4-lobed PLA fibers with good luster, which could give appearance feature in textile applications.

**Keywords:** poly(lactic acid) fibers, fiber melt spinning, cross-sectional fiber

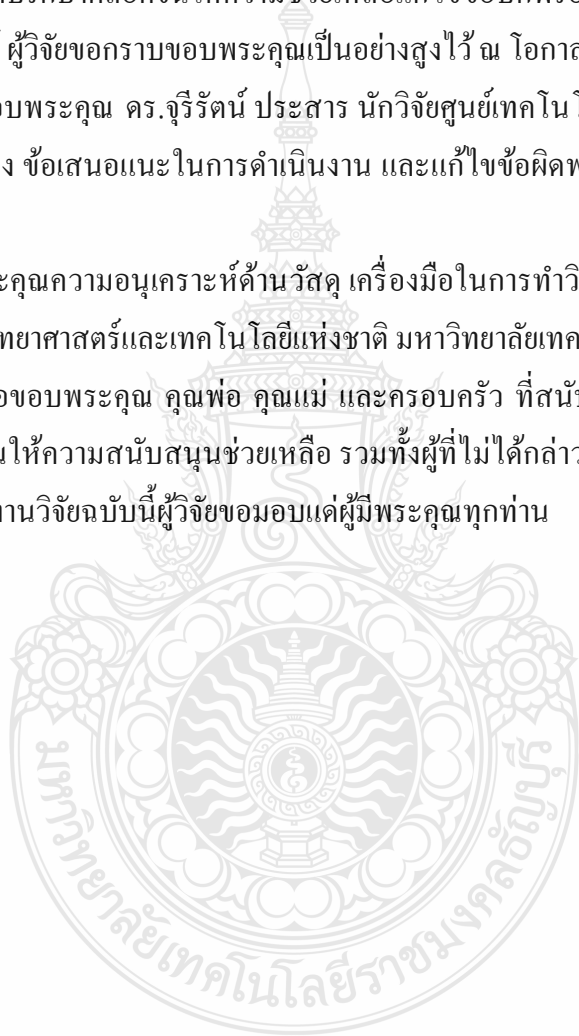
## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภูสุปรีย์ ดร.นที ศรีสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร. กุลวดี สังข์สนิท ดร. ณรงค์ชัย โอเจริญ กรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิรัตน์ เล่าห์บุตร ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.จूरรัตน์ ประสาร นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้คำแนะนำแนวทาง ข้อเสนอแนะในการดำเนินงาน และแก้ไขข้อผิดพลาดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณความอนุเคราะห์ด้านวัสดุ เครื่องมือในการทำวิจัย และเครื่องมือวิเคราะห์จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่สนับสนุนทั้งกำลังใจและกำลังทรัพย์ทุกท่านที่มีส่วนให้ความสนับสนุนช่วยเหลือ รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ด้วย สำหรับคุณความดีอันเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



นรรจงพร เรืองไพศาล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(9)
สารบัญรูป.....	(10)
บทที่ 1 บทนำ.....	17
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	17
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	19
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	19
1.4 ประโยชน์ของการวิจัย.....	20
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	21
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid).....	25
2.3 การผลิตเส้นใยสังเคราะห์.....	30
2.4 รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใย (Cross Sectional Fibers).....	32
2.5 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณทางออกของดา.....	33
2.6 สาเหตุของการบวมตัวของพลาสติกเหลว.....	34
2.7 สมบัติการไหลของพอลิเมอร์ในการไหลแบบเฉือน.....	35
2.8 เครื่องมือวัดความหนืดแบบจานกลมแผ่นขนาน (Parallel-Plate Viscometer).....	38
2.9 การวิเคราะห์ทางความร้อนเชิงน้ำหนัก.....	39
2.10 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ (Mechanical Properties of Polymers).....	40
2.11 ลักษณะพื้นฐานทางกายรูปของสี.....	45

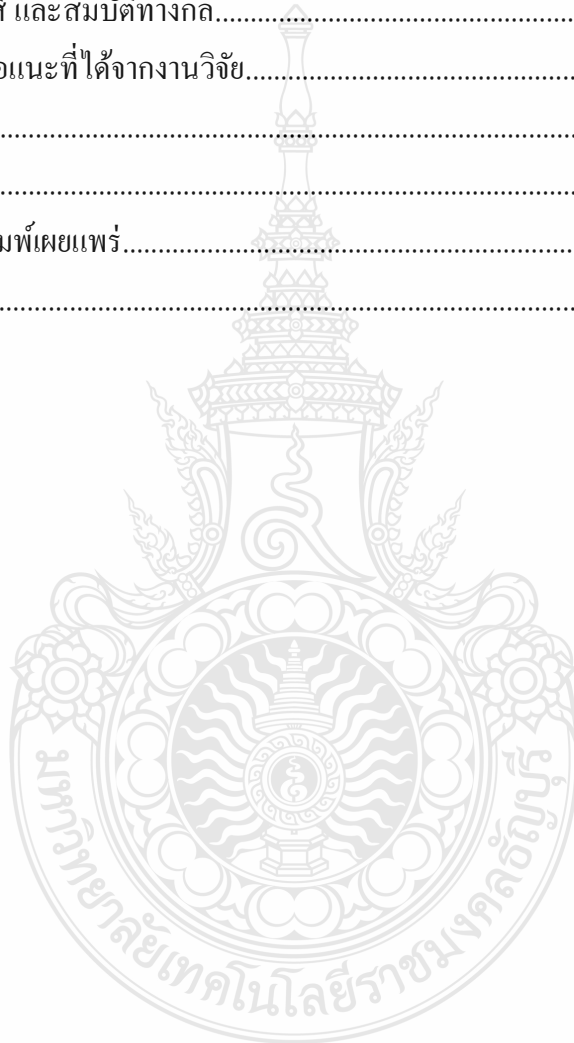
## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.12 การทำงานของเครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง.....	50
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	55
3.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี.....	55
3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	56
3.3 ทดสอบสมบัติของเม็ดซีฟโพลีแลคติกแอซิด.....	57
3.4 ศึกษาสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่ไม่ผ่านการผสมใดๆ ที่มีหน้าตัดเส้นใยต่างๆ กัน.....	58
3.5 ศึกษาการปั่นหลอมขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงสีที่มีรูปร่างหน้าตัด ต่างกัน.....	63
3.6 ศึกษาผลของการติดสีและการสะท้อนแสงของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด ที่มีหน้าตัดเส้นใยต่างกัน (Dye Uniformity and Reflection).....	64
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	67
4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเม็ดซีฟโพลีแลคติกแอซิด (PLA).....	67
4.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยที่มี หน้าตัดต่างๆ กัน.....	69
4.3 ค่าปัจจัยรูปร่างหน้าตัด (Compactness Factor) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดหน้า ตัดแบบวงกลม (Circular) และสี่แฉก (4-Lobed) ที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆ กัน.	76
4.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหน้าตัดของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด ผสมผงสีที่ขึ้นรูปได้ต่อสมบัติเชิงกล การสะท้อนแสง และการติดสี.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	92
5.1 ผลของสภาวะการขึ้นรูปที่มีต่อรูปร่างหน้าตัดเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด.....	92
5.2 ผลของการเติมอนุภาคสีที่มีต่อรูปร่างหน้าตัดเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด.....	93
5.3 ผลของสภาวะการขึ้นรูปที่มีต่อรูปร่างหน้าตัดเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่ผสม สีและสมบัติด้านการสะท้อนแสง.....	93



## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	92
5.4 ผลของสภาวะการขึ้นรูปที่มีต่อรูปร่างหน้าตัดเส้นใยระหว่างไม่ผสมและผสม อนุภาคสี และสมบัติทางกล.....	93
5.5 ข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัย.....	93
รายการอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	98
ประวัติผู้เขียน.....	125



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน.....	21
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่มองเห็นและคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนโดยวัตถุ.....	46
ตารางที่ 4.1 ค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัดของหัวฉีด.....	76
ตารางที่ 4.2 เฉดสีของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมสี 0.1% blue ที่ปั่นหลอมขึ้นรูปด้วย สภาวะต่างๆ กัน ความเร็วหมุนเก็บ(S) 300 m/min.....	87
ตารางที่ 4.3 ค่าการติดสีบนเส้นใย (Dye-uniformity) ที่อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ 0.34 g/hole/min.....	87
ตารางที่ 4.4 ค่าการติดสีบนเส้นใย (Dye-uniformity) ที่อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ 0.52 g/hole/min.....	88
ตารางที่ 4.5 เฉดสีของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมสี 0.1% blue ที่ปั่นหลอมขึ้นรูปด้วย สภาวะต่างๆ กัน ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min.....	89
ตารางที่ 4.6 ค่าการติดสีบนเส้นใย (Dye-uniformity) ที่อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ 0.34 g/hole/min.....	89
ตารางที่ 4.7 ค่าการติดสีบนเส้นใย (Dye-uniformity) ที่อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ 0.52 g/hole/min.....	90

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างเส้นใยที่มีรูปร่างหน้าตัดเส้นใยต่างๆกัน.....	18
รูปที่ 1.2 การเปลี่ยนแปลงของเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ (สีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับหัวฉีดเส้นใย (เหลือง).....	18
รูปที่ 2.1 การจำลองการบวมตัวของเส้นใยพอลิพรอพิลีนที่มีหน้าตัดแบบกากบาทเปรียบเทียบกับ กับเส้นใยที่ขึ้นรูปได้.....	22
รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบแบบจำลองเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสามเหลี่ยมจากผลของการบวมตัว และความตึงผิว.....	23
รูปที่ 2.3 รูปร่างหน้าตัดเส้นใยพอลิเอสเทอร์แบบ 3-Mountain ที่สภาวะการปั่นหลอมต่างๆ กัน.....	24
รูปที่ 2.4 รูปร่างหน้าตัดเส้นใยพอลิเอสเทอร์แบบสามเหลี่ยม.....	25
รูปที่ 2.5 กระบวนการสังเคราะห์ PLA.....	26
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของกรดแลคติก.....	28
รูปที่ 2.7 Typical Melt Spinning Line.....	31
รูปที่ 2.8 รูปหน้าตัดเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์.....	32
รูปที่ 2.9 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่บริเวณทางออกของดาบ.....	33
รูปที่ 2.10 อัตราส่วนการบวมตัวที่เกิดจากอิทธิพลของลักษณะความเร็วการไหล.....	34
รูปที่ 2.11 การไหลแบบลามินาร์ของของไหลที่มีความหนืด.....	36
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของของไหลแบบต่างๆ.....	37
รูปที่ 2.13 พฤติกรรมการไหลนอนนิวทอเนียนแบบซูโดพลาสติกตามขอบเขตกฎยกกำลัง (Power Law Region) .....	38
รูปที่ 2.14 ไดอะแกรมเครื่องมือวัดความหนืดแบบแผ่นขนาน.....	39
รูปที่ 2.15 ชิ้นงานภายใต้แรงดึง.....	40
รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน.....	42

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.17 การล้อมรอบของการแตกหัก.....	43
รูปที่ 2.18 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Testing Machine) และการดึงขึ้นงาน.....	45
รูปที่ 2.19 แรงดึงดูระหว่างช่วงระหว่างสี่ดิสเพิร์สกับเส้นใยพอลิเอสเทอร์.....	48
รูปที่ 2.20 ลักษณะลำแสงเมื่อส่องผ่านวัตถุ.....	51
รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย.....	56
รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบความเสถียรต่อความร้อนของวัสดุ รุ่น TGA/SDTA851e.....	57
รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบความหนืด (Rheometer: Gemini 200HR Nano (Malvern Instruments)	58
รูปที่ 3.4 เม็ดชิฟพอลิแลคติกแอซิดเกรด 3052 D.....	59
รูปที่ 3.5 เครื่องอบเม็ดชิฟระบบลมร้อน (Hot Air Through Dryer).....	59
รูปที่ 3.6 ระบบการปั่นหลอมเพื่อขึ้นรูปเส้นใย.....	60
รูปที่ 3.7 หน้าตัดของรูหัวฉีดสปินเนอร์ (Orifice Spinneret) ที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใย วงกลม (Circular) (ซ้าย) และ สี่แฉก (4-Lobed) (ขวา).....	60
รูปที่ 3.8 แผ่นสำหรับตัดเส้นใย (Cutting Fiber Holder): ซ้าย และกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope): ขวา.....	61
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างวิธีการวัดขนาดรูหัวฉีดและเส้นใยที่ขึ้นรูปได้จากรูหัวฉีดที่มีหน้าตัดต่างกัน	62
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Tester).....	63
รูปที่ 3.11 ผงสีฟิคเมนต์สีน้ำเงิน Phthalocyanine: ซ้าย และเม็ดชิฟพอลิแลคติกแอซิดหลังผสม ด้วยสีน้ำเงิน (Phthalocyanine) 0.1% ที่ผ่านการอบแล้ว.....	63
รูปที่ 3.12 เครื่องวัดค่าสี (Datacolor 650 Spectrophotometer) .....	65
รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของพอลิแลคติกแอซิดต่ออัตราเงื่อนไขอุณหภูมิต่างๆ กัน	67

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 ความเสถียรต่อความร้อน (TGA) ของพอลิแลคติกแอซิดที่อุณหภูมิต่างๆกัน.....	68
รูปที่ 4.3 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) (บน-ล่าง) และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min (ซ้าย-ขวา) ที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	70
รูปที่ 4.4 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) (บน-ล่าง) และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min (ซ้าย-ขวา) ที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	71
รูปที่ 4.5 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) (บน-ล่าง) และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min (ซ้าย-ขวา) ที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	72
รูปที่ 4.6 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) (บน-ล่าง) และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min (ซ้าย-ขวา) ที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	73
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นรอบหน้าตัด (Perimeter) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด หน้าตัดแบบ วงกลม (Circular) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 และ 500 m/min ที่ อุณหภูมิต่างกัน (T) 220, 240 และ 260°C และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min.....	74
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นรอบหน้าตัด (Perimeter) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด หน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ(S) 300 และ 500 m/min ที่ อุณหภูมิต่างกัน (T) 220, 240 และ 260°C และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min.....	74
รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัด (Area) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัด แบบวงกลม (Circular) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 และ 500 m/min ที่อุณหภูมิ ต่างกัน (T) 220, 240 และ 260°C และอัตราการป้อนเนื้อ พอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min.....	75

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัด (Area) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดสี่แฉก (4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 และ 500 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) 220, 240 และ 260°C และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min.....	75
รูปที่ 4.11 ค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัด (Compactness Factor) ของเส้นใยพอลิแลคติก ที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆ กัน.....	76
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนืดของพอลิแลคติกแอซิดไม่ผสมสี (Non-Dye) และผสมสี (Dyed) ต่ออัตราเร็วที่อุณหภูมิต่างๆกัน (220, 240 และ 260°C)	77
รูปที่ 4.13 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 m/min ที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	78
รูปที่ 4.14 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min ที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	79
รูปที่ 4.15 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 m/min ที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	79
รูปที่ 4.16 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min ที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	80
รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นรอบหน้าตัด (Perimeter) ของพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ไม่ผสมสี (Non-Dye) และผสมสี (Dyed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 และ 500 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) 220 และ 260°C และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min.....	81
รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ (Area) ของพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ไม่ผสมสี (Non-Dye) และผสมสี (Dyed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 และ 500 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) 220 และ 260°C และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min.....	82

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.19 ค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัด (Compactness Factor) ของพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ไม่ผสมผงสี (Non-Dye) และผสมผงสี (Dyed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 และ 500 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) 220 และ 260°C และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min.....	83
รูปที่ 4.20 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างกัน (วงกลม: Circular และ สี่แฉก: 4-Lobed) ระหว่างไม่ผสมสี และผสมสี ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.52 g/hole/min และอุณหภูมิต่างกัน (T) 220 และ 260°C.....	84
รูปที่ 4.21 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างกัน (วงกลม: Circular และ สี่แฉก: 4-Lobed) ระหว่างไม่ผสมสี และผสมสี ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.52 g/hole/min และอุณหภูมิต่างกัน (T) 220 และ 260°C.....	84
รูปที่ 4.22 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่อระยะการยืดตัวของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างกันระหว่างไม่ผสมสี: A และผสมสี: B ที่ความเร็วหมุนเก็บ(S) 500 m/min อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.52 g/hole/min และอุณหภูมิต่างกัน (T) 220 และ 260°C.....	85
รูปที่ 4.23 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่อระยะยืดตัวของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างกัน (วงกลม: Circular และ สี่แฉก: 4-Lobed) ระหว่างไม่ผสมสี และผสมสี ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.52 g/hole/min และอุณหภูมิต่างกัน(T) 220 และ 260°C.....	86
รูปที่ 4.24 ค่าการสะท้อนแสงบนเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) และสี่แฉก (4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 m/min ที่สภาวะต่างๆ กัน.....	88
รูปที่ 4.25 ค่าการสะท้อนแสงบนเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) และสี่แฉก (4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min ที่สภาวะต่าง ๆ กัน.....	90

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

+a*	สีแดง
-a*	สีเขียว
+b*	สีเหลือง
-b*	สีน้ำเงิน
Bulk	ความฟองฟู
CIE	องค์กรที่กำหนดมาตรฐานด้านสี (International Commission on Illumination)
CED	ซอฟต์แวร์ (Hydromechanical simulation software) สำหรับวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหน้าตัดเส้นใย
Circular	วงกลม
°C	องศาเซลเซียส
Cross Sectional Fiber	เส้นใยแบบมีหน้าตัด
4DG™	เส้นใยแบบมีดองกลี
FEM	โปรแกรม Finite element method simulation สำหรับวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหน้าตัดเส้นใย
g/hloe/min	กรัมต่อรูต่อนาที
α-Hydroxy acids	กรดอัลฟาไฮดรอกซี
L*	ค่าความสว่าง
Luster	ความมันเงา
m/min	เมตรต่อนาที
Melt Spinning	การปั่นแบบหลอมเหลว
Octagon	แบบแปดเหลี่ยม
Orifice	รูหัวฉีดเส้นใย
PLA	พอลิแลคติกแอซิด
PLLA	พอลิแอลแลคติกแอซิด



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Pigment dye	สีพิกเมนต์
% R	เปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง
S	ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย
T	อุณหภูมิ
TP	อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์
TGA	การทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยความร้อน
Trilobal	แบบสามเหลี่ยม
Technical Textile	สิ่งทอทางเทคนิค
Tetragon	แบบสี่เหลี่ยม
Velocity	ความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย
$\alpha$	แอลฟา
$\beta$	เบต้า
$\gamma$	แกมมา



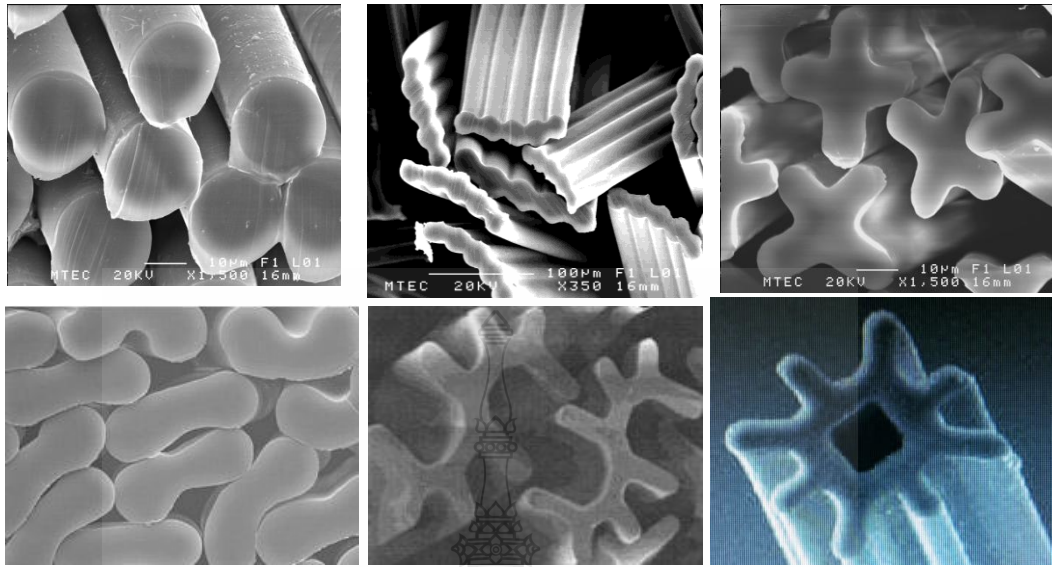
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

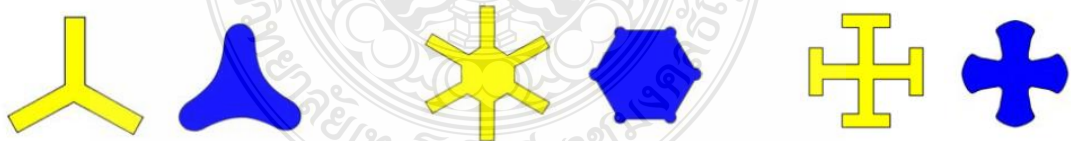
พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid) หรือ PLA ได้รับการการใช้งานอย่างแพร่หลายในแง่ของพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ ซึ่งถูกค้นพบในปี 1932 โดย Carothers (Du Pont) ผู้ซึ่งผลิตแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำด้วยความร้อนภายใต้สถานะสุญญากาศ การใช้งานในช่วงแรกถูกนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์เช่น ไหมละลาย (Sutures) ระบบควบคุมการนำส่งยา (Controlled Drug Release) โดย Du Pont และ Ethicon [1, 2] เนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตสูง อย่างไรก็ตามเมื่อไม่นานมานี้ ได้มีการพัฒนาและปรับปรุงการผลิตพอลิแลคติกแอซิดให้มีสมบัติการนำไปใช้งานที่ดียิ่งขึ้นในเชิงพาณิชย์ในประเทศสหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น โดยสารตั้งต้นที่นำมาผลิตเป็นแลคติกแอซิดสำหรับสังเคราะห์เป็นพอลิแลคติกแอซิดผลิตขึ้นจากแหล่งวัตถุดิบที่สร้างทดแทนใหม่ได้ (Renewable Resources) อย่างต่อเนื่อง ได้แก่ ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง เป็นต้น จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยแก้ปัญหาขยะ ลดการพึ่งพาทรัพยากรปิโตรเลียมลง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดมีสมบัติที่เด่นหลายประการ ได้แก่ ดูดซึมความชื้นต่ำ การซึมและส่งผ่านน้ำได้ดี ทดไฟยาก และก่อให้เกิดควันน้อย ทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) ฯลฯ จึงมีการนำพอลิแลคติกแอซิดมาผลิตในงานสิ่งทอเทคนิค (Technical Textile) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ค่อนข้างหลากหลาย เช่น ใช้เป็นเสื้อผ้า (Clothes) วัสดุกรอง (Filter) ผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง (Disposable) และการใช้งานด้านสมรรถนะสูงๆ [3]

ทั้งนี้เพื่อเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มและการใช้งานผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่หลากหลายจึงมีกลุ่มผู้วิจัยที่สนใจศึกษาเกี่ยวกับการปั่นแบบหลอมเหลวเพื่อขึ้นรูปเส้นใยประเภทเทอร์โมพลาสติก (พอลิพรอพิลีน, พอลิเอสเทอร์) โดยออกแบบบรูหัวฉีดเส้นใย (Orifice Spinneret) ให้สามารถขึ้นรูปเส้นใยให้มีหน้าตัดต่างๆกัน (Cross Sectional Fiber or Shaped Fibers) เช่น สามเหลี่ยม (Trilobal) สี่เหลี่ยม (Tetragon) เส้นใยแบบมีร่องลึก (4DG™) แปดเหลี่ยม (Octagon) ดาว (Star) เป็นต้น เพื่อเพิ่มหรือปรับเปลี่ยนสมบัติบางประการให้กับเส้นใยก่อนที่จะนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ความมันเงา (Luster) ฟองฟู (Bulk) น้ำหนักเบา (Light Weight) ผิวสัมผัส (Hand Tough) พื้นที่ผิว (Surface Area) การส่งผ่านน้ำ (Water Transport) เป็นต้น ดังรูปที่ 1.1 จึงทำให้ได้เส้นใยแต่ละหน้าตัดมีสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกันไป จากหน้าตัดแบบดั้งเดิมคือ หน้าตัดแบบวงกลม (Circular) [4-6]



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างเส้นใยที่มีรูปร่างหน้าตัดเส้นใยต่างๆกัน [6-7]

อย่างไรก็ตามในกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยแบบมีหน้าตัดด้วยกระบวนการปั่นแบบ หลอมเหลว (Melt Spinning Fibers) มักพบปัญหาการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหน้าตัดเส้นใยที่ขึ้นรูป ได้ กล่าวคือยากที่จะคงรักษารูปร่างของหน้าตัดของเส้นใยให้มีหน้าตัดเหมือนกับรูหัวฉีดเส้นใย (รูปที่ 1.2) ซึ่งเป็นผลมาจากพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในพอลิเมอร์ที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโทเนียน[8-11] ซึ่งเป็นสาเหตุทำการเกิดการบวมตัว (Die Swell) และความตึงผิว (Surface Tension) [12-15] กับพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลว (Polymer Melt) ก่อนที่จะฟอร์มรูปร่างตามหน้าตัดของรูหัวฉีดได้



รูปที่ 1.2 การเปลี่ยนแปลงของเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ (สีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับหัวฉีดเส้นใย (เหลือง) [12]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาการปั่นแบบหลอมเหลวเพื่อขึ้นรูปเส้นใยพอลิ แลคติกแอคผ่านหัวฉีดเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) และแบบสี่แฉก (4-Lobed) เนื่องจาก ทั้งสองหัวฉีดเส้นใยมีความซับซ้อนของรูปร่างหน้าตัดต่างกันมาก อาจทำให้ทราบถึงผลกระทบของ สภาวะการปั่นหลอมที่แตกต่างกัน คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใย (Spinning Temperature)

อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (Throughput Rate) ความเร็วในการม้วนเก็บ (Velocities) ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น โดยเปรียบเทียบรูปร่างหน้าตัดและสมบัติต่างๆ ของเส้นใยที่ได้ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบรูปร่างหน้าตัดและสมบัติของเส้นใยให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความหนืดขณะหลอมเหลวของพอลิแลคติกแอซิด เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาเลือกช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดด้วยเทคนิคการปั่นแบบหลอมเหลวด้วยหัวฉีดเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบวงกลม และสี่แฉกได้

1.2.2 เพื่อศึกษาเทคนิคและสภาวะการปั่นหลอมของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีรูปร่างหน้าตัดเส้นใยต่างๆกัน ต่อ ขนาด พื้นที่ผิว และลักษณะรูปร่างหน้าตัดเส้นใย

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการเติมอนุภาคสีต่อ สมบัติการสะท้อนแสง และการติดสีของเส้นใยพอลิแลคติกที่มีรูปร่างหน้าตัดเส้นใยต่างๆกัน

1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติบางประการของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่ผลิตได้

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของเม็ดพอลิแลคติกแอซิด ก่อนนำมาทำการขึ้นรูป

1. การทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยความร้อนด้วยเครื่องทดสอบ Thermogravimetric Analysis (TGA)

2. การทดสอบการเปลี่ยนแปลงความหนืดของพอลิแลคติกแอซิดที่อุณหภูมิต่างๆกันคือ 200, 205, 210, 220, 240 และ 260 °C โดยเครื่อง Viscosity Rheometer

1.3.2 ทำการขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผ่านหัวฉีดที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) และสี่แฉก (4-Lobed) ด้วยเทคนิคการปั่นแบบหลอมเหลวด้วยเครื่อง Randcastle Melt Spinning ที่สภาวะการปั่นหลอม ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิการปั่นหลอมที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยที่ 220, 240 และ 260 °C
2. อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ที่ 0.34 g/hole/min และ 0.52 g/hole/min
3. อัตราความเร็วในการม้วนเก็บที่ 300 m/min และ 500 m/min

เพื่อเปรียบเทียบขนาด (Area, Perimeter) และวัดค่าบ่งชี้รูปร่างของหน้าตัดเส้นใย (Compactness Factor)

1.3.3 ทำการเติมอนุภาคสี 0.1% Blue ในพอลิแลคติกแอซิดและขึ้นรูปเป็นเส้นใยที่มีหน้าตัดต่างกัน วงกลม (Circular) และสี่แฉก (4-Lobed) โดยเลือกสภาวะการขึ้นรูปเส้นใยที่เหมาะสม เพื่อเปรียบเทียบผลของรูปร่างหน้าตัดของเส้นใยที่ได้ต่อการสะท้อนแสง และการติดสี โดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์และวิเคราะห์ด้วย โปรแกรม ImageJ

1.3.4 ทำการทดสอบเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างกัน วงกลม (Circular) และสี่แฉก (4-Lobed)

1. การต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength): ASTM D 3822-01
2. เปอร์เซนต์การยืดตัว (% Elongation): ASTM D 3822-01

## 1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

1.4.1 สามารถนำองค์ความรู้และเทคนิคที่ได้จากการศึกษา ไปใช้ในการปั่นหลอมเพื่อขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างๆ กัน ด้วยกระบวนการปั่นแบบหลอมเหลว (Melt Spinning) ได้

1.4.2 ทำให้ทราบถึงผลสภาวะการปั่นหลอม และการเติมอนุภาคสีที่มีต่อรูปร่างหน้าตัด และสมบัติอื่นๆของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างกันระหว่าง วงกลม (Circular) และสี่แฉก (4-Lobed) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกรูปร่างหน้าตัดของเส้นใยที่มีสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งานได้

## 1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน (เริ่ม : กรกฎาคม 2012)	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวบรวมข้อมูลและวางแผนการดำเนินงาน	←→													
ดำเนินการจัดเตรียมเม็ดชิฟพอลิแลคติกแอซิด หัวฉีดเส้นใยและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง		←→												
นำเม็ด PLA ตัวอย่างไปทำการทดสอบสมบัติทาง ความร้อนเช่น TGA, Viscosity			←→											
ทำการขึ้นรูปเส้นใยด้วยเครื่อง Randcastle Melt Spinning ตามแผนดำเนินงาน					←→									
นำตัวอย่างเส้นใยที่ได้ไปทำการถ่ายด้วยกล้อง จุลทรรศน์เพื่อเปรียบเทียบวิเคราะห์ขนาดและ ลักษณะของหน้าตัดเส้นใยที่มีหน้าตัดต่างกัน							←→							
ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติเชิงกล และการสะท้อน แสงเปรียบเทียบระหว่างหน้าตัดแบบวงกลมและ แบบสี่แฉก							←→							
รวบรวมข้อมูล ทำการวิเคราะห์ผลและจัดทำรูปเล่ม									←→					

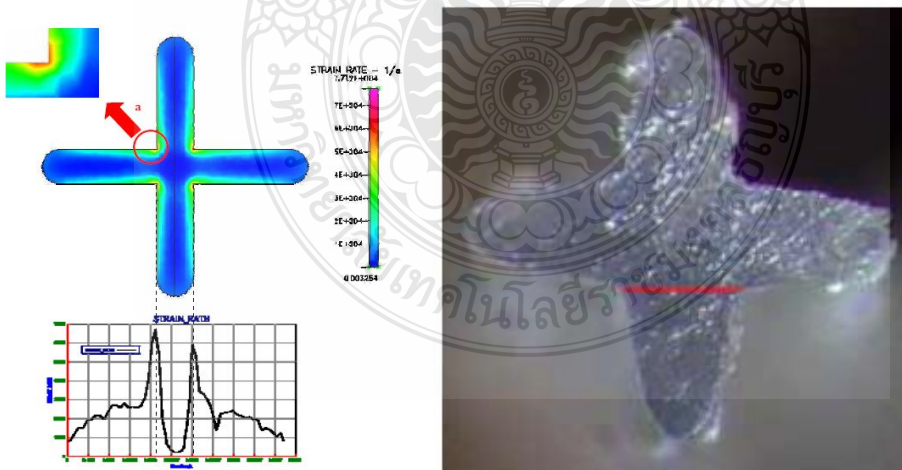
## บทที่ 2

### งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

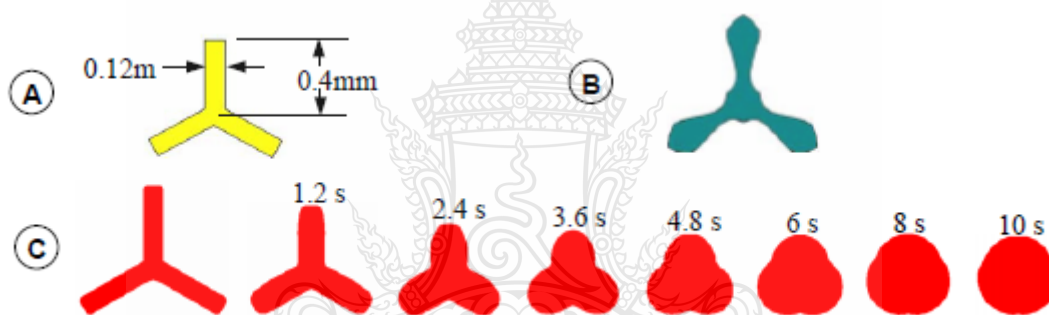
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการปั่นหลอมเพื่อขึ้นรูปเส้นใย (Melt Spinning Fibers) แบบมีรูปร่างหน้าตัดและการนำไปใช้ประโยชน์ ยกตัวอย่างดังต่อไปนี้

Hsiao-Chi และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างของหน้าตัดเส้นใยพอลิพรอพิลีนที่ขึ้นรูปได้ด้วยซอฟต์แวร์ Hydromechanical Simulation Software (CED) โดยใช้รูหัวฉีดเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบกากบาทเปรียบเทียบกับกรขึ้นรูปจริง โดยศึกษาผลของ Elastic Effect โดยป้อนค่าความหนืด อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันพบว่า จุดที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากที่สุดคือบริเวณตรงกลาง (มีมุมถึง 4 มุม) ดังรูปที่ 2.1 เมื่อจำลองรูปร่างของหน้าตัดเส้นใยที่ได้หลังจากป้อนพารามิเตอร์ในโปรแกรมเพื่อจำลองรูปร่างหน้าตัดเส้นใยพบว่า มีค่าอัตราการไหลต่ออัตราการเคลื่อนที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณขอบ ซึ่งจะเกิดการบวมตัวน้อยกว่าการแก้ปัญหาคือปรับค่าอัตราการไหลให้เหมาะสมกับรูปร่างของหัวฉีดนั้นๆ แต่ทั้งนี้ต้องออกแบบหน้าตัดของรูหัวฉีดสปินเนอร์ให้เหมาะสมกับ ค่าการไหลต่ออัตราเคลื่อนด้วย จึงจะสามารถช่วยลดปัญหาการบวมตัวของพอลิเมอร์ที่นำมาขึ้นรูปเป็นเส้นใยที่มีสมบัติความเป็นอิลาสติกต่างๆ กันได้



รูปที่ 2.1 การจำลองการบวมตัวของเส้นใยพอลิพรอพิลีนที่มีหน้าตัดแบบกากบาทเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ [12]

Yao และคณะ [13] ได้ทำการศึกษากลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหน้าตัดเส้นใยที่ไม่เป็นวงกลมโดยการใช้แบบจำลอง พบว่า เมื่อขึ้นรูปเส้นใยแล้วหน้าตัดเส้นใยที่ได้จะไม่เป็นไปตามรูปร่างหน้าตัดของรูปหัวฉีดเส้นใย (Spinneret Orifice) เนื่องจากปัญหาการบวมตัว และความตึงผิวของพอลิเมอร์ที่นำมาขึ้นรูปที่สภาวะต่าง ๆ กัน ทำให้รูปร่างหน้าตัดของเส้นใยเปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเขาเรียกปัญหานี้ว่า Newtonian Die Swell ซึ่งจะส่งผลถึง Surface Tension ด้วย กล่าวคือ ในการทดลองพบว่าเมื่อปล่อยให้พอลิเมอร์ขณะไหลออกจากรูปหัวฉีดแบบมีหน้าตัด ช่วงวินาทีแรกๆ ที่พอลิเมอร์ออกมา จะเกิดลักษณะการบวมตัว แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะเกิด การเปลี่ยนรูปร่างจากสามเหลี่ยม (Trilobal) เป็นวงกลมจากสาเหตุของ ความตึงผิว ดังนั้นเวลาจึงเป็นส่วนสำคัญของการพัฒนารูปร่างหน้าตัด โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหน้าจะเกิดบริเวณตรงกลางซึ่งมีมุมมากที่สุด จะเป็นบริเวณที่เกิด Surface Tension มากที่สุด

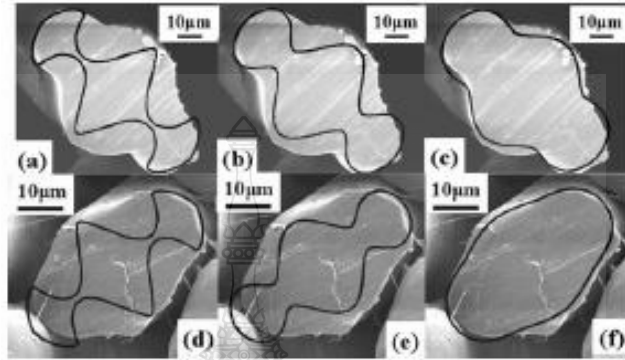


รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบแบบจำลองเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสามเหลี่ยมจากผลของการบวมตัวและความตึงผิว

ผลการวิจัยของ Zhou และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหน้าตัดของเส้นใยพอลิเอสเทอร์โดยใช้แบบจำลอง (Numerical Simulation) เพื่อใช้ในการคาดเดารูปร่างหน้าตัดสุดท้ายของเส้นใยที่ขึ้นรูปได้เปรียบเทียบกับเส้นใยที่ขึ้นรูปจริง โดยพารามิเตอร์ที่สนใจคือ อุณหภูมิ อัตราการลดขนาด อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ และ โหมดการให้ความเย็น ซึ่งพบว่าปัจจัยของอุณหภูมิและอัตราการลดขนาดเส้นใยมีส่วนสำคัญต่อความตึงผิวของพอลิเมอร์ในขณะหลอมเหลวและเป็นสาเหตุที่ทำให้ความลึกของร่องบนเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบ 3-Mountain มีแนวโน้มหายไป ดังรูปที่ 2.3 มากกว่าปัจจัยอื่นๆ เพราะถ้าการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการขึ้นรูปเกินกว่าจุดสมดุล (Optimum Point) จะไม่สามารถปรับเปลี่ยนรูปร่างหน้าตัดได้อีก โดยที่สภาวะการปั่นหลอมพอลิเอสเทอร์ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น จาก 270°C เป็น 290°C อนาคตจะส่งผลทำให้

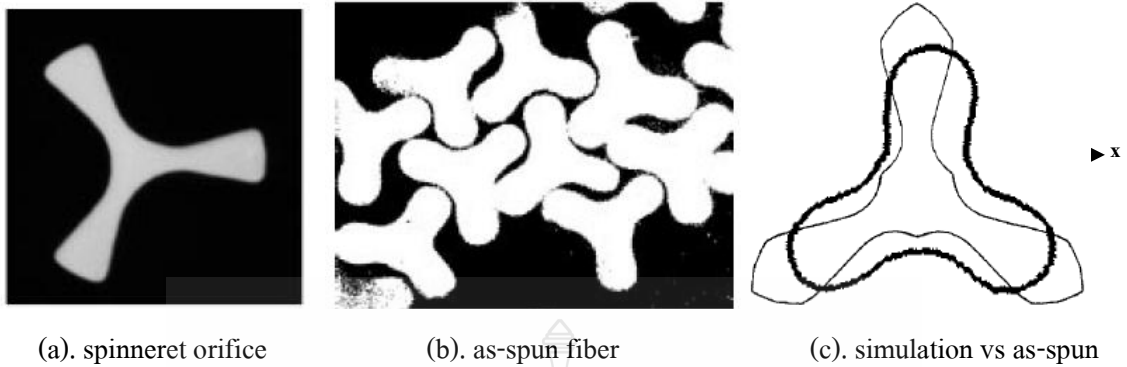


เส้นใยที่ขึ้นรูปได้มีลักษณะที่คล้ายวงกลมถึงแม้จะปรับ โหมมการให้ความเย็น หรือ อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ รูปร่างหน้าตัดของเส้นใยที่ได้จะไม่เกิดเปลี่ยนแปลง รวมไปถึงที่สภาวะความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใยค่าก็จะส่งผลต่อรูปร่างหน้าตัดเส้นใยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.3 รูปร่างหน้าตัดเส้นใยพอลิเอสเตอร์แบบ 3-Mountain ที่สภาวะการปั่นหลอมต่างๆกัน[14]

Kim และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาการปั่นหลอมพอลิเอสเตอร์ที่มีหน้าตัดแบบสามเหลี่ยม โดยการใช้โปรแกรม Finite Element Method Simulation (FEM) โดยใช้สมมติฐานว่าการเปลี่ยนแปลงหลักสำหรับหน้าตัดเส้นใยเกิดจากการบวมตัว (Die Swell) เท่านั้น ในขณะที่พื้นที่ (Area) ของเส้นใยไม่เปลี่ยนดังนั้นบริเวณที่สนใจศึกษาจึงถูกจำกัดอยู่ใกล้บริเวณรูของสปินเนอร์เรท (Spinneret Orifice) ซึ่งเป็นที่รู้ดีว่าพอลิเอสเตอร์จะสมบัตินิวโทเนียนที่อัตราการเฉือนที่ค่อนข้างกว้างมาก ดังนั้นพฤติกรรมไหลที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขึ้นรูปจะเป็นผลมาจากอุณหภูมิแบบคงที่เท่านั้น (Isothermal Temperature) เท่านั้น ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEM จะไม่รวมถึงความสามารถในการนำความร้อนของพอลิเอสเตอร์ โดยจะถูกสมมุติว่าคงที่ ซึ่งในการศึกษานี้จะสนใจลักษณะรูปร่างหน้าตัดเส้นใยที่ได้จากผลของ แรงโน้มถ่วง (ที่ระยะ 4.5 เมตรจากหัวฉีดเส้นใย) ความตึงผิว และการเย็นตัว หลังจากถูกฉีดผ่านหัวฉีดเส้นใย พบว่าเส้นใยที่ขึ้นรูปได้มีขนาดหน้าตัดเส้นใยเกิดการบวมตัวจากหัวฉีดเส้นใยมากกว่า 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.4 อัตราส่วนในทิศทางแกน x มีขนาดมากกว่าในแนวแกน y อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง พบว่าการบวมในแนวแกน x มีขนาดน้อยกว่า อาจเนื่องมาจากการวิเคราะห์ค่าในแบบจำลองต้องกำหนดให้บางตัวแปรเป็นค่าคงที่ ซึ่งส่งผลให้รูปร่างหน้าตัดเส้นใยที่ได้ต่างไปจากการทดลองจริง



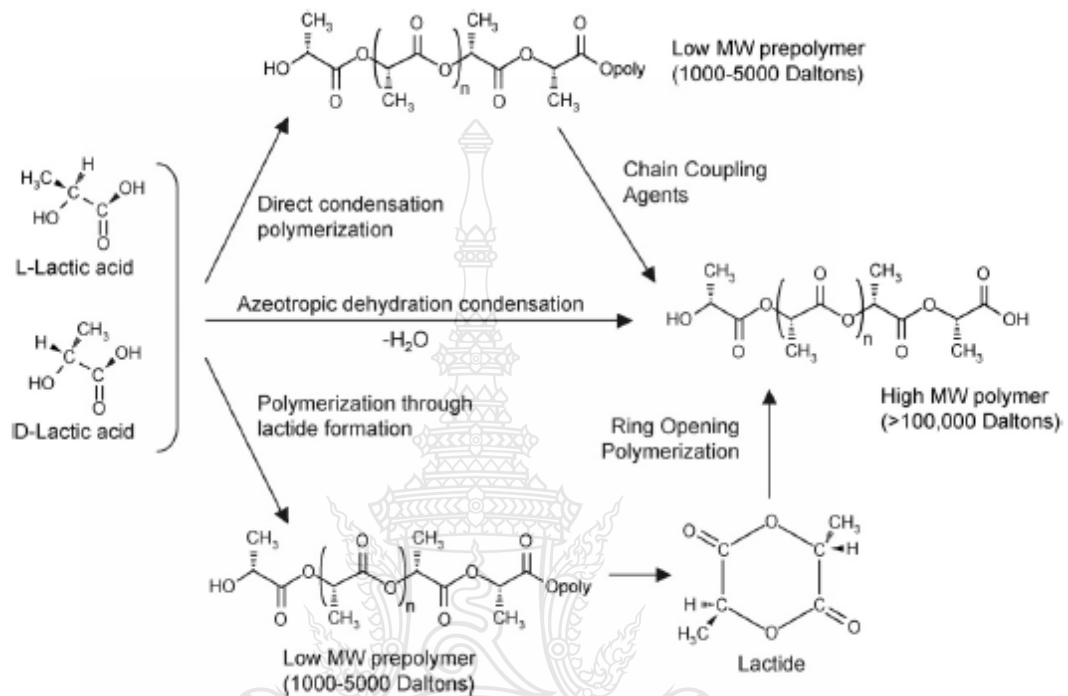
รูปที่ 2.4 รูปร่างหน้าตัดเส้นใยพอลิเอสเทอร์แบบสามเหลี่ยม

## 2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid) [16]

พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) เป็นพอลิเมอร์ชีวรูปชนิดหนึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่มีสายโซ่ตรง (Aliphatic Polyester) สังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก (Lactic Acid) ซึ่งกรดแลคติกสามารถผลิตได้จากการหมักแป้งหรือน้ำตาล ดังนั้นพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวสาลีหรืออ้อย จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่องพอลิแลคติกแอซิดจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้กันทั่วไป เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) การอัดขึ้นรูป (Compression Molding) การอัดรีด (Extrusion) และการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) เป็นต้น

ภายหลังการใช้งาน ผลิตภัณฑ์จากพอลิแลคติกแอซิด สามารถย่อยสลายได้ทางชีวรูปเมื่อนำไปฝังกลบในดินโดยใช้ระยะเวลาอันสั้นเมื่อเทียบกับพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี วัฏจักรของพอลิแลคติกแอซิดดังรูปที่ 2.5 ในอดีตการใช้งานของพอลิแลคติกแอซิดจำกัดอยู่ในวงการแพทย์ เช่น อุปกรณ์การปลูกถ่ายอวัยวะ (Implant Devices) วัสดุค้ำจุนสำหรับการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (Tissue Scaffolds) และไหมละลาย (Sutures) เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตสูง หาได้ยากและพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำทำให้มีสมบัติทางกลต่ำ เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ ที่ช่วยให้สามารถผลิตพอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในเชิงพาณิชย์ขึ้นได้ การใช้งานของพอลิเมอร์ชนิดนี้จึงเริ่มขยายออกไป เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่สลายตัวได้และผลิตได้จากวัตถุดิบที่สร้างทดแทนใหม่ได้ จึงคาดกันว่าการใช้วัสดุชนิดนี้จะช่วยลดปัญหาขยะลงได้ และสมบัติความไม่เป็นพิษและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมทำให้ พอลิแลคติกแอซิดเป็นวัสดุใน

อุดมคติสำหรับงานด้านบรรจุภัณฑ์และผลิตภัณฑ์เพื่อการอุปโภคบริโภคด้านอื่นๆ ทิศทางงานวิจัยในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะพัฒนาพอลิแลคติกแอซิดเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งทนทาน (Semi-Durable Products) ดังรูปที่ 2.5 และสามารถใช้ทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี



รูปที่ 2.5 กระบวนการสังเคราะห์ PLA [16]

### 2.2.1 โครงสร้าง องค์ประกอบและการสังเคราะห์

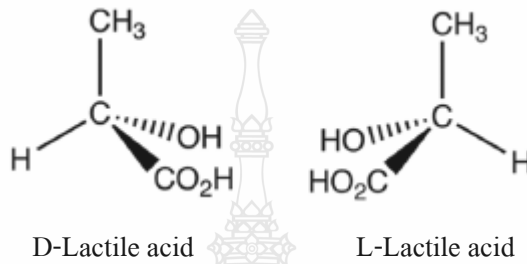
พอลิแลคติกแอซิด Poly(Lactic Acid), PLA เป็นพอลิเมอร์ชีวรูปชนิดหนึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่มีสายโซ่ตรง (Aliphatic Polyester) สังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก (Lactic Acid) ซึ่งกรดแลคติกสามารถผลิตได้จากการหมักแป้งหรือน้ำตาล ดังนั้นพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวสาลีหรืออ้อย จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง พอลิแลคติกแอซิดจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้กันทั่วไป เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) การอัดขึ้นรูป (Compression Molding) การอัดรีด (Extrusion) และการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) เป็นต้น ภายหลังจากการใช้งาน ผลิตภัณฑ์จากพอลิแลคติกแอซิด สามารถย่อยสลายได้ทางชีวรูปเมื่อนำไปฝังกลบในดิน

โดยใช้ระยะเวลาอันสั้นเมื่อเทียบกับพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีวัฏจักรของพอลิแลกติกแอซิด ในอดีตการใช้งานของพอลิแลกติกแอซิดจำกัดอยู่ในวงการแพทย์ เช่น อุปกรณ์การปลูกถ่ายอวัยวะ (Implant Devices) วัสดุค้ำจุนสำหรับการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (Tissue Scaffolds) และไหมละลาย (Sutures) เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตสูง หาได้ยากและพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำทำให้มีสมบัติทางกลต่ำ เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ ที่ช่วยให้สามารถผลิตพอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในเชิงพาณิชย์ขึ้นได้ การใช้งานของพอลิเมอร์ชนิดนี้จึงเริ่มขยายออกไปเนื่องจากพอลิแลกติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่สลายตัวได้และผลิตได้จากวัตถุดิบที่สร้างทดแทนใหม่ได้ จึงคาดกันว่าการใช้วัสดุชนิดนี้จะช่วยลดปัญหาขยะลงได้ และสมบัติความไม่เป็นพิษและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมทำให้ พอลิแลกติกแอซิดเป็นวัสดุในอุดมคติสำหรับงานด้านบรรจุภัณฑ์และผลิตภัณฑ์เพื่อการอุปโภคบริโภคอื่น

### 2.2.2 การสังเคราะห์พอลิแลกติกแอซิด

พอลิแลกติกแอซิดสังเคราะห์ขึ้นจาก กรดอัลฟาไฮดรอกซี ( $\alpha$ -Hydroxy Acids) หน่วยย่อยหรือมอนอเมอร์ของพอลิแลกติกแอซิด คือ กรดแลกติก หรือมีชื่อทางเคมีคือ 2-ไฮดรอกซีโพรพิโอนิกแอซิด (2-Hydroxy Propionic Acid) กรดแลกติกมีไอโซเมอร์สองรูปแบบ คือ แบบดี และแอล ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นอีแนนชิโอเมอร์ (Enantiomer) ที่มีความว่องไวต่อแสง (Optical Active) ต่างกัน กล่าวคือ มีสูตรเคมีเหมือนกันแต่จัดเรียงตัวในสามมิติไม่เหมือนกัน และบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ในทิศทางต่างกัน ในธรรมชาติส่วนใหญ่พบในรูปแบบแอลไอโซเมอร์ หรือพบในรูปแบบของผสมระหว่างแอลและดีไอโซเมอร์ เรียกว่าของผสมราซิมิก (Racemic Mixture, อัตราส่วน = 1:1 เขียนแทนด้วย DL หรือ สารประกอบมีโซ (Meso Compound) ซึ่งไม่มีสมบัติบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Optically Inactive) ปัจจุบันการผลิตกรดแลกติกอาศัยการหมักเป็นหลัก ซึ่งสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสง (Optical Purity) ที่ดี การผลิตพอลิแลกติกแอซิดอาจกระทำโดยสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิก (Azeotropic Dehydrative Condensation) ปฏิกิริยาการควบแน่นโดยตรง (Direct Condensation Polymerization) และ/หรือการสังเคราะห์ผ่านการเกิดแลคไทด์ (Lactide Formation) ดังรูปที่ 2.6 พอลิแลกติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (มากกว่า 100,000 ดาลตัน) ในเชิงพาณิชย์สังเคราะห์ได้โดยผ่านการเปิดวง (Ring Opening Polymerization) ของแลคไทด์ เนื่องจากกรดแลกติกมีสองไอโซเมอร์ สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่อาจประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ชนิดแอล-ไอโซเมอร์เกือบทั้งหมด (พอลิแอล-แลกติกแอซิด (PLLA)) หรือประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ที่เป็นของผสมราซิมิก (พอลิดีแอล-แลกติกแอซิด (PDLLA)) ในปัจจุบันการผลิตดีไอโซเมอร์ของกรดแลกติกที่บริสุทธิ์นั้นทำได้ยาก การผลิตพอลิเมอร์ที่สายโซ่

หลักประกอบไปด้วยมอนอเมอร์ชนิด ดี หรือพอลิดีแลกติกแอซิด (PDLA) ในเชิงพาณิชย์จึงยังไม่มีพอลิแลกติกแอซิดที่มีโครงสร้างผลึกสามรูปแบบ ได้แก่ แอลฟา ( $\alpha$ ) เบตา ( $\beta$ ) และแกมมา ( $\gamma$ ) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอิแนนชิโอเมอร์แอล หรือดี, แอล โครงสร้างแบบอัลฟาเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุด หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส ในขณะที่โครงสร้างเบต้าหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส



## รูปที่ 2.6 โครงสร้างของกรดแลกติก

### 2.2.3 สมบัติของพอลิแลกติกแอซิด

ความบริสุทธิ์เชิงแสง (Optical Purity) ของพอลิแลกติกแอซิดส่งผลอย่างมากต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว (Barrier Properties) [7-8] พอลิแลกติกแอซิดที่มีสัดส่วนของแอล-ไอโซเมอร์สูงกว่าร้อยละ 90 มีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline Polymer) ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีดี-ไอโซเมอร์ในองค์ประกอบเพิ่มขึ้น มีความบริสุทธิ์เชิงแสงต่ำลงและมีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์ออสถฐาน (Amorphous) นอกจากนี้ อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิกลาสทรานสิชันและระดับความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของแอล-ไอโซเมอร์ที่ลดลงด้วย สัดส่วนของไอโซเมอร์ที่แตกต่างกันในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้พอลิแลกติกแอซิดที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นมีสมบัติได้หลากหลาย จึงสามารถปรับให้รองรับความต้องการการใช้งานได้กว้างขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) และ พอลิสไตรีน (PS) พอลิแลกติกแอซิดมีความใส และมีสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซใกล้เคียงกัน

#### 2.2.4 สมบัติการละลายของพอลิแลคติกแอซิด

การละลายของพอลิแลคติกแอซิดขึ้นอยู่กับสัดส่วนของหน่วยที่เป็นองค์ประกอบในสายโซ่พอลิเมอร์ และระดับความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity) พอลิแลคติกแอซิดไม่ละลายน้ำ แอลกอฮอล์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีหมู่แทนที่ เช่น เฮกเซน (Hexane) และเฮปเทน (Heptane) ตัวทำละลายที่ดีสำหรับพอลิแลคติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงสูง (Poly(L-Lactic Acid), PLLA) ได้แก่ ตัวทำละลายอินทรีย์กลุ่มคลอริเนตและฟลูออริเนต (Chlorinated or Fluorinated Organic Solvents) ไดออกเซน (Dioxane) ไดออกโซเลน (Dioxolane) และฟูเรน (Furane) ราซิมิกพอลิแลคติกแอซิด Poly(lactic Acid) นอกจากละลายได้ในตัวทำละลายสำหรับพอลิแลคติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงสูงที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น ยังละลายได้ใน อะซิโตน (Acetone) ไพริดีน (Pyridine) เอทิลแลคเตท (Ethyl Lactate) เอทิลอะซิเตท (Ethyl Acetate) เตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran) ไชลีน (Xylene) ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl Sulfoxide) เอ็น,เอ็น-ไดเมทิลฟอร์มามิด (N,N- Dimethyl Formamide) และเมทิลเอทิลคีโตน (Methylethyl Ketone)

#### 2.2.5 สมบัติทางกายภาพและทางกลของพอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิดมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 พอลิเมอร์ที่ไม่ผ่านการดึงยืด (Unoriented PLA) มีความเปราะมากแต่มีความคงรูป (Stiffness) และความแข็งแรง (Strength) สูง เมื่อนำไปผ่านการดึงยืด (Oriented) จะมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเรต (Polyethylene Terephthalate, PET) แต่ดีกว่า พอลิสไตรีนที่ผ่านการดึงยืด (Oriented PS) โมดูลัสแรงดึงและแรงคด (Tensile and Flexural Moduli) ของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) แต่ความทนต่อแรงกระแทก (Izod Impact Strength) และการยืดที่จุดแตกหัก (Elongation at Break) มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

#### 2.2.6 การแปรรูปของพอลิแลคติกแอซิด

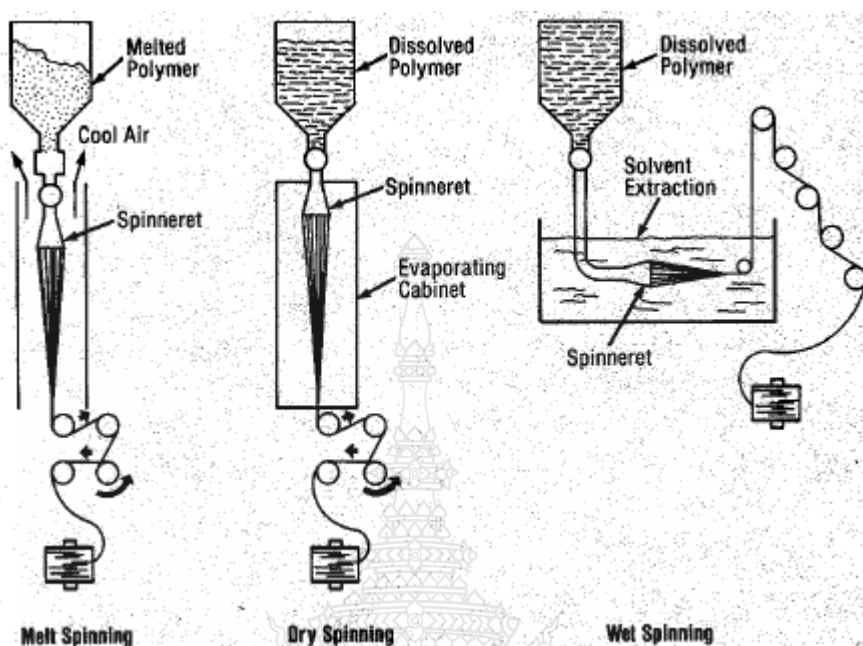
วิธีการแปรรูปหลักสำหรับพอลิแลคติกแอซิดคือการขึ้นรูปโดยใช้ความร้อน เช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป ระดับความร้อนที่ใช้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการขึ้นรูป สำหรับกรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยความร้อนหรือเทอร์โมฟอร์มมิง (Thermo-Forming) ความร้อนที่ใช้อยู่ในระดับที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการอ่อนตัวและสามารถดึงยืดได้ตามแบบของแม่พิมพ์เท่านั้น ในขณะที่การอัดรีด (Extrusion) การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) การอัดขึ้นรูป (Compression Molding) และการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) นั้น ความร้อนที่ใช้อยู่ในระดับสูงถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิแลคติกแอซิด พอลิเมอร์ หลอมเหลวจะไหลเข้าไปเติมเต็มช่องว่างในแม่พิมพ์ แล้วเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งและมี

รูปร่างตามแบบแม่พิมพ์เมื่อเย็นตัวลง ดังนั้นการเข้าใจถึงพฤติกรรมทางความร้อน การตกผลึกขณะพอลิเมอร์หลอมเย็นตัว และพฤติกรรมด้านกระแสวิทยา (Rheological Behavior) จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการปรับการผลิตและควบคุมคุณภาพ ก่อนนำพอลิแลกติกแอซิดไปขึ้นรูปจำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการอบไล่ความชื้น ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของพอลิแลกติกแอซิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลง รวมถึงป้องกันไม่ให้สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป โดยทั่วไประดับความแห้งอยู่ในระดับที่น้อยกว่า 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) (ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก) บริษัทเนเจอร์เวิร์ค (Natureworks LLC) ซึ่งเป็นผู้ผลิตพอลิแลกติกแอซิดเชิงพาณิชย์รายแรกของโลกแนะนำให้ผู้ผลิตทำให้เรซินแห้งจนมีระดับความชื้นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 250 ส่วนในล้านส่วน (ppm) (ร้อยละ 0.025% โดยน้ำหนัก) ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการอัดรีด ในกรณีที่กรรมวิธีต้องใช้เวลาานาน (Long Residence Times) หรืออุณหภูมิสูงใกล้เคียง 240 องศาเซลเซียส ควรทำให้แห้งในระดับ 50 ส่วนในล้านส่วน เพื่อคงระดับน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุดไว้ พอลิแลกติกแอซิดที่ใช้กันทั่วไปในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่มีความเป็นผลึก จึงนิยมทำแห้งที่อุณหภูมิสูงเพื่อลดเวลาการทำแห้งลง อุณหภูมิการทำแห้งอยู่ในช่วง 80-100 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเม็ดพลาสติกที่มีโครงสร้างอสัณฐานจำเป็นต้องทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (น้อยกว่า 60 องศาเซลเซียส) เพื่อป้องกันการเหนียวติดกันเองและทำให้เครื่องทำแห้งอุดตัน การเลือกเกรดพอลิแลกติกแอซิดให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยทั่วไปชิ้นงานพอลิแลกติกแอซิดที่ต้องการสมบัติความทนทานต่อความร้อนสูงสามารถขึ้นรูปได้โดยใช้เรซินที่มี ดี-ไอโซเมอร์ผสมอยู่ต่ำกว่า 1% และการเติมสารก่อผลึก (Nucleating Agent) ช่วยเพิ่มความเป็นผลึกภายในระยะเวลาการขึ้นรูปที่สั้น (Short Molding Cycle) ในทางกลับกันเรซินที่มีสัดส่วนดีไอโซเมอร์สูง (4-8%) เหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง (Thermo-Forming) กระบวนการอัดรีด (Extrusion) และกระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) เนื่องจากกระบวนการเหล่านี้ทำได้ง่ายกว่าเมื่อเรซินมีความเป็นผลึกต่ำ

### 2.3 การผลิตเส้นใยสังเคราะห์ [17]

เป็นเส้นใยที่สังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการทางเคมี ซึ่งมีกระบวนการผลิตคล้ายกับการผลิตพลาสติก คือ เริ่มจากการนำวัตถุดิบมาสังเคราะห์เป็นมอนอเมอร์ก่อน จากนั้นจึงมาผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันไปเป็นพอลิเมอร์ โดยมีความแตกต่างจากการผลิตพลาสติก คือ เส้นใยสังเคราะห์จะใช้วิธีการฉีดของพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวออกมาเป็นเส้นใยที่ยาวต่อเนื่องกัน

## 1. กระบวนการปั่นแบบหลอมเหลว [4]



รูปที่ 2.7 Typical Melt Spinning Line [18]

กระบวนการปั่นแบบหลอมเหลวเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในโรงงานผลิตเส้นใยส่วนใหญ่ เพราะไม่ต้องแก้ปัญหาเหมือนกับการใช้ตัวทำละลาย ดังนั้นจึงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากกว่า คือสามารถใช้ความร้อนในการหลอมพอลิเมอร์ได้โดยตรงเลย เมื่อเม็ดพอลิเมอร์หรือเม็ดชิฟจากวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการปั่นแบบหลอมเหลวผ่านการอบแห้ง จากนั้นถูกหลอมใน Extruder จนเป็นเนื้อเดียวกัน และถูกกรองจากนั้นไหลผ่านช่องแคบๆหลายๆช่อง ไปยังส่วนของการหล่อเย็น ซึ่งพอลิเมอร์เหลว จะเกิดการแข็งตัวและถูกรวบเป็นมัดของฟิลาเมนต์ ดังรูปที่ 2.7 ในที่สุดมัดฟิลาเมนต์ก็จะผ่านช่วง Spin Finish (น้ำมัน) ก่อนเข้าสู่ลูกกลิ้งเพื่อม้วนเก็บ เป็นกระบวนการขนาดใหญ่และใช้ผลิตเส้นใยที่ความต่อเนื่อง และยูนิตของกระบวนการสังเคราะห์สามารถส่งผ่านมายังส่วนหลอมเหลวได้โดยตรง ในกรณีของพอลิพรอพิลีน ตั้งแต่งกระบวนการสังเคราะห์จนถึงผลิตภัณฑ์ของแข็ง จะแยกจากกระบวนการปั่น

## 2. กระบวนการปั่นแห้ง (Dry Spinning)

หากพอลิเมอร์ที่ต้องการผลิตเป็นเส้นใยไม่สามารถหลอมภายใต้อุณหภูมิที่เครื่องสามารถกระทำได้นั้นนับว่าเป็นการยากที่จะผลิตเส้นใยแบบ Melt Spinning จึงต้องหาวิธีการผลิตโดย



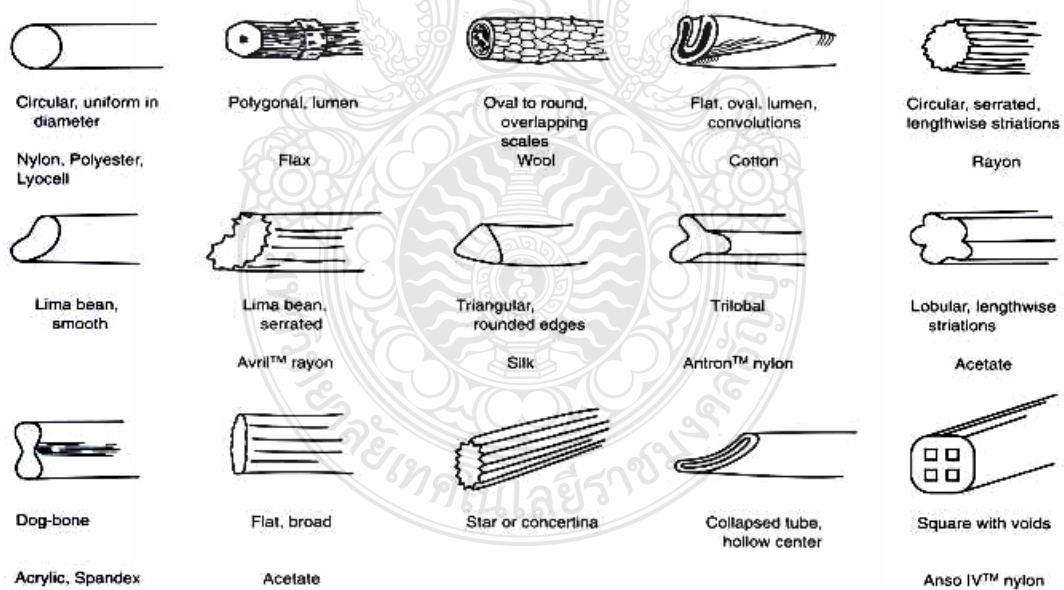
เปลี่ยนจากพอลิเมอร์ที่ถูกหลอมด้วยความร้อน มาเป็นการละลายด้วยตัวทำละลาย เมื่อผ่านสปินเนอร์แล้วจึงระเหยตัวทำละลายออกด้วยลมเย็น ซึ่งเรียกว่า Dry Spinning

### 3. กระบวนการปั่นเปียก (Wet Spinning)

เป็นกระบวนการที่ต้องทำละลายพอลิเมอร์ที่ต้องการปั่นเป็นเส้นใยเช่นเดียวกันกับกระบวนการ แบบปั่นแห้ง ต่างกันตรงที่เมื่อสารละลายพอลิเมอร์ไหลผ่านสปินเนอร์ลงไปสู่ของเหลวซึ่งพอลิเมอร์สามารถแข็งตัวได้ หรือตกตะกอนได้ วิธีการนี้จะใช้เมื่อ ตัวทำละลายพอลิเมอร์นั้นระเหยยาก หรืออาจมีปัญหาในการระเหยตัวทำละลายออก ซึ่งอาจมีปัญหาในการปั่นแบบหลอมเหลวหรือปั่นแห้ง

## 2.4 รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใย (Cross Sectional Fibers) [19]

รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใยมีผลต่อความเป็นมันวาว ลักษณะเนื้อผ้า และสมบัติต่อผิวสัมผัส เส้นใยมีรูปร่างหน้าตัดที่หลากหลายกัน เช่นวงกลม สามเหลี่ยม ทรงคล้ายกระดูก (Dog Bone) ทรงรูปถั่ว (Bean Shaped) เป็นต้น

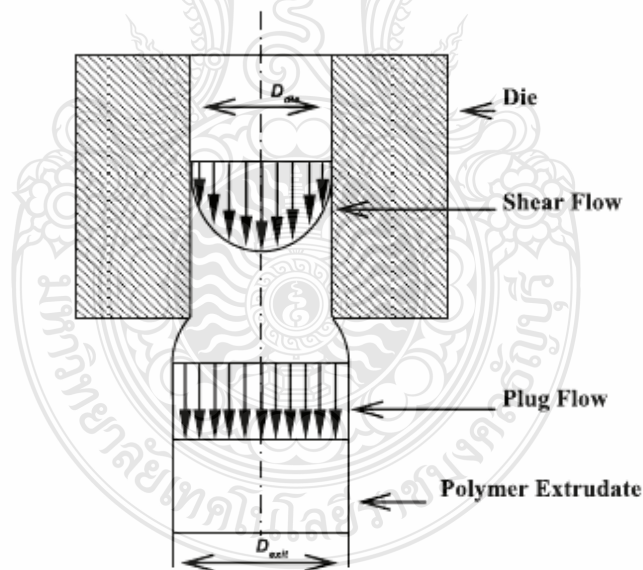


รูปที่ 2.8 รูปร่างหน้าตัดเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ [20]

ความแตกต่างของรูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใยธรรมชาติ ดังรูปที่ 2.8 เกิดจากลักษณะการสร้างเซลล์โลสในขณะที่พืชเติบโต เช่นในเส้นใยฝ้าย หรือการกระบวนการสร้างโปรตีนในสัตว์ เช่นขนสัตว์หรือรูปร่างของช่อง (Orifice) ในตัวไหมที่ทำหน้าที่ฉีดเส้นใยไหมออกมาสำหรับเส้นใยประดิษฐ์รูปร่างของหน้าตัดของเส้นใยขึ้นอยู่กับรูปร่างของรูในหัวฉีด

## 2.5 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณทางออกของดาย [21-22]

เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวถูกเอ็กทรูดออกมาที่บริเวณทางออกของดาย (Die Exit) ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของพอลิเมอร์จะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดพื้นที่หน้าตัดของดาย (Die) ที่ใช้ ดังรูปที่ 2.9 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่บริเวณทางออกของดายซึ่งพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวนี้เป็นที่รู้จักกันในชื่อของดายสเวล (Die Swell) การศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์นี้ มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ ผู้ออกแบบดายมีความจำเป็นที่จะต้องทราบถึงพฤติกรรม และสัดส่วนของการบวมตัวนี้เพื่อที่จะสามารถได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดและรูปร่างตรงตามความต้องการ โดยทั่วไปการคำนวณค่าอัตราส่วนการบวมตัว (Swelling Ratio, B) เชิงปริมาณดังสมการที่ 2.1 ในกรณีของดายที่มีหน้าตัดกลม)



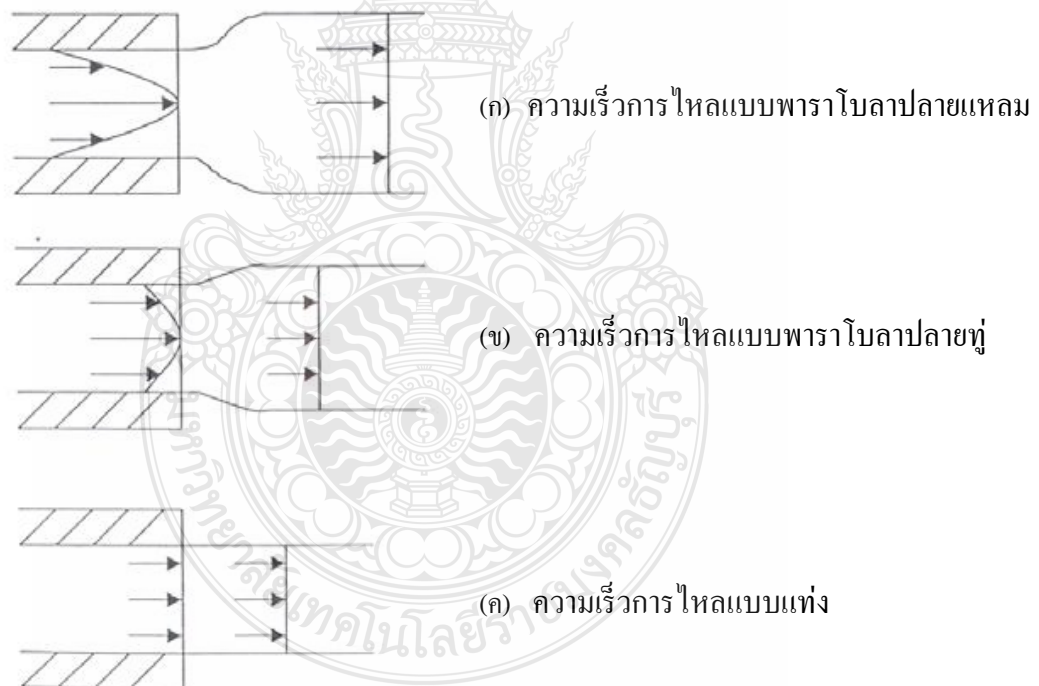
รูปที่ 2.9 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่บริเวณทางออกของดาย [22]

$$N_{DEB} = (Tr/Tp) \quad (2.1)$$

โดย  $T_r$  คือเวลาที่พอลิเมอร์ใช้ในการคลายตัว (Relaxation Time)  $T_p$  คือเวลาที่พอลิเมอร์ไหลอยู่ในกระบวนการผลิต (Processing Time,  $t_p$ ) เป็นที่ทราบกันดีว่า หากค่า  $N_{DEB}$  น้อยกว่า 1 พอลิเมอร์จะมีความสมบัติที่ไหลง่าย (Viscous) ในขณะที่ถ้าค่า  $N_{DEB}$  มากกว่า 1 พอลิเมอร์จะมีสมบัติยืดหยุ่นตัวสูงโดยพอลิเมอร์ที่มีสมบัติยืดหยุ่นตัวสูงจะมีค่าการบวมตัวสูงตามไปด้วยและในทางปฏิบัติการเพิ่มความยาวของหัวขึ้นรูป ( $T_p$  มากขึ้น) ค่า  $N_{DEB}$  มีแนวโน้มน้อยกว่า 1 ปริมาณการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง [22]

## 2.6 สาเหตุของการบวมตัวของพลาสติกเหลว [21]

การที่พลาสติกเหลวเกิดการบวมตัวขณะไหลออกจากตาย เนื่องมาจากพลาสติกเหลวขณะที่ไหลอยู่ในช่องทางการไหล จะเกิดความเครียดสะสมอยู่โดยไม่สามารถผ่อนคลาย (Relaxation) ได้หมดก่อนที่จะไหลผ่านพ้นออกจากตาย ดังนั้นพลาสติกเหลวจึงมาทำการผ่อนคลายตัวภายนอก



รูปที่ 2.10 อัตราส่วนการบวมตัวที่เกิดจากอิทธิพลของลักษณะความเร็วการไหล

เกิดการบวมตัว ซึ่งเป็นการพฤติกรรมอีลาสติกของพลาสติกเหลวนั่นเอง การพิจารณาการเกิดการบวมตัวของพลาสติกเหลวสามารถดูได้จากปริมาณความเครียดที่สะสมควบคู่ไปกับลักษณะ

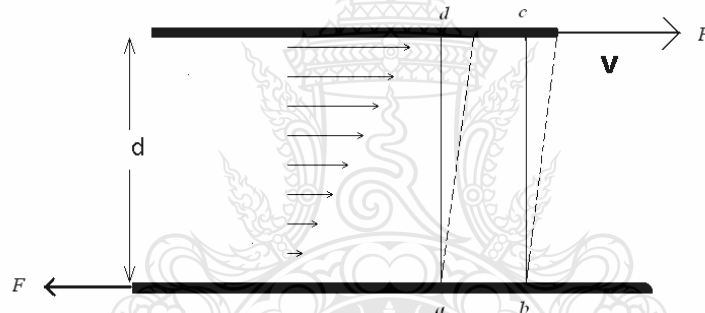
ความเร็วการไหล (Velocity Profile) ของพลาสติกเหลวตรงตำแหน่งสุดท้าย ขณะที่กำลังจะไหลออกจากคาย นั่นคือเมื่อพลาสติกเหลวมีความหนืดคงที่และมีลักษณะความเร็วการไหลเป็นแบบพาราโบลา (Parabola) ปลายแหลมมากดังรูปที่ 2.10 (ก) ว่ามีความเครียดสะสมอยู่มากการบวมตัวก็จะมาก แต่ถ้าลักษณะความเร็วการไหลเป็นแบบพาราโบลาลายทุ่ ดังรูปที่ 2.10 (ข) ว่ามีความเครียดสะสมอยู่น้อย การบวมตัวก็จะน้อย และเมื่อลักษณะความเร็วการไหลเข้าใกล้ การไหลแบบแท่ง (Plug Flow) มากขึ้น ดังรูปที่ 2.10 (ค) การบวมตัวก็จะลดลง โดยเฉพาะถ้ามีลักษณะการไหลเป็นแบบแท่งก็จะไม่เกิดการบวมตัว

## 2.7 สมบัติการไหลของพอลิเมอร์ในการไหลแบบเฉือน [21-25]

ของไหลทุกชนิดย่อมมีสมบัติอย่างหนึ่งคือ เมื่อมีวัตถุเคลื่อนที่ผ่านหรือเมื่อมันไหลผ่านวัตถุใดๆจะมีแรงเสียดทานกระทำต่อวัตถุโดยของไหลนั้นๆ เสมอ สมบัติของของไหลที่ต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุนี้เรียกว่า ความหนืด (Viscosity) และแรงต้านทานการเคลื่อนที่ที่เกิดจากของไหลนี้เรียกว่า แรงหนืด (Viscous Force) หรือแรงเสียดทานภายใน เมื่อของไหลที่มีความหนืดเคลื่อนที่จินตนาการได้ว่า ของไหลถูกแบ่งออกเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นบางมากเปรียบเสมือนแผ่นกระดาษที่ประกอบเป็นหนังสือ สมบัติของไหลถูกประกอบอยู่ระหว่างแผ่นแก้วสองแผ่นขนานกัน แผ่นล่างตรึงอยู่กับที่ แผ่นบนถูกแรงขนานกับแผ่นแก้วดึงให้เคลื่อนที่ ชั้นของไหลที่ติดอยู่กับแผ่นบนจะเคลื่อนที่ติดไปกับแผ่นแก้วและมีความเร็วเท่ากับแผ่นแก้ว แต่ชั้นอื่นๆ แต่ละชั้นที่อยู่ต่ำลงไปจะเคลื่อนที่ตามไปแต่จะมีความเร็วช้าลงไปเรื่อยๆ จนถึงชั้นล่างสุดที่อยู่ติดกับแผ่นแก้วแผ่นล่างจะไม่เคลื่อนที่เลยการไหลแบบนี้เรียกว่า ไหลแบบลามินาร์หรือแผ่นบาง (Laminar Flow) ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเสียดทานภายในระหว่างชั้นลามินา เมื่อพิจารณาแผ่นกระดาษที่ประกอบกันเป็นหนังสือจะเห็นได้ชัดเจน เมื่อออกแรงที่ปกหนังสือดันนิ้วปกตามแนวขนานกับปกบน โดยมีนิ้วปกด้านล่างตรึงอยู่กับโต๊ะ ปกหนังสือด้านบนจะเข้าไปตามแรง กระดาษแผ่นแรกที่อยู่ติดกับปกจะเคลื่อนที่ไปตามปก แผ่นล่างลงไปจะเข้าตามแผ่นแรก แต่ระยะทางเคลื่อนที่จะน้อยกว่าแผ่นบนสุด และลดหลั่นลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงแผ่นสุดท้ายซึ่งจะไม่เคลื่อนที่เลย คืออยู่ติดกับแผ่นปกด้านล่าง ลักษณะคล้ายดังรูป เมื่อพิจารณาส่วนหนึ่งของของไหลคือ  $abcd$  ขณะยังไม่มีแรง  $F$  กระทำจะมีรูปร่างเหมือนเป็นแท่งสี่เหลี่ยมที่อยู่ระหว่างแผ่นขนาน เมื่อออกแรง  $F$  คงที่ดึงให้แผ่นบนเคลื่อนที่ได้ ขณะหนึ่ง แผ่นบนเคลื่อนที่ได้ระยะทางสมมติให้เท่ากับ  $x$  ชั้นของไหลที่อยู่ติดกับแผ่นบนจะเคลื่อนที่ได้ระยะทาง  $x$  ด้วย แต่ชั้นถัดลงมาจะได้ระยะทางน้อยกว่า  $x$  และจนในที่สุดชั้นล่างสุด

จะไม่เคลื่อนที่ แต่ละชั้นใช้เวลาเคลื่อนที่เท่ากัน ชั้นบนสุดจึงมีความเร็วสูงสุด และเท่ากับความเร็วของแผ่นบนที่ถูกแรง  $F$  ดึง

ตัวอย่างข้างต้นพฤติกรรมของของไหลเมื่อมีแรงเฉือนมากระทำ ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการเคลื่อนที่ของวัสดุสามารถใช้ในการตรวจสอบสมบัติเฉพาะตัวได้ โดยการวัดความต้านทานต่อการสูญเสียรูปร่าง ปริมาณของการสูญเสียรูปร่างของวัสดุนี้ได้จากการวัดค่าความเครียดเฉือน (Shear Strain:  $\gamma_{xy}$ ) เมื่อ  $G = G(\gamma_{xy})$  ตัววัสดุในสภาวะของแข็งไม่ประพฤติตัวตามกฎของฮุกเกียน (Hookean Elastic Solid) และใช้ในการบ่งบอกถึงความยืดหยุ่นมอดูลัสเฉือน ( $G$ ) เป็นค่าคงที่ทางรีโอโลยีซึ่งใช้ในการตรวจสอบสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุ ในทำนองเดียวกัน  $G(\gamma_{xy})$  เป็นฟังก์ชันทางรีโอโลยีของวัสดุสำหรับของไหลที่พฤติกรรมแบบนิวโทเนียน (Newtonian Fluid) สมการต่อเนื่องที่ได้คือ ค่าความหนืดของวัสดุซึ่งประพฤติตัวตามกฎของนิวตัน ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การไหลแบบลามินาร์ของของไหลที่มีความหนืด

แบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ ของไหลที่สมบัติเป็นแบบนิวโทเนียน (Newtonian) และของไหลที่สมบัติเป็นแบบนอนนิวโทเนียน (Non-Newtonian)

2.7.1 ของไหลที่มีสมบัติเป็นแบบนิวโทเนียน (Newtonian) หมายถึงของไหลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนต่ออัตราเฉือนมีค่าคงที่ ดังสมการที่ 2.2

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau}{(dv/dy)} \quad (2.2)$$

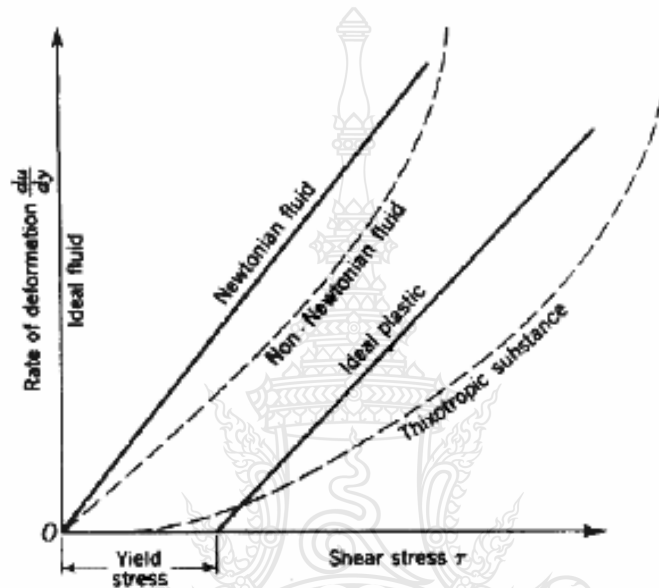
$\eta$  คือความหนืดหน่วย (Pas)

$\tau$  คือความเค้นเฉือนหน่วย (Nm)

$\gamma$  คือ อัตราเฉือนหน่วย ( $s^{-1}$ )

ของไหลประเภทนี้ เช่น น้ำ อากาศ เอทานอล และเบนซิน เป็นอิสระจากการเปลี่ยนแปลงอัตราเฉือน ทำให้ความชันมีลักษณะคงที่ ดังรูปที่ 2.12

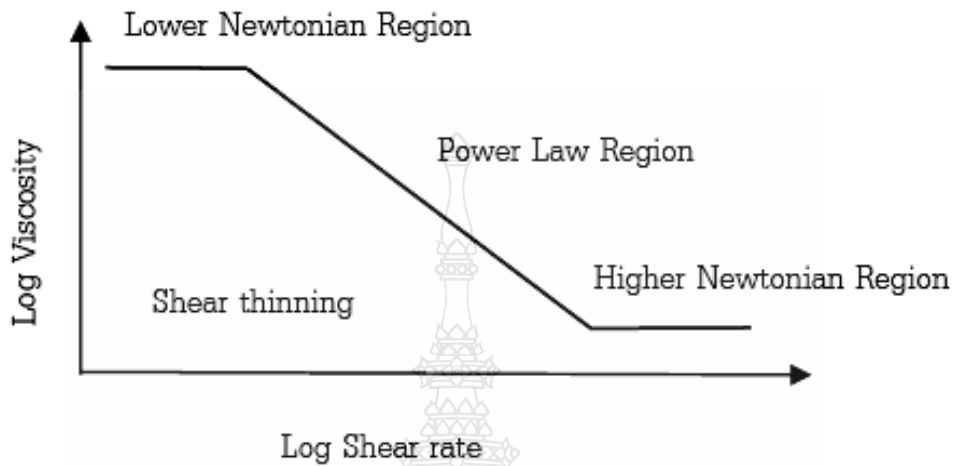
2.7.2 ของไหลที่มีสมบัติเป็นแบบนอนนิวทอนเนียน (Non-Newtonian) ลักษณะของไหลแบบนอนนิวทอนเนียนมีหลายลักษณะ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของของไหลแบบต่าง ๆ

1. ของไหลแบบบิงแฮม (Bingham) ของไหลประเภทนี้จะเกิดการไหลต่อเมื่อมีค่าความเค้นเฉือนสูงเกินค่าหนึ่ง และเมื่อของไหลเกิดการไหลจะมีอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนต่ออัตราเฉือนคงที่เช่นในกลุ่ม ซอสมะเขือเทศ ปูนซีเมนต์ จาระบี
2. ของไหลแบบดิลาแทน (Dilatant) ของไหลประเภทนี้เป็นของไหลที่มีค่าความหนืดสูงเมื่อมีการเพิ่มค่าอัตราเฉือน โดยมีสาเหตุมาจากการที่ห้วงโซ่โมเลกุลมีการเกี่ยวพันกันหรือเมื่อมีแรงกระทำจะทำให้เกิดการจับตัวหนาแน่นมากขึ้น เช่น น้ำแป้ง
3. ของไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastics) เป็นของไหลที่มีค่าความหนืดลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มสูงขึ้น อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของอัตราเฉือน กับความเค้นเฉือนมีลักษณะการเพิ่มขึ้นที่น้อยลง ซึ่งสามารถอธิบายการลดลงของความหนืดได้ว่า ขณะที่อัตราเฉือนเพิ่ม

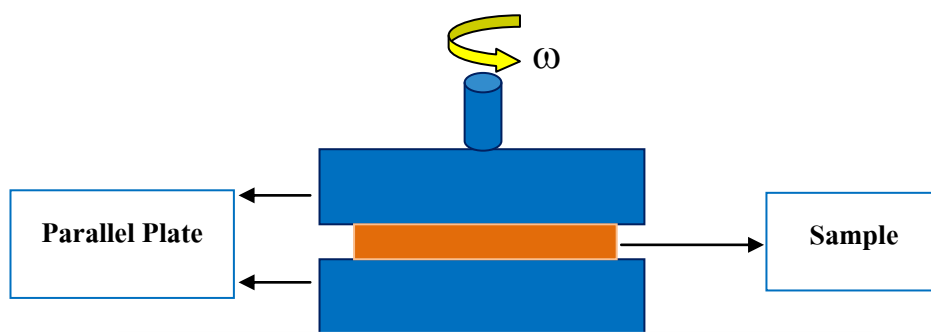
สูงขึ้น จะเกิดการคลายตัวของห่วงโซ่โมเลกุลที่พันกัน เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากอัตราเฉือน จากกราฟความสัมพันธ์ที่เกิดจากอัตราเฉือนและความหนืดแบ่งขอบเขตเป็นช่วง ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 พฤติกรรมการไหลนอนิวทอนเนียนแบบซูโดพลาสติกตามขอบเขตถูกกำลัง (Power Law Region)

## 2.8 เครื่องมือวัดความหนืดแบบจานกลมแผ่นขนาน ( Parallel-Plate Viscometer) [24]

เครื่องมือวัดความหนืดแบบแผ่นขนานเป็นเครื่องมืออีกชนิดหนึ่งที่ใช้วัดการไหลเฉือนของพอลิเมอร์หลอม บางครั้งอาจเรียกว่าเครื่องวัดความหนืดแบบแซนวิช (Sandwich Viscometer) ดังรูปที่ 2.14 วัสดุที่มีความหนืด เช่น อีลาสโตเมอร์จะถูกบรรจุอยู่ระหว่างผิวหน้าของแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมซึ่งวางขนานกัน โดย  $F$  คือแรงเฉือน  $A$  คือพื้นที่ ที่พอลิเมอร์สัมผัสกับแผ่นขนาน เครื่องทดสอบนี้สามารถใช้ในการหาความเค้นเฉือนชั่วครวที่จุดเริ่มต้นของวัสดุได้ หลังจากระยะเวลาานเพียงพอ และวัสดุนั้นเสถียร เราสามารถวัดความเค้นของวัสดุที่ภาวะคงตัวได้ ที่จุดนี้ความหนืดจะถูกวัดอยู่ในรูปฟังก์ชันของอัตราเฉือน ในการทดสอบอีลาสโตเมอร์ส่วนใหญ่จำเป็นต้องใช้เวลาค่อนข้างนานรวมทั้งการใช้ความเครียดสูง ภาวะดังกล่าวมีผลทำให้เกิดการหลุดของตัวอย่าง เพื่อลดค่าการเลื่อนหลุดของตัวอย่างให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ผิวสัมผัสมักมีการบากเป็นร่อง เครื่องมือการทดสอบความหนืดแบบนี้สามารถทำการวัดความหนืดโดยใช้อัตราการเฉือนต่ำได้ ข้อดีของการใช้อัตราเฉือนต่ำสามารถป้องกันการเกิดการลื่นหลุดของตัวอย่างซึ่งมักจะเกิดขึ้นกับเครื่องมือที่มีการหมุนภายใต้สภาวะ ที่ไม่มีความดัน เช่น เครื่องวัดความหนืดแบบกรวยและแผ่น เป็นต้น



รูปที่ 2.14 ไคอะแกรมเครื่องมือวัดความหนืดแบบแผ่นขนาน

## 2.9 การวิเคราะห์ทางความร้อนเชิงน้ำหนัก ( Thermogravimetric Analysis: TGA) [24]

การวิเคราะห์ความร้อนเชิงน้ำหนัก เป็นเทคนิคซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของน้ำหนักของสารตัวอย่างที่หายไป เมื่อได้รับความร้อนหรือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ค่าหนึ่ง อีกทางเลือกหนึ่งอาจทำให้ได้โดยวัดน้ำหนักที่หายไปเป็นฟังก์ชันกับเวลาที่อุณหภูมิคงที่ ประโยชน์หลักของ TGA ในการใช้งานกับพอลิเมอร์ได้แก่ การศึกษาการสลายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Decomposition) การเกิดออกซิเดชันและความมีเสถียรรูป (Stability) ของพอลิเมอร์ เส้นกราฟ TGA ให้ข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน โดยอยู่ในรูปของน้ำหนักที่ลดลง

นอกจากอัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิของสารตัวอย่างมีผลต่อรายละเอียดของข้อมูลแล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ควรคำนึงถึงร่วมด้วยได้แก่ ก๊าซที่ขึ้นจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ในเตาเผาสามารถบดบังรายละเอียดของข้อมูลที่ได้ ดังนั้นจึงควรผ่านก๊าซเฉื่อย (ไนโตรเจน) ปริมาณเล็กน้อยเข้าไปในห้องเตาเผา นอกจากนี้รูปร่างของภาชนะของภาชนะที่บรรจุตัวอย่าง พื้นที่ผิวของสารตัวอย่างอนุภาค ที่มีขนาดใหญ่และความหนาของหน้าตัดชิ้นตัวอย่างอาจมีผลต่อการลดลงของการส่งผ่านความร้อนและเกรเดียนอุณหภูมิ ทั้งจากความร้อนที่ใส่เข้าไปหรือความร้อนของปฏิกิริยา

## 2.10 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ (Mechanical Properties of Polymers) [24]

ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) คือสมบัติทางกลพื้นฐานของพอลิเมอร์ และสามารถนำมาพิจารณาประกอบการประยุกต์ใช้ประโยชน์พอลิเมอร์ได้ สมบัตินี้สามารถทดสอบได้โดยการดึงชิ้นตัวอย่างพอลิเมอร์ด้วยแรงที่ควบคุมได้ ในขณะเดียวกันก็วัดการยืดตัวของชิ้นตัวอย่างเทียบกับขนาดของแรงที่ใช้ การทดลองนี้เรียกว่า Tensile Experiment จากนั้นจึงคำนวณความเค้นจากอัตราส่วนของแรงต่อหน่วยพื้นที่ และคำนวณความเครียด จากอัตราการยืดตัวของชิ้นตัวอย่างต่อ



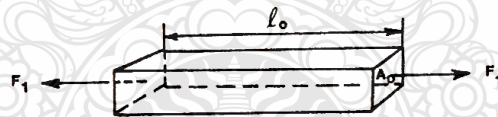
ความยาวเริ่มต้น กราฟที่ได้จากการวัดความเค้นและความเครียด จะมีลักษณะ และความชัน Slope (อัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียด) ที่ต่างกันตามสมบัติของพอลิเมอร์ กล่าวคือ สมบัติแบบพลาสติก (Plastic) สมบัติแบบวัสดุยืดหยุ่น (Elastomer) และสมบัติแบบเส้นใย (Fiber) โดยความชันของกราฟจะบ่งบอกความแข็ง (Modulus) ของพอลิเมอร์

### 2.10.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing) [24]

แรงที่ใช้ในการวัดความเค้น-ความเครียดโดยส่วนใหญ่เป็นการวัดภายใต้โหมดของแรงดึง (Tension) ดังรูปที่ 2.15 เมื่อให้แรงเข้าไป  $F_1$  เพื่อให้ชิ้นงานยืดตัวออก และเมื่อสร้างความสัมพันธ์ของแรงที่ทำให้เป็นฟังก์ชันกับระยะยืด (Extension) ความเค้นเนื่องจากแรงดึงหรือความเค้นดึง (Tensile Stress :  $\sigma_1$ ) สามารถคำนวณจากอัตราส่วนของแรงต่อพื้นที่เริ่มต้น ดังสมการที่ 2.3

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_0} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\sigma_1$  ความเค้นเนื่องจากการดึงตัวอย่าง  
 $F_1$  แรงที่ใช้ในการดึง (Tensile Force)  
 $A_0$  พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 2.15 ชิ้นงานภายใต้แรงดึง

ถ้าชิ้นงานถูกดึงด้วยความเค้นดึงจนมีความยาว  $l_1$  จะพบว่าความเครียดเนื่องจากแรงดึงหรือความเครียดดึง (Tensile Strain;  $\epsilon_1$ ) หาได้จากการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นงานที่เวลาใด ๆ ต่อหน่วยความยาวเริ่มต้น ถ้าให้  $l_0$  เป็นความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานและ  $l_1$  เป็นความยาว ณ เวลาที่เราสนใจ ดังนั้นความเครียดดึงสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการข้างล่าง

$$\epsilon_1 = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{kt}{l_0} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $k$  คืออัตราในการยืด (Rate of Extrusion) และ  $t$  คือ เวลา

ถ้าทำการดึงชิ้นงานที่มีสมบัติแข็งแรงเปราะอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งวัสดุเกิดการแตกหัก (Fracture) ผลที่ได้จากการวัดแรงกระทำต่อวัสดุ ณ ตำแหน่งที่เกิดการแตกหักเราเรียกว่าความเค้นสูงสุดเนื่องจากแรงดึง (Ultimate Tensile Stress) หรือความแข็งแรงต่อการดึง (Tensile Strength) ดังสมการที่ 2.5

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $F$  คือแรง ณ ตำแหน่งที่เกิดการแตกหัก และ  $A$  พื้นที่หน้าตัด ณ ตำแหน่งที่เกิดการแตกหักนั้น

ในระหว่างกระบวนการดึง ชิ้นงานจะมีความยาวเพิ่มขึ้นแต่มีพื้นที่หน้าตัดลดลงเรื่อย ๆ ดังนั้นเราถือว่าปริมาตรของชิ้นงานมีค่าคงที่ (ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาในการดึงเพิ่มขึ้น) โดยทั่วไปความเค้นดึงมักจะวางอยู่บนพื้นฐานของพื้นที่หน้าตัดที่วัดได้ขณะเริ่มทำการทดสอบ ( $A_0$ ) อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ผลการทดสอบมีค่าถูกต้องและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ในการคำนวณการยืด ณ จุดขาด (Elongation at Break ;  $\epsilon$ ) หรือการยืดตัวสูงสุด (Ultimate Elongation) สามารถเขียนในเทอมของเปอร์เซ็นต์ของความยาวต่อความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน

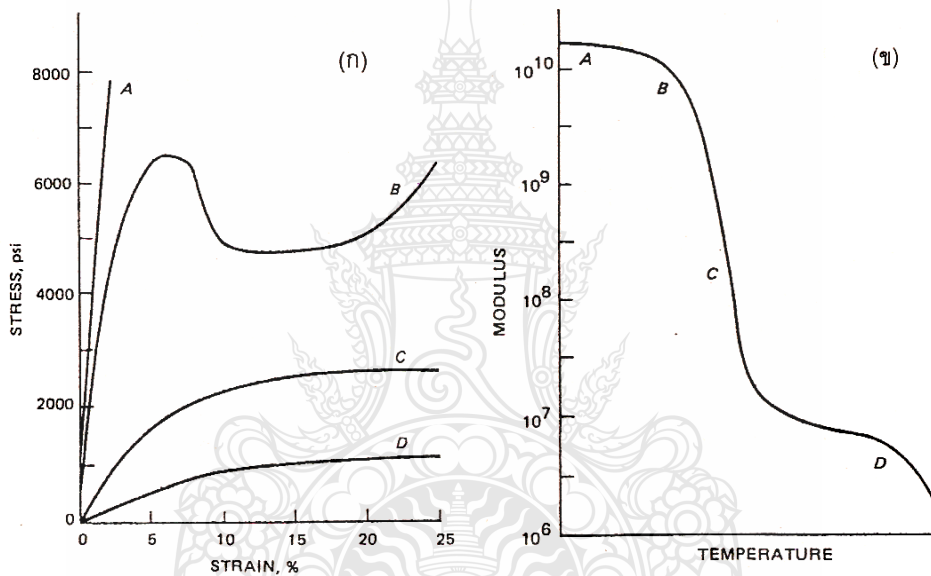
$$\% \epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100 \quad (2.6)$$

เมื่อ  $l$  เป็นความยาวของชิ้นงาน ณ จุดที่เกิดการแตกหัก

การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ออสัญฐานแต่ละชนิดกับอุณหภูมิดังรูปที่ 2.16 (ก) และเส้นโค้งมอดูลัส-อุณหภูมิดังรูปที่ 2.16 (ข) เมื่อเริ่มทำการทดสอบพอลิเมอร์ถูกทำให้เย็นตัวต่ำกว่าอุณหภูมิในสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ซึ่งพอลิเมอร์สมบัติเปราะคล้ายแก้ว (Brittle) ตามเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (A) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสมบัติของพอลิเมอร์จะค่อย ๆ เปลี่ยนผ่านสมบัติซึ่งมีความเหนียว (Ductile) เพิ่มขึ้นตามเส้นโค้งความเค้นความเครียด (B) ถ้าการเพิ่มอุณหภูมิยังคงดำเนินต่อไปอีก สมบัติที่ออกมาของพอลิเมอร์ค่อย ๆ เปลี่ยนจากความเหนียวเป็นความยืดหยุ่นซึ่งเป็นสมบัติของอีลาสโตเมอร์และยาง ตามเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (C) และ (D) ตามลำดับ ในวัสดุที่มีความยืดหยุ่นหรือยืดตัวสูง ถ้าเราดึงพอลิเมอร์ ชนิดนี้ด้วยแรงซึ่งยัง

ไม่สูงพอที่ทำให้พอลิเมอร์นั้นจุดคราก (Yield Point) เมื่อมีการปล่อยหรือลดแรงดึงซึ่งกระทำต่อวัสดุลง เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุสามารถผันกลับได้ (Reversible) หรือพอลิเมอร์ซึ่งถูกยืดตัวออกด้วยระยะยืดค่าหนึ่งสามารถหดตัวกลับสู่ความยาวเริ่มต้น (ระยะยืดเท่ากับศูนย์) การวัดความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์มาตรฐานนั้นเราสามารถทดสอบชิ้นงานที่สภาวะเดียวกัน (ทั้งเวลาและอุณหภูมิ) เพื่อผลิตเส้นโค้งต้นแบบ (Master Curve) เส้นโค้งต้นแบบนี้ใช้ในการทำนายข้อมูลระยะยาวล่วงหน้าจากข้อมูลในระยะสั้น ๆ ที่ได้จากการทดลองในช่วงที่พอลิเมอร์สมบัติยืดหยุ่นเหมือนกัน

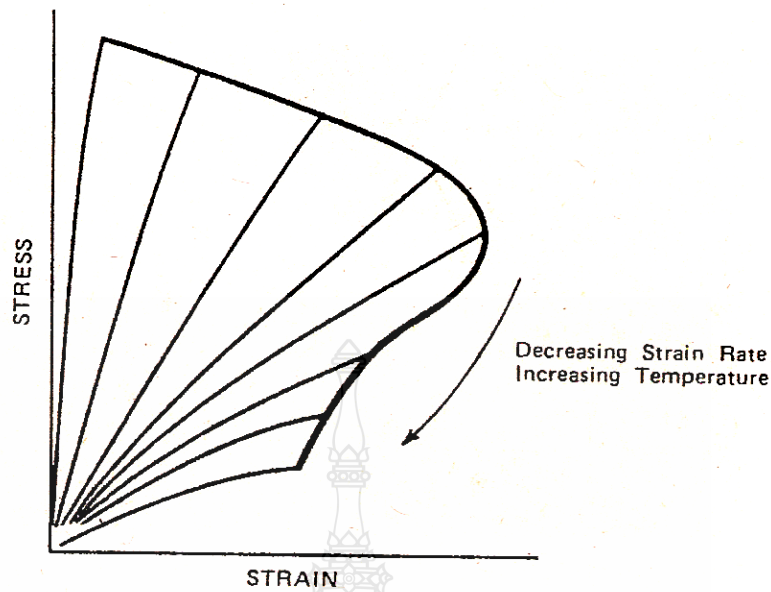
มอดูลัสของสตรูปยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity ; E) ของชิ้นทดสอบ หรือบางครั้งเรียกว่ามอดูลัสของยังส์ (Young's Modulus) นิยามไว้ว่าเป็นอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียด



(ก) เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสและอุณหภูมิ

รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน

ในทางปฏิบัติข้อมูลของสมบัติของพอลิเมอร์ได้จากการพิจารณาการแตกหัก ดังรูปที่ 2.17 โดยการสร้างเส้นกราฟความเค้น-ความเครียดที่จุดแตกหักซึ่งเกิดจากอัตราเร็วในการดึงค่าต่างๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดอัตราเร็วในการดึงลง จุดที่เกิดการแตกหักจะเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกา (เลื่อนไปทางขวามากขึ้น) พอลิเมอร์เปลี่ยนจากวัสดุเปราะไปสู่วัสดุที่มีความเหนียวมากขึ้น ขณะที่ความเค้นสูงสุดที่พอลิเมอร์สามารถทนทานต่อแรงดึงก่อนเกิดการแตกหักมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ระยะยืด ณ จุดที่พบการแตกหักมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (ตามรูปที่ 2.16 ( ก ) A → B → C → D))



รูปที่ 2.17 การล้อมรอบของการแตกหัก

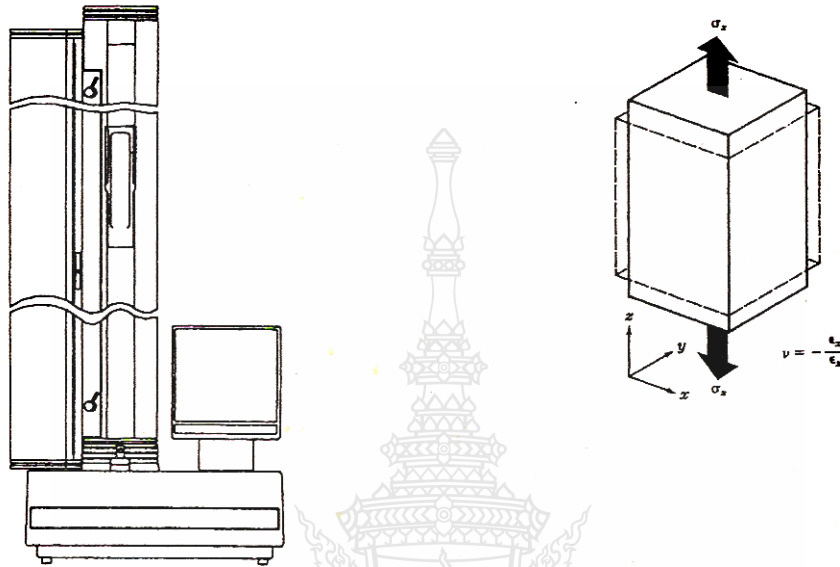
ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  มาก ๆ น้ำหนักโมเลกุลและความมีกิ่งก้านสาขา (Branching) หรือการเชื่อมโยงของสายโซ่ตาข่าย (Crosslinking) ของพอลิเมอร์มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความเค้น ความเครียดค่อนข้างน้อย อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้  $T_g$  หรืออุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  เล็กน้อยจะ ผลเพิ่มขึ้น เช่น ในกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ซึ่งต้องการความเหนียวสูงขึ้นไปนั้น สามารถทำได้โดยการดึงเส้นใยที่อุณหภูมิต่ำ (Cold Draw) การดึงเส้นใยนี้ทำให้สายโมเลกุลของพอลิเมอร์เรียงตัวกันในแนวเดียวกับทิศทางการดึงทำให้ความแข็งแรง (Stiffness) ของเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.17 เปรียบเทียบการยืดตัวจนขาดของตัวอย่างที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยทั่วไปพอลิเมอร์ในสถานะคล้ายยางมีระยะทางการยืดตัวจนขาดเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักโมเลกุล โมเลกุลพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างใหญ่ เทอะทะกว่าจะมีค่าความเค้นดึงสูงสุดหรือความแกร่งต่อการดึงน้อยกว่าพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างขนาดเล็ก ในขณะที่ค่าการยืดจนขาดของพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างใหญ่มีค่ามากกว่าพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างขนาดเล็ก การเพิ่มขึ้นของสายโซ่ตาข่ายมีแนวโน้มต่อการลดลงของระยะยืดตัวจนขาด ความเค้นดึงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเกิดสายโซ่ตาข่ายในช่วงต้น แต่เมื่อดำเนินการจนผ่านจุดสูงสุดแล้ว ค่าความเค้นดึงสูงสุดลดลงตามปริมาณการเกิดสายโซ่ตาข่าย

ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  ปริมาณของโครงสร้างผลึก (% Crystallinity) แปรผกผันกับค่าความเค้นดึงสูงสุดของพอลิเมอร์ เนื่องจากผลึกจะกระทำตัวเสมือนตัวเพิ่มความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentrators) อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ที่มีปริมาณโครงสร้างผลึกสูงๆ (30-85%) สามารถ

เปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุจากลักษณะยึดหยุ่นคล้ายยางมาเป็นพอลิเมอร์ค่อนข้างแข็งเหนียวได้ เช่น พอลิเอทิลีน พอลิพรอพิลีน ชนิดของลักษณะโครงสร้างภายในหรือมอร์ฟอโลยี (Morphology) มีอิทธิพลต่อความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดมาก ถ้าพอลิเมอร์มีความเป็นโครงสร้างผลึกสูง ส่วนใหญ่มีแนวโน้มต่อการเพิ่มมอดูลัสแต่มีระยะการยืดตัวจนขาดลดลงหรือขาดง่ายขึ้น ในการอธิบายผลของเส้นกราฟความเค้น-ความเครียดของพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึกหรือกึ่งผลึก ต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับรีโอโลยีของก้อนพอลิเมอร์หรือบัลค์รีโอโลยี (Bulk Rheology) และการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะตัวภายในของวัสดุร่วมพิจารณาด้วย

ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เส้นใยพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ผ่านการดึงที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งทำให้การเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลเปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราในการดึงแม้เพียงเล็กน้อยจะมีผลต่อการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลและสมบัติของเส้นใยที่ผลิตได้ นอกจากเทอร์โมพลาสติกแล้ว วัสดุพอลิเมอร์รวมถึงพอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) พลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย อีลาสโตเมอร์และเทอร์โมเซต คุณสมบัติความเค้น-ความเครียดของวัสดุเหล่านี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพอลิเมอร์และความแข็งแรงในการยึดติดกันระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ แต่ละชนิด (Adhesive Strength of Interface) เครื่องมือที่ใช้วัดความเค้น-ความเครียดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ เครื่องทดสอบแรงดึงมาตรฐาน (Universal Testing Machine) ดังรูปที่ 2.18 เครื่องมือนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ในการจับชิ้นงานหรือหัวจับ (Grips of Jaws) สองตัว หัวจับตัวหนึ่งอยู่นิ่งติดกับเครื่องมือ ส่วนหัวจับอีกตัวหนึ่งจะยึดติดกับราวขวาง (Crosshead) ซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นและแยกออกจากหัวจับตัวแรกซึ่งอยู่ด้านล่างด้วยอัตราดึงคงที่ค่าต่างๆ จาก 0.5-500 มิลลิเมตร/นาที ความเค้นของชิ้นตัวอย่างแปรตามขนาดของเซลล์บรรทุกน้ำหนักหรือโหลดเซลล์ (Load Cell) โหลดเซลล์มีค่าน้ำหนักอยู่ระหว่าง 2 ถึง 500 กิโลกรัม หรือมากกว่านั้น เพื่อช่วยให้ข้อมูลมีความถูกต้องและหลีกเลี่ยงความผิดพลาดอันเนื่องมาจากชิ้นงานเกิดการลื่นหลุด (Slippage) ออกจากหัวจับระยะในการยืดตัวของตัวอย่างจึงควรวัดระยะเกจที่เพิ่มขึ้นจากระยะเริ่มต้นเดิม ไม่ควรวัดจากการเคลื่อนที่ของหัวจับเท่านั้นดังนั้นการออกแบบหัวจับและรูปร่างของชิ้นงาน ตลอดจนการเตรียมชิ้นงาน มักถูกเลือกอย่างเหมาะสม เพื่อให้ความเค้นหรือความเครียดที่ไม่พึงประสงค์มีค่าต่ำสุดหรือไม่มีเลย เครื่องทดสอบแรงดึงเทนซาชนสามารถติดตั้งคำสั่งต่าง ๆ ไว้ล่วงหน้า เช่น สามารถกำหนดให้ดึงตัวอย่างที่อัตราเร็วในการดึงค่าต่าง ๆ และสิ้นสุดการทดสอบเมื่อชิ้นตัวอย่างมีค่าระยะยืดที่กำหนด สามารถสั่งให้ราวขวางเคลื่อนที่กลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นอย่างอัตโนมัติหลังจากการให้ค่าระยะยืดสูงสุดของชิ้นงาน สำหรับการศึกษาค่าผ่อนคลายความเค้น (Stress Relaxation) เราสามารถสั่งให้เครื่องหยุดการทดสอบเมื่อถึงระยะยืดที่กำหนดไว้ล่วงหน้า หรือคำสั่งหยุดการเคลื่อนที่กลับลงมาของราว

ขวางได้ โดยทั่วไปการทดสอบมักกระทำที่อุณหภูมิห้อง ยกเว้นบางกรณีอาจมีการใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิขณะทดสอบร่วมด้วย เพื่อให้ข้อมูลที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.18 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Testing Machine) และการดึงชิ้นงาน

## 2.11 ลักษณะพื้นฐานทางกายรูปของสี [25]

สีที่ตามองเห็นนั้นเป็นคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ ซึ่งคลื่นแสงดังกล่าวจัดเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่น 380-780 นาโนเมตร แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแสงสีขาวเกิดจากการรวมกันของคลื่นแสงในความยาวดังกล่าว และคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) ความยาวคลื่นน้อยกว่า 380 นาโนเมตร การแยกแสงสีขาวเป็นแสงสีต่างๆ นั้น สามารถทำได้ด้วยปริซึม การมองเห็นสีของคนเรานั้นเกิดจากการที่แสงตกกระทบกับวัตถุ แล้วสะท้อนเข้าตาเรา ซึ่งวัตถุมิติจะดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นหนึ่งไว้ และสะท้อนแสงที่เป็นคลื่นแสงเต็มเต็มของคลื่นแสงนั้น การดูดกลืนคลื่นแสงของวัตถุมิตินั้นเกิดจากการเปลี่ยน หรือเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electronic Transition) จากออร์บิทัล (Orbital) หนึ่งไปสู่ออร์บิทัลหนึ่งภายในโมเลกุล ช่วงความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนโดยวัตถุนั้นจะขึ้นกับค่าพลังงานที่แตกต่างกันของออร์บิทัลทั้งสอง ดังนั้นสีข้อมและพิกเมนต์แต่ละตัวจะมีสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorption Spectrum) ต่างกันขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของสีนั้น

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสีที่มองเห็นและคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนโดยวัตถุ

คลื่นแสงที่ถูกดูดกลืน		สีที่ตามองเห็น
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	สี	
400 – 435	ม่วง	เหลืองอมเขียว
435 – 480	น้ำเงิน	เหลือง
480 – 490	น้ำเงินอมเขียว	ส้ม
490 – 500	เขียวอมน้ำเงิน	แดง
500 – 560	เขียว	ม่วงแดง
560 -580	เขียวอมเหลือง	ม่วง
580 – 595	เหลือง	น้ำเงิน
595 – 605	ส้ม	น้ำเงินอมเขียว
605 – 750	แดง	เขียวอมน้ำเงิน

ตารางที่ 2.1 สีที่ตามองเห็น และสีที่วัตถุดูดกลืนคลื่นแสงไว้ เช่น วัตถุที่ดูดกลืนคลื่นแสงสีน้ำเงินจะสะท้อนคลื่นแสงสีเหลือง ทำให้เห็นเป็นวัตถุสีเหลือง อย่างไรก็ตามคลื่นแสงสีเขียวจะไม่มีคลื่นแสงที่เป็นคลื่นแสงเติมเต็ม (Complementary Color) แต่วัตถุที่ดูดกลืนคลื่นแสงสีเขียวจะมีสีม่วงแดง (Purple) จึงเป็นสีผสมระหว่างแสงสีแดง และแสงสีม่วง (Violet)

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย่อมอาจมีความซับซ้อน สีที่มีความสดใสสว่างมักจะมีแถบสเปกตรัมที่แคบ และมีลักษณะเป็นกราฟที่มียอดแหลม (Sharp Peak) ส่วนสีที่ทึบไม่สดใสจะมีแถบสเปกตรัมที่กว้าง และไม่มียอดแหลม สีน้ำเงินจะมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นที่กว้าง ในขณะที่สีดาจะมีการดูดกลืนแสงตลอดความยาวคลื่นในช่วงคลื่นแสงที่ตามองเห็นได้ การอธิบายถึงลักษณะของสีนั้นมักใช้คำว่าโทนสี (Hue) ความสดใส (Brightness) และความเข้ม (Strength) โทนสี หมายถึง สีที่โดยความยาวคลื่นแสงหลักที่สะท้อนจากวัตถุ เช่น สีเหลือง สีแดง สีน้ำเงิน เป็นต้น ในช่วงแถบสีหนึ่ง ๆ โทนสีที่ได้จะขึ้นกับความยาวคลื่น เช่น สีน้ำเงินจะมีสีน้ำเงินอมเขียวเมื่อความคลื่นเพิ่มขึ้น และจะมีสีน้ำเงินออกแดงเมื่อความยาวคลื่นลดลง ความสดใสจะใช้อธิบายถึงคุณลักษณะของสีว่าเป็นสีสดใสหรือสีทึบ สีที่สดใสจะมีการดูดกลืนพลังงานแสงน้อย ทำให้สีดูสดใสกว่า ในขณะที่สีทึบจะมีการดูดกลืนพลังงานมาก ทำให้สีดูทึบไม่สดใส ส่วนความเข้มจะเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาณแสงสีขาวที่สะท้อนจากพื้นผิว ถึงแม้โทนสีจะเริ่มจากสีม่วงไปเป็นสีแดงเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่นจาก 400 ไปเป็น 750 นาโนเมตร

### 2.11.1 การสะท้อนแสง (Reflection)

คือ การเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงกลับมาสู่ตัวกลางเดิม เมื่อแสงเคลื่อนที่ไปถึงแนวเขตระหว่างตัวกลาง 2 ตัวกลาง เช่น เมื่อแสงตกกระทบผิวของกระจก แสงจะสะท้อนที่ผิวกระจกกลับสู่อากาศ เป็นต้น เมื่อแสงตกกระทบผิวของวัตถุใดๆ โดยที่พื้นผิวของวัตถุนั้นไม่ดูดกลืนแสงไปทั้งหมด แสงส่วนที่เหลือจะสะท้อนออกจากผิววัตถุนั้นๆ ไม่ว่าจะเป็วัตถุที่มีผิวเรียบหรือผิวขรุขระ

### 2.11.2 ความสามารถในการคิดของสี (Substantivity)

ความสามารถในการดูดคิดของสี หมายถึง สมบัติในการดึงดูดกันระหว่างวัสดุและสี โดยสีจะถูกดึงดูดจากตัวกลางเข้าไปเกาะติดในวัสดุ ดังนั้นสีย้อมที่มีความสามารถในการดูดคิดบนเส้นใยสูงก็จะสามารถย้อมติดเส้นใยได้มาก

### 2.11.3 ประเภทของแรงดึงดูดที่ทำให้สีย้อมสามารถดูดคิดเส้นใย

#### 1. แรงไอออนิก (Ionic Forces)

เกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่มีประจุต่างกัน เช่น ในการย้อมเส้นใยโปรตีนด้วยสีแอซิด หรือการย้อมเส้นใยอะคริลิกด้วยสีเบสิก

#### 2. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Forces) หรือแรงลอนดอน (London Forces)

เป็นแรงดึงดูดที่เกิดกับการที่ไม่มีประจุ เกิดเนื่องจากการที่อิเล็กตรอนในโมเลกุลของสารไม่อยู่นิ่ง แต่เคลื่อนที่ตลอดเวลา ทำให้รูปแบบการกระจายตัวของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไปมาตลอดเวลา ในบางขณะโมเลกุลนั้นอาจมีการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของโมเลกุลมากกว่าที่ส่วนอื่น ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการเกิดขั้วที่ตรงข้ามขึ้นบนโมเลกุลอื่นที่อยู่โดยรอบ เกิดเป็นแรงดึงดูดชั่วคราวระหว่างขั้วที่ต่างกันของโมเลกุลเหล่านั้น แรงดึงดูดชนิดนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อโมเลกุลเหล่านั้นอยู่ใกล้กัน และขนาดของแรงก็จะขึ้นกับขนาดพื้นที่ผิวหรือขนาดของโมเลกุล โดยโมเลกุลที่มีพื้นที่ผิวมาก หรือขนาดใหญ่จะเกิดแรงดึงดูดนี้ได้มากกว่าโมเลกุลที่มีผิวน้อยหรือมีขนาดเล็ก แรงดึงดูดนี้สามารถเกิดขึ้นได้กับเส้นใยและสีย้อมทุกประเภท

#### 3. แรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Polar Forces)

แรงดึงดูดชนิดนี้แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่

##### 1) แรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-Dipole Interaction)

เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วบวกและลบเกิดขึ้นอย่างถาวร

##### 2) แรงไดโพล-ไดโพลเหนี่ยวนำ (Dipole-Inducted Dipole Interaction)



เกิดขึ้นระหว่าง โมเลกุลที่มีขั้วบวกและลบถาวรและ โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วบวกและลบขึ้น โดยโมเลกุลแรก แรงดึงดูดระหว่างขั้วนี้เกิดขึ้นกับขั้วขั้วและเส้นใยทุกประเภท โดยเฉพาะระหว่างสตีลสเฟิร์สกับเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แรงดึงดูดระหว่างขั้วระหว่างสตีลสเฟิร์สกับเส้นใยพอลิเอสเตอร์

เกิดขึ้นกับสารเคมีที่มีการกระจายตัวของอิเล็กตรอนที่ไม่สมดุลภายในโมเลกุล เนื่องจากการมีอะตอมในโมเลกุลที่มีแรงดึงดูดต่ออิเล็กตรอนไม่เท่ากัน ทำให้เกิดเป็นขั้วบวกและลบขึ้นภายในโมเลกุล และไปดึงดูดกับขั้วที่ต่างกันของโมเลกุลอื่น

#### 4. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding)

เกิดขึ้นกับสารที่มีอะตอมไฮโดรเจน อะตอมที่มีความสามารถในการเกิดประจุลบ (Electronegativity) สูง เช่น อะตอมออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และอะตอมฮาโลเจน (Halogen) เป็นต้น โดยอะตอมไฮโดรเจนของโมเลกุลหนึ่งจะเกิดประจุบวกขึ้น และเกิดแรงดึงดูดกับอะตอมที่มีประจุลบของอีกโมเลกุลหนึ่งที่อยู่ใกล้กัน แรงดึงดูดชนิดนี้เกิดขึ้นระหว่างขั้วขั้วกับเส้นใยทุกประเภท

#### 5. พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond)

เป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากการแบ่งปัน และใช้คู่อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสีกับโมเลกุลของเส้นใย แรงดึงดูดชนิดนี้เป็นแรงดึงดูดที่ค่อนข้างแข็งแรงและถาวร เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยเซลลูโลส เช่น ฝ้ายหรือเรยอนกับสีรีแอคทีฟ

#### 2.11.4 ประเภทของการย้อมสี

สีย้อมสามารถย้อมให้ติดสิ่งทอได้ใน 5 ชั้นของกระบวนการผลิตสิ่งทอ ดังนี้

1. การย้อมสีสารเส้นใย (Spun or Solution or Dope Dyeing)
2. การย้อมสีใย (Fiber or Stock Dyeing)
3. การย้อมสีด้าย (Yarn Dyeing)
4. การย้อมสีผ้า (Fabric Dyeing)
5. การย้อมสีผลิตภัณฑ์ (Finish Product Dyeing)

### 1) การย้อมสีสารเส้นใย (Spun-Dyed Solution-Dyed Dope-Dyed)

การย้อมสีสารเส้นใย (Spun-Dyed Solution-Dyed Dope-Dyed) คือ การเติมสีเข้าไปขณะใยอยู่ในสถานะของเหลว หรือขณะกำลังปั่นเป็นสารเส้นใยก่อนทำการอัดผ่านแว่นกดใย สีที่ย้อมด้วยวิธีการนี้จะเป็นส่วนหนึ่งของใย กระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอภายในเส้นใย ทำให้สีมีความคงทนต่อการซักและการขัดถูสูง หากเคลือบด้ายที่ทำจากใยที่ย้อมด้วยวิธีการนี้จะพบว่าใยทุกเส้นติดสีสม่ำเสมอ การย้อมสีด้วยวิธีการนี้จะย้อมได้สีใดสีหนึ่งในรอบการผลิตใยนั้นจึงมักย้อมสีที่นิยมใช้กันทั่วไปตลอดเวลา เช่น สีดำ สีกรมท่า สีเนื้อ อีกทั้งต้องมีการสูญเสียสีไปกับการผลิตในขั้นตอนต่างๆ สูงกว่าการย้อมแบบอื่นๆ แล้วยังต้องใช้เวลาในการผลิตอีกหลายขั้นตอน กว่าจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคใช้จริงคือเครื่องแต่งกาย หรือผ้าตกแต่งบ้าน ซึ่งอาจไม่ทันต่อระยะเวลาของสีตามแฟชั่น วิธีการย้อมนี้มักใช้ย้อมใยที่ย้อมยาก เช่น โอลีฟิน (Olefin) และอะซิเตท (Acetate) การย้อมอะซิเตท (Acetate) ด้วยวิธีการนี้จะช่วยป้องกันการเกิดการเปลี่ยนสีจากแก๊สในอากาศได้ดีกว่าการย้อมด้วยวิธีการอื่น

### 2) การย้อมสีใย (Fiber or Stock Dyeing)

การย้อมสีใย (Fiber or Stock Dyeing) คือ การย้อมสีสิ่งทอที่อยู่ในสถานะใยภายหลังการทำใยกระจายตัวจากกัน หรือย้อมในขณะที่เป็นสโลว์เวอร์ที่ผ่านการหรีเรียบร้อย เรียกว่า การย้อมสโลว์เวอร์ (Top Dyeing) การย้อมใยทำให้สีซึมติดใยได้ดี สม่ำเสมอ เมื่อนาใยที่ย้อมด้วยวิธีการนี้ตั้งแต่สองสีขึ้นไปมาผสมรวมกันปั่นเป็นด้ายแล้วนำมาทำเป็นผืนผ้า จะได้ผ้าที่มีลักษณะคล้ายขนสัตว์ (Tweed or Heather Effect) การจำแนกใยที่ผ่านการย้อมสีด้วยวิธีการนี้สามารถทำได้โดยการคลายเกลียวเส้นด้ายเพื่อดูสีของใย จะปรากฏสีที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 สีขึ้นไปในด้ายเส้นเดียว แต่หากผ้าที่ผลิตขึ้นเป็นสีพื้นหรือสีเดียวตลอดทั้งหมด (Solid Color) เมื่อคลายเกลียวด้าย จะปรากฏว่าใยทุกเส้นติดสีสม่ำเสมอ เท่ากัน เหมือนกัน โดยจะไม่สะท้อนสีขาวหรือสีอ่อนกว่าที่เกิดจากใยบางส่วนที่ได้รับสีย้อมไม่ทั่วถึง

### 3) การย้อมสีด้าย (Yarn Dyeing)

การย้อมสีด้าย (Yarn dyeing) คือ การย้อมสีสิ่งทอขณะเป็นเส้นด้ายก่อนนำไปทำเป็นผืนผ้า การย้อมด้ายสามารถย้อมสีพื้นหรือเป็นสีเดียวกันตลอดเส้น (Solid Color) หรือมากกว่าหนึ่งสีในเส้นเดียวกัน (Space Dyeing) เช่น สีกับสีขาว หรือหลากสี ผ้าบางรูปแบบนิยมใช้ด้ายที่ผ่านการย้อมสี (Yarn Dyed) ในการผลิต เช่น ผ้าลายทาง (Stripes) หลากสี ทั้งตามยาวและตามขวาง ผ้าสีเหลี่ยม (Chambray) คือ ผ้าที่ทอโดยใช้ด้ายแนวด้ายยืนและแนวด้ายพุ่งต่างสีกัน ผ้ายกดอกที่มีด้ายยืนหรือด้ายพุ่งเสริมพิเศษ ผ้าลายตารางหรือลายสก๊อต (Plaid) ผ้าที่ทอจากด้ายย้อมสีสามารถจำแนกได้โดยการแกะเส้นด้ายจากโครงสร้างเพื่อพิจารณาความสม่ำเสมอของสีด้าย เนื่องจากด้ายย้อมสีจะมีสี

ภายนอกด้วยส้อมที่ติดตลอดทั้งเส้น แต่หากคลายเกลียวเส้นด้ายอาจพบว่ามีใยบางส่วนติดสี ไม่สม่ำเสมอกัน โดยจะสะท้อนเงาหรือส่วนที่ย้อมติดสีน้อยกว่าให้เห็น

#### 4) การย้อมสีผ้า (Fabric Dyeing)

การย้อมสีผ้า (Fabric Dyeing) คือ การย้อมสีสิ่งทอเมื่อเป็นผืนผ้าแล้ว สำหรับผ้าที่สำเร็จเป็น ผืนที่ทำจากด้ายและใยที่ไม่ย้อมสีไม่ว่าจะเป็นผ้าทอหรือผ้าถักที่ยังไม่ผ่านกระบวนการใดๆ เลย ภายหลังจากออกจากเครื่องทอหรือเครื่องถักเรียกว่า ผ้าดิบ (Greige Fabric) การย้อมผืนผ้ามีหลายวิธี

#### 5) การย้อมสีผลิตภัณฑ์ (Finish Product Dyeing)

การย้อมสีผลิตภัณฑ์ (Finish Product Dyeing) คือ การย้อมสีขณะที่สิ่งทอนั้นอยู่ในรูปของ ผลิตภัณฑ์ เช่น เสื้อ กางเกง ถุงเท้า ปลอกหมอนต่างๆเรียบร้อยแล้ว นิยมใช้ย้อมสินค้าแฟชั่นที่ต้องการ ผลิตงานวนไม่มากนักเพื่อให้สินค้าที่ผลิตขึ้นถูกลอกเลียนแบบได้ง่าย หรือย้อมสินค้าแฟชั่นที่ ต้องการความรวดเร็วในการจำหน่ายเข้าสู่ตลาดเพื่อให้แฟชั่นนั้นทันสมัยไป การย้อมสีผลิตภัณฑ์ สามารถย้อมผลิตภัณฑ์ที่ทำจากใยชนิดเดียวกันทั้งหมดหรือใยผสมก็ได้ การจำแนกการย้อมสี ผลิตภัณฑ์สามารถทำได้โดยการพิจารณาความสม่ำเสมอของสีที่ส่วนของผลิตภัณฑ์ที่จะมีความหนา กว่าส่วนอื่นเช่น ด้านในของบริเวณกระเป๋า บริเวณตะเจ็บ เป็นต้น อาจพบว่ามีสีเข้มหรืออ่อนกว่าส่วน ที่เป็นผ้าชั้นเดียว หรือส่วนที่เหลือโดยส่วนมากของผลิตภัณฑ์

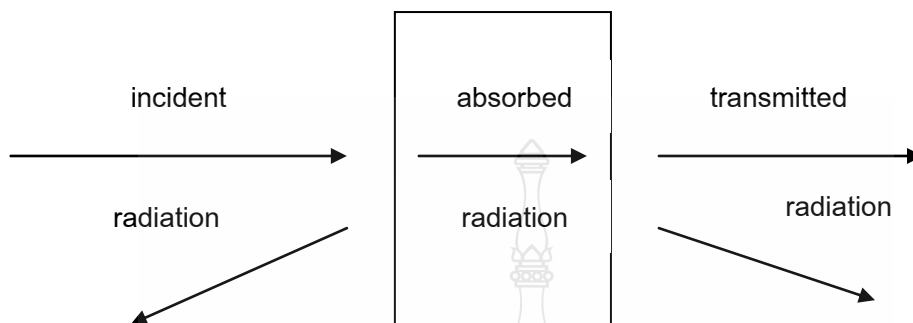
## 2.12 การทำงานของเครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง [26]

### หลักการ

สเปกโทรสโคปี (Spectroscopy) เป็นศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับการวัดการดูดกลืน (Absorption) หรือการคาย (Emission) รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiation) ของ สาร โดยเฉพาะสารส่วนใหญ่สามารถดูดกลืนคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet UV) และช่วง แสงที่มองเห็นได้ (Visible) ได้ จากสมบัตินี้จึงนำมาใช้เป็นเทคนิควิเคราะห์ที่เรียกว่า ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-Vis Spectroscopy)

การดูดกลืนแสงหรือรังสีที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น ประมาณ 190 – 800 นาโนเมตร ของสารเคมี สมบัติของสารดังกล่าวนี้ได้นำมาใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้ง ในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณอย่างกว้างขวางเพราะวิธีนี้ให้ความถูกต้องแม่นยำและมีสรุปไว (Sensitivity) สูง โดยอาจทำการวิเคราะห์อยู่ในรูปของธาตุหรือโมเลกุลก็ได้ แต่การที่จะพิสูจน์ว่า สารตัวอย่างเป็นสารอะไร มีโครงสร้างอย่างไร จำเป็นต้องใช้เทคนิคอื่นเข้าช่วยเพื่อให้เกิดความ ถูกต้องแม่นยำ

เมื่อให้ลำแสงที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง (Continuous Beam of Radiation) ผ่านเข้าไปในวัตถุ จะพบว่าแสงบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนกระเจิง และบางส่วนทะลุออกไปดังรูป 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะลำแสงเมื่อส่องผ่านวัตถุ

ถ้าให้ลำแสงที่ทะลุออกไปนั้นผ่านเข้าเครื่องกระจายแสง (เช่น ปริซึม หรือเกรตติง) จะเห็นว่าสเปกตรัมหายไปบางส่วน ส่วนที่หายไปจะเรียกว่า Absorption Spectrum และพลังงานที่ถูกดูดกลืนไปนั้นจะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับของพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น

เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่นำเทคนิค UV-Vis Spectroscopy ไปใช้งาน เครื่องมือตัวนี้ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจาก ตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิด เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer โดยทั่วไปแล้วจะมีส่วนประกอบหลักๆ ที่เหมือนกัน ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง เกรตติงหรือโมโนโครเมเตอร์ เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่าง และเครื่องตรวจวัดแหล่งกำเนิดแสงจะต้องให้แสงที่คงที่อย่างต่อเนื่อง ตัวที่นิยมใช้ คือ หลอดทังสแตน-ฮาโลเจน ซึ่งให้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 320-2,500 นาโนเมตร สำหรับแหล่งกำเนิดแสงในช่วงรังสียูวีนั้นจะใช้หลอดไฮโดรเจนหรือหลอดควิที่ เรียมซึ่งให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 160-375 นาโนเมตร แต่แสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดนั้นจะมีความยาวคลื่นต่างๆ ดังนั้นจึงต้องใช้โมโนโครเมเตอร์เป็นตัวกระจายแสงออกเพื่อให้แสงที่จะผ่านไป ยังตัวอย่างมีความยาวคลื่นค่าเดียวตามที่ต้องการ หลังจากนั้นแสงความยาวคลื่น ค่าเดียวจะผ่านไปยังเซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างและสารเปรียบเทียบ (Cuvettes) ซึ่งมีรูปร่างต่างๆ กันออกไป แต่โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างภายใน 1 เซนติเมตร (ซึ่งค่านี้จะเป็นค่าระยะทางเดินของแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างตามกฎของ Beer-Lambert เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer บางรุ่น สามารถใช้หลอดทดลองเป็น Cuvettes ได้ แต่ Cuvettes ที่ดีที่สุดนั้นทำมาจากควอตซ์ที่มีคุณภาพสูง สำหรับ Cuvettes ที่ทำจากแก้วหรือ

พลาสติกนั้นก็เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป แต่สามารถใช้ได้เฉพาะในช่วงแสงขาวเท่านั้นเพราะแก้วและพลาสติกดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวีแสงในส่วนที่ไม่ถูกดูดกลืนจะเดินทางผ่านตัวอย่างมาถึงเครื่องตรวจวัด สำหรับเครื่องตรวจวัดที่นิยมใช้ ได้แก่ PMT (Photomultiplier Tube) Diode Arrays และ CCDs (Charge Coupled Devices) เครื่องจะทำการบันทึกค่าความยาวคลื่นร่วมกับค่ามุมของแต่ละความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนผลของสเปกตรัมที่ได้จะในรูปแบบของกราฟ

เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ แบบลำแสงเดี่ยว และแบบลำแสงคู่ สำหรับเครื่องแบบ ลำแสงเดี่ยวเป็นเครื่องที่ใช้ลำแสงเดี่ยวจากแหล่งกำเนิดผ่านไปยังตัวอย่าง เครื่องมือนี้ได้รับการออกแบบให้สามารถใช้งานได้ง่ายสะดวก และมีราคาไม่แพงมากนัก สำหรับเครื่องแบบลำแสงคู่ นั้น แสงจะถูกแยกออกเป็น 2 ลำ ก่อนที่จะไปตกลงบนตัวอย่าง โดยแสงลำหนึ่งจะใช้เป็นลำแสงอ้างอิงขณะที่อีกลำจะผ่านไปยังตัวอย่าง เครื่องมือที่เป็นแบบลำแสงคู่บางรุ่นจะมีเครื่องตรวจวัด 2 ตัวเพื่อที่จะตรวจวัดแสงอ้างอิงและแสงที่มาจากตัวอย่างได้พร้อมกัน แต่ในบางรุ่นจะมีเครื่องตรวจวัดเพียงตัวเดียว โดยแสงทั้งสองลำจะผ่านตัว Beam Chopper ซึ่งจะทำหน้าที่กักแสงลำหนึ่งไว้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เครื่องตรวจวัดจึงสามารถตรวจวัดความแตกต่างของแสงทั้งสองลำได้

#### 2.12.1 การวัดค่าสี [27]

การวัดค่าความเข้มสี (ค่า K/S) ค่าสี CIELAB (L\* a\* b\*)

- ค่าความเข้มสี (ค่า K/S)

วัดค่าความเข้มสีของเส้นด้ายติดสีโดยใช้เครื่องวัดสี Datacolor 650 Spectrophotometer ซึ่งเครื่องจะทำการวัดค่าการสะท้อนแสง (%Reflectance) ของตัวอย่างเส้นด้ายในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร และนำมาคำนวณเป็นค่าความเข้มสี (ค่า K/S) ตามสมการด้านล่าง ถ้าค่า K/S สูงว่าเส้นด้ายติดสีได้เข้ม ถ้าค่า K/S ต่ำว่าเส้นด้ายติดสีได้อ่อน

$$K/S = (1-R^2)/2R \quad (2.7)$$

- เมื่อ
- K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Kubelka-Munk Coefficient of Absorption)
  - S คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง (Kubelka-Munk Coefficient of Scattering)
  - R คือ ค่าการสะท้อนแสงของเส้นด้ายตัวอย่าง (Reflectance Factor)

โดยในการวัดค่าสีโดยเครื่องวัดสีนี้ จะตั้งค่าแหล่งกำเนิดแสงเป็น D65 และมีมุมมองวัตถุ ที่ 10 องศา (10 Degree Standard Observer) และแต่ละตัวอย่างของเส้นด้ายจะทำการวัดซ้ำ 4 ครั้ง ที่ตำแหน่งต่างกัน ซึ่งค่า K/S ที่จะเป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้

- ค่าสี CIELAB ( $L^* a^* b^*$ )

1) ค่าความสว่าง (Lightness,  $L^*$ ) ของสี

การทดสอบนี้เพื่อเปรียบเทียบความสว่าง ( $L^*$ ) ของเส้นด้ายตัวอย่างโดยใช้เครื่องวัดสี Datacolor 650 Spectrophotometer ในการหาค่าความสว่างของเส้นด้ายย้อมสีแต่ละตัวอย่างจะวัดซ้ำ 4 ครั้ง ที่ตำแหน่งต่างกัน ซึ่งค่าที่วัดได้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณโดยเครื่องวัดสี (วัดสีที่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร) ถ้าค่า  $L^*$  มากกว่าเส้นด้ายมีสีขาว การคำนวณค่าความสว่างของเส้นด้ายดังกล่าว

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 \quad (2.8)$$

เมื่อ  $Y$  คือ ค่า CIE ไตรสติมูลัส (CIE Tristimulus Value) โดย  $Y$  จะบอกความเป็นสีเขียวของวัตถุ

$Y_n$  คือ ค่าไตรสติมูลัส (Tristimulus Value) ของค่าของสีขาวอ้างอิง (Reference White) ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงหนึ่ง เช่น D65 ( $Y_n = 100$  เสมอ ส่วน  $Y/Y_n$  จะมีค่ามากกว่า 0.01)

1) การวัดค่า  $a^*$  และ  $b^*$  ของสี

การทดสอบนี้เพื่อเปรียบเทียบค่า  $a^*$  และ  $b^*$  ของเส้นด้ายตัวอย่างโดยใช้เครื่องวัดสี Datacolor 650 Spectrophotometer ในการหาค่า  $a^*$  และ  $b^*$  ของเส้นด้ายตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจะวัดซ้ำ 4 ครั้ง ซึ่งค่าที่วัดได้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณโดยเครื่องวัดสี (วัดสีที่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร) โดยค่า  $a^*$  เป็นบวกออกโทนสีแดง  $a^*$  เป็นลบออกโทนสีเขียว  $b^*$  เป็นบวกออกโทนสีเหลือง  $b^*$  เป็นลบออกโทนสีน้ำเงิน  $a^*$  และ  $b^*$  มีค่าบวกมากหรือลบมากกว่าสีออกโทนนั้นมาก

$$a^* = 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}]$$

$$b^* = 200[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}]$$

เมื่อ ค่า  $X, Y$  และ  $Z$  คือ ค่า CIE ไตรสตีมูลต์ โดย  $X$  จะบอกความเป็นสีแดงของวัตถุ  $Y$  จะบอกความเป็นสีเขียวของวัตถุ และ  $Z$  จะบอกความเป็นสีน้ำเงินของวัตถุ  
ค่า  $X_n, Y_n, Z_n$  คือ ค่าไตรสตีมูลต์ของค่าของสีขาวอ้างอิง (Reference “hite”) ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง (Illuminant) หนึ่ง เช่น D65 ( $Y_n = 100$  เสมอ ส่วน  $X/X_n, Y/Y_n$  และ  $Z/Z_n$  จะมีค่ามากกว่า 0.01)



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี

ทำการเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีดังหัวข้อต่อไปนี้ เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการขึ้นรูปและทดสอบเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างๆ กัน

##### 3.1.1 วัสดุดิบ

เม็ดชิฟพอลิแลคติกแอซิดเกรด (PLA 3052D) (MFI = 14 กรัม/10 นาที, Density = 1.24 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) จากบริษัทเนเจอร์เวิร์ค จำกัด (NatureWorks<sup>®</sup> LLC)

##### 3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องปั่นหลอมเส้นใยระดับห้องปฏิบัติการ (Randcastle Melt Spinning)
2. เครื่องดึงยึดเส้นใย (Draw Unit)
3. หัวฉีดสปินเนอร์ที่มีรูปร่างของรูต่างกัน (Shaped Spinnerets): วงกลม (Circular), ลีแฉก (4-Lobed)
4. เครื่องอบเม็ดชิฟระบบลมร้อน (Hot Air Through Dryer)
5. กล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope (National Digital Microscope)
6. แผ่นสำหรับตัดเส้นใย (Cutting Fiber Holder)
7. โปรแกรมวิเคราะห์ขนาด (ImageJ)
8. เครื่องวัดความหนืด (Rheometer : Gemini 200HR Nano (Malvern Instruments)
9. เครื่องวัดสี Datacolor 650 Spectrophotometer
10. เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุต่อแรงดึง จาก Instron รุ่น 5569
11. เครื่องมือทดสอบทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis รุ่น TGA/SDTA851e

##### 3.1.3 สารเคมี

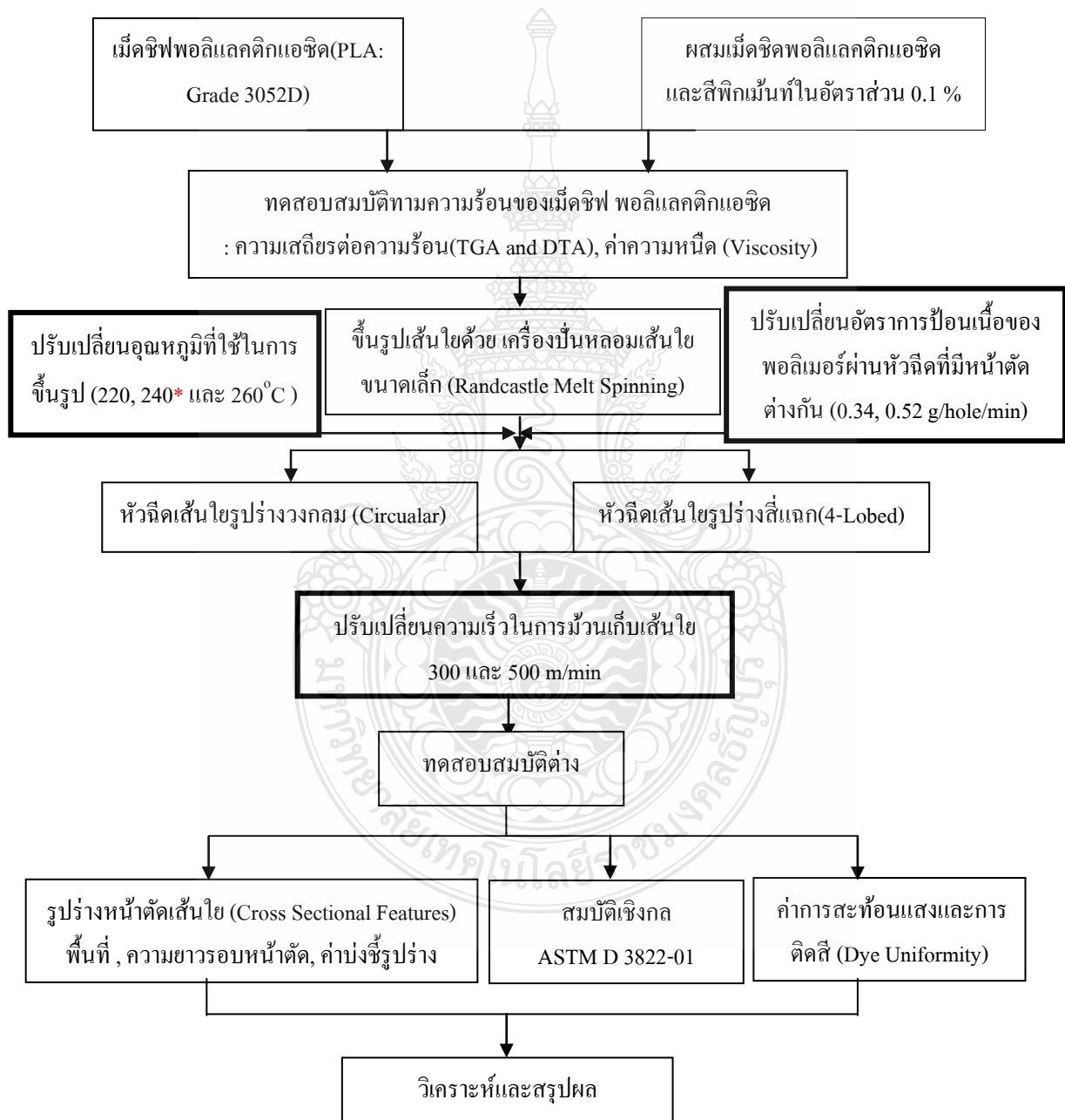
สีผสมพลาสติกชนิดผง (Phthalocyanine: Pigment Dye) จากบริษัทสาลีคัลเลอร์

จำกัด



### 3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

การนำเสนอในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ซึ่งในจะทำการศึกษาหา สภาวะ การปั่นหลอมเส้นใยพอลิแลคติกไม่ผ่านการผสมใดๆที่มีรูปร่างหน้าตัดต่างกัน วงกลมและสี่แฉก (Circular, 4-Lobed) เปรียบเทียบกับเส้นใยที่ผสมด้วยผงสี (0.1% Blue Pigment) และการทดสอบเพื่อ วิเคราะห์หาสมบัติต่างๆของเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย

### 3.3 ทดสอบสมบัติของเม็ดชิฟพอลิแลคติกแอซิด

ทำการศึกษาสภาวะการบั่นหลอมเพื่อขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดแบบมีหน้าตัดต่างกัน ด้วยหัวฉีดเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) ลี่แฉก (4-Lobed) ด้วยเครื่องบั่นหลอมเส้นใยระดับห้องปฏิบัติการ เบื้องต้นทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ดังรูปที่ 3.4 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการตั้งค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใย ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน ดังต่อไปนี้

- ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์: Thermogravimetric Analysis (TGA) เพื่อวิเคราะห์ความเสถียรของเม็ดชิฟพอลิแลคติกแอซิดเมื่อได้รับความร้อน ดังรูปที่ 3.4 โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ด้วยสภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50°C และสิ้นสุดที่ 800°C ที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหลในการป้อน 50 ml/min ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบความเสถียรต่อความร้อนของวัสดุ รุ่น TGA/SDTA851e

- ความหนืดของพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลว: (Rheometer : Gemini 200HR Nano (Malvern Instruments) เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการไหลของพอลิแลคติกแอซิดขณะหลอมเหลวที่ช่วงอุณหภูมิต่างกัน โดยจะทำการผลในรูปแบบของ ความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปต่อการเพิ่มของอัตราการเฉือนที่คงที่ (Steady Flow) ดังรูปที่ 3.3

### สภาวะการทดสอบ

- ความหนาของตัวอย่าง: 1 มิลลิเมตร
- หัววัด: แผ่นขนาน (Parallel Plate) 2.5 เซนติเมตร
- เทคนิค: Shear Rate Sweep Test
- อุณหภูมิ: 220, 240 และ 260 องศาเซลเซียส
- อัตราเฉือน: 0.1-100 เรเดียน/วินาที



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบความหนืด (Rheometer : Gemini 200HR Nano (Malvern Instruments))

### 3.4 ศึกษาสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่ไม่ผ่านการผสมใดๆ ที่มีหน้าตัดเส้นใยต่างๆกัน

ก่อนขึ้นรูปเส้นใยทุกครั้งทำการอบเม็ดชิฟที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ด้วยระบบลมร้อน ดังรูปที่ 3.5 เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นศึกษาสภาวะการทดสอบและขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแบบมีหน้าตัดด้วยเครื่องปั่นหลอมเส้นใยระดับห้องปฏิบัติการ (Randcastale Melt Spinning) ดังรูปที่ 3.6 โดยใช้หัวฉีดสปินเนอร์ที่มีหน้าตัดดังต่อไปนี้ วงกลม (Circular) และสี่แฉก (4-Lobed) ดังรูปที่ 3.7



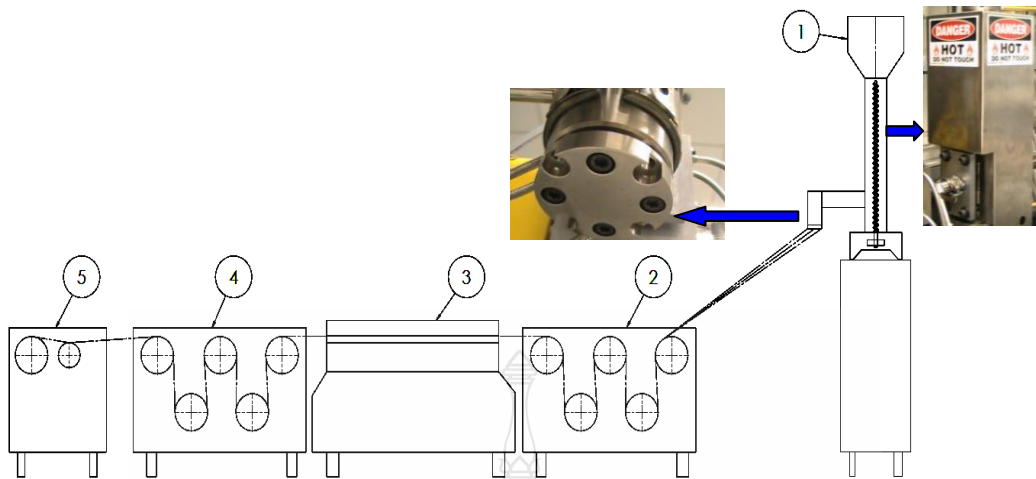
รูปที่ 3.4 เม็ดซีฟโพลีแลคติกแอซิดเกรด 3052 D



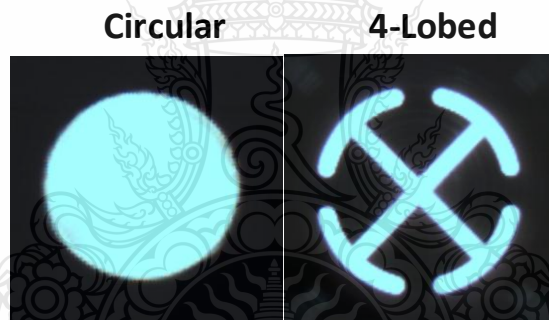
รูปที่ 3.5 เครื่องอบเม็ดซีฟระบบลมร้อน (Hot Air Through Dryer)

โดยทำการตั้งค่าสถานะที่ใช้ในการขึ้นรูปดังต่อไปนี้

- อุณหภูมิปั่นหลอมเพื่อขึ้นรูปเส้นใย (Spinning Temperature): 220, 240 และ 260°C
- อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (Throughput Rate): TP 0.34 และ 0.52 กรัม/รู/นาที
- ความเร็วในการม้วนเก็บ (Take Up Speed): 300 และ 500 เมตร/นาที



รูปที่ 3.6 ระบบการปั่นหลอมเพื่อขึ้นรูปเส้นใย: Extruder and Spinneret (1), 1<sup>st</sup> Roller Unit (2), Heated Bar (3), 2<sup>nd</sup> Roller Unit (4), and Winding Unit (5)



รูปที่ 3.7 หน้าตัดของรูหัวฉีดสปินเนอร์ (Orifice Spinneret) ที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยวงกลม (Circular) (ซ้าย) และ สี่แฉก (4-Lobed) (ขวา)

### 3.4.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใย (Physical Properties)

เนื่องจากเส้นใยที่ขึ้นรูปได้จาก หัวฉีดสปินเนอร์ แบบวงกลม (Circular) และสี่แฉก (4-Lobed) มีรูปร่างหน้าตัดที่แตกต่างกัน เบื้องต้นจึงทำการตัดขวางเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ด้วยแผ่นตัดเส้นใย จากนั้นนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope) ที่กำลังขยาย 40 เท่า และสำหรับหัวฉีดสปินเนอร์ ด้วยกำลังขยาย 10 เท่า ทำการบันทึกรูป ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผ่นสำหรับตัดเส้นใย (Cutting fiber holder): ซ้าย และกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope): ขวา

เพื่อวิเคราะห์เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีรูปร่างหน้าตัดต่างกัน (Cross-Sectional Features) จากนั้นทำการวัดขนาดรูปร่างหน้าตัดของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่ขึ้นรูปได้เปรียบเทียบกับขนาดของรูหัวฉีดสปินเนอร์ที่ด้วยรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์รูป Image J ดังต่อไปนี้

1. เส้นรอบหน้าตัดเส้นใย (Perimeter)

นิยาม คือผลรวมของเส้นใยรอบรูป (จำนวนพิกเซลที่ขอบทั้งหมดของรูปร่าง)

2. พื้นที่หน้าตัดเส้นใย (Area)

นิยาม คือ พื้นที่ในขอบเขตของเส้นใยรอบรูป (จำนวนพิกเซลที่อยู่ในขอบทั้งหมดของรูปร่าง)

3. ค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัดเส้นใย (Compactness)

นิยาม คือถึงความเรียบหรือขรุขระของรูปร่าง โดยสำหรับเส้นใยที่มีรูปร่างกลมค่านี้จะมีค่าต่ำสุด และค่านี้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีความขรุขระของขอบหรือเป็นรูปร่างที่มีเหลี่ยมมากขึ้น ดังตัวอย่างการวัดขนาด ดังรูปที่ 3.9 สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตร

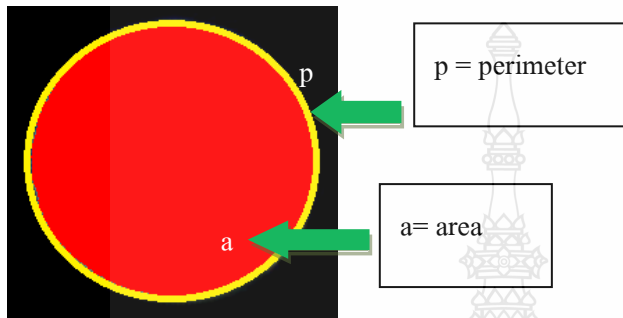
$$compactness = \frac{perimeter^2}{4\pi a} \quad (3.1)$$

perimeter = เส้นรอบหน้าตัดเส้นใย ( $\mu\text{m}^2$ )

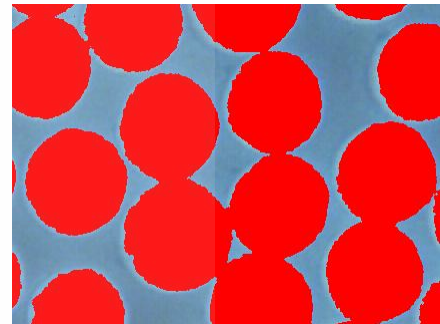
a = พื้นที่หน้าตัดเส้นใย ( $\mu\text{m}^2$ )

$\pi$  = ค่าคงตัวทางคณิตศาสตร์ มีค่าเท่ากับ 3.14159

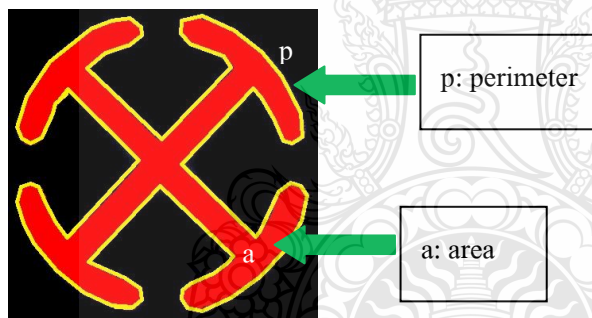
ตัวอย่างการวัดขนาดรูหัวฉีดสปินเนอเร็ทและเส้นใยที่มีหน้าตัดต่างกันที่ขึ้นรูปได้



(ก) การวัดขนาดของรูหัวฉีดหน้าตัดแบบวงกลม



(ข) การวัดขนาดของเส้นใย



(ค) การวัดขนาดของรูหัวฉีดหน้าตัดแบบสี่แฉก



(ง) การวัดขนาดของเส้นใย

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างวิธีการวัดขนาดรูหัวฉีดและเส้นใยที่ขึ้นรูปได้จากรูหัวฉีดที่มีหน้าตัดต่างกัน

### 3.4.2 ศึกษาสมบัติทางกลของเส้นใย (Mechanical Properties)

นำตัวเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดหาค่า ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength), เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation): ASTM D 3822-01 ด้วยเครื่องทดสอบดังรูปที่ 3.9

สภาวะการทดสอบ

ความยาวของกลุ่มเส้นใย (Gauge Length): 2.54 cm

ความเร็วในการดึงทดสอบ (Pull Speed): 25 mm/min

สภาวะทดสอบ: ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) 65, อุณหภูมิ (Temperature): 21°C



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Tester)

### 3.5 ศึกษาการปั่นหลอมขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงสีที่มีรูปร่างหน้าตัดต่างกัน

ทำการขึ้นรูปเส้นใยรูปร่างหน้าตัดแบบต่างๆ (วงกลมและ สี่แฉก) ที่ผสมผงสีในเส้น 0.1% โดยใช้ ผงสี Phthalocyanine ผสมกับเม็ดชนิดพอลิแลคติกแอซิดเกรด 3052 D ดังรูปที่ 3.11 จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ด้วยระบบลมร้อน เป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วนำไปขึ้นรูปเส้นใย



รูปที่ 3.11 ผงสีพิกเมนต์สีน้ำเงิน Phthalocyanine: ซ้ำย และเม็ดชนิดพอลิแลคติกแอซิดหลังผสมด้วยสีน้ำเงิน (Phthalocyanine) 0.1% ที่ผ่านการอบแล้ว

โดยทำการตั้งค่าสถานะที่ใช้ในการขึ้นรูปดังต่อไปนี้

- อุณหภูมิปั่นหลอมเพื่อขึ้นรูปเส้นใย (Spinning Temperature): 220 และ 260 องศาเซลเซียส
- อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (Throughput Rate): TP 0.34 และ 0.52 กรัม/รู/นาที
- ความเร็วในการม้วนเก็บ (Take Up Speed): 300 และ 500 เมตร/นาที



จากนั้นวิเคราะห์ผลของการเติมผงสี ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีรูปร่างหน้าตัดเส้นใยต่างกัน คือ วงกลม (Circular) และ สี่แฉก (4-Lobed) เช่น ความสามารถในการปั่นหลอมขึ้นรูปเส้นใย (Fiber Spinnability) รูปร่างหน้าตัด (Cross-Sectional Feature) สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใย (Tensile Strength) ( หัวข้อที่ 3.4) สมบัติด้านการสะท้อนแสง (Luster Property) ความสม่ำเสมอของการติดสี (Dye Uniformity) เป็นต้น

### 3.5.1 ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพของเส้นใย (Physical Properties)

วิเคราะห์รูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์และวัดขนาดของเส้นใยตาม ตามกำหนดนิยามในข้อ 3.4.1

### 3.5.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลของเส้นใย (Mechanical Properties)

นำตัวเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดหาค่า ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) เปรอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) : ASTM D 3822-01 ด้วยเครื่องทดสอบดังรูปที่ 3.12

#### สภาวะการทดสอบ

ความยาวของกลุ่มเส้นใย (Gauge Length): 2.54 cm

ความเร็วในการดึงทดสอบ (Pull Speed): 25 mm/min

สภาวะทดสอบ: ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) 65, อุณหภูมิ (Temperature): 21°C

## 3.6 ศึกษาผลของการติดสีและการสะท้อนแสงของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดเส้นใยต่างกัน (Dye Uniformity and Reflection)

#### สภาวะการวัดค่าสี

-Specular : Include

-Aperture: XUSAV (3 mm)

-Uv Filter: 100% UV (Filter FL40)



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดค่าสี (Datacolor 650 Spectrophotometer)

การวัดค่าความเข้มสี (ค่า K/S) และค่าสี CIELAB ( $L^*$   $a^*$   $b^*$ )

- ค่าความเข้มสี (ค่า K/S)

โดยในการวัดค่าสีโดยเครื่องวัดสีนี้ ดังรูปที่ 3.12 จะตั้งค่าแหล่งกำเนิดแสงเป็น D65 และมีมุมมองวัตถุที่ 10 องศา (10 Degree Standard Observer) และแต่ละตัวอย่างของเส้นด้ายตัวอย่าง จะทำการวัดซ้ำ 4 ครั้ง ที่ตำแหน่งต่างกัน ซึ่งค่า K/S ที่จะเป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้

-ค่าสี CIELAB ( $L^*$   $a^*$   $b^*$ )

1) ค่าความสว่าง (Lightness,  $L^*$ ) ของสี

การทดสอบนี้เพื่อเปรียบเทียบความสว่าง ( $L^*$ ) ของเส้นด้ายตัวอย่างโดยใช้เครื่องวัดสี Datacolor 650 Spectrophotometer ในการหาค่าความสว่างของตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจะวัดซ้ำ 4 ครั้ง ที่ตำแหน่งต่างกัน ซึ่งค่าที่วัดได้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณ โดยเครื่องวัดสี (วัดสีที่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร) ถ้าค่า  $L^*$  มากกว่าเส้นด้ายมีสีสว่าง

2) ค่า  $a^*$  และ  $b^*$  ของสี

การทดสอบนี้เพื่อเปรียบเทียบค่า  $a^*$  และ  $b^*$  ของเส้นด้ายตัวอย่างโดยใช้เครื่องวัดสี Datacolor 650 Spectrophotometer ในการหาค่า  $a^*$  และ  $b^*$  ของเส้นด้ายตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจะวัดซ้ำ 4 ครั้ง ซึ่งค่าที่วัดได้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณ โดยเครื่องวัดสี (วัดสีที่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร) โดยค่า  $a^*$  เป็นบวกออกโทนสีแดง  $a^*$  เป็นลบออกโทนสีเขียว  $b^*$  เป็นบวกออกโทนสีเหลือง  $b^*$  เป็นลบออกโทนสีน้ำเงิน,  $a^*$  และ  $b^*$  มีค่าบวกมากหรือลบมากกว่าสีออกโทนนั้นมาก

### 3) การสะท้อนแสง (% Reflection)

เครื่องจะทำการวัดค่าการสะท้อนแสง (%Reflectance) ของตัวอย่างเส้นด้ายตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจะวัดซ้ำ 4 ครั้ง ซึ่งค่าที่วัดได้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณ โดยเครื่องวัดสี (วัดสีที่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร)



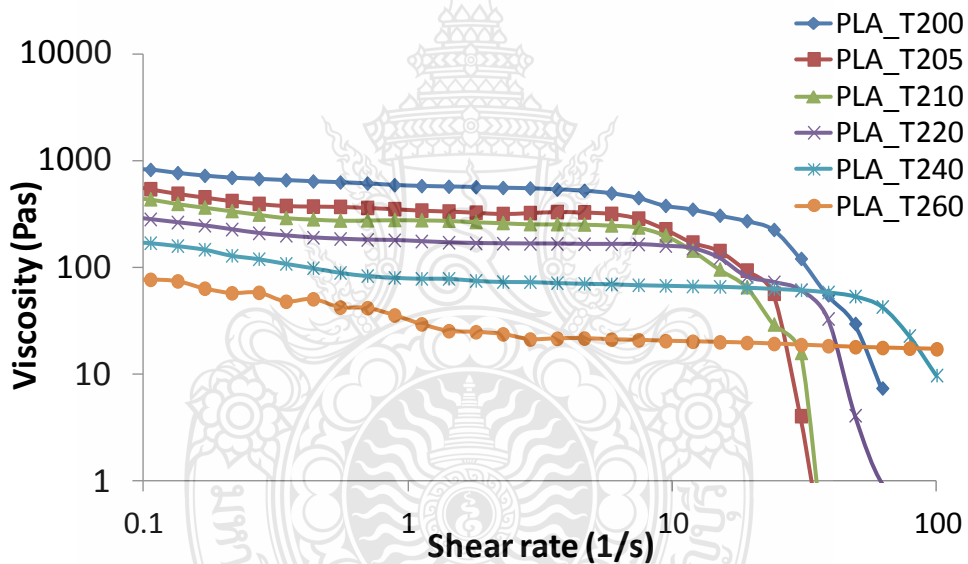
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ก่อนขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างๆกัน ได้ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เพื่อพิจารณาพฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่อุณหภูมิการขึ้นรูปต่างกัน ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเส้นใยที่ขึ้นรูปได้

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเม็ดชิฟ พอลิแลคติกแอซิด (PLA)

##### 4.1.1 ผลของความหนืดที่อุณหภูมิต่างกัน (Viscosity)



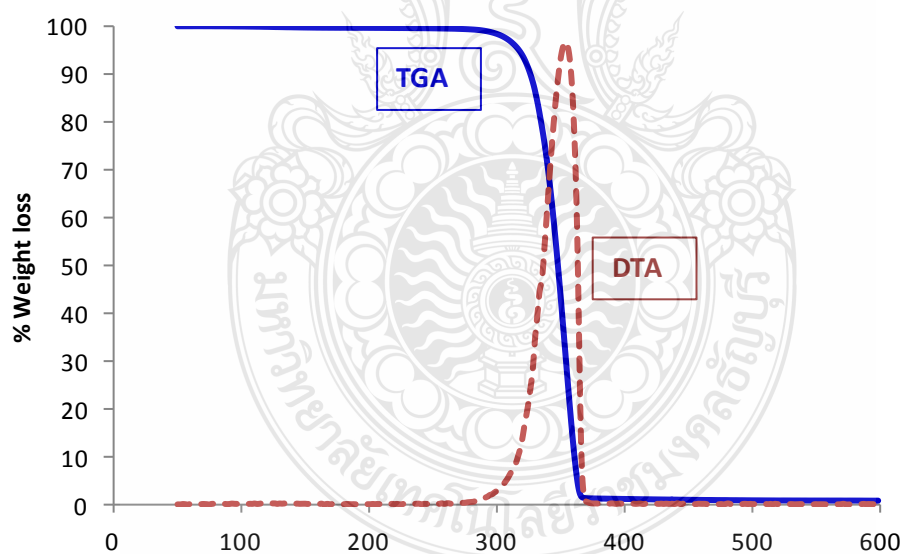
รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของพอลิแลคติกแอซิดต่ออัตราเฉือน ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

ความหนืดหลอมเหลวของ PLA ถูกวัดค่าการ เปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่างกัน คือ 200, 205, 210, 220, 240 และ 260°C จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 200-210°C ค่าความหนืด ดังรูปที่ 4.1 ค่อนข้างสูง เมื่อขึ้นรูป เส้นใยที่อุณหภูมิดังกล่าวทำให้ไม่สามารถม้วนเก็บได้ อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะ หัวฉีดที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-lobed) เนื่องจากความหนืดที่สูงเกินไปส่งผลให้เมื่อพอลิเมอร์หลอมไหลผ่านหัวฉีดที่มีความซับซ้อนทำให้เกิดความเค้นที่สูง ส่งผลทำให้เส้นใยขาดเมื่อม้วนเก็บที่ความเร็วสูง (500 m/min) [8] ขณะเดียวกันเมื่อขึ้นรูปเส้นใย PLA ที่อุณหภูมิ 220-260°C พบว่าสามารถ

ม้วนเก็บ เส้นใยได้อย่างต่อเนื่องและเส้นใยไม่ขาดถึงแม้จะม้วนเก็บ ด้วยอัตราความเร็วสูง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงทำการ เลือกว่าช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูปเส้นใยที่ 220, 240 และ 260°C เพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบของความหนืดต่อการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหน้าตัดของเส้นใย โดยเมื่อพิจารณาจาก ช่วงอุณหภูมิดังกล่าวพบว่า ค่าความหนืดของพอลิเมอร์ ขณะหลอมเหลวมีความแตกต่างอย่างชัดเจน โดยที่อุณหภูมิ 220°C พอลิเมอร์เหลวพฤติกรรมการไหล ที่ยังคงเป็นซูโดพลาสติก (Pseudo Plastic Flow) คือ ที่อัตราเฉือนเพิ่มขึ้นความหนืดมีแนวโน้มลดลง ในทางกลับกัน กับ 240 และ 260°C พบว่าที่อัตราการเฉือนที่เพิ่มขึ้น (0.1-100 1/s) ค่าความหนืดค่อนข้างคงที่ (ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนซึ่งลักษณะการไหลแบบนี้พฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน) [9] ซึ่งลักษณะการไหลที่แตกต่างกันนี้เอง เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหน้าตัดเส้นใยที่ขึ้นรูปได้

#### 4.1.2 ผลของความเสถียรต่อความร้อน (TGA and DTA)

เมื่อพิจารณาความเสถียรต่อความร้อนของ PLA รูปที่ 4.2 พบว่า PLA เริ่มเสื่อมสลายที่ 310°C จากนั้นน้ำหนักของสารลดลงอย่างรวดเร็ว ที่เสื่อมสลายอย่างสมบูรณ์ที่ 370°C ซึ่งจากผลการทดสอบ นี้ชี้ให้เห็นว่าในการศึกษานี้สามารถขึ้นรูปเส้นใย PLA ได้ ที่ช่วงอุณหภูมิ 220-260°C โดยที่ PLA ยังไม่เกิดการเสื่อมสลายได้ [10]



รูปที่ 4.2 ความเสถียรต่อความร้อน (TGA and DTA) ของพอลิแลคติกแอซิดที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

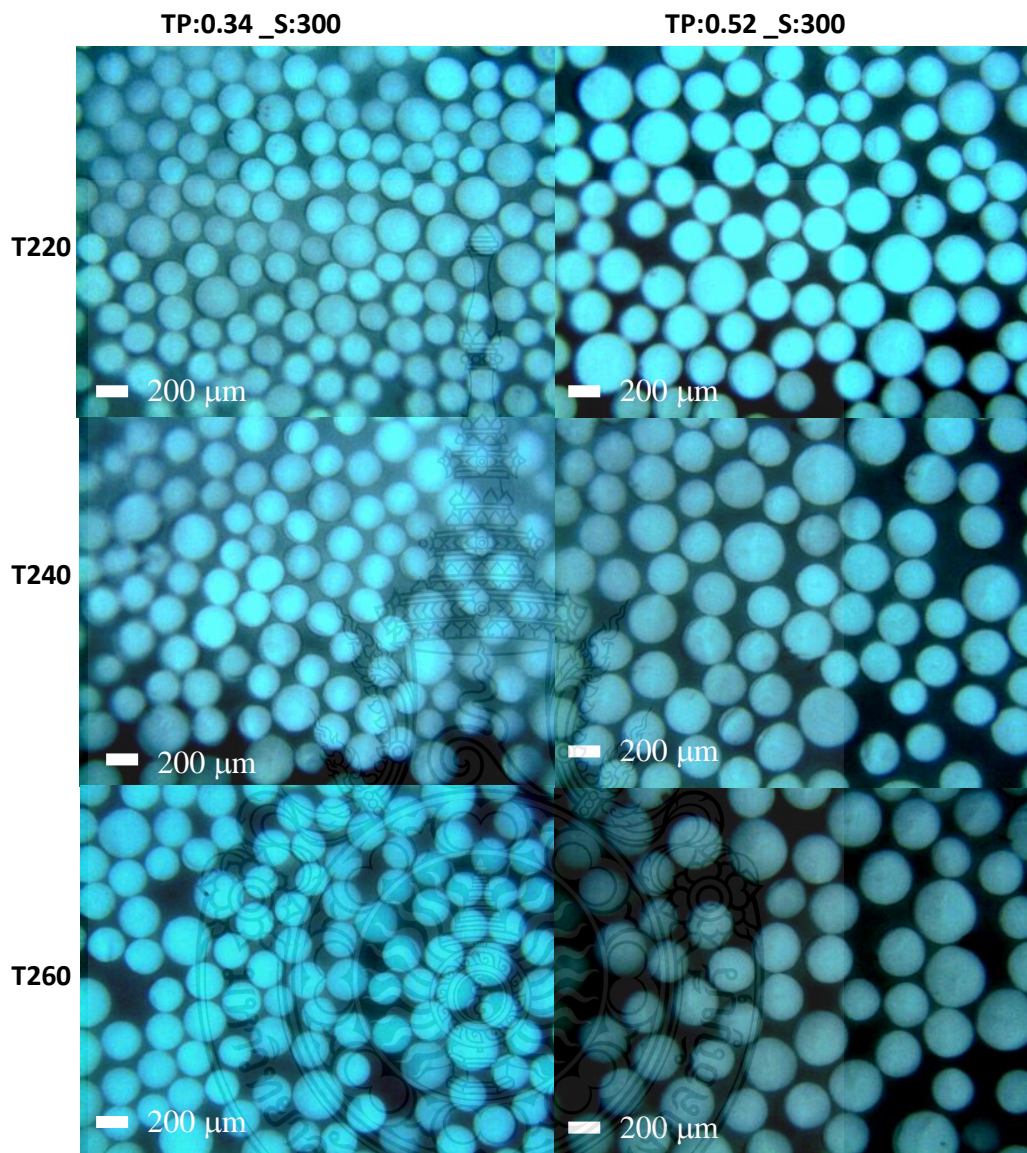
## 4.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยที่มีหน้าตัด ต่างๆ กัน

ผลการวิเคราะห์จากรูปตัดขวางของเส้นใยจะเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหน้าตัดเห็นได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ดังรูปที่ 4.5-4.6 เมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) ดังรูปที่ 4.3-4.4 ที่ยังสามารถคงรูปร่างเดิมไว้ได้ในทุกๆ สถานะ พบว่าที่สถานะการขึ้นรูปเส้นใยที่ต่างกัน ตัวแปรที่ส่งผลทำให้เส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-lobed) เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหน้าตัดมากที่สุดคือ อุณหภูมิการขึ้นรูปเส้นใย (Spinning Temperature) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรอื่นๆ

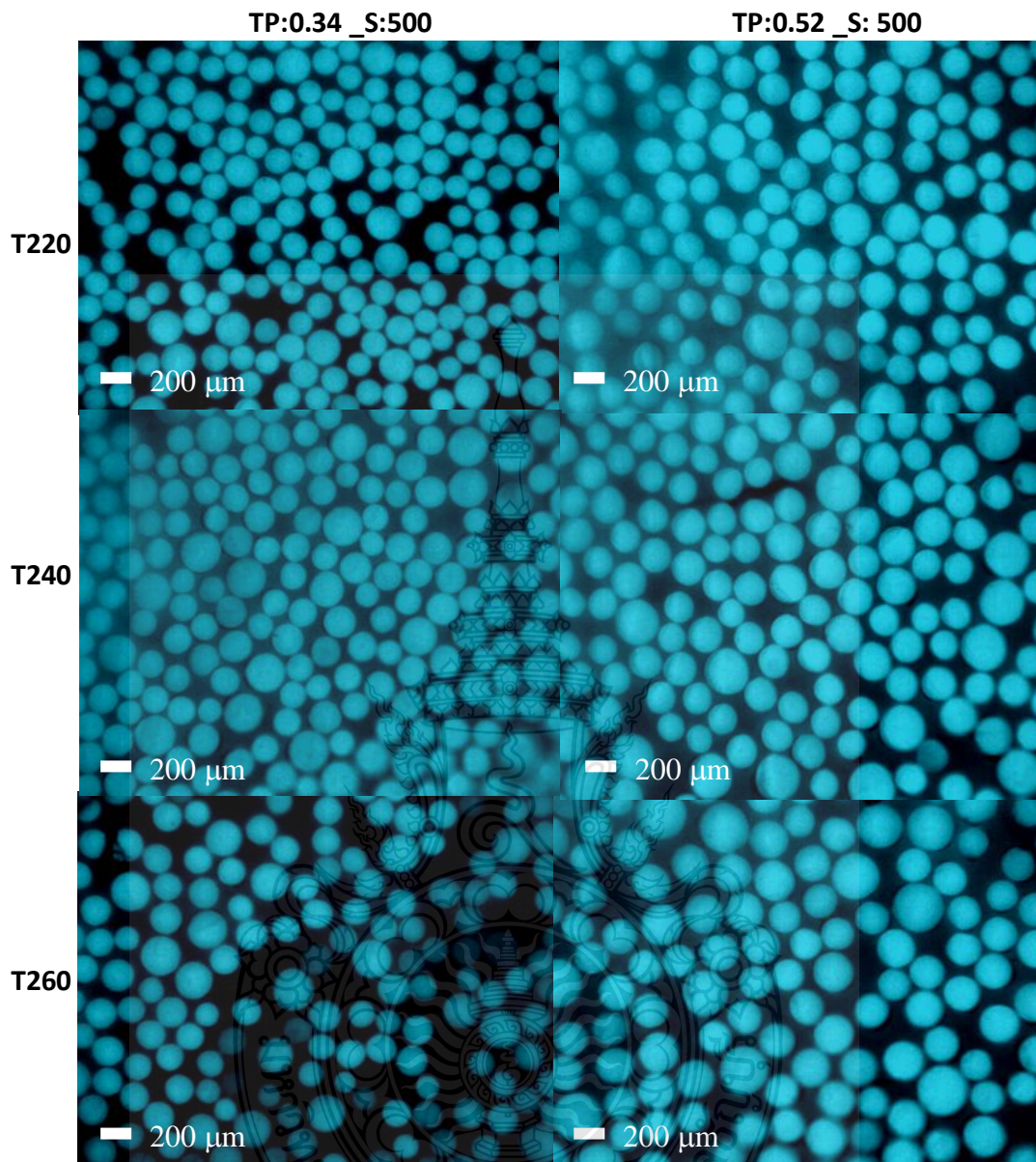
จะเห็นได้ว่าพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยทั้งสองหน้าตัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วในการม้วนเก็บเพิ่มขึ้น จาก 300 m/min เป็น 500 m/min โดยความเร็วม้วนเก็บเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เส้นใยเย็นตัวเร็วและคงรูปร่างตามแบบของหัวฉีดได้มากกว่า [28-31] ซึ่งสอดคล้องกับค่าบ่งชี้หน้าตัดดังรูปที่ 4.11 พบว่าที่ความเร็วม้วนเก็บเส้นใย 500 m/min มีแนวโน้มค่าบ่งชี้รูปร่างเพิ่มขึ้น คือมีรูปร่างหน้าตัดใกล้เคียงกับหัวฉีดมากกว่า

เมื่อพิจารณาร่วมกับผลการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นรอบหน้าตัด (Perimeter) และพื้นที่หน้าตัดเส้นใยแบบวงกลม (Circular) และแบบสี่แฉก (4-Lobed) ดังรูปที่ 4.7-4.10 พบว่าที่อุณหภูมิการขึ้นรูปเส้นใยเพิ่มขึ้น (220-260°C) เส้นใยทั้งสองหน้าตัดมีแนวโน้มที่ขนาดพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) มีการเพิ่มขึ้นของขนาดค่อนข้างมากที่อุณหภูมิ 240-260°C ในขณะเดียวกันขนาดเส้นรอบหน้าตัด (Perimeter) ของเส้นใยกลับมีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.8 สังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าร่องบนหน้าตัดเส้นใยหายไป อันเป็นสาเหตุที่ทำให้รูปร่างที่ซับซ้อนแบบสี่แฉกมีหน้าตัดเปลี่ยนแปลงไปคล้ายวงกลม ดังรูปที่ 4.5-4.6 ซึ่งสอดคล้องกับผลของการเปลี่ยนแปลงความเหนียวของพอลิเมอร์หลอม ณ ช่วงอุณหภูมิดังกล่าว พอลิเมอร์หลอมจะเริ่มพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน และส่งผลกระทบต่อความตึงผิวของพอลิเมอร์หลอมจึงทำให้แรงยึดติดระหว่างพอลิเมอร์หลอมกับผนังของหัวฉีดต่ำเกินไปไม่สามารถคงรูปร่างหน้าตัดตามหัวฉีดได้ [11-13]

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหน้าตัดเส้นใยที่วิเคราะห์โดยรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

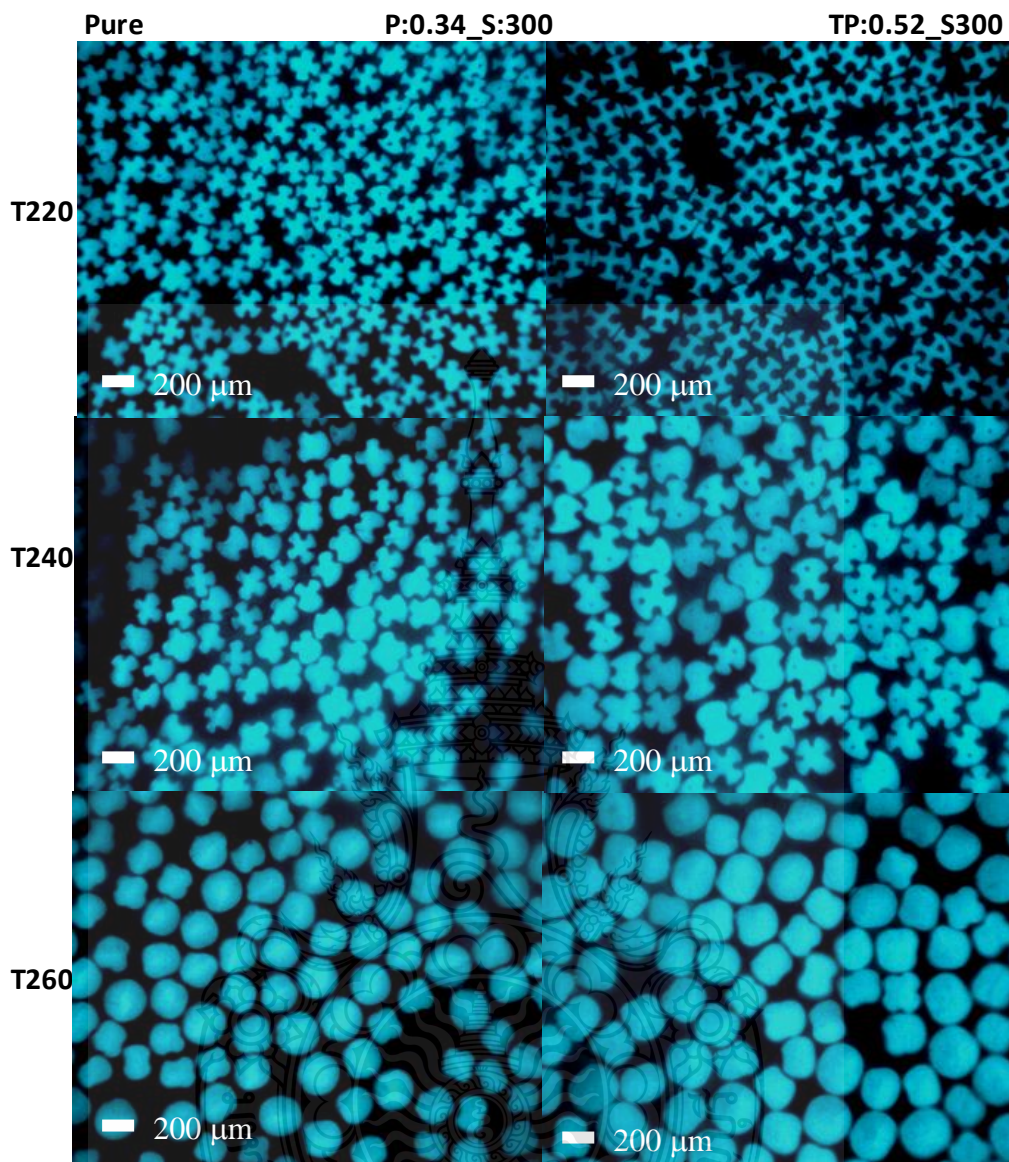


รูปที่ 4.3 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) (บน-ล่าง) และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min (ซ้าย-ขวา) ที่กำลังขยาย 40 เท่า

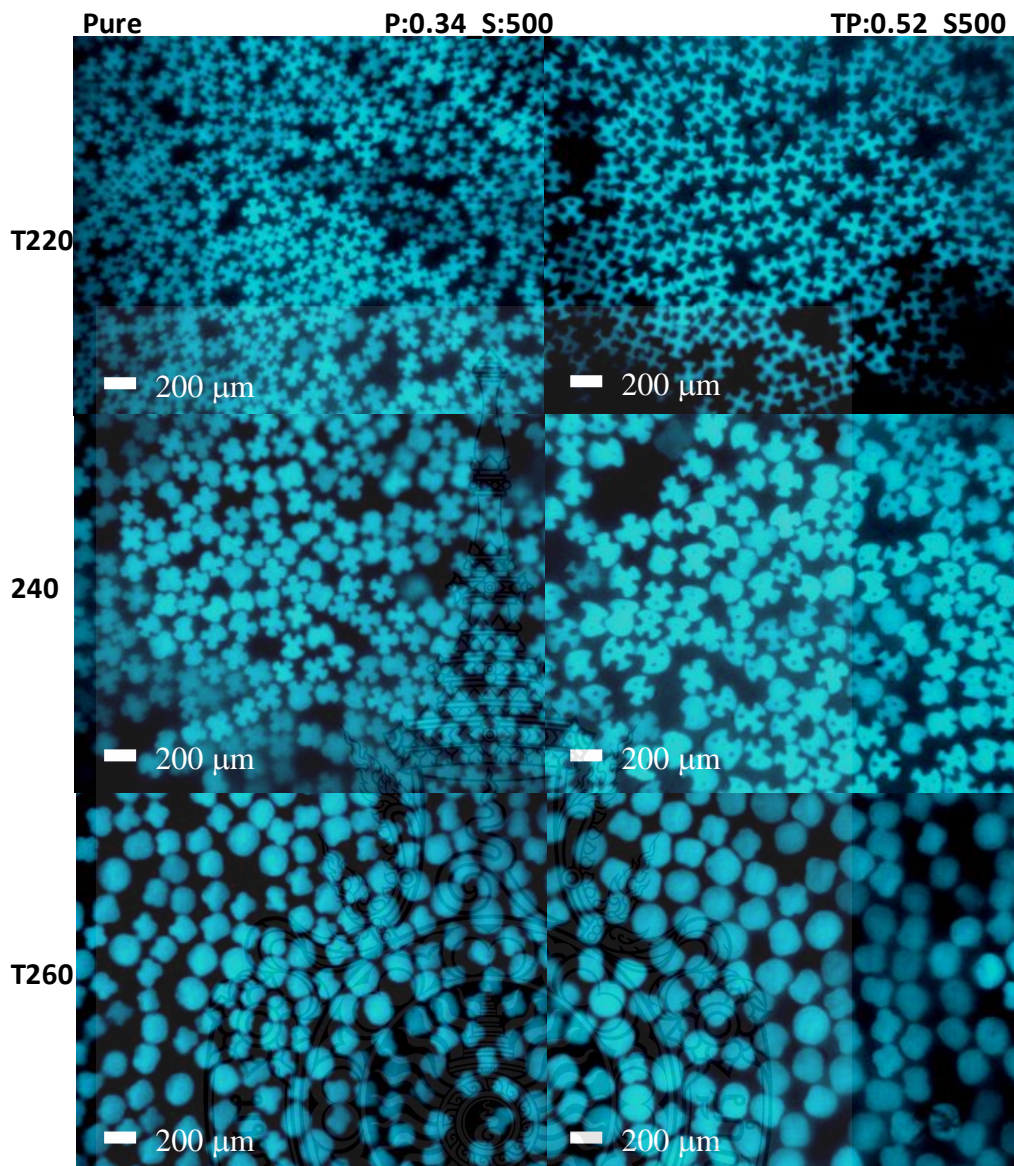


รูปที่ 4.4 เส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) (บน-ล่าง) และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min (ซ้าย-ขวา) ที่กำลังขยาย 40 เท่า



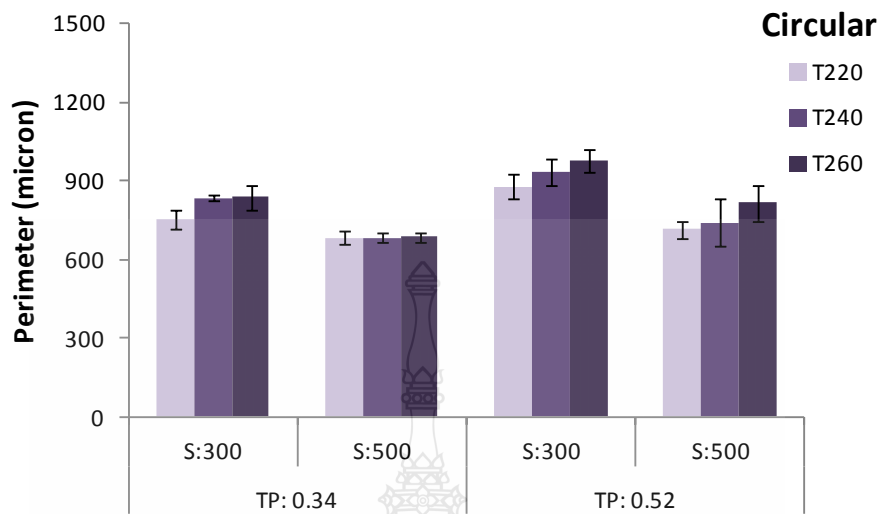


รูปที่ 4.5 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) (บน-ล่าง) และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min (ซ้าย-ขวา) ที่กำลังขยาย 40 เท่า

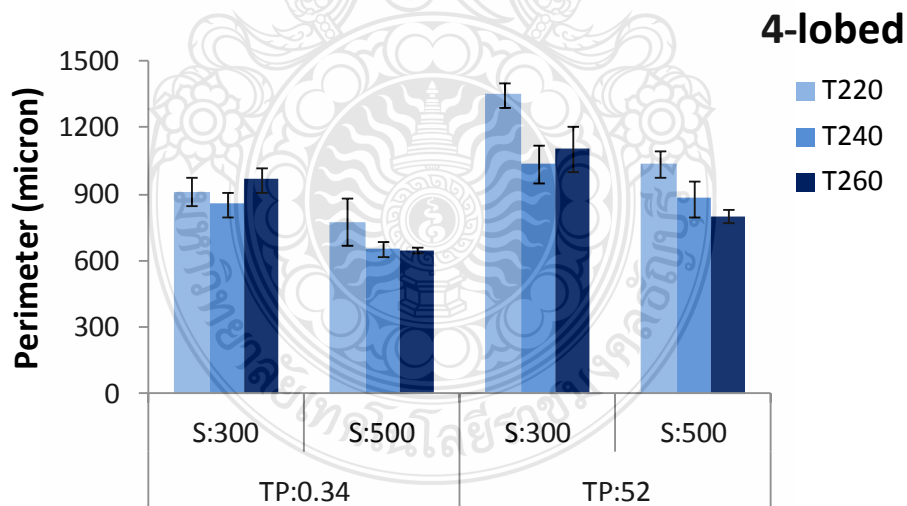


รูปที่ 4.6 รูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) (บน-ล่าง) และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min (ซ้าย-ขวา) ที่กำลังขยาย 40 เท่า

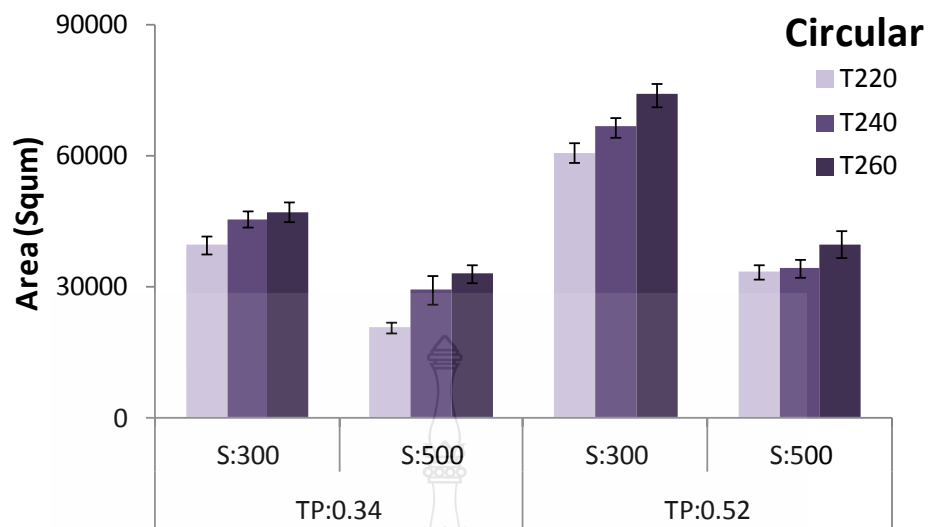
การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นรอบหน้าตัดและพื้นที่หน้าตัดเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างกัน



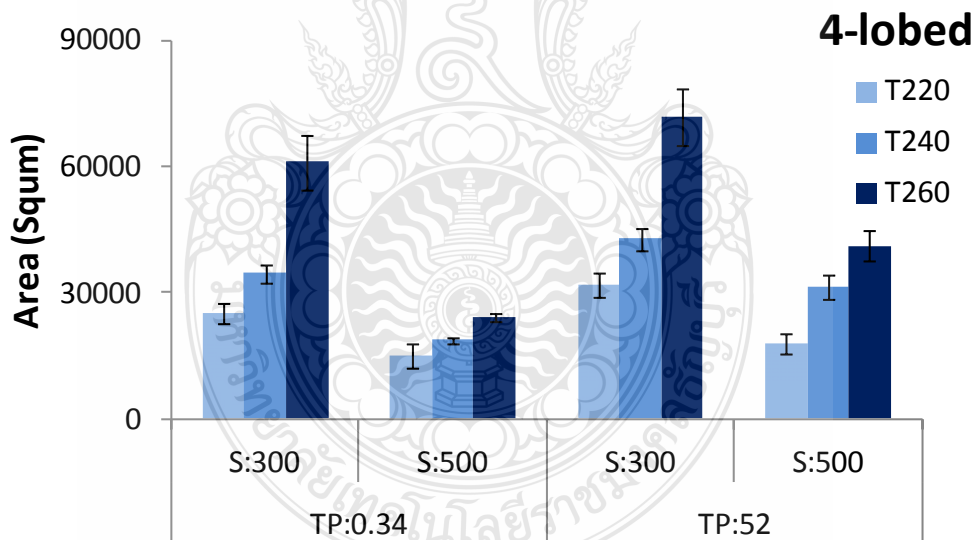
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นรอบหน้าตัด (Perimeter) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดแบบ วงกลม (Circular) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 และ 500 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) 220, 240 และ 260°C และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นรอบหน้าตัด (Perimeter) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 และ 500 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) 220, 240 และ 260°C และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัด (Area) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 และ 500 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) 220, 240 และ 260°C และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัด (Area) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 และ 500 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) 220, 240 และ 260°C และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min

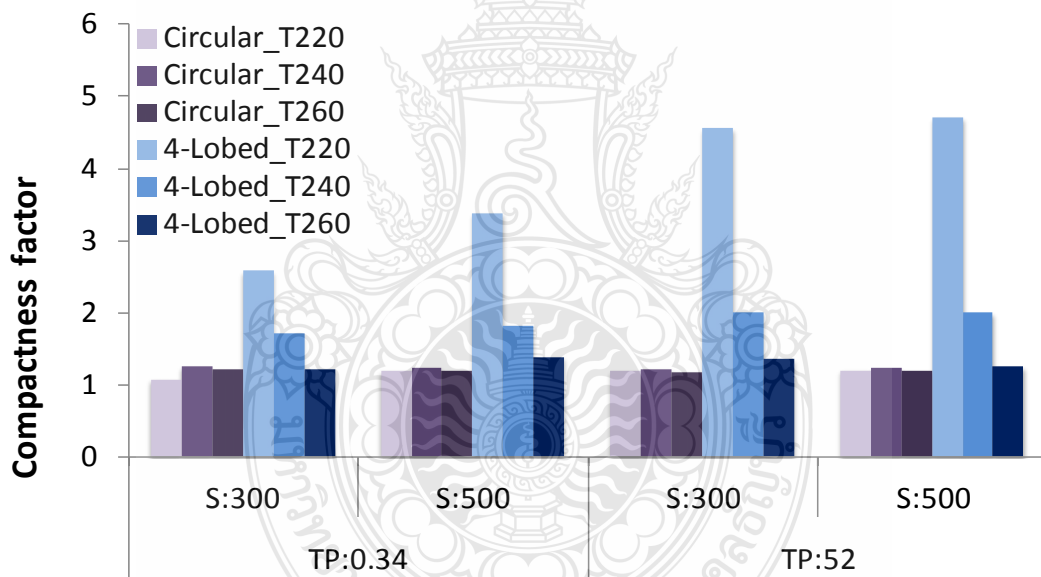
### 4.3 ค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัด (Compactness Factor) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) และสี่แฉก (4-Lobed) ที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆ กัน

$$compactness = \frac{perimeter^2}{4\pi a} \quad (4.1)$$

นิยาม คือค่าบ่งชี้ถึงความเรียบหรือขรุขระของรูปร่าง โดยสำหรับเส้นใยที่มีรูปร่างกลมค่านี้จะมีค่าต่ำสุด และค่านี้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีความขรุขระของขอบหรือมีพื้นที่ผิวมาก

ตารางที่ 4.1 ค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัดของหัวฉีด

Spinneret orifice	Circular	4-Lobed
Compactness factor	1.12	12.36



รูปที่ 4.11 ค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัด (Compactness Factor) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆกัน

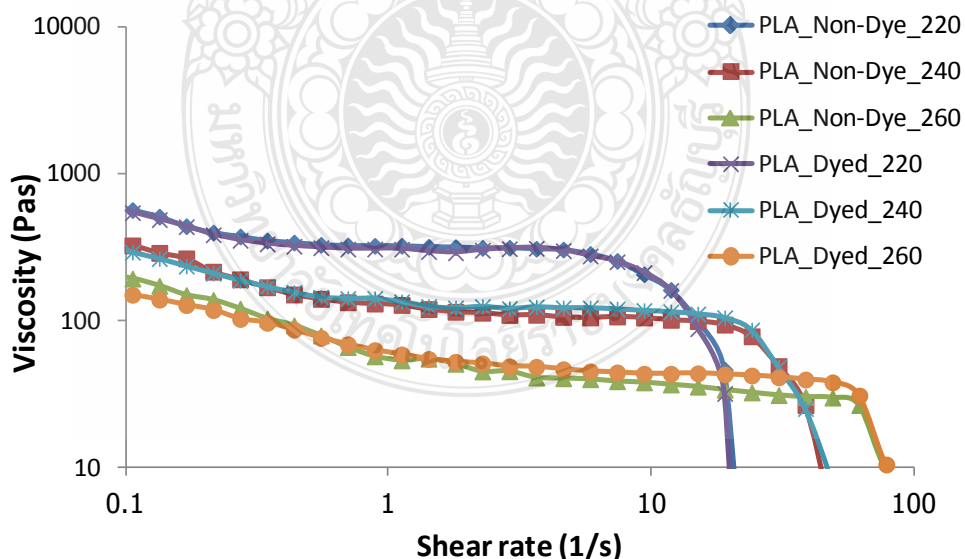
ผลจากการคำนวณค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัดเส้นใย ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งคำนวณมาจากสูตรดังสมการที่ 1 พบว่าค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัดของเส้นใยหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) มีค่าใกล้เคียงกับหัวฉีด (Spinneret Orifice) ที่ 1.12 ดังตารางที่ 4.1 ทุกๆ สภาวะการขึ้นรูปซึ่งบ่งชี้ถึงหน้าตัดที่ยังคงรูปร่างวงกลมเหมือนกับหัวฉีด ในขณะที่เส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ค่าบ่งชี้รูปร่างที่มีค่า

น้อยกว่าหัวฉีดเส้นใย (12.36) ก่อนข้างมาก และในแต่ละและสภาวะการขึ้นรูปมีค่าแตกต่างกันไป (1- 4.7) โดยสังเกตได้ชัดเจนว่า ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 220°C จนถึง 260°C ค่าบ่งชี้รูปร่างมีแนวโน้มลดลงก่อนข้างมากจนเกือบเท่ากับ 1 นั้นหมายความว่ารูปร่างมีลักษณะเรียบและคล้ายวงกลม ดังรูปที่ 4.5-4.6 กล่าวคือร่องบนเส้นใยหายไป ไม่เพียงแต่อุณหภูมิเท่านั้นที่ส่งผลต่อหน้าตัดเส้นใยแบบสี่แฉก (4-Lobed) ยังพบว่าอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ที่ 0.52 g/hole/min ผลบ่งชี้หน้าตัดที่ใกล้เคียงกับหัวฉีดมากกว่าที่ 0.34 g/hole/min เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วหมุนเก็บ ดังนั้นจึงสามารถนำค่าบ่งชี้รูปร่างมาใช้ในการตัดสินใจเลือกสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับเส้นใยแบบมีหน้าตัดได้ [28-30]

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหน้าตัดของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงสีที่ขึ้นรูปได้ต่อสมบัติเชิงกล การสะท้อนแสง และการติดสี

ก่อนขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงสีที่มีหน้าตัดต่างๆกัน ได้ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด (Non-Dye) ที่ไม่ผสมผงสี เปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดผสมผงสี (Dyed) 0.1 % Blue Pigment เพื่อพิจารณาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่อุณหภูมิการขึ้นรูปต่างกัน ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเส้นใยที่ขึ้นรูปได้

##### 4.4.1 ผลของความหนืดของพอลิแลคติกแอซิดไม่ผสมสี (Non-Dye) และผสมสี (Dyed) ที่อุณหภูมิต่างๆกัน (Viscosity)

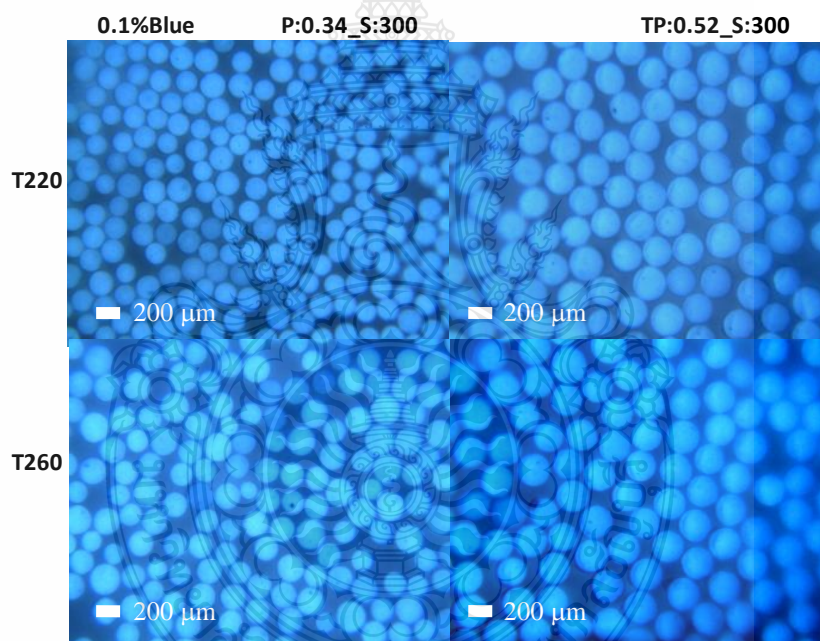


รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความหนืดของพอลิแลคติกแอซิดไม่ผสมสี (Non-Dye) และผสมสี (Dyed) ต่ออัตราเฉือนที่อุณหภูมิต่างๆ กัน (220, 240 และ 260°C)

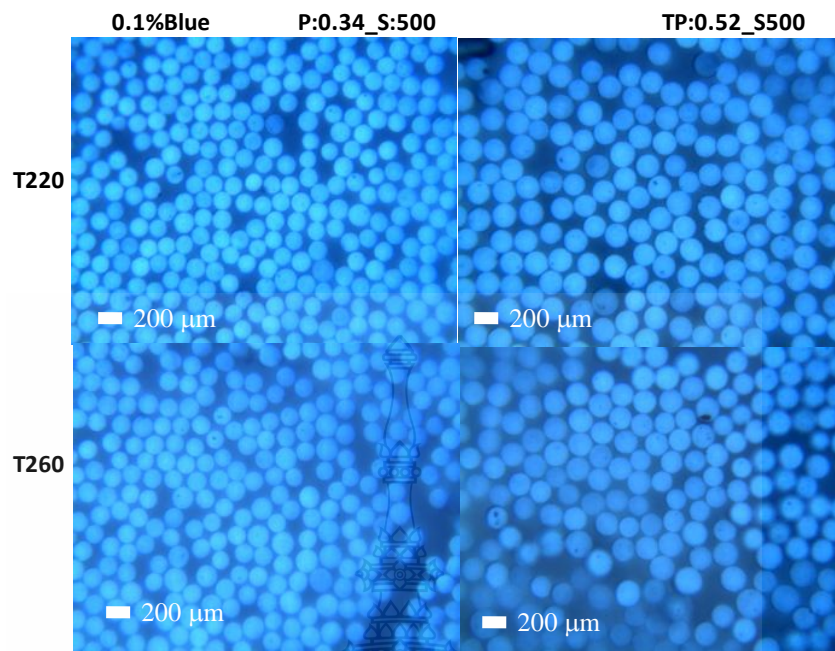
ความหนืดหลอมเหลวของพอลิแลคติกแอซิดที่ไม่ผสมผงสีและผสมผงสีถูกวัดค่าการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่างกัน คือ 220, 240 และ 260°C ดังรูปที่ 4.12 จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความหนืดพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมผงสี 0.1% blue (PLA\_Dyed) มีแนวโน้มสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิดที่ไม่ผสมผงสี (PLA\_Non-Dye) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผงสีที่ผสมกับพอลิแลคติกแอซิดเมื่อถูกหลอมเหลวแล้วจะกระจายอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ซึ่งจะขัดขวางการไหลส่งผลทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น [28-29]

#### 4.4.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยพอลิแลคติก หน้าตัดต่างกันที่ไม่ผสมสี (Non-Dye) เปรียบเทียบกับผสมผงสี (Dyed)

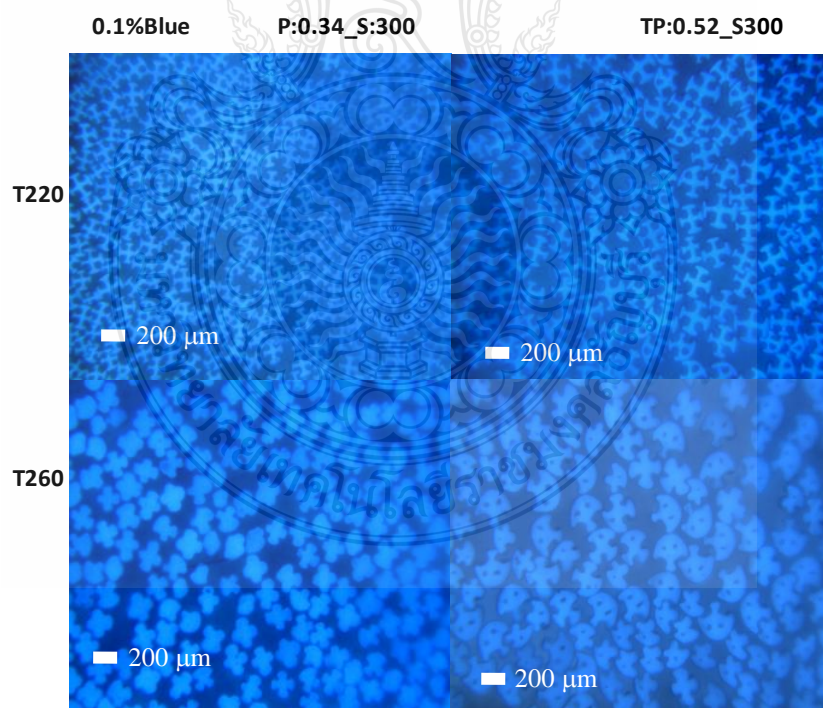
การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหน้าตัดเส้นใยที่วิเคราะห์โดยรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 4.13 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) ที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆ กัน ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 m/min ที่กำลังขยาย 40 เท่า

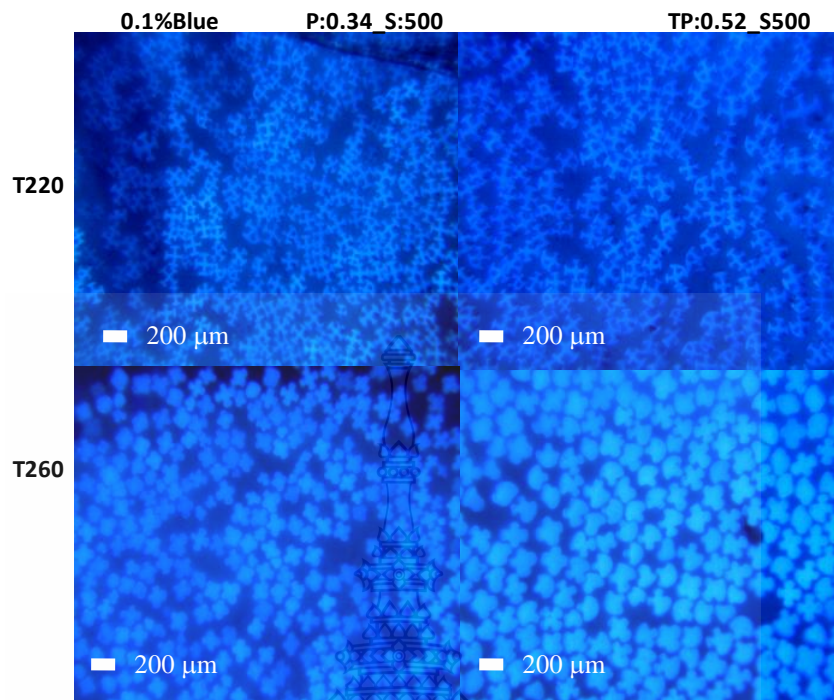


รูปที่ 4.14 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) ที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆ กัน ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min ที่กำลังขยาย 40 เท่า



รูปที่ 4.15 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆ กัน ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 m/min ที่กำลังขยาย 40 เท่า





รูปที่ 4.16 เส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆ กัน ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min ที่กำลังขยาย 40 เท่า

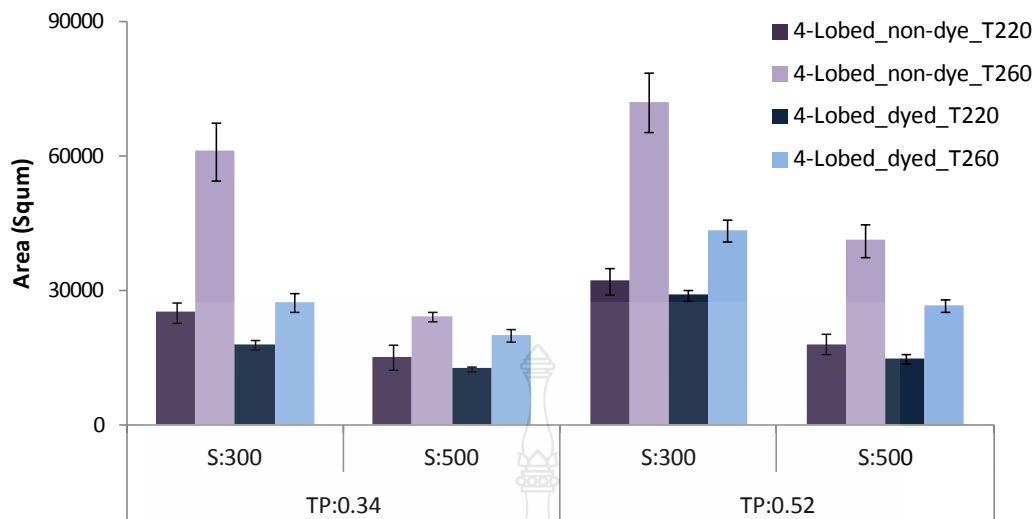
ผลการวิเคราะห์จากรูปตัดขวางของเส้นใยจะเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหน้าตัดเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ผสมสี (0.1% Blue) ได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ดังรูปที่ 4.15-4.16 เมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) ดังรูปที่ 4.13-4.14 ที่ยังสามารถคงรูปร่างเดิมไว้ได้ในทุกๆ สภาวะ พบว่าที่สภาวะการขึ้นรูปเส้นใยที่ต่างกัน เส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหน้าตัดมากที่สุดคืออุณหภูมิการขึ้นรูปเส้นใย (Spinning Temperature) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรอื่นๆ ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของพอลิเมอร์ หลอมทำให้ความตึงผิวของพอลิเมอร์หลอมจึงทำให้แรงยึดติดระหว่างพอลิเมอร์หลอมกับผนังของหัวฉีดต่ำเกินไปไม่สามารถคงรูปร่างหน้าตัดตามหัวฉีดที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ [11-13]

การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นรอบหน้าตัดและพื้นที่หน้าตัดเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างกัน



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นรอบหน้าตัด (Perimeter) ของพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ไม่ผสมผงสี (Non-Dye) และผสมผงสี (Dyed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 และ 500 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) 220 และ 260°C และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยพอลิแลคติกหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ไม่ผสมสีและผสมสี (0.1% Blue) พบว่าเส้นใยที่ผสมสี ค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิ 260°C รูปร่างหน้าตัดเส้นใยแบบสี่แฉกมีร่องบนเส้นใยปรากฏมากกว่า ดังรูปที่ 4.15-4.16 เส้นใยที่ไม่ผสมสี ดังรูปที่ 4.5-4.6 ส่งผลให้ค่าขนาดเส้นรอบหน้าตัด (Perimeter) ดังรูปที่ 4.17 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากผงสีที่ผสมกับพอลิแลคติกแอซิดขัดขวางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเมื่อไหลผ่านหัวฉีดส่งผลทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น [31-32] จึงทำให้ที่อุณหภูมิดังกล่าว เส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉกสามารถจรรูปร่างได้มากขึ้น



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ (Area) ของพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดแบบสี่แฉก

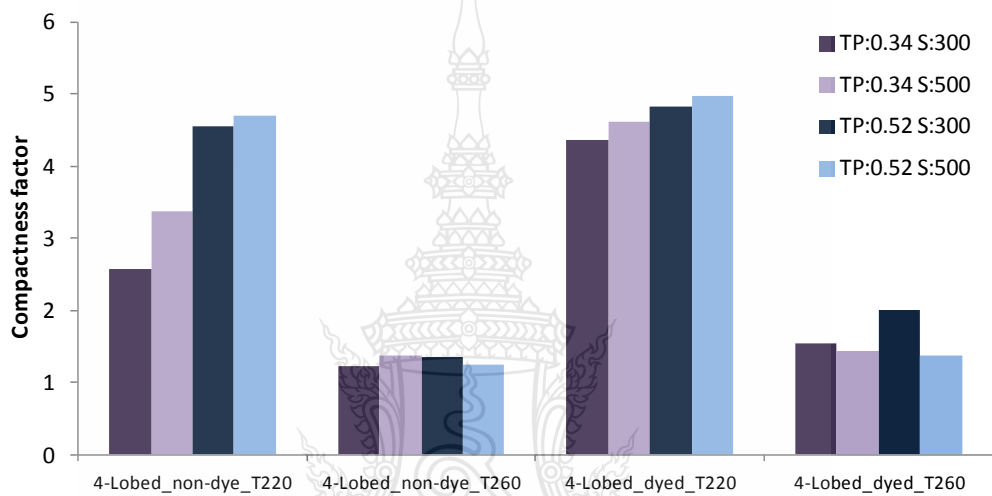
(4-Lobed) ที่ไม่ผสมผงสี (Non-dye) และผสมผงสี (Dyed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 และ 500 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) 220 และ 260°C และอัตราการ ป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min

ผลการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ (Area) ของพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ไม่ผสมผงสี (Non-Dye) และผสมผงสี (Dyed) ดังรูปที่ 4.18 พบว่า

- อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ขนาดพื้นที่ของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น
- ความเร็วในการหมุนเก็บเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ขนาดพื้นที่ของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง
- อุณหภูมิการขึ้นรูปเส้นใยที่เพิ่มขึ้น (220-260°C) ส่งผลทำให้ขนาดของเส้นใยที่อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์และความเร็วการหมุนเก็บเส้นใยเดียวกัน มีขนาดพื้นที่เพิ่มขึ้น สังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าร่องบนหน้าตัดเส้นใยหายไป เกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงความหนืดของพอลิเมอร์หลอมที่แตกต่างกันมากระหว่างอุณหภูมิการขึ้นรูปที่ 220°C ดังรูปที่ 4.12 พอลิเมอร์หลอมยังคงพฤติกรรม การไหลที่ขึ้นอยู่กับอัตราการเฉือน กล่าวคือ โมเลกุลของพอลิเมอร์หลอมยังคงมีความหนืดมากพอที่จะยึดเหนี่ยวกัน และสามารถฟอร์มรูปร่างตามหัวฉีดเส้นใยได้ ในทางกลับกันความหนืดที่ อุณหภูมิการขึ้นรูปที่ 260°C ดังรูปที่ 4.12 ค่อนข้างต่ำ และเริ่มพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน (ที่ไม่ขึ้นอยู่กับการเฉือน) จึงส่งผลกระทบต่อความตึงผิวของพอลิเมอร์หลอมทำให้แรงยึดติดระหว่างพอลิเมอร์หลอมกับผนังของหัวฉีดต่ำเกินไปไม่สามารถงอรูปร่างหน้าตัดตามหัวฉีดได้ [12]

- เส้นใยที่ผสมผงสีมีแนวโน้มขนาดพื้นที่น้อยกว่าเส้นใยที่ไม่ผสมผงสี ในทุกๆ สถานะการขึ้นรูป ดังรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 220°C ขนาดพื้นที่หน้าตัดเส้นใยน้อยกว่าที่ 260°C เป็นผลมาจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นจากการผสมผงสีทำให้เกิดการขัดขวางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเมื่อไหลผ่านหัวฉีด ส่งผลทำให้ขนาดพื้นที่ลดลง [32-33]

4.4.3 ค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัด (Compactness Factor) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ไม่ผสมผงสี (Non-Dye) เปรียบเทียบกับผสมผงสี (Dyed)

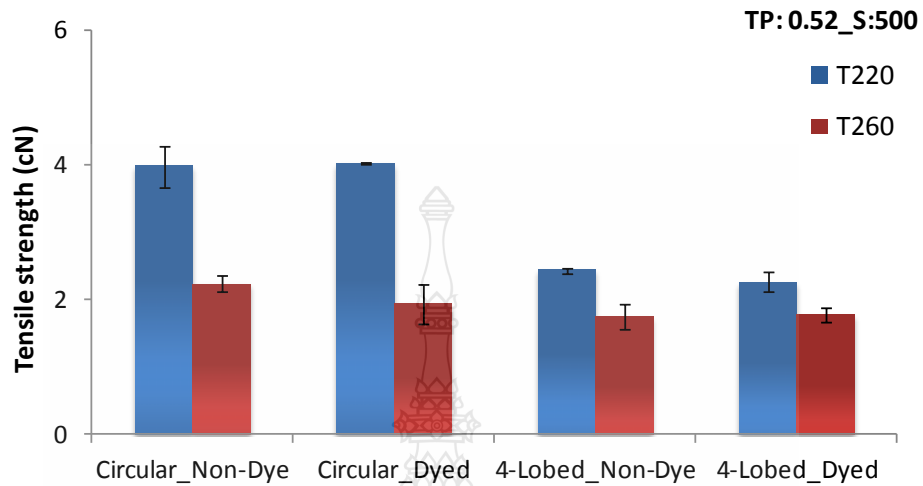


รูปที่ 4.19 ค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัด (Compactness Factor) ของพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดแบบสี่แฉก

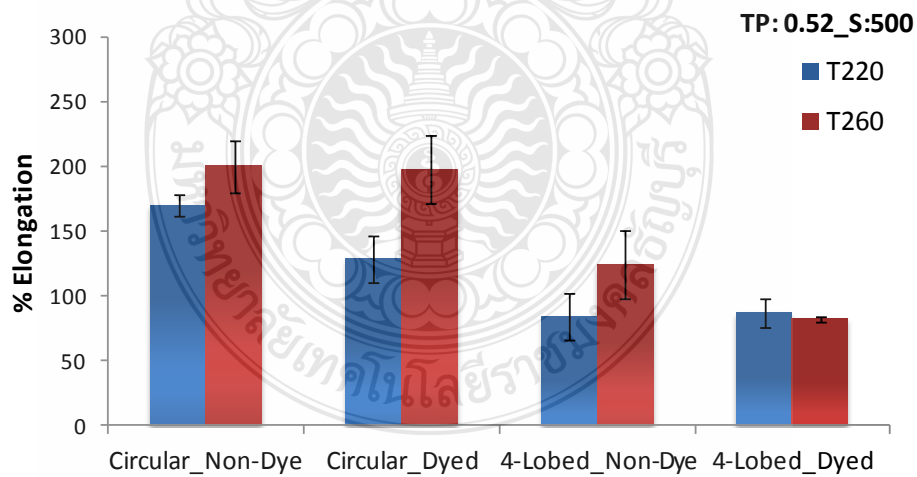
(4-Lobed) ที่ไม่ผสมผงสี (Non-Dye) และผสมผงสี (Dyed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 และ 500 m/min ที่อุณหภูมิต่างกัน (T) 220 และ 260°C และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min

ผลจากการคำนวณค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัดเส้นใย ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งคำนวณมาจากสูตรดังสมการที่ 4.1 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัดของเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ไม่ผสมผงสี (Non-Dye) และผสมผงสี (Dyed) พบว่าค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัดเส้นใยที่มีค่าน้อยกว่าหัวฉีดเส้นใย (12.36) ค่อนข้างมาก และในแต่ละและสถานะการขึ้นรูปมีค่าแตกต่างกันไป (1- 4.9) จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิการขึ้นรูปเดียวกันค่าบ่งชี้รูปร่างของเส้นใยที่ผสมสี (Dyed) มีค่ามากกว่าเส้นใยที่ไม่ผสมสีเล็กน้อย พบว่ารูปร่างหน้าตัดเส้นใยแบบสี่แฉกที่ผสมสี ดังรูปที่ 4.15-4.16 ปรากฏมุมและร่องบนเส้นใยมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ไม่ผสมสี ดังรูปที่ 4.5-4.6 ซึ่งส่งผลสอดคล้องกับค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้น ทำให้พอลิเมอร์หลอมสามารถฟอร์มรูปร่างตามหัวฉีดเส้นใยได้มากขึ้น [11-13]

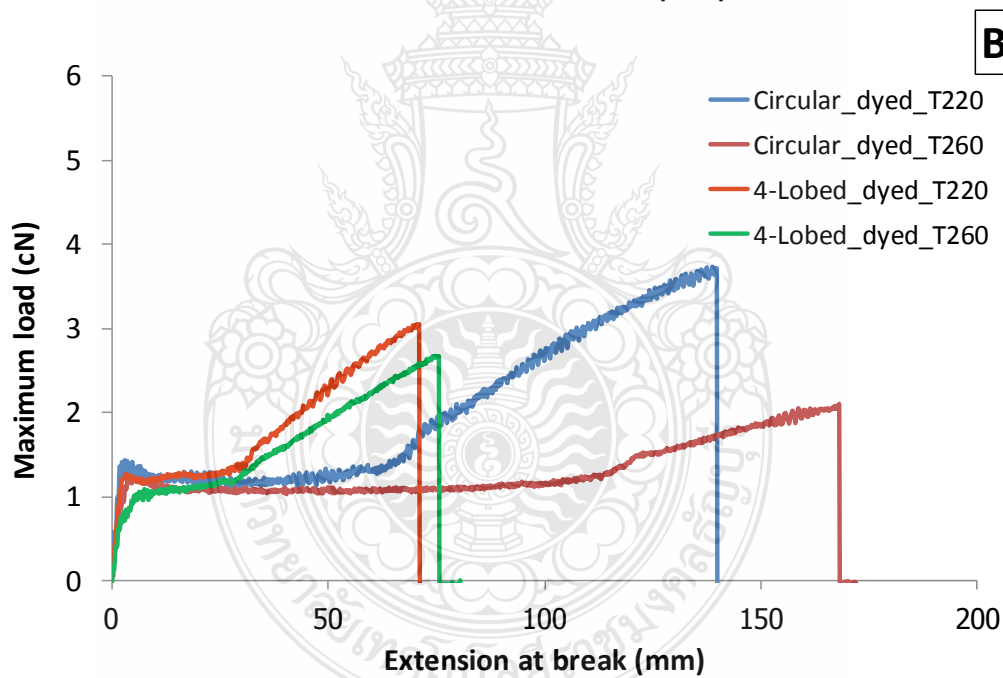
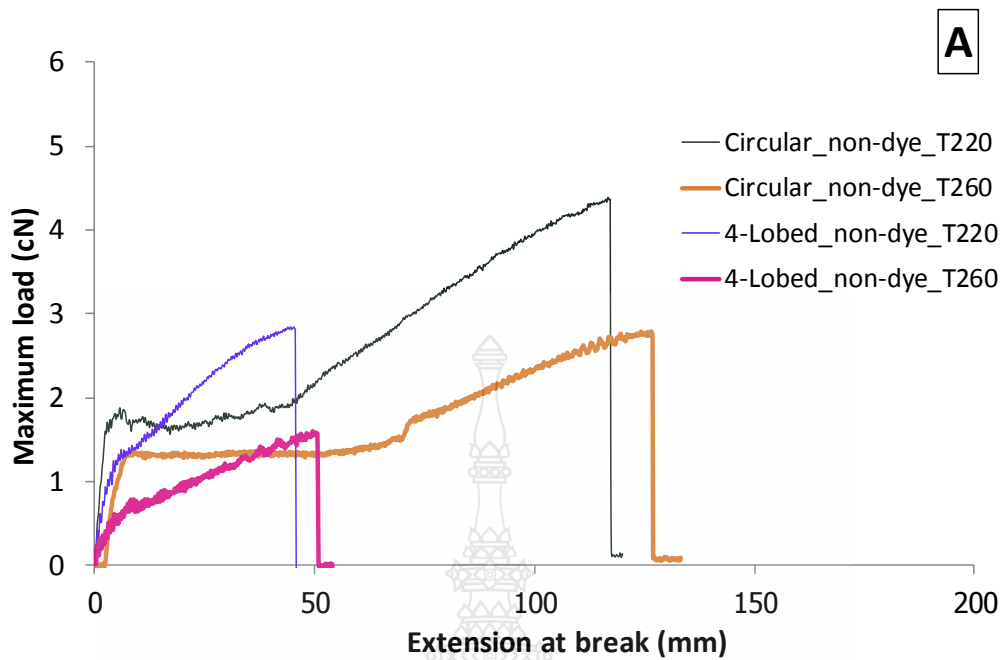
4.4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเส้นใย  
พอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดต่างกันที่ไม่ผสมสี (Non-Dye) เปรียบเทียบกับผสมผงสี (Dyed)



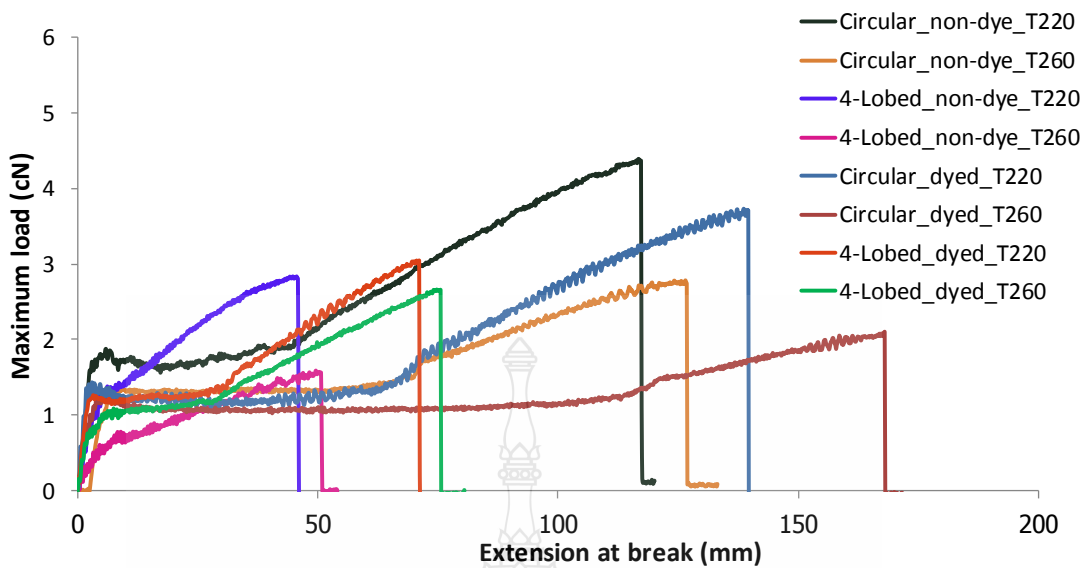
รูปที่ 4.20 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างกัน (วงกลม: Circular และสี่แฉก: 4-Lobed) ระหว่างไม่ผสมสี และ ผสมสี ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.52 g/hole/min และอุณหภูมิต่างกัน (T) 220 และ 260°C



รูปที่ 4.21 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างกัน (วงกลม: Circular และสี่แฉก: 4-Lobed) ระหว่างไม่ผสมสี และผสมสี ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.52 g/hole/min และอุณหภูมิต่างกัน (T) 220 และ 260°C



รูปที่ 4.22 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่อระยะการยืดตัวของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างกัน (วงกลม: Circular และ สี่แฉก: 4-Lobed) ระหว่างไม่ผสมสี: A และผสมสี: B ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.52 g/hole/min และอุณหภูมิต่างกัน(T) 220 และ 260°C





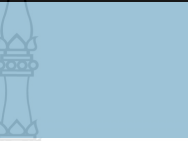
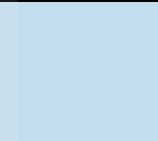








รูปที่ 4.23 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่อระยะยืดตัวของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างกัน (วงกลม: Circular และ สี่แฉก: 4-Lobed) ระหว่างไม่ผสมสี และผสมสี ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.52 g/hole/min และอุณหภูมิต่างกัน (T) 220 และ 260°C



จากรูปที่ 4.20-4.21 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบวงกลมที่ไม่ผสมสีและผสมสี มีแนวโน้มสูงกว่า หน้าตัดเส้นใยแบบสี่แฉก ในทุกๆ สภาวะการขึ้นรูป เนื่องจากรูปร่างหน้าตัดเส้นใยแบบสี่แฉกมีความซับซ้อนมากกว่าแบบวงกลม จึงส่งผลทำให้เกิดความเค้นสะสมมากกว่าบริเวณที่เป็นมุม จึงทำให้เมื่อได้รับแรงดึงจึงขาดได้ง่ายกว่า [24] เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิการขึ้นรูปเส้นใยที่เพิ่มขึ้น 220°C เป็น 260°C ดังรูปที่ 4.22-4.23 พบว่าเส้นใยที่ไม่ผสมสีและผสมสี มีแนวโน้มค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิสูง ส่งผลต่อสายโซ่โมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดซึ่งเมื่อถูกทำให้หลอมเหลวเพื่อขึ้นรูป แล้วเย็นตัวเพื่อฟอร์มรูปร่าง สายโซ่โมเลกุลมีแนวโน้มที่จะเสื่อมสลายหรือขาดได้ง่ายกว่า พอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ [31] จึงทำให้ความแข็งแรงลดลง

4.4.5 ผลของรูปร่างหน้าตัดของเส้นใยผสมผงสีที่ขึ้นรูปได้ต่อการสะท้อนแสง และการติดสี

ตารางที่ 4.2 เจดสีของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมสี 0.1% Blue ที่ปั่นหลอมขึ้นรูปด้วยสภาวะต่างๆ กัน ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 m/min



conditions		
Speed: 300m/in		
T220_TP:0.34		
T260_TP:0.34		
T220_TP:0.52		
T260_TP:0.52		

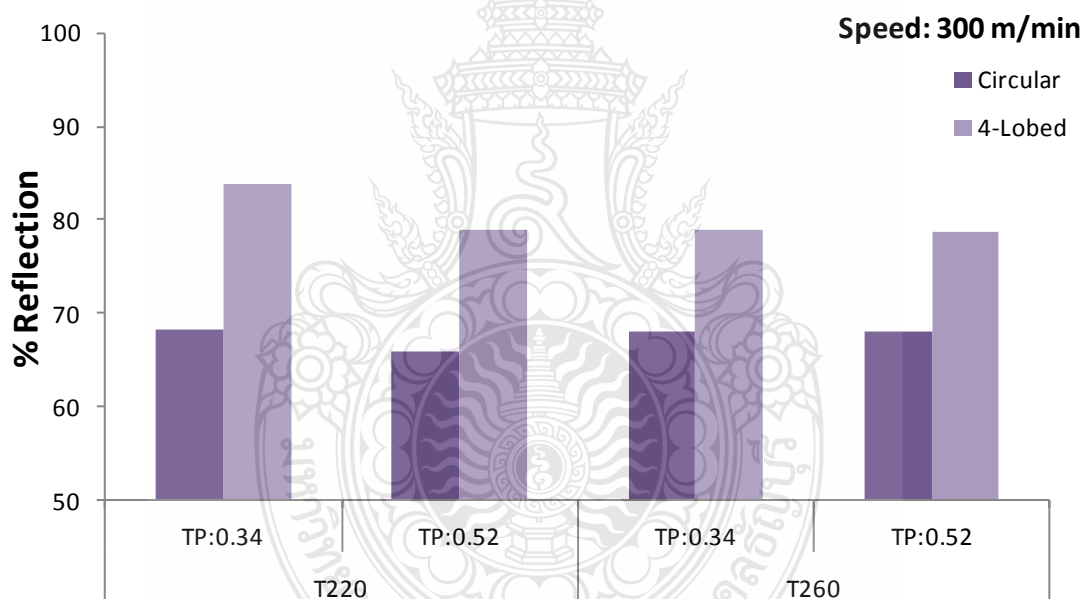
ตารางที่ 4.3 ค่าการติดสีบนเส้นใย (Dye-Uniformity) ที่อัตราการปั่นเนื้อพอลิเมอร์ 0.34 g/hole/min

profile	Condition	CIELAB			K/S at (max=600nm)
		L*	a*	b*	
	TP: 0.34 Speed: 300	L*	a*	b*	
	T220	76.26	-10.19	-14.1	0.4734
	T260	76	-10.58	-14.33	0.3829
	T220	83.72	-5.92	-8.39	0.1379
	T260	79.32	-11.19	-15.58	0.4000










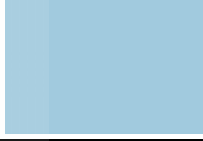




ตารางที่ 4.4 ค่าการติดสีบนเส้นใย (Dye-Uniformity) ที่อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ 0.52 g/hole/min

profile	Condition	CIELAB			K/S at (max=600nm)
	TP: 0.52 Speed: 300	L*	a*	b*	
	<b>T220</b>	74.18	-11.09	-15.4	0.5903
	<b>T260</b>	70.47	-10.97	-14.84	0.4350
	<b>T220</b>	84.6	-7.22	-9.78	0.1783
	<b>T260</b>	80.51	-11.21	-15.76	0.3613





รูปที่ 4.24 ค่าการสะท้อนแสงบนเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) และสี่แฉก (4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ (S) 300 m/min ที่สภาวะต่างๆ กัน



ตารางที่ 4.5 เจดสีของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมสี 0.1% Blue ที่ปั่นหลอมขึ้นรูปด้วยสภาวะต่างๆ กัน ความเร็วหมุนเก็บ (S) 500 m/min

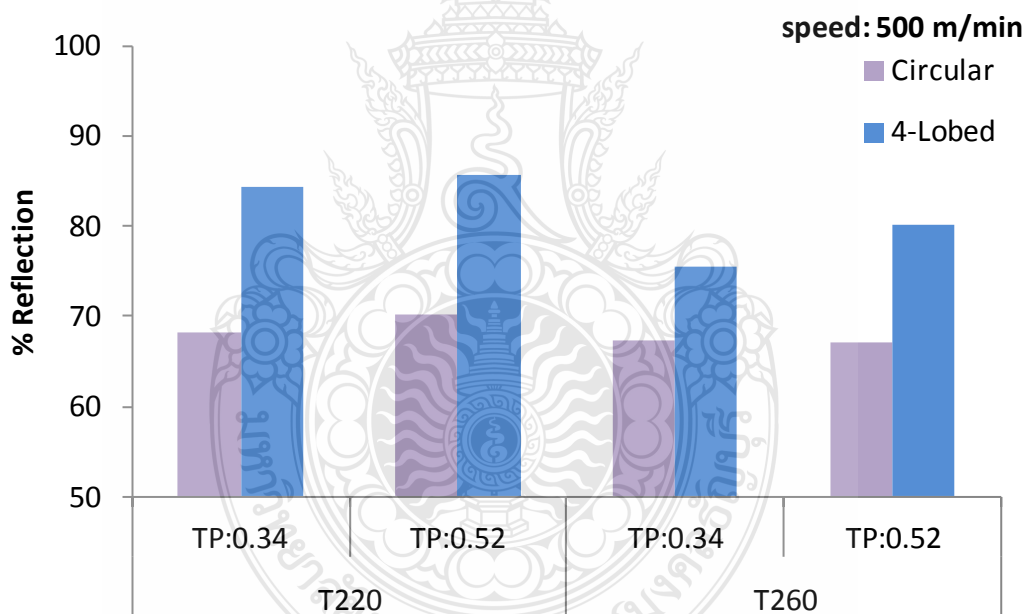
Condition		
Speed: 500m/min		
T220_TP:0.34		
T260_TP:0.34		
T220_TP:0.52		
T260_TP:0.52		

ตารางที่ 4.6 ค่าการติดสีบนเส้นใย (Dye-Uniformity) ที่อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ 0.34 g/hole/min

profile	Condition TP: 0.34 Speed: 500	CIELAB			K/S at (max=600nm)
		L*	a*	b*	
	T220	78.01	-10.19	-12.56	0.4944
	T260	76.66	-9.09	-12.84	0.4383
	T220	87.03	-9.55	-9.53	0.1388
	T260	80.84	-9.56	-13.16	0.3128

ตารางที่ 4.7 ค่าการติดสีบนเส้นใย (Dye-Uniformity) ที่อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ 0.52 g/hole/min

profile	Condition	CIELAB			K/S at (max=600nm)
	TP: 0.52 Speed: 500	L*	a*	b*	
	T220	77.26	-10.19	-13.91	0.7754
	T260	74.98	-11.06	-15.03	0.5529
	T220	87.05	-7.05	-9.62	0.1315
	T260	82.57	-9.83	-13.7	0.2723



รูปที่ 4.25 ค่าการสะท้อนแสงบนเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) และสี่แฉก (4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ(S) 500 m/min ที่สภาวะต่างๆ กัน

จากการทดสอบสมบัติด้านการสะท้อนแสงของเส้นใยพอลิแลคติกผสมผงสีน้ำเงิน 0.1% ตัวอย่างสีของเส้นใยตารางที่ 4.2 และ 4.5 ผลการทดลองพบว่าเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ดังรูปที่ 4.24-4.25 (ความเร็วหมุนเก็บ 300 และ 500 m/min ตามลำดับ) ค่าการสะท้อนแสงบนเส้นใยมากกว่าหน้าตัดแบบวงกลมในทุกๆ สถานะการขึ้นรูป โดยเฉพาะที่อุณหภูมิขึ้นรูปต่ำที่ 220°C จะมีค่าการสะท้อนแสงสูงที่สุด ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหน้าตัดที่มีมุมของหัวฉีดมาก ทำให้การสะท้อนของแสงมีโอกาสที่จะสะท้อนกลับในทิศทางเดิมมากกว่าหน้าตัดที่มีลักษณะผิวเรียบ โค้งแบบวงกลม [34] ในทางกลับเมื่อพิจารณาผลของค่าการบิดสี ดังตารางที่ 4.3-4.4 และ 4.6-4.7 (ความเร็วหมุนเก็บ 300 และ 500 m/min ตามลำดับ) พบว่าค่าการบิดสีบนเส้นใยที่มีแนว โนม์ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ เส้นใยที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) ค่าการบิดสีในทิศทางของสีน้ำเงิน ( $a^*$  และ  $b^*$ ) และค่าความเข้มสี  $k/s$  มากกว่าแบบสี่แฉก (4-Lobed) ซึ่งเป็นผลมาจากสะท้อนแสง(%R) และค่าความสว่าง ( $L^*$ )บนเส้นใยมาก การมองเห็นความเข้มสีจึงลดลง



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาการปั่นแบบหลอมเหลวเพื่อขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผ่านหัวฉีดเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) และแบบสี่แฉก (4-Lobed) ภายใต้สภาวะการปั่นหลอมที่แตกต่างกัน คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใย (Spinning Temperature) อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (Throughput Rate) ความเร็วในการม้วนเก็บ (Velocities) โดยเปรียบเทียบรูปร่างหน้าตัดและสมบัติต่างๆ ของเส้นใยที่ได้ ผลการทดลองดังสรุปต่อไปนี้

#### 5.1 ผลของสภาวะการขึ้นรูปที่มีต่อรูปร่างหน้าตัดเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด

สภาวะการขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างกัน ส่งผลต่อเส้นใยที่ขึ้นรูปโดยใช้หัวฉีดแบบสี่แฉก (4-Lobed) มากกว่าหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) ในทุกๆ สภาวะ กล่าวคือเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ปรากฏรูปร่างหน้าตัดที่หลากหลาย โดยเฉพาะจากตัวแปรอุณหภูมิการขึ้นรูป จากค่าบ่งชี้รูปร่าง (Shape Factor) พบว่าที่อุณหภูมิการปั่นหลอม  $220^{\circ}\text{C}$  อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์  $0.52\text{ g/hole/min}$  และความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย  $500\text{ m/min}$  เส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉกมีรูปร่างคล้ายกับหัวฉีดมากที่สุด

#### 5.2 ผลของการเติมอนุภาคสีที่มีต่อรูปร่างหน้าตัดเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ไม่ผสมสีและผสมสี (0.1% blue) พบว่าที่อุณหภูมิการปั่นหลอม  $220^{\circ}\text{C}$  อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์  $0.52\text{ g/hole/min}$  และความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย  $500\text{ m/min}$  เส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉกมีรูปร่างคล้ายกับหัวฉีดมากที่สุด เช่นเดียวกับเส้นใยที่ไม่ผสมสี เป็นที่น่าสังเกตว่า กลุ่มของเส้นใยที่ผสมผลสีที่สภาวะการขึ้นรูปเดียวกัน มีแนวโน้มค่าบ่งชี้รูปร่างมากขึ้น กล่าวคือมีรูปร่างหน้าตัดคล้ายกับหัวฉีดมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากผลสีที่ผสมกับพอลิแลคติกแอซิดมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการฟอร์มเพื่อขึ้นรูปเส้นใยแบบมีหน้าตัด

### 5.3 ผลของสถานะการขึ้นรูปที่มีต่อรูปร่างหน้าตัดเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมสี และสมบัติด้านการสะท้อนแสง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยพอลิแลคติกหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) และ สีแฉก (4-Lobed) ที่ผสมสี (0.1% Blue) พบว่าเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสีแฉก (4-Lobed) แสดงค่าการสะท้อนแสงบนเส้นใยมากกว่าหน้าตัดแบบวงกลมในทุกๆ สถานะการขึ้นรูป โดยเฉพาะที่อุณหภูมิขึ้นรูปต่ำที่ 220°C จะมีค่าการสะท้อนแสงสูงที่สุด ซึ่งเป็นไปตามลักษณะเฉพาะของหัวฉีด ดังนั้นการเลือกสถานะการขึ้นรูปเส้นใยแบบมีหน้าตัดที่เหมาะสม ทำให้เส้นใยที่ได้มีสมบัติการสะท้อนแสงที่ดี เหมาะที่จะนำไปใช้งานสิ่งทอที่ต้องการผิวมันเงาได้

### 5.4 ผลของสถานะการขึ้นรูปที่มีต่อรูปร่างหน้าตัดเส้นใยระหว่างไม่ผสมและผสมอนุภาคสี และสมบัติทางกล

ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) ของเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบวงกลมที่ไม่ผสมสีและผสมสี มีแนวโน้มสูงกว่า หน้าตัดเส้นใยแบบสีแฉก ในทุกๆ สถานะการขึ้นรูป เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิการขึ้นรูปของเส้นใยทั้งสองหน้าตัด พบว่า อุณหภูมิการขึ้นรูปต่ำ 220°C ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มสูงกว่า การขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง 260°C ดังนั้นการขึ้นรูปเส้นใยแบบมีหน้าตัดที่ซับซ้อน จึงควรพิจารณาการเลือกสถานะการขึ้นรูปที่เหมาะสม เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีสมบัติทางกลที่ดี สามารถนำไปใช้ในงานสิ่งทอได้

### 5.5 ข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัย

เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาสถานะการขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) และแบบสีแฉก (4-Lobed) ซึ่งเป็นหัวฉีดที่มีค่าบ่งชี้รูปร่างของหัวฉีด (Shape Factor) และลักษณะรูปร่างเฉพาะ (Unique Shape) ดังนั้นการขึ้นรูปเส้นใยโดยใช้หัวฉีดที่มีหน้าตัดแบบอื่นๆ อาจส่งผลต่อค่าบ่งชี้รูปร่างที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความซับซ้อน ของรูปร่างหัวฉีดนั้นๆ รวมถึงปัจจัย ชนิดของพอลิเมอร์ ชนิดของอนุภาค และปริมาณ เป็นต้น

## รายการอ้างอิง

- [1] J. Lunt, "Polylactic Acid Polymers for Fibers and Nonwovens," *Fiber international journal*, pp. 48-52, 2000
- [2] J. Lunt and Davies, S, " Poly(lactic acid) fibers," NatureWorks LLC, USA and RS black burn University of Leeds, pp.199-207, 2005
- [3] ผศ.ดร.อภิชาติ สนธิสมบัติ, เส้นใยสมรรถนะสูง, (Online 2012), [http://www.ttcexpert.com/2012/powerpoint/High\\_Performance\\_Fiber\\_PART2.pdf](http://www.ttcexpert.com/2012/powerpoint/High_Performance_Fiber_PART2.pdf)
- [4] J.D. Dugan, "Novel Properties Of PLA Fibers," *Fiber Innovation Technology*, pp. 1-10, 2005
- [5] Q. Lu, A. Simionescu and N. Vyavahare, " Novel capillary channel fiber scaffolds for guided tissue engineering," *Acta Biomaterialia*, pp. 607–613, Jul 2005
- [6] A. William, M. Haile and Bobby Phillips, " Deep grooved polyester fiber for wet lay Application," *Tappi Journal*, Vol. 78, pp. 139-142, Jan 1995
- [7] Teijin Fibers Ltd., New octopus polyester fiber from Teijin Fibers Ltd, (December 2, 2001), [http://specialtyfabricsreview.com/articles/120211\\_polyester\\_fiber.html](http://specialtyfabricsreview.com/articles/120211_polyester_fiber.html)
- [8] S. Teke and S. Altun, "CFD modeling of the melt spinning of poly (ethylene terephthalate) at low take-up velocity," *Academic Journal*, pp. 372-386, 2012
- [9] A. Deshpande, J.M. Krishna, and S. Kumar, " Rheology of complex fluids," *Springer New, York Dordrecht heidelberg London*, pp. 3-35, 2010
- [10] K.N.S. Suman and VVS. KESAVA RAO, "Study of rheological and mechanical properties of biodegradable polylactile and polycaprolactone blends," *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, pp. 6259-6265, 2011
- [11] I. Jung, S.Y. Kim, S.Y and T.H. OH, T.H, " Effects of Spinning Conditions on Shape Changes of Trilobal-shaped Fibers," *Textile Research Journal*, pp. 12-18, 2010
- [12] D.Yao, "Fundamental study of the driving Mechanisms for cross-Section shape change in highly noncircular fiber spinning.," *The fiber society*, pp. 56-56, 2005
- [13] H. Kim, K. Chung, K and J.R. Youn, J.R, " Three dimensional FEM simulation for spinning of noncircular fibers," *Fibers and polymer*, pp.37-44, 2000

## รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [14] H.C. Tsai, C.A. Lin and C.C. Tung, "The elasticity of special-shaped fiber simulation by hydromechanical simulation software. H.C. Tsai, Institute of textile engineering," *Feng chia University*, pp. 49-55, 2008
- [15] J. Zhou, J. Li, W. Yu, Z. Li, and CH. Zhou, "Studies on the melt spinning process of noncircular fiber by numerical and experimental methods," *Polymer engineering and science*, pp. 1935-1944, 2001
- [16] อมรรัตน์ เลิศวรศิริกุล, พอลิแลกติกแอซิดพอลิเอสเทอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้  
Risk Assessment of Traction Battery Charging System in Warehouse, ฉบับที่ 77 ปีที่ 24  
กรกฎาคม - กันยายน 2554 หน้า 99-108
- [17] V.B. Gupta and V.K. Kothari, "Manufactured Fiber Technology," First edition London,  
Chapman & Hall, pp. 66-75, 2007
- [18] <http://textileengineerr.blogspot.com/2010/11/textile-glossary-s.html>
- [19] [http://www2.mtec.or.th/th/research/textile/textile\\_sci.htm](http://www2.mtec.or.th/th/research/textile/textile_sci.htm)
- [20] [http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318\(51\)/MY318-2.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318(51)/MY318-2.pdf)
- [21] ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และ ชาคริต สิริสิงห์, พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว  
และการนำไปใช้งาน. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,  
2544
- [22] N. Sombatsompop, "Polymer Rheology and Applications," KMUTT, Bangkok, 2003
- [23] <http://www.scs.illinois.edu/~chem584/lectures/chem584.polymerproperties.pdf>
- [24] ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุลม, พอลิเมอร์เบื้องต้น 1, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. หน้า  
297-361, 2546
- [25] ศรีนยา เกษมบุญญากร. กระบวนการเตรียม ย้อม พิมพ์ และการตกแต่งสิ่งทอ, โครงการอบรม  
การตรวจสอบผลิตภัณฑ์ผ้าตามหลักมาตรฐาน, ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [26] แม้น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม, หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ, หน้า  
33-107, 2539
- [27] R.W.G Hunt, "Measuring color. 2<sup>nd</sup> ed," *The City University*, London, 1993



## รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [28] W. Takarada, H. Shiito, T. Kikutani and N. Okui, “Studies on High-Speed Melt Spinning of Noncircular Cross-Section Fibers. I. Structural Analysis of As-Spun Fibers,” *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 80, pp. 1575–1581, Aug 2001
- [29] W. Takarada, H. Shiito, T. Kikutani and N. Okui, “Studies on High-Speed Melt Spinning of Noncircular Cross-Section Fibers. II. On-Line Measurement of the Spin Line, Including Change in Cross-Sectional Shape,” *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 80, pp. 1582–1588, Aug 2001
- [30] W. Takarada, H. Shiito, T. Kikutani and N. Okui, “Studies on High-Speed Melt Spinning of Noncircular Cross-Section Fibers. III. Modeling of Melt Spinning Process Incorporating Change in Cross-Sectional Shape,” *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 80, pp. 1589–1600, Aug 2001
- [31] Q. Li, “Biodegradation Study of Polymeric Material with Various Levels of Molecular Orientation Induced via Vibration Assisted Injection Molding,” Lehigh University Bethlehem. Pennsylvania, pp. 69-71, 2011
- [32] W. Li and T. Burkhart, “Preferential Location of TiO<sub>2</sub> Particles in PET/PP Blend,” ICCM17 Edinburgh, Edinburgh UK, Jul 2009
- [33] S.K. Esthappan, Kuttappan, and R. Joseph, “Thermal and mechanical properties of polypropylene/titanium dioxide nano composite fibers,” *Materials and Design*, pp. 537-542, 2012
- [34] X. Liu and W. Fumei, “Visible Light Shielding Performance of Fabrics with Non-Circular Cross Section Fiber,” *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, pp. 50-58, 2012

ภาคผนวก

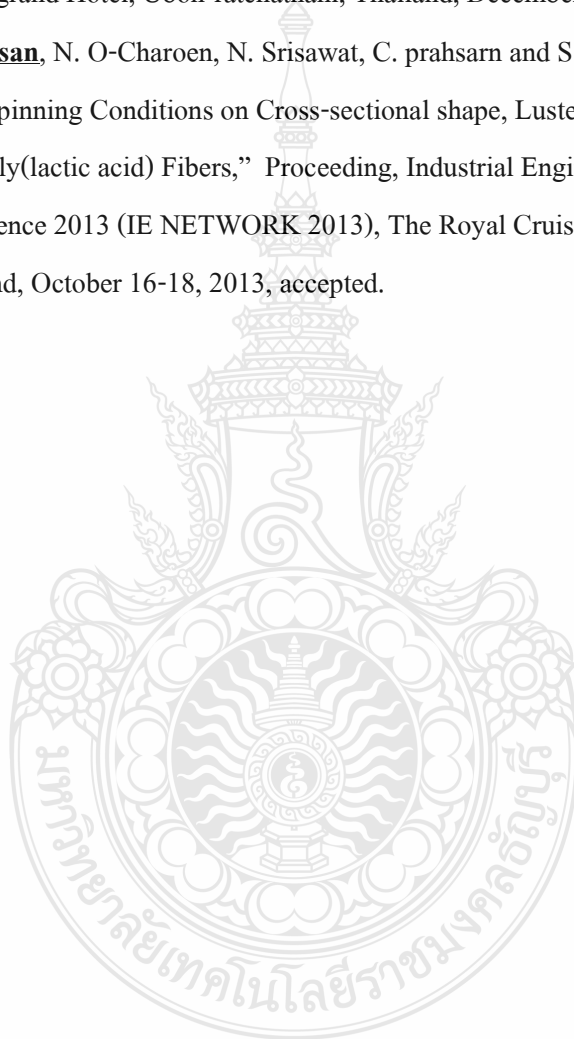




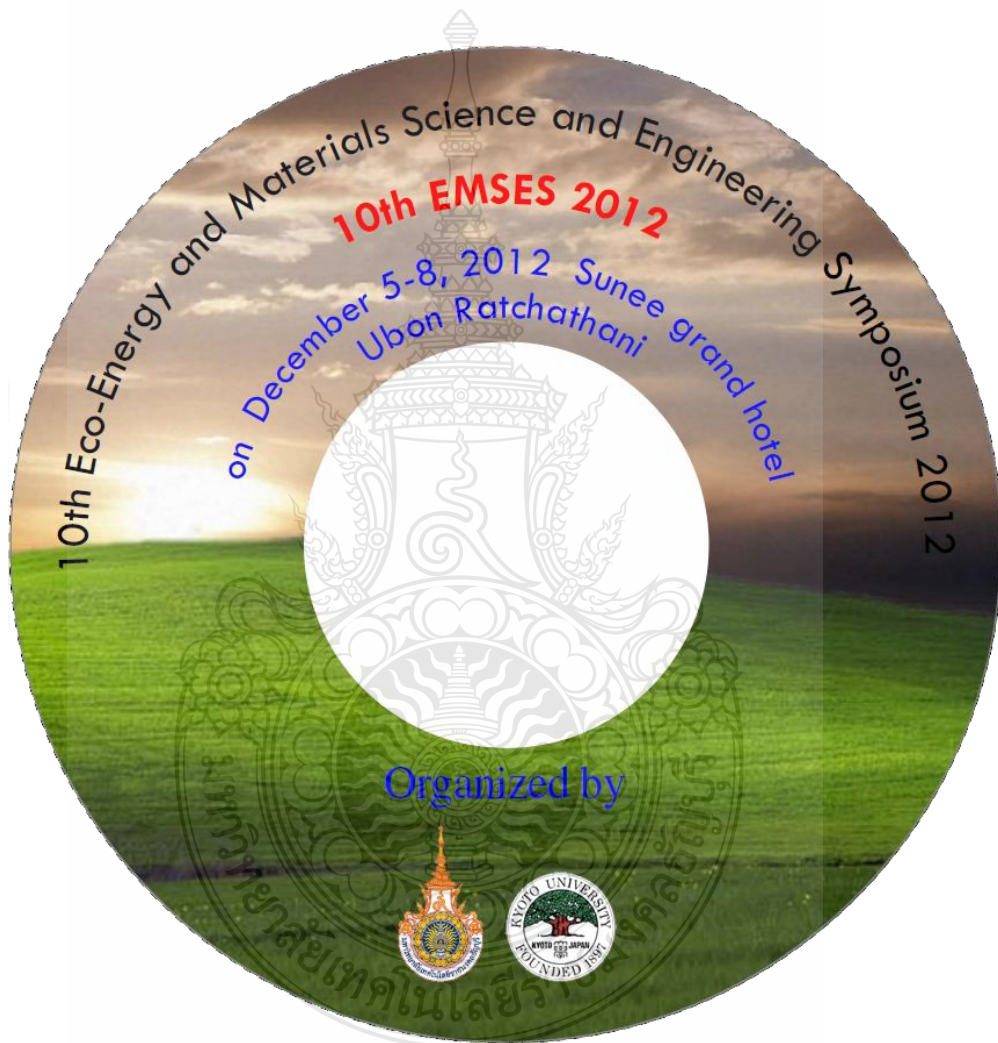
ภาคผนวก  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ (National and International Conferences)

1. **N. Rongpaisan**, N. O-Charoen, N. Srisawat, C. prahsarn and S. Pavasupree, “Effects of melt spinning conditions on cross-sectional features of poly(lactic acid) fibers,” 10<sup>th</sup> Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium (10<sup>th</sup> EMSES 2012), Sunee grand Hotel, Ubon-ratchathani, Thailand, December 5-8, 2012, pp. 749/754
2. **N. Rongpaisan**, N. O-Charoen, N. Srisawat, C. prahsarn and S. Pavasupree, “Effects of Melt Spinning Conditions on Cross-sectional shape, Lustern and Dyeing Properties of Poly(lactic acid) Fibers,” Proceeding, Industrial Engineering Network Conference 2013 (IE NETWORK 2013), The Royal Cruise Hotel, Chonburi, Thailand, October 16-18, 2013, accepted.



**10<sup>th</sup> EMSES 2012**  
on December 5-8, 2012 **Sunee grand hotel, Ubon-ratchathani**



## 10<sup>th</sup> 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.Sommai 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

## 10<sup>th</sup> 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
<b>ASEAN Committee:</b>	
Prof. Dr. Yoyok Wahyu Subroto	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Wega TRISUNAYANTI	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
<b>General Secretary:</b>	
Asst.Prof.Dr.Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
Dr. Sumonman NIAMLANG	RMUTT, Thailand
<b>Technical Program Chair:</b>	
Asst.Prof.Dr.Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
<b>Area: Energy Technology(ET)</b>	
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr.Boonrit PRASARTKAEW	RMUTT, Thailand
Dr. Sathapron THONGWIK	RMUTT, Thailand
Dr. Nathabhat PHANKONG	RMUTT, Thailand
<b>Area: Environmental and Social Impact(ES)</b>	
Dr. Nithiwat CHOOSAKUL	RMUTT, Thailand
<b>Area: Nanotechnology and Materials Science(NM)</b>	
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
<b>Area: Energy Economic and Management(EM)</b>	
Assoc.Prof.Dr. Natha KUPTHASTHIEN	RMUTT, Thailand
Dr. Surin NGAEMNGAM	RMUTT, Thailand
Dr. Pimnapat IEMSOMBOON	RMUTT, Thailand
<b>Area: New Energy Technology(NT)</b>	
Dr. Boonyang PLANGKLANG	RMUTT, Thailand
<b>Area: Nuclear Technology(NU)</b>	
Asst.Prof.Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand

## 10<sup>th</sup> EMSES 2012

### Exhibition Chair:

Dr. Amnoi 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

NM81	The fabrication and mechanical Properties of Jute Spun Yarn/PLA Unidirection Composite by Compression Molding <i>A. Memon and A. Nakai</i>	169
NM83	Effect of Twisted Jute Fiber Bundle on Mechanical Property of Glass/jute/polypropylene Hybrid Composites <i>P. Uawongsuwan, Y. Yang and H. Hamada</i>	170
NM88	Impact Property of Flexible Epoxy Treated Natural Fiber Reinforced PLA Composites <i>Wiphawee Nuthong, Putimin Uawongsuwan, Weraporn Pivsa-Art and Hiroyuki Hamada</i>	171
NM89	Mechanical Property of Surface Modified Natural Fiber Reinforced PLA Biocomposites <i>Wassamon Sujaritjun Putimin Uawongsuwan, Weraporn Pivsa-Art and Hiroyuki Hamada</i>	172
NM90	Mechanical properties of silk fiber reinforced PLA composite <i>Kornkanok Manaphak, Putimin Uawongsuwan, Weraporn Pivsa-Art and Hiroyuki Hamada</i>	173
NM91	Effect of Flexible Epoxy Treated on Surface Morphology of Natural Fibers <i>Napawadee Klomhadyay, Putimin Uawongsuwan, Weraporn Pivsa-Art and Hiroyuki Hamada</i>	174
NM92	Electron-Acceptor Nanomaterials Fabricated by Electrospinning for Polymer Solar Cells <i>Surawut Chuangchote and Takashi Sagawa</i>	175
NM93	Effects of Melt Spinning Conditions on Cross-sectional Features of Poly (lactic acid) Fibers <i>N. Roungpaisan, N. Ocharoen, N. Srisawat, C. Praharn, S. Pavasupree</i>	176
NM94	Nonstoichiometric Polymer Particles as Nanoactuators and Catalytic Nanofilters with Unique Properties <i>Md. Shahimul Islam, Won San Choi, Ha-Jin Lee</i>	177
NM95	Investigation of Si-gel-NR interaction in Si-Gel/NR vulcanizate using Dynamic Mechanical Thermal Analysis <i>C.Thongpin and R. Rodsunthia</i>	178

---

## Effects of Melt Spinning Conditions on Cross-sectional Features of Poly(lactic acid) Fibers

N. Rongpaisan<sup>1</sup>, N. Ocharoen<sup>1</sup>, N. Srisawat<sup>2</sup>, C. Prahsarn<sup>3</sup>, S. Pavasupree<sup>1\*</sup>

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

<sup>2</sup>Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand

<sup>3</sup>National Metal and Materials Technology Center, 114 Paholyothin Rd., Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand  
\*E-mail: sorapongp@yahoo.com

**Abstract**— Melt spinning of Poly(lactic acid) was conducted, using two spinneret profiles- circular and 4-lobed shapes, to investigate effects of spinning conditions on cross-sectional features of the obtained PLA fibers. The studied spinning parameters included throughput rates, spinning temperatures, and take up speeds. Results showed that, with varying spinning conditions, PLA fibers spun from circular orifice could remain their circular shapes whereas those spun from 4-lobed orifice exhibited variation in cross-sectional shapes. Such shape variation was found increased with increasing spinning temperature and throughput rate, but with decreasing take up speed. This offered possibility to design fibers with desired cross-sectional shapes for different applications, through the same spinneret orifice, simply by manipulating fiber spinning conditions.

**Keywords**— Poly(lactic acid) fibers, Fiber melt spinning, Cross-sectional fibers, Die swell, Surface tension

### 1. INTRODUCTION

Poly(lactic acid) or PLA has been widely used in biodegradable plastic applications due to its naturally-derived lactic acid monomer [1-3]. In textiles, an introduction of poly (lactic acid) as a commercial polymer offers textile manufacturers with interesting properties that should prove valuable in a wide range of applications.

Cross-sectional feature of fibers is known to closely relate to properties including surface area, hand, and luster. For example, the commercial deep-grooved fibers (4DG), having capillary channeled surface, showed excellent moisture transport. Recently, the fibers were also used to fabricate tissue engineering scaffolds with the potential for cell growth and guide tissue formation [4-6].

Despite their great potential on properties and applications, shaped fibers were difficult to prepare. In their melt spinning, it is difficult to maintain fiber cross-sectional shape the same as its original hole orifice due to the effects of Newtonian fluid on die swell and surface tension [7-8]. There were reports on studying melt flow through star-shaped spinneret hole, using hydromechanical simulation software (CFD) [9-10]. It was found that fluid shear strain rate of melt through star-shaped spinneret hole was non-uniform. The largest shear strain rate occurred at the center of shaped hole, causing greater shape deformation than that at the extended arms. Therefore the spinneret hole should be re-designed to obtain balance shear rate that helped reducing the gap between polymer melt and spinneret hole, and thus reducing the shape changing.

In this study, PLA fibers were spun through circular and 4-Lobed orifice profiles, under varied spinning temperatures, throughput rates, and take up speeds in

order to investigate spinning behaviors as well as roles of these influencing parameters on cross-sectional features of PLA fibers.

### 2. PROCEDURE

#### 2.1 Materials

Poly(lactic acid) resins (PLA 3052D) (MFI = 14 g/10 min, density 1.24 g/cm<sup>3</sup>) obtained from NatureWorks<sup>®</sup>LLC were used as received.

#### 2.2 Method

To prepare PLA fibers with two different cross-sectional shapes (circular and 4-Lobed), PLA resins were melt spun through 10-hole spinnerets, using laboratory fiber spinning machine (Fig. 1). Profiles of the two spinneret orifices employed were shown in Figure 2. Different spinning conditions: spinning temperatures (220, 240 and 260°C), throughput rates (0.34, 0.52 g/hole/min), and take up speeds (300 and 500 m/min.) were used (Table 1).

#### 2.3 Characterizations

Characteristics of the obtained circular and 4-lobed PLA fibers such as cross-sectional features, perimeter, area, compactness were investigated, using optical microscope and ImageJ software. Thermogravimetric Analyzer (TGA/SDTA851e) was used to determine thermal stability of PLA resins. The samples were heated at a rate of 5 °C per minute from 50°C to 800 °C. The chamber was continuously swept with nitrogen at a rate of 50 ml/min. The corresponding weight change was noted. Melt viscosity of PLA resins was measured at varied temperatures (220, 240, and 260 °C), using rotational rheometer (ARE, Rheometric Scientific).

This work was supported by National Metal and Materials Technology Center. (MTEC), National Science and Technology Development Agency, Thailand.

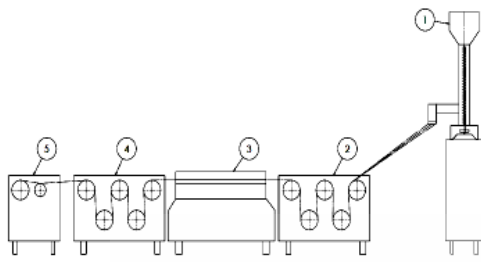


Fig. 1 Fiber melt spinning system: Extruder (1), 1<sup>st</sup> roller unit (2), heated bar (3), 2<sup>nd</sup> roller unit (4), and winding unit (5)

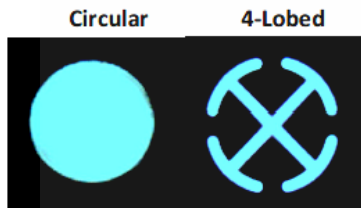


Fig. 2 Profiles of circular and 4-Lobed spinneret orifice under OM (Magnification =4X).

Table 1. PLA fiber spinning conditions

Parameter	Condition
Polymer	PLA (MFI: 14 g/min)
Nozzle hole shape	Circular, 4-Lobed
Spinning Temperature (°C)	220, 240, 260 °C
Throughput rate (g/hole/min): TP	0.34, 0.52
Take up speed (m/min): S	300, 500

### 3. Result and Discussion

#### 3.1 Characterizations of PLA resins

Thermal stability of PLA resins was determined, using TGA, and result was shown in Fig. 3. PLA started to degrade at 310°C, where its weight began to drop rapidly, and degradation was completed at 370°C. This confirmed that spinning temperature at range 220-260°C employed in this study could be conducted without severe degradation of polymer.

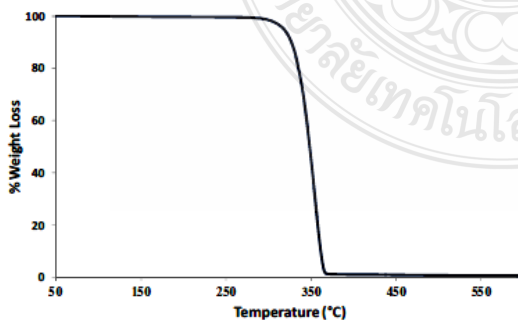


Fig. 3 Thermal stability of PLA at different temperatures.

Polymer melt viscosities of PLA resins were measured at temperature 220, 240, and 260°C, and results were shown in Figure 4. The viscosity of PLA measured at 220°C was the highest, followed by those measured at 240 and 260°C. At 220 °C, polymer viscosity changed with shear rate, and dropped rapidly at very high shear rate (100/s). On the other hand, at 240°C and 260°C the polymer melt viscosities were observed less dependent on shear rate than that of 220°C. The polymer melt exhibited newtonian behavior at extreme shear rates (100 /s) where the viscosity is approximately constant [12-13]. This showed that, under different spinning temperatures, the polymer melt exhibited different fluid behavior, which could be related to variation in cross-sectional shapes in the obtained PLA fibers.

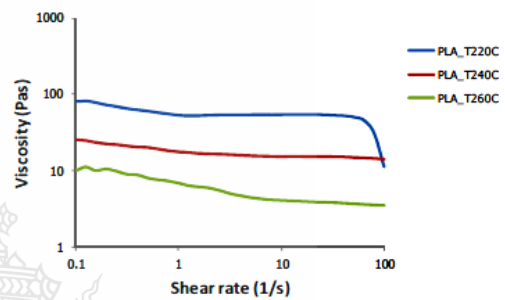


Fig. 4 Change in viscosities of PLA with shear rate at different temperature.

#### 3.2 Cross-sectional features

Cross-sectional features of PLA fibers obtained from different spinning conditions were shown in Figs. 5-6 and 7-8 for circular and 4-Lobed shaped fibers, respectively. PLA fibers spun from circular orifice could remain their circular shapes at all spinning conditions, whereas those spun from 4-lobed orifice exhibited variation in cross-sectional shapes and seemed to lose their grooved feature. In circular orifice, shear strain acting on polymer melt was more uniformly distributed, compared to that in the complex 4-Lobed orifice. As shown in Figs. 7 and 8, the features of 4-Lobed fibers changed with spinning parameters.

The final fiber profile was suspected to be related to surface tension of polymer melt. The adhesive forces between polymer melt and the walls of orifice center tended to decrease with increasing temperature. This affected shape forming of 4-Lobed fibers that low cohesive forces lead to transfiguration of cross-sectional feature so as the fibers showed variation shapes[16] . Yao et al. [7] reported numerical simulation on trilobal cross-sectional shape. Newtonian die swell and surface tension were considered to be the main causes for shape change such that surface tension made the shape became almost circular, in stead of trilobal shape, and die swell effect tended to enlarge the curvature in the center section.

In our study, it was noted that fibers exhibited shape transition from 4-Lobe to tetragonal shape when take up speed was decreased from 500 to 300 m/min., especially at spinning temperature 240°C and throughput rate 0.34 g/hole/min (Figs. 7-8). At lower take up speed, polymer

melt were slightly stretched and had more time to relax, thus exhibiting die swell.

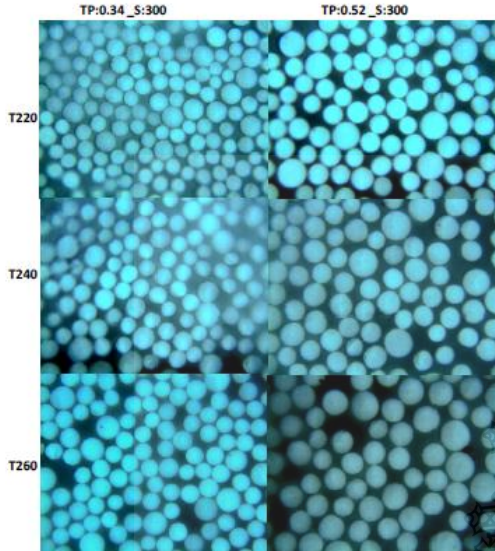


Fig. 5 OM micrographs of circular PLA fibers at various temperatures (top-down) and throughput rates (left-right) 0.34 and 0.52 g/hole/min (TP0.34, TP0.52) at take up speed 300 m/min (S:300) (magnification= 40x)

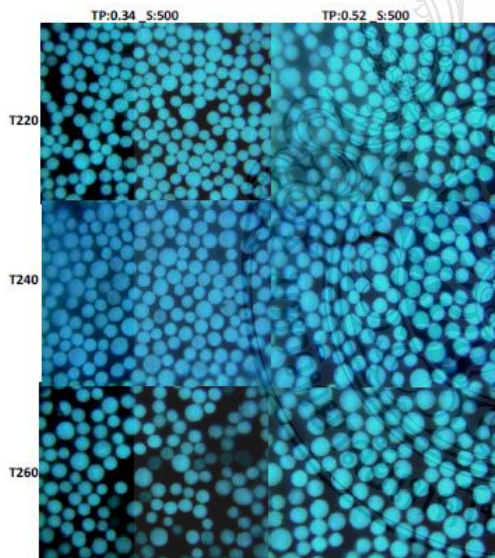


Fig. 6 OM micrographs of circular PLA fibers at various temperatures (top-down) and throughput rates (left-right) 0.34 and 0.52 g/hole/min (TP0.34, TP0.52) at take up speed 500 m/min (S:500) (magnification= 40x)

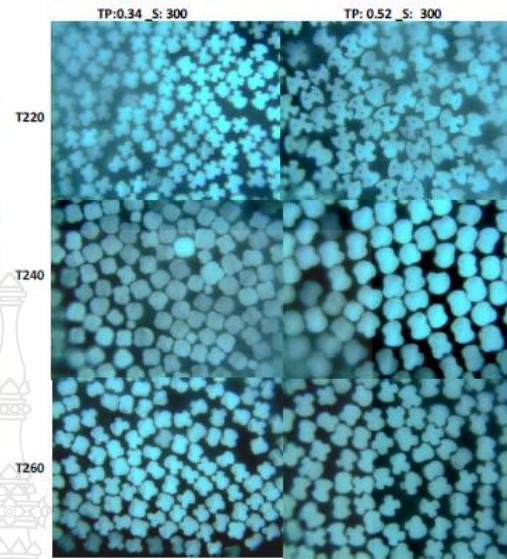


Fig. 7 OM micrographs of 4-lobed PLA fibers at various temperatures (top-down) and throughput rates (left-right) 0.34 and 0.52 g/hole/min (TP0.34, TP0.52) at take up speed 300 m/min (S:300) (magnification= 40x)

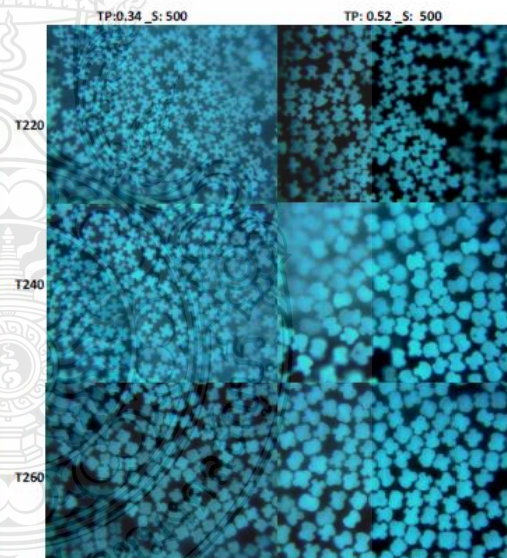


Fig. 8 OM micrographs of 4-lobed PLA fibers at various temperature (top-down) and throughput rates (left-right) 0.34 and 0.52 g/hole/min (TP0.34, TP0.52) at take up speed 500 m/min (S:500) (magnification= 40x)

3.2.1 Effect of spinning temperatures

At lower spinning temperature (220°C), fiber spinnability of the 4-Lobed fibers was poor. Better spinnability was obtained when higher spinning temperature was increased to 240°C. However, at higher temperature 260°C, fibers breakage occurred from time to time. Such fiber breakage was suspected to be related to rapid decrease in polymer melt viscosity at 260°C even at lower shear rate (Fig. 4). However, the fibers could be collected, especially at higher take up speed (500m/min). To compare between circular and 4-Lobed fibers, their perimeter and areas were determined (Figs. 9-10 and 11-12). From results, Circular fibers area and perimeter tended to increase with increasing spinning temperatures. On the other hand, area of 4-Lobe tended to increase with increasing spinning temperatures, whereas their perimeter showed no clear trend (Figs. 11 and 12). It was noticed that the groove of 4-Lobed fibers tended to disappear when spun at higher temperature.

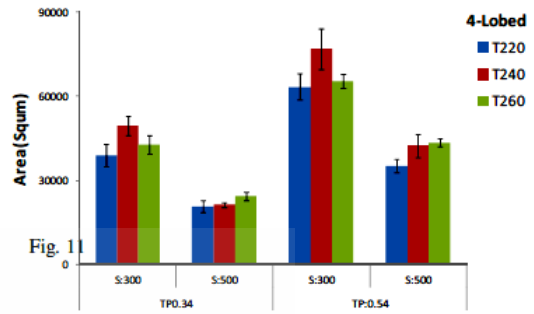


Fig. 11 Cross sectional area of 4-Lobed PLA fibers obtained from different spinning conditions (Temperature 220, 240, 260 °C Throughput rates, TP:0.34, 0.52 g/hole/min and Take up speeds S:300, 500m/min) (magnification= 40x)

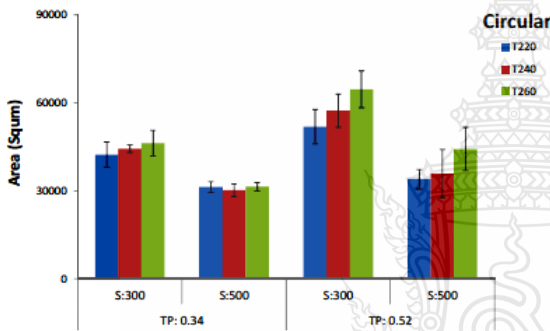


Fig. 9 Cross sectional area of circular PLA fibers obtained from different spinning conditions (Temperature 220, 240, 260 °C Throughput rates, TP:0.34, 0.52 g/hole/min and Take up speeds S:300, 500m/min) (magnification= 40x)

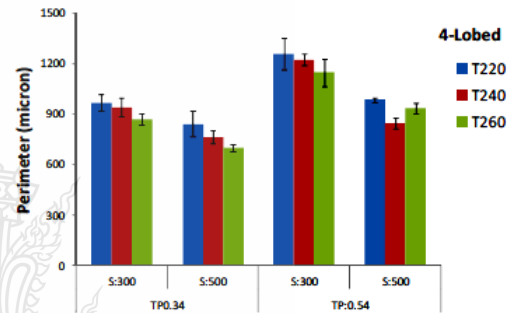


Fig. 11 Cross sectional perimeter of 4-Lobed PLA fibers obtained from different spinning conditions (Temperature 220, 240, 260 °C Throughput rates, TP:0.34, 0.52 g/hole/min and Take up speeds S:300, 500m/min) (magnification= 40x)

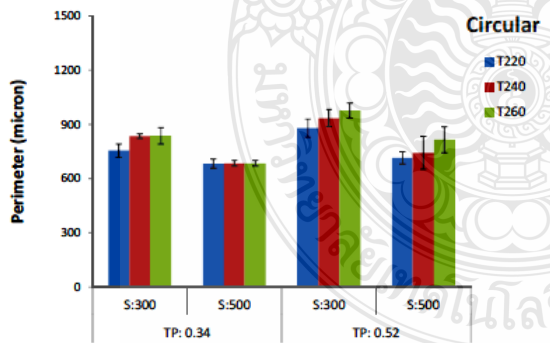


Fig. 10 Cross sectional perimeter of circular PLA fibers obtained from different spinning conditions (Temperature 220, 240, 260 °C Throughput rates, TP:0.34, 0.52 g/hole/min and Take up speeds S:300, 500m/min) (magnification= 40x)

3.2.2 Effect of throughput rates

As shown in Figs 9-12, both circular and 4-Lobed fibers obtained at high throughput 0.52 g/min/hole tended to have greater perimeter and area than those obtained from lower throughput 0.34 g/min/hole, for all take up speeds. Teke et al [14] reported influence of volumetric flow rates and take up velocities on surface tension of polyester melt. They found that such spinning conditions caused rapid acceleration and rapid attenuation for solidification of fiber near the orifice spinneret, resulting in different diameter profile of the obtained fibers. In our study, we found that throughput rate was related to take up speed in fibers of 4-Lobed profile. Figures 7 and 8 compared different fiber profiles in relation to throughput rates and take up speeds at various temperatures. It was noticed that at low throughput rate (0.34g/hole/min) and high take up speed (500m/min), most fibers tended to remain their grooves, which were preferable for fiber spinning.

3.2.3 Effect of take up speeds

Two take up speeds, 300 and 500 m/min, were used to study effect of take up speed on cross-sectional feature of PLA fibers. From results, both circular and 4-lobed fibers showed decrease in perimeter and area with increasing take up speed, for all throughput rates (Figs 9-12).

Zhou et al. [10] employed 3D simulation to adjust the value of surface tension coefficient until the predicted shape of as-spun polyester fiber was close to the actual observation. The depth of fiber grooves were chosen as primary standard, and the overall similarity in cross-section as secondary standard for comparison. Surface tension as a function of temperature and draw ratio were found to be a major factor to determine change of fiber cross-section. Temperature difference between outer surface and center of nozzle hole affected solidification of fibers. Fiber cross-section tended to have circular shape under high temperature and low draw ratio. On the other hand, the groove of polyester fiber could be maintained when increasing draw ratio although they were spun at high temperature. This result corresponded to our observation in 4-Lobed fiber As shown in Figs. 7 and 8, fibers obtained at higher take up speed had sharp grooved profile, compared to those obtained at lower take up speed. This suggested that the 4-lobed PLA fibers preferably be spun at high take up speed.

3.3 Compactness of shaped fibers

Compactness is defined as feature extraction from shape [15]. It represents smoothness or roughness of the shape. Circular shape is considered most compact, and is given the lowest value. For rough or more edge shape, the value is higher. Value of compactness can be calculated from perimeter and area as shown in equation (1). In this study, the compactness value of the shape of spinneret orifice was determined to compare with those of actual spun shape fibers. As shown in Table 2, the compactness value of circular spinneret shape was equal to 1.13 and that of 4-Lobed shape was 12.43.

$$compactness = \frac{perimeter^2}{4\pi area} \quad (1)$$

Table 2 Compactness value of circular and 4-Lobed spinneret orifice shapes (OM= 40x)

Measurement	Orifice profile configuration	
	Circular	4-Lobed
Compactness	1.13	12.43
Perimeter(μm)	1666	7086
Area (Squm)	195847	321418

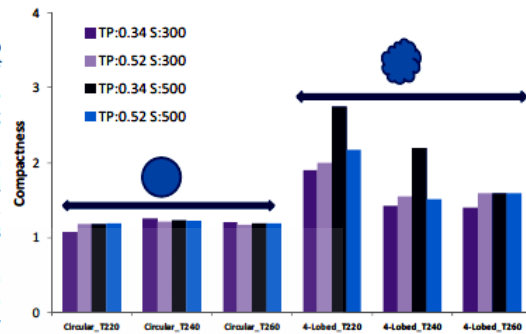


Figure. 13 Compactness values of circular and 4-Lobed PLA fibers obtained from different spinning conditions (Temperatures 220, 240, 260 °C, Throughput rates;TP:0.34, 0.52 g/hole/min and Take up speeds S:300,500m/min)

Compactness values of the two profiled fibers: Circular and 4-Lobed, obtained from different spinning conditions were shown in Fig. 13. For circular fibers, compactness values were approximately 1.13 for all spinning conditions. Notice that shape areas were very similar among these circular shapes. For 4-lobed fibers, higher compactness values were observed with variations for difference spinning conditions. Fibers obtained at low temperature (220°C), low throughput rate (0.34g/hole min) and high take up speed (500m/min) showed highest compactness value (approximately 2.75). This indicated that their features were rougher than those of circular fibers and they were most similar to their original 4-lobed orifice. However, fiber breakage tended to occur at this spinning condition. Higher spinning temperature could be used to obtain better spinnability but it should not exceed 240°C, beyond which compactness started to decrease, i.e. less grooved feature. This may be due to newtonian fluid behavior at high temperature that caused loss in surface tension [7-10]. At this point, it seemed that spinning temperature was the most significant parameter which affected compactness, or cross-sectional features of 4-Lobed PLA fibers, compared to take up speed and throughput rate.

4. CONCLUSION

Circular and 4-Lobed shaped PLA fibers were prepared via melt spinning to investigate effects of spinning parameters on cross-sectional features of the obtained fibers. From results, it was found that spinning temperature was a major parameter that determined cross-sectional shapes of fibers, compared to take up speed and throughput rate. With increasing spinning temperature, the groove features of 4-Lobed fibers tended to loss or disappear. This was suspected to be related to loss in surface tension of polymer melt at high spinning temperature. In circular shaped fibers, such effect was found less that circular shape could still be maintained., In this study, the compactness value was used to indicate deviation of fiber shape from its original spinneret.

## ACKNOWLEDGMENT

This work was financially supported by National Metal and Materials Technology Center.(MTEC), National Science and Technology Development Agency, Thailand.

## REFERENCES

- [1] Lunt, J. 2000. Polylactic Acid Polymers for Fibers and nonwovens. *International Fiber Journal* 44(4): 48-52.
- [2] Lunt, J.; Davie, S. 2005. Poly(lactic acid) fibers. *NatureWorks LLC, USA and RS black burn , University of Leeds,U* 27(9): 199-207.
- [3] Dennis, S.; Michael J. Drews.; Nadarajah, V. 2005. Poly(lactic acid) Derived Fibers and Films with Enhanced Performance. *National Textiles Center Annual Report*: 1-10.
- [4] Jeffrey, S. Dugan. 2001. Novel Properties Of PLA Fibers. *Fiber Innovation Technology*: 1-8
- [5] Lu, Q.; Simionescu, A.; Vyavahare, N. 2005. Novel capillary channel fiber scaffolds for guided tissue engineering. *Acta Biomaterialia*: 607-613.
- [6] William, A.; Haile.; Bobby.; Phillips, M. 1995. Deep grooved polyester fiber for wet lay applications. *Tappi Journal* 78(9): 139-142.
- [7] Donggang Yao. 2005. Fundamental study of the driving Mechanisms for cross-Section shape change in highly noncircular fiber spinning. *The fiber society*: 56-56
- [8] Kim, H.; Chung, K.; and Youn, J.R. 2000. Three dimensional FEM simulation for spinning of noncircular fibers. *Fibers and polymers* 1(9): 37-44 .
- [9] Tsai, H.; lin, H. 2008. The elasticity of special-shaped fiber simulation by hydromechanical simulation software. *H.C. Tsai, Institute of textile engineering Feng chia University*: 49-55.
- [10] Zhou, J.; Li, J.; Yu, W.; Li, X.; Zhou, C. 2010. Studies on the melt spinning process of noncircular fiber by numerical and experimental methods. *Polymer engineering and science*: 1935-1944.
- [11] Igathinathane, C.; Pordesimo, L.O.; Columbus,W.D.; Batchelor.; Methuku, S.R. 2008. Shape identification and particles size distribution from basic shape parameters using ImageJ. *computers and electronics in agriculture* 30(5): 168-1821.
- [12] Abhijit, D.; Murali, J.; Krishans.; Lumaer , P.B. 2010. Rheology of complex fluids. *Springer new York Dordrecht heidelberg london* 6(3): 3-35.
- [13] Umamaheswara Rao. 2011. Study of rheological and mechanical properties of biodegradable polylactile and polycaprolactone blends. *International journal of engineering science and technology* 3(8): 6259-6265
- [14] Teke, S.; Sule, A. 2012. CFD modeling of the melt spinning of poly (ethylene terephthalate) at low take-up velocities. *Academic journals* 7(3): 372-386.
- [15] Raul, S.; Montero. 2009. State of the Art of Compactness and circularity measures. *International mathematical forum* 27(4): 1305 – 1335.
- [16] Abate, R.; Han, L.; Jin, L.; Suo, Z.; Weitz, A. 2012. Measuring the elastic modulus of microgels using microdrops. *The Royal Society of Chemistry*: 1-4.



# IE Network 2013

Green Productivity and Innovation



### Login

Username

Password

Login

Forgot

### 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](#)

ShinyStat™	
today visits	92
tot. visits	13291

## 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 อันจะก่อให้เกิดการพัฒนางานวิจัยอย่างต่อเนื่อง ที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถทางการแข่งขันอย่างยิ่งยั้ง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ กิ่งผอง  
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล




IE Network 2013

ประกาศเลื่อนวันประกาศผลการพิจารณาบทความฉบับสมบูรณ์  
เป็นวันที่ 23 สิงหาคม 2556

egienet2013@mahidol.ac.th





 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.สิริรงค์ กลั่นคำสอน
2. ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง
3. ดร.นันทวิภา จันทศรี
4. ดร.เพ็ญสุดา พันธุ์ศรีคำ
5. ดร.รัฐดิกร พัฒนพิบูล
6. อ.จักรินทร์ กลั่นเงิน

### มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

1. รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล
2. รศ.ดร.ชนนาค กฤตวรกาญจน์
3. รศ.ดร.นิวิธ 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.รุ่งจิตร ชมภูอินทร์
10. ผศ.ดร.วิสนัย วรธนนัจฉริยา
11. ผศ.ดร.อรรณพ สมุทคุปต์
12. ดร.วชิระ นาคเขี้ยว
13. ดร.วริษา วิสิทธิ์พานิช
14. ดร.อนิรุท ไชยจรรุณิชา

### มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

1. รศ.ดร.จิรัชย์ พุทธกุลสมศิริ

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

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



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 สุนทรวาณิชย์
12. ดร.ปภัศร ชัยวัฒน์
13. ดร.ชอแก้ว จตุรานนท์
14. อ.แบงค์ งามอรุณโชติ
15. อ.อาวุธ สนใจยุทธ
16. อ.มงคล สันะวัฒน์
17. อ.ภัทธีรา ม้วนจัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1. ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์
2. ผศ.ดร.กฤษ ทัฬหะพันธุ์ศรี
3. ผศ.ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์
4. ผศ.ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิตร
5. ดร.ธนสาร อินทรกำธรชัย
6. ดร.วรพจน์ มีถม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1. รศ.ดร.วัลย์ลักษณ์ อัฒธิวงศ์
2. รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ
3. รศ.ดร.ฤดี มาสุจินทร์
4. รศ.ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต
5. ผศ.ดร.ชมพล ยางใย
6. ผศ.ดร.สิทธิพร ทิมพัสกุล
7. ดร.พลชัย โชติปราชญกุล
8. ดร.พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม
9. ดร.วิภู ศรีสืบสาย
10. ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

1. ผศ.ดร.นนทโชติ อุดมศรี
2. ผศ.จักรินทร์ น่วมทิม
3. ผศ.ร่าพิง เจริญยศ
4. ดร.สมพงษ์ พิริยานนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุโขทัยธรรมาธิราช

1. รศ.พกาภาศ ผจญแก้ว
2. รศ.สุภาวดี ธีรธรรมากร
3. รศ.สุณี ภูสีม่วง
4. รศ.ศุภณี เรียบเลิศศิริ
5. ดร.แววมยุร แยมแสงสังข์
6. อ.กรรณิการ์ ยิ้มนาค
7. อ.จิรานุช บุคดีจัน
8. อ.บุญชัย วลีธรรมสวัสดิ์
9. อ.ภูมิ เจือศิริภักดี
10. อ.อิทธิเดช นูมมิ่งมี

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

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

เครื่องเชื่อมไฟฟ้า สองเวลา



คุณภาพทนทาน บริการสุดยอดเยี่ยม



6. อ.อรรถ พฤตศรีภักย์
7. ผศ.ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์

มหาวิทยาลัยนครพนม

1. ดร.บัณฑิต บุญขาว
2. ดร.วิชัย พัฒนพล
3. อ.จุจกานา นันทโพธิ์เดช

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

1. ดร.วีระยุทธ สุดสมบูรณ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

1. ดร.จิรวัดณ์ วิมุตติสุขวิริยา

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

1. รศ.ดร.วิชัย แหวนเพชร
2. ผศ.ดร.ประณต บุญไชยอภิสิทธิ์
3. ผศ.อวยชัย วงศ์รัตน์
4. ดร.อนันตกุล อินทรผดุง
5. อ.ชาญชัย วัลลิสุด
6. อ.พีเชษฐ์ รัตนบุญทวี
7. อ.ภาสุระ อังกุลานนท์
8. อ.ลักขณา ฤกษ์เกษม
9. อ.อรมน บั้นทอง

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

1. อ.ธิดา โชนงนุช
2. อ.อลงกรณ์ เมืองไหว

มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

1. อ.เปรมชัย มูลหล้า

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

1. ผศ.ดร.ชูชาติ พยอม
2. ผศ.ดร.ณัฐกานต์ พวงไพฑูริย์
3. ผศ.ดร.นิคม อนันทน

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

1. อ.นิวัฒน์ ศรีราตรี
2. อ.วสันต์ พลัวพันธ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

1. ดร.กันต์ อินทวงศ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1. ดร.จกมล ศรีธ

#### มหาวิทยาลัยรามคำแหง

1. ผศ.ดร.กฤษดา พิศลยบุตร
2. ผศ.บุญล อุลลบาน
3. ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์

#### มหาวิทยาลัยมหิดล

1. รศ.ดร.ดวงพรรณณ 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 ไกรฎ
7. ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย
8. ดร.จิรพรรณ เลียงโรคาพาท
9. ดร.มงคล เทียนวิบูลย์
10. ดร.รณชัย ศิริเวธนูกุล
11. ดร.ศุภชัย ราชภูริศิริ
12. อ.กัญจน์ คณาธารทิพย์
13. อ.ดวงยศ สุภักดิ์
14. อ.ธนา สาตรา
15. อ.นพพร ภูระยา
16. อ.พิมพ์วิไลย สุตะโคตร
17. อ.สิทธิพันธุ์ ดัชนีวิรุฬห์

#### มหาวิทยาลัยแม่โจ้

1. ผศ.เสริมสุข บัวเจริญ

#### มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

1. รศ.ธนรัตน์ แด้ววัฒนา
2. ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์
3. ผศ.ดร.พิลดา หวังพานิช
4. ผศ.รติรัตน์ กิตติปัญญาพัฒน์
5. ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ
6. ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ
7. ดร.วราธร ปัญญางาม
8. ดร.สิเรเดช ชาตินิยม

#### มหาวิทยาลัยศิลปากร

1. ผศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร
2. ผศ.จันทร์เพ็ญ อุนรัตนานนท์
3. ผศ.วันชัย ลีลากรวิวงศ์
4. ดร.กัญญา ทองสนธิ
5. ดร.คณิศ พลอยดน้อย
6. ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม
7. ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์
8. อ.กวิธร สัยเจริญ

#### มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

1. รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล
2. รศ.สมชาย ชูโถม
3. รศ.วนิดา รัตน์มณี
4. ผศ.ดร.กลางเดือน โพชนา

- 
5. ผศ.ดร.ธเนศ รัตน์วิไล
  6. ผศ.ดร.นภิสพร มิ่งมงคล
  7. ผศ.ดร.รัชชานา สันธวาลัย
  8. ผศ.ดร.สุภาพรณ ไชยประพัทธ์
  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 ริจิราวณิช
2. รศ.ศันสนีย์ สุภาภา
3. ผศ.ดร.เฉลิมเกียรติ วงศ์วนิทธิ
4. ผศ.ดร.รัฐาณี รู้แทนคุณ
5. ผศ.ดร.อาทิตย์ โสทรโยม
6. อ.ณัฐพล พุฒยงกูร
7. อ.ธัชชนนท์ แคนเซต
8. อ.ปญฺยิศา คีนดี
9. อ.พงศ์พัฒน์ เพชรรุ่งเรือง
10. อ.วิมลพรรณ คงสมบูรณ์

#### มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

1. รศ.ดร.สถาพร อมรสวัสดิ์วัฒนา
2. ผศ.ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร
3. ผศ.ดร.ชนะ เยี่ยงกมลสิงห์
4. ดร.วิมลชัย พฤษก์านนท์

#### มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

1. ดร.นิศากร สมสุข
2. อ.จิตลดา หมายมัน
3. อ.วรลักษณ์ เสถียรรังสฤษฏ์
4. อ.อรอุมา กอสนาน

#### มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

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

#### โรงเรียนนายเรืออากาศ

1. น.อ.สุทธิ ศรีบูรพา
2. น.ท.ปัญญาธิ์ โกศลวัฒน์

**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 ศรีระดมย์

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร**

1. ดร.วิจิตรสวัสดิ์ สุขสวัสดิ์ ณ อยุธยา
2. อ.ธนกฤต โชติภาวโรต
3. อ.ธนิดา สุนาร์กษ
4. อ.พัฒนาพงษ์ แสงหัดถวิลวัฒนา
5. อ.พรเทพ แก้วเชื้อ
6. อ.วรินทร์ เกียรติคุณกุล
7. อ.อรณิชา อนุชิตชาญชัย

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**


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

**มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร**

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

**มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต**

1. รศ.นิตยา สวัสดิพงษ์
2. ผศ.สุทัศน์ จันบัวลา
3. ดร.ชาติ หิชะ
4. ดร.ชนินทร์ กุลเศรษฐ์ณัฐลี
5. ดร.สิริวิภา เรื่องช่วย คู่ประกาย

		
IE Network Conference 2013 [ MAHIDOL / SILPAKORN ]		
MAT005	ผลกระทบของสภาวะการปั่นหลอมที่มีต่อรูปร่างหน้าตัด สมบัติการสะท้อนแสงและการดูดสีของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด นรรจพร เรืองไพศาล ณรงค์ชัย โอเจริญ นที ศรีสวัสดิ์ จุรีรัตน์ ประสาร และ สรพงษ์ ภาสุปรีย์	83
MAT006	การปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสมอลูมิเนียม -7%ซิลิคอน-1% เหล็ก โดยการเติมโลหะแม่ชนิด Al-10%Mn-1%Sr รัฐพงศ์ เจริญเนตร์ พิสิทธิ์ เมืองน้อย กิตติชัย พัทพันธุ์ และ กฤตธี เอียดเหตุ	84
MAT007	การพัฒนาการเตรียมวัสดุท่อนาโนที่มีสมบัติการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยใช้แสงสูงจากแร่ อิลเมไนท์ของไทยโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ธนกร วิรุฬห์มงคล ณรงค์ชัย โอเจริญ กุลวดี สังข์สนธิ และ สรพงษ์ ภาสุปรีย์	85
MAT008	ผลกระทบของอุณหภูมิการเผาต่อโครงสร้างและปฏิกิริยาเชิงแสงของแผ่นบางขนาดนาโน จากแร่อิลเมไนท์ของไทยที่เตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล วิษณุ เจริญนอม ธนกร วิรุฬห์มงคล ณรงค์ชัย โอเจริญ และ สรพงษ์ ภาสุปรีย์	86
MAT009	การศึกษาผลของศูนย์รวมความเค้นในเหล็กกล้า AISI1045 ภายใต้แรงแบบ cyclic เฉลิมพล คล้ายนิล และ พงศกร หลีตระกูล	87
MAT010	การศึกษาการนำวัชพืชในธรรมชาติมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมแผ่นวัสดุผสมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมระหว่างผักตบชวาและพอลิแลคติกแอซิด ประยูร สุรินทร์ และ เจษฎา วงษ์อ่อน	88
MAT011	การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบความต้านทานการตกกระแตกของพลาสติกฟิล์ม เดชา สุขมา ประกวต หงษาชาติ เอกสิทธิ์ ชนินทรภูมิ และ ศิริพงศ์ สัมพาทวิวัฒน์	89
MAT012	การประยุกต์ใช้พีแอลซีสำหรับการควบคุมเครื่องทดสอบแรงดึง เดชา สุขมา ประกวต หงษาชาติ เอกสิทธิ์ ชนินทรภูมิ และ ศิริพงศ์ สัมพาทวิวัฒน์	90
MAT013	การเตรียมวัสดุแผ่นวัสดุผสมที่เตรียมจากต้นธูปฤาษีและพอลิแลคติกแอซิด เกียรติชัย อ่ำคลองธรรม และ สเนตร มลทา	91

ผลกระทบของสภาวะการปั่นหลอมที่มีต่อรูปร่างหน้าตัด สมบัติการสะท้อนแสงและการ  
ติดสีของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด

**Effects of Melt Spinning Conditions on Cross-sectional shape, Lustern and  
Dyeing Properties of Poly(lactic acid) Fibers**

นรรจพร เรืองไพศาล<sup>1</sup> ณรงค์ชัย โอเจริญ<sup>1</sup> นที ศรีสวัสดิ<sup>1</sup> จุรีรัตน์ ประสาร<sup>2</sup> สรพงษ์ ภาวสุปรีย์<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

<sup>2</sup>ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ผ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี

Nanjaporn Rongpaisan<sup>1</sup> Narongchai Ocharoen<sup>1</sup> Natee Srisawat<sup>1</sup> Chureerat Prahsam<sup>2</sup>

Sorapong Pavasupree<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of  
Technology Thanyaburi, Pathumthani

<sup>2</sup>National Metal and Materials Technology Center, 114 Paholyothin Rd., Klong Luang, Pathumthani

\*E-mail: sorapongp@yahoo.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของสภาวะการปั่นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดด้วยกระบวนการปั่นหลอมต่อสมบัติด้าน  
การสะท้อนแสงและการติดสีของเส้นใยโดยใช้หัวฉีดเส้นใยที่มีหน้าตัดต่างกัน คือ แบบวงกลม (Circular) และแบบ  
สี่แฉก (4-lobed) ตัวแปรที่ทำการศึกษาคืออุณหภูมิในการปั่นรูป อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ และความเร็วในการ  
ม้วนเก็บเส้นใยที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าเส้นใยที่ปั่นรูปจากหัวฉีดเส้นใยหน้าตัดแบบวงกลมสามารถ  
รักษารูปร่างตามลักษณะเดิมของหัวฉีดได้ในขณะที่เส้นใยที่ปั่นรูปด้วยหัวฉีดแบบสี่แฉกจะปรากฏลักษณะหน้าตัด  
ของเส้นใยที่หลากหลายขึ้นอยู่กับสภาวะการปั่นหลอม จากการวิเคราะห์ค่าปัจจัยรูปร่าง (Shape factor) พบว่าตัว  
แปรที่ส่งผลต่อรูปร่างหน้าตัดของเส้นใยมากที่สุดคืออุณหภูมิ โดยเฉพาะเส้นใยที่ปั่นรูปด้วยหัวฉีดแบบสี่แฉก ที่  
อุณหภูมิการปั่นหลอม 220 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ 0.52 กรัม/รู/นาที และความเร็วในการม้วน  
เก็บ 500 เมตร/นาที พบว่าเส้นใยรูปร่างหน้าตัดแบบสี่แฉกที่ปั่นรูปได้มีค่าปัจจัยรูปร่างคล้ายกับหัวฉีดมากที่สุด ซึ่ง  
บ่งบอกว่าเส้นใยที่ได้สามารถรักษารูปร่างหน้าตัดแบบสี่แฉกของรูหัวฉีดไว้ได้ เส้นใยที่ได้มีสมบัติการสะท้อนแสงที่  
ดี เหมาะที่จะนำไปใช้งานสิ่งทอที่ต้องการผิวมันเงาได้

**คำหลัก** เส้นใยพอลิแลคติกแอซิด, การปั่นแบบหลอมเหลวขึ้นรูปเส้นใย, เส้นใยแบบมีรูปร่างหน้าตัด

**abstract**

This research aimed to study the effects of spinning conditions on fiber luster and dyeing properties of  
PLA fibers. PLA fibers were prepared by melt spinning process with two spinneret hole profiles- circular,  
and 4-lobed shapes. The studied spinning parameters included spinning temperatures, throughput rates,  
and fiber take up speeds. From results, circular PLA fibers could remain circular shapes resembling its  
original spinneret whereas 4-lobed PLA fibers exhibited variations in cross-sectional shapes with spinning  
conditions. The calculated shape factors indicated that spinning temperature was a major factor that  
determined PLA fiber shape. At spinning temperature: 220°C, throughput rate: 0.52 g/hole/min and take  
up speed: 500m/min, the 4-lobed PLA fibers with cross-sectional shape similar to that of original  
4-lobed orifice could be obtained. This spinning condition was therefore preferable to produce 4-lobed  
PLA fibers with good luster, which could give appearance feature in textile application.

**Keywords:** Poly(lactic acid) fibers, Fiber melt spinning, Cross-sectional fiber



## 1. บทนำ

พอลิแลคติกแอซิด หรือ polylactic acid (PLA) ถูกนำมาใช้งานเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากผลิตจากแลคติกแอซิดมอนอเมอร์ที่ได้รับจากแหล่งธรรมชาติ [1]. ในงานสิ่งทอได้มีความสนใจนำพอลิแลคติกแอซิดมาใช้งานในเชิงการค้าที่มากขึ้น เนื่องจากมีการปรับปรุงสมบัติบางประการให้สามารถใช้งานที่หลากหลายเพิ่มขึ้นเส้นใยแบบมีรูปร่างหน้าตัดเป็นที่รู้จักมากขึ้นในแง่ของการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยที่หลากหลายมากขึ้น เช่น พื้นที่ผิว, ความนุ่ม, การสะท้อนแสง เป็นต้น ยกตัวอย่างการใช้งาน ในเชิงพาณิชย์ของเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบมีร่องลึก(4-deep-groove) ซึ่งมีลักษณะร่องลึกบนเส้นใย ทาหน้าที่คล้ายกับหลอดแคป-ปิลารี กล่าวคือแสดงสมบัติการส่งผ่านความชื้นที่ดีเยี่ยมเมื่อไม่นานมานี้ยังถูกนำไปใช้ในงานแผ่นทึบสำหรับวิศวกรรมปลูกถ่ายเนื้อเยื่อที่เพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของเซลล์ได้อย่างดี [2-3]. ถึงแม้จะมีการนำเส้นใยแบบมีรูปร่างไปใช้งานที่มีสมบัติเด่นมากมายแต่ในแง่ของการระบายนการเตรียมเพื่อขึ้นรูปเส้นใยด้วยวิธีการปั่นแบบหลอมเหลวนั้นเป็นการยากที่จะคงรูปร่างหน้าตัดสุดท้ายของเส้นใยให้เหมือนกับหัวฉีดเส้นใยนั้นๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพอลิเมอร์ที่มีลักษณะการไหลแบบนิวโทเนียน ส่งผลให้เกิดการบวมตัวและความตึงผิวต่อพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลวทำให้หน้าตัดเปลี่ยนไปจากหัวฉีดเดิม [4-5]. โดยมีรายงานเกี่ยวกับการไหลของพอลิเมอร์ผ่านหัวฉีดเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบดาว ซึ่งวิเคราะห์ผลของรูปร่างโดยใช้โปรแกรมการจำลองไฮโดรแมคานิคอล [6]. พบว่าอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์เหลวขณะไหลผ่านหัวฉีดรูปดาวนั้นไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะมีค่ามากบริเวณตรงกลางของหัวฉีดรูปดาวซึ่งมีมุมมากที่สุด เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง มากกว่าบริเวณที่เป็นแขนทังสี่ตั้งนั้น ในจุดนี้จึงควรที่จะออกแบบหัวฉีดเส้นใยให้เหมาะสมกับอัตราความเครียดเฉือน เพื่อที่จะช่วยลด ปัญหาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเส้นใย

ในการศึกษานี้ ได้ทำการปั่นหลอมขึ้นรูปเส้นใยผ่านหัวฉีดที่มีหน้าตัดแบบวงกลมและแบบสี่แฉก ภายใต้สภาวะการปั่นหลอมที่แตกต่างกันดังนี้อุณหภูมิ, อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ และความเร็วในการม้วนเก็บเส้นใย

เพื่อที่จะวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์ปั่นหลอมต่างๆที่มีผลต่อรูปร่างหน้าตัดเส้นใย สมบัติด้านการสะท้อนแสง และการติดสีบนเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด

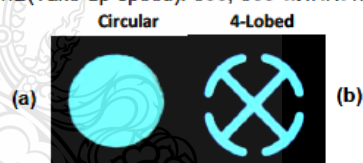
## 2. ขั้นตอนการดำเนินการ

### 2.1 วัสดุ (Materials)

- เม็ดชิพพอลิแลคติกแอซิด (PLA 3052D) (MFI = 14 g/10 min, density 1.24 g/cm<sup>3</sup>) NatureWorks<sup>®</sup> LLC
- ผงสีน้ำเงิน (Phthalocyanine จากบริษัท สาลีคัลเลอร์ จำกัด)

### 2.2 วิธีการทดลอง (Method)

เตรียมเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมสีและไม่ผสมสารใดๆ ด้วยหัวฉีดเส้นใยแบบวงกลม (Circular) และสี่แฉก (4-Lobed) (รูปที่1) โดยใช้เครื่องปั่นหลอมเส้นใยขนาดเล็ก (Randcastle melt spinning) โดยทำการตั้งค่าสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปดังนี้ อุณหภูมิปั่นหลอมเพื่อขึ้นรูปเส้นใย (Spinning Temperature): 220, 240, 260 องศาเซลเซียส, อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (Throughput rate): TP 0.34, 0.52 กรัม/รูนาที่ และความเร็วในการม้วนเก็บ (Take up speed): 300, 500 เมตร/นาที่



รูปที่1 แสดงภาพหัวฉีดเส้นใยแบบวงกลม(Circular): (a) และหัวฉีดแบบสี่แฉก(4-lobed): (b) ที่กำลังขยาย 40 เท่า

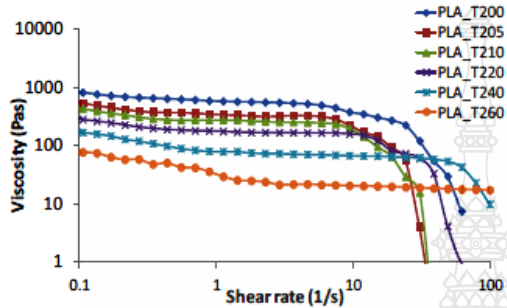
### 2.3 การวิเคราะห์ผล (Investigation)

- ทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยความร้อนด้วยเครื่องทดสอบ Thermogravimetric Analysis (TGA)
- ทดสอบการเปลี่ยนแปลงความหนืดของพอลิแลคติกแอซิดที่อุณหภูมิต่างๆกันคือ 200, 205, 210, 220, 240, 260°C (Rheometer Gemini 200HR nano)
- ทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง(Optical microscope) และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ เพื่อวัดค่าบ่งชี้รูปร่างของหน้าตัดเส้นใย (Compactness value) และขนาดพื้นที่ (area)
- เปรียบเทียบผลของรูปร่างหน้าตัดของเส้นใยผสมผงสีที่ขึ้นรูปได้ต่อการสะท้อนแสง และการติดสี (เครื่อง Datacolor 650 Spectrophotometer)

### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเมดิซิปพอลิแลคติกแอซิด (PLA)

##### 3.3.1 ผลของความหนืดที่อุณหภูมิต่างกัน (Viscosity)



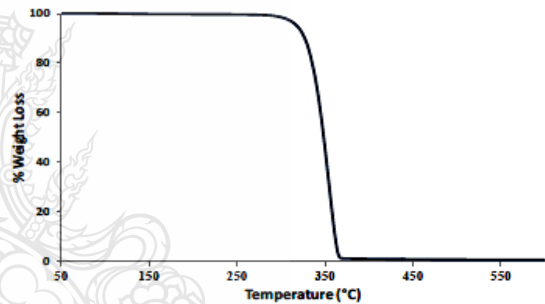
รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของพอลิแลคติกแอซิดต่ออัตราเฉือน ที่อุณหภูมิต่างๆกัน

ความหนืดไหลของ PLA ถูกวัดค่าการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่างกัน คือ 200, 205, 210, 220, 240, 260°C จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200-210°C ค่าความหนืด (ดังรูปที่ 2) ค่อนข้างสูง เมื่อขึ้นรูปเส้นใยที่อุณหภูมิตั้งกล่าวทำให้ไม่สามารถม้วนเก็บได้อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะหัวฉีดที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-lobed) อาจเนื่องมาจากความหนืดที่สูงเกินไปส่งผลให้เมื่อพอลิเมอร์ไหลผ่านหัวฉีดที่มีความซับซ้อนทำให้เกิดความดันที่สูง ส่งผลทำให้เส้นใยขาดเมื่อม้วนเก็บด้วยความเร็วสูง (500 m/min) [6]. ขณะเดียวกันเมื่อขึ้นรูปเส้นใย PLA ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 220-260°C พบว่าสามารถม้วนเก็บเส้นใยได้อย่างต่อเนื่องและเส้นใยไม่ขาดถึงแม้จะม้วนเก็บด้วยอัตราความเร็วสูง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงทำการเลือกช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูปเส้นใยที่ 220, 240, 260°C เพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบของความหนืดต่อการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหน้าตัดของเส้นใย โดยเมื่อพิจารณาจากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวพบว่า ค่าความหนืดของพอลิเมอร์ขณะไหลมีความแตกต่างอย่างชัดเจน โดยที่อุณหภูมิ 220°C พอลิเมอร์เหลวแสดงพฤติกรรมการไหลที่ยังคงเป็นซูโดพลาสติก (Pseudo plastic flow) คือ ที่อัตราเฉือนเพิ่มขึ้นความหนืดมีแนวโน้มลดลง ในทางกลับกันที่ 240 และ 260°C พบว่าที่อัตราการเฉือนที่เพิ่มขึ้น (0.1-100 1/s) ค่าความหนืดค่อนข้างคงที่ (ไม่ขึ้นอยู่กั

อัตราเฉือนซึ่งลักษณะการไหลแบบนี้พฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน) [7]. ซึ่งลักษณะการไหลที่แตกต่างกันนี้เอง เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหน้าตัดเส้นใยที่ขึ้นรูปได้

##### 3.3.2 ผลของความเสถียรต่อความร้อน (TGA)

เมื่อพิจารณาความเสถียรต่อความร้อนของ PLA แสดงดังรูปที่ 3 พบว่า PLA เริ่มเสื่อมสลายที่ 310°C จากนั้นน้ำหนักของสารลดลงอย่างรวดเร็ว ที่เสื่อมสลายอย่างสมบูรณ์ที่ 370°C ซึ่งจากผลการทดสอบ นี้ชี้ให้เห็นว่าในการศึกษานี้สามารถขึ้นรูปเส้นใย PLA ได้ ที่ช่วงอุณหภูมิ 220-260°C โดยที่ PLA ยังไม่เกิดการเสื่อมสลายได้ [8].



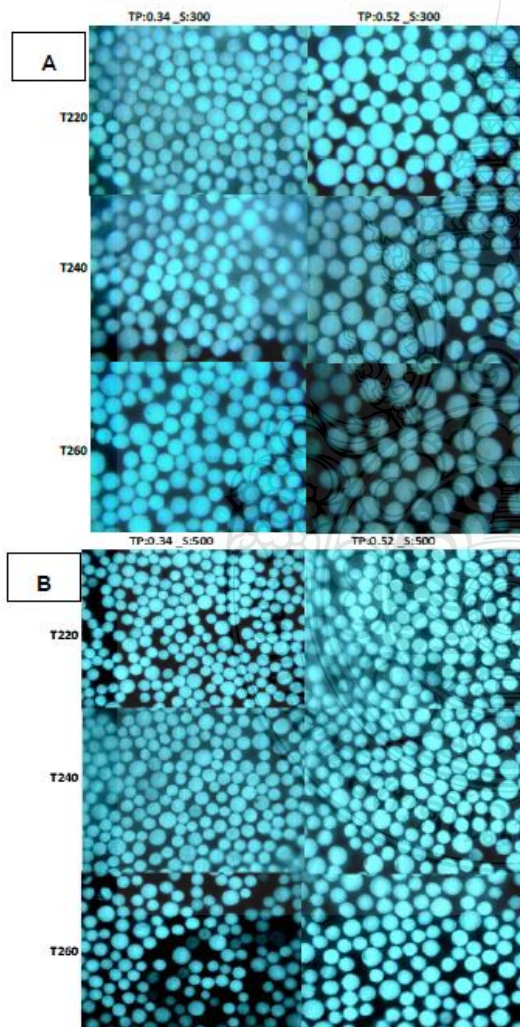
รูปที่ 3 แสดงความเสถียรต่อความร้อน (TGA) ของพอลิแลคติกแอซิดที่อุณหภูมิต่างๆกัน

#### 3.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยที่มีหน้าตัดต่างๆกัน

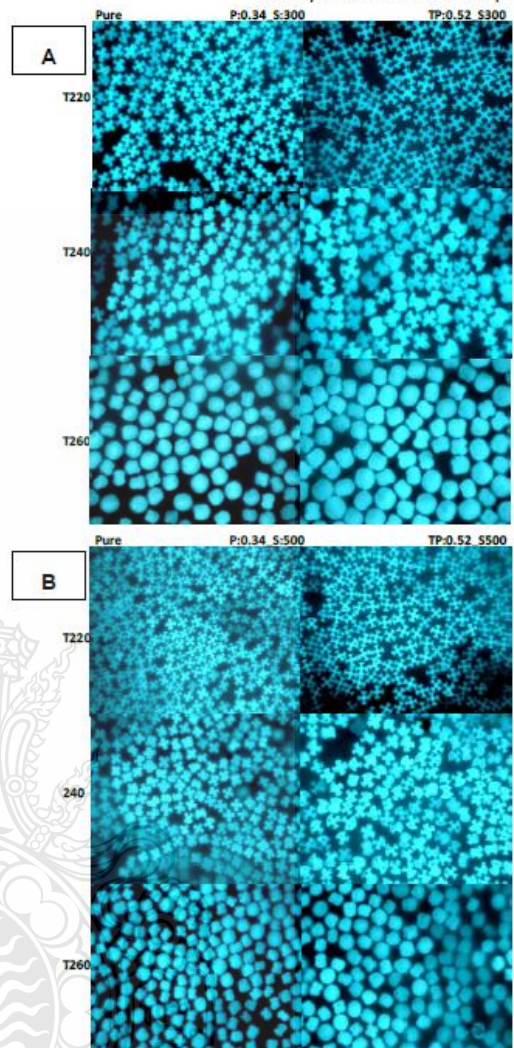
ผลการวิเคราะห์จากภาพตัดขวางของเส้นใยจะเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหน้าตัดเห็นได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-lobed) (รูปที่ 5) เมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดแบบวงกลม (circular) (รูปที่ 4) ที่ยังสามารถคงรูปร่างเดิมไว้ได้ในทุกๆสภาวะ พบว่าที่สภาวะการขึ้นรูปเส้นใยที่ต่างกัน ตัวแปรที่ส่งผลทำให้เส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-lobed) เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหน้าตัดมากที่สุดคือ อุณหภูมิการขึ้นรูปเส้นใย (Spinning temperature) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรอื่นๆ

เมื่อพิจารณาร่วมกับผลการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดเส้นใยแบบวงกลม (circular) และแบบสี่แฉก (4-lobed) (รูปที่ 6-7) พบว่าที่อุณหภูมิการขึ้นรูปเส้นใยเพิ่มขึ้น (220-260°C) เส้นใยทั้งสองหน้าตัดมีแนวโน้มที่

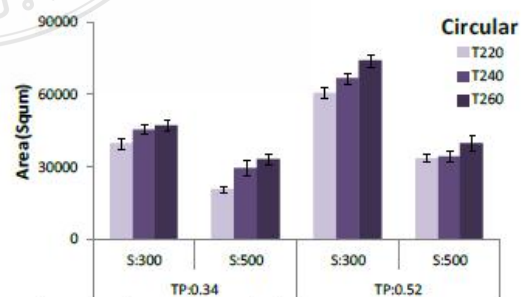
ขนาดพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-lobed) มีการเพิ่มขึ้นของขนาดค่อนข้างมากที่อุณหภูมิ 240-260°C และสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าร่องบนหน้าตัดเส้นใยหายไป ซึ่งสอดคล้องกับผลของการเปลี่ยนแปลงความหนืดของพอลิเมอร์หลอม ณ ช่วงอุณหภูมิดังกล่าว พอลิเมอร์หลอมจะเริ่มแสดงพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเรียน และส่งผลกระทบต่อความตึงผิวของพอลิเมอร์หลอมจึงทำให้แรงยึดติดระหว่างพอลิเมอร์หลอมกับผนังของหัวฉีดต่ำเกินไปไม่สามารถคงรูปร่างหน้าตัดตามหัวฉีดได้ [6].



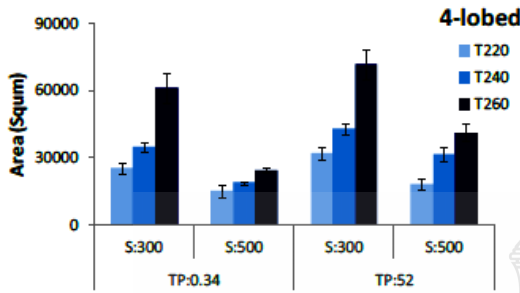
รูปที่ 4 ภาพเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (Circular) ที่ความเร็วหมุนเก็บ(S) 300 m/min: A และ 500 m/min: B ที่อุณหภูมิต่างกัน(T) (บน-ล่าง) และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min (ซ้าย-ขวา) ที่กำลังขยาย 40 เท่า



รูปที่ 5 ภาพเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ(S) 300 m/min: A และ 500 m/min: B ที่อุณหภูมิต่างกัน(T) (บน-ล่าง) และอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (TP) 0.34 และ 0.52 g/hole/min (ซ้าย-ขวา) ที่กำลังขยาย 40 เท่า



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัด(area) ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีหน้าตัดแบบ วงกลม (circular) ที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆกัน



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัด (area) ของพอลิแลคติกแอซิดที่หน้าตัดแบบสี่แฉก (4-Lobed) ที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆ

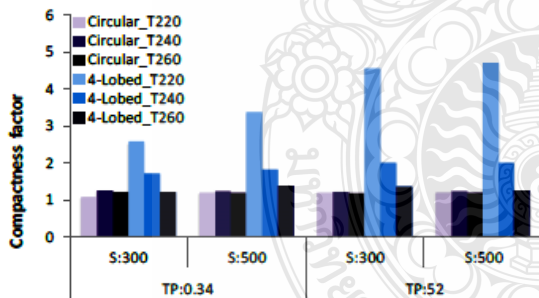
### 3.3 ค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัด (compactness factor)

$$compactness = \frac{perimeter^2}{4\pi a} \quad \text{สมการ: (1)}$$

**นิยาม** คือค่าบ่งชี้ถึงความเรียบหรือขรุขระของรูปร่างโดยสำหรับเส้นใยที่มีรูปร่างกลมค่านี้จะมีค่าต่ำสุด และค่านี้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีความขรุขระของขอบหรือมีพื้นที่ผิวมาก

ตารางที่ 2 แสดงค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัดของหัวฉีด

Spinneret orifice	Circular	4-Lobed
Compactness factor	1.12	12.36

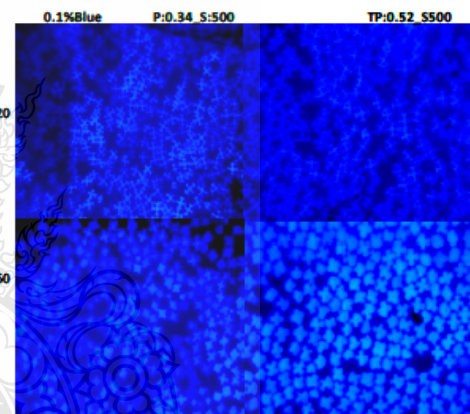


รูปที่ 8 แสดงค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัด(compactness factor) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆ

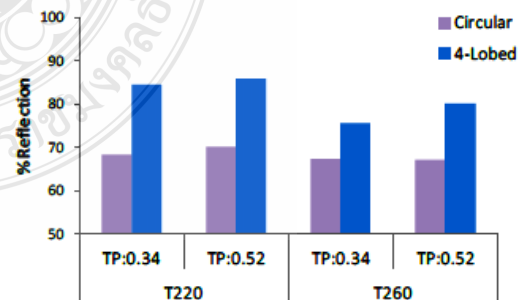
ผลจากการคำนวณค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัดเส้นใย(รูปที่ 8) ซึ่งคำนวณมาจากสูตรตั้งสมการที่ 1 พบว่าค่าบ่งชี้รูปร่างหน้าตัดของเส้นใยหน้าตัดแบบวงกลม (circular) มีค่าใกล้เคียงกับหัวฉีด (spinneret orifice) ที่ 1.12 (ตารางที่ 2) ทุกๆ สภาวะการขึ้นรูปซึ่งบ่งชี้ถึงหน้าตัดที่ยังคงรูปร่างกลมเหมือนกับหัวฉีด ในขณะที่เส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-lobed) แสดงค่าบ่งชี้รูปร่างที่มีค่าน้อยกว่าหัวฉีดเส้นใย (12.36) ค่อนข้างมาก และในแต่ละสภาวะการขึ้นรูปมีค่าแตกต่างกันไป (1- 4.7) โดยสังเกตได้ชัดเจนว่า ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 220°C จนถึง

260°C ค่าบ่งชี้รูปร่างมีแนวโน้มลดลงค่อนข้างมากจนเกือบเท่ากับ 1 นั้นหมายความว่ารูปร่างมีลักษณะเรียบและคล้ายวงกลม ดังรูปที่ 5 กล่าวคือร่องบนเส้นใยหายไปไม่เพียงแต่อุณหภูมิเท่านั้นที่ส่งผลต่อหน้าตัดเส้นใยแบบสี่แฉก(4-lobed) ยังพบว่าอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ที่ 0.52 g/hole/min แสดงผลบ่งชี้หน้าตัดที่ใกล้เคียงกับหัวฉีดมากกว่าที่ 0.34 g/hole/min เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วหมุนเก็บ ดังนั้นจึงสามารถนำค่าบ่งชี้รูปร่างมาใช้ในการตัดสินใจเลือกสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับเส้นใยแบบมีหน้าตัดได้ [5].

### 3.4 ผลของรูปร่างหน้าตัดของเส้นใยผสมผงสีที่ขึ้นรูปได้ต่อการสะท้อนแสง และการติดสี



รูปที่ 9 ภาพเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก(4-Lobed) ที่ความเร็วหมุนเก็บ(S) 500 m/min ที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆกัน ที่กำลังขยาย 40 เท่า





รูปที่ 10 แสดงค่าการสะท้อนแสงบนเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบวงกลม (circular) และสี่แฉก (4-lobed) ที่สภาวะต่างๆกัน

จากการทดสอบสมบัติด้านการสะท้อนแสงของเส้นใยพอลิแลคติกผสมผงสีน้ำเงิน 0.1% (รูปที่ 10) พบว่าเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก(4-lobed) (รูปที่ 9) แสดงค่าการสะท้อนแสงบนเส้นใยมากกว่าหน้าตัดแบบ

วงกลมในทุกๆสภาวะการขึ้นรูป โดยเฉพาะที่อุณหภูมิขึ้นรูปต่ำที่ 220 °C จะมีค่าการสะท้อนแสงสูงที่สุด ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหน้าตัดที่มีมุมของหัวฉีดมาก ทำให้การสะท้อนของแสงมีโอกาสที่จะสะท้อนกลับในทิศทางเดิมมากกว่าหน้าตัดที่มีลักษณะผิวเรียบโค้งแบบวงกลม [9] ในทางกลับเมื่อพิจารณาผลของค่าการติดสี (ตารางที่ 3) พบว่าเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบวงกลม(Circular)แสดงค่าการติดสีในทิศทางของสีน้ำเงิน (a\* และ b\*) และค่าความเข้มสี K/s มากกว่าแบบสี่แฉก(4-lobed) ซึ่งเป็นผลมาจากการสะท้อนแสงบนเส้นใยมาก การมองเห็นความเข้มสีจึงลดลง

ตารางที่ 3 แสดงค่าการติดสีบนเส้นใย (Dye-uniformity)

Profile	Condition TP: 0.52 Speed: 500	0.1%Blue	CIELAB			K/S at (λ,max: 600nm)
			L*	a*	b*	
	T220		77.26	-10.19	-13.91	0.435
	T260		74.98	-11.06	-15.03	0.5529
	T220		87.05	-7.05	-9.62	0.1315
	T260		82.57	-9.83	-13.7	0.2723

หมายเหตุ K/S แสดงค่าความเข้มสี (Color strength); ค่าสูงแสดงว่ามีสีเข้ม ค่าต่ำแสดงว่ามีสีอ่อน, L\* แสดงค่าความสว่างของสี (Lightness); ค่ามากแสดงว่ามีสีสว่างมาก, ค่า a\* แสดงความเป็นสีแดง (ค่าบวก) หรือสีเขียว (ค่าลบ) ค่า b\* แสดงความเป็นสีเหลือง (ค่าบวก) หรือสีน้ำเงิน (ค่าลบ)

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าสภาวะการขึ้นรูปเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีหน้าตัดต่างกัน ส่งผลต่อเส้นใยที่ขึ้นรูปโดยใช้หัวฉีดแบบสี่แฉก(4-lobed)มากกว่าหน้าตัดแบบวงกลม(Circular) ในทุกๆสภาวะ กล่าวคือเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ปรากฏรูปร่างหน้าตัดที่หลากหลาย โดยเฉพาะจากตัวแปรอุณหภูมิการขึ้นรูป จากค่าปัจจัยรูปร่าง (Shape factor) พบว่าที่อุณหภูมิการปั่นหลอม 220 °C อัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ 0.52 g/hole/min และความเร็วในการหมุนเก็บเส้นใย 500 m/min เส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉกมีรูปร่างคล้ายกับหัวฉีดมากที่สุด ที่สภาวะเดียวกันนี้พบว่า ค่าการสะท้อนแสงและการติดสีบนเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสี่แฉก (4-lobed) เป็นไปตามลักษณะเฉพาะของหัวฉีด ดังนั้นการเลือกสภาวะการขึ้นรูปเส้นใยแบบมีหน้าตัดที่เหมาะสม ทำให้เส้นใยที่ได้มีสมบัติการสะท้อนแสงที่ดี เหมาะที่จะนำไปใช้งานสิ่งทอที่ต้องการผิวมันเงาได้

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Lunt, J., Davie, S. 2005. Poly(lactic acid) fibers. NatureWorks LLC, USA and RS black burn, University of Leeds: 199-207.
- [2] Lu, Q., Simionescu, A., Vyavahare, N. 2005. Novel capillary channel fiber scaffolds for guided tissue engineering. Acta Biomaterialia: 607-613.
- [3] William, A., Haile, Bobby, Phillips, M. 1995. Deep grooved polyester fiber for wet lay applications. Tappi Journal: 139-142.
- [4] Donggang, Y. 2005. Fundamental study of the driving Mechanisms for cross-Section shape change in highly noncircular fiber spinning. The fiber society: 56-56
- [5] Kim, H., Chung, K., and Youn, J.R. 2000. Three dimensional FEM simulation for spinning of Non-circular fibers. Fibers and polymers: 37-44 .
- [6] Tsai, H. and lin, H. 2008. The elasticity of special-shaped fiber simulation by hydromechanical simulation software. H.C. Tsai, Institute of textile engineering, Feng chia University: 49-55.
- [7] Abhijit, D., Murali, J., Krishans., and Lumaer, P.B. 2010. Rheology of complex fluids. Springer, new York, Dordrecht Heidelberg, London: 3-35.
- [8] Li, Q. 2011. Biodegradation Study of Polymeric Material with Various Levels of Molecular Orientation Induced via Vibration Assisted Injection Molding. Lehigh University Bethlehem, Pennsylvania: 69-71
- [9] Liu, X and Fumei, W. 2012. Visible Light Shielding Performance of Fabrics with Non-Circular Cross Section Fiber. Journal of Engineered Fibers and Fabrics: 50-58

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวรรรจพร เรืองไพศาล  
วัน เดือน ปีเกิด 7 กรกฎาคม 2529  
ที่อยู่ 90/909 หมู่บ้านเดอะวิลล่ารัตนานิเบต ตำบลอิฐ อำเภอบางกร่าง  
จังหวัดนนทบุรี 11120

การศึกษา  
พ.ศ. 2551 ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งทอ  
แผนกการผลิตเส้นใยสังเคราะห์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เบอร์โทรศัพท์ 086-9020325

ประสบการณ์การทำงาน ผู้ช่วยนักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ  
(National Metals and Materials Technology Center: MTEC)  
พ.ศ. 2551-ปัจจุบัน

อีเมล nanjaprs@gmail.com

