

สมบัติของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่

PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE FROM  
BAMBOO CHARCOAL POWDER AND POLYLACTIC ACID

อนุพล พุ่มซ้อน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งทอ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


# สมบัติของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่


อนุพล พุ่มซ้อน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งทอ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


หัวข้อวิทยานิพนธ์      สมบัติของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่  
Properties of Polymer Composite from Bamboo Charcoal Powder  
and Polylactic Acid  
ชื่อ – นามสกุล      นายอนุพล พุดซ้อน  
สาขาวิชา      วิศวกรรมสิ่งทอ  
อาจารย์ที่ปรึกษา      อาจารย์นที ศรีสวัสดิ์, วท.ด.  
ปีการศึกษา      2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมนึก สังข์หนู, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ปิยะพร คามภีร์ภาพพันธ์, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์บดินทร์ ขวัญข้าว, Dr.rer.nat.)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์นที ศรีสวัสดิ์, วท.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)  
วันที่ 1 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2563

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่
ชื่อ-นามสกุล	นายอนุพล พุฒซ้อน
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์นที ศรีสวัสดิ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2562

## บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปเส้นใยและสมบัติของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ วัสดุดิบที่ใช้มี 3 ชนิด คือ พอลิแลคติกแอซิด (PLA), bamboo-charcoal polylactic compounds (bamboo-charcoal PLA), และ compatibilizer polylactic compounds (PE-g-MA PLA) จากนั้นนำมาผสมเพื่อดูความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปเส้นใย โดยกำหนดให้มีทั้งหมด 13 การทดลอง ทำการขึ้นรูปเส้นใยด้วยเครื่อง Single Screw Extruder โดยผ่านหัวสปินเนอร์เรท 24 รู อุณหภูมิที่ 230 องศาเซลเซียส ความเร็วสกรู 8 rpm ความเร็วการม้วน 400 (m/min)

ลักษณะการขึ้นรูป เส้นใยที่อัตราส่วนผสมของผงถ่านไม้ไผ่ 1% สามารถขึ้นรูปได้ต่อเนื่อง ส่วนเส้นใยที่อัตราส่วนผสมของผงถ่านไม้ไผ่ 3% สามารถขึ้นรูปได้แต่มีแนวโน้มว่าเส้นใยจะขาดเมื่อผ่านไปไม่กี่นาที และเส้นใยที่อัตราส่วนผสมของผงถ่านไม้ไผ่ 5% สามารถขึ้นรูปได้ แต่ได้เส้นใยที่ไม่ต่อเนื่องเนื่องจากเส้นใยขาดเมื่อฉีดผ่านหัวสปินเนอร์เรท

เส้นใยที่มีค่า Tensile strength สูงสุดคือเส้นใยที่มี bamboo charcoal 1% PE-g-MA 1.5% โดยมีค่าอยู่ที่ 30 MPa เนื่องจากการเติม Bamboo charcoal ทำให้ค่า Tensile strength ลดลง แต่เมื่อเติม PE-g-MA เป็นสารช่วยเพิ่มการยึดเกาะ PLA และ Bamboo charcoal ทำให้สมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เส้นใยที่มีค่า Sonic modulus สูงสุดคือเส้นใยที่มี bamboo charcoal 5% PE-g-MA 1.5% โดยมีค่าเท่ากับ 1.92 Km/sec เนื่องจาก เมื่อเราเติม PE-g-MA ทำให้ค่า Sonic modulus มีแนวโน้มสูงขึ้นเพราะ PE-g-MA เข้าไปช่วยทำให้ความหนาแน่นและการกระจายตัวของผงถ่านไม้ไผ่ใน เส้นใยเส้นใยที่มีค่า Moisture content ต่ำสุดคือเส้นใย bamboo charcoal 5% PE-g-MA 1.5% อยู่ที่ 0.37% จากการทดสอบสมบัติโดยรวมเส้นใยและความสามารถในการขึ้นรูป เส้นใยคือ bamboo charcoal 1% PE-g-MA 1.5 % เป็นเส้นใยที่เหมาะสมที่สุด

**คำสำคัญ:** พอลิแลคติกแอซิด ผงถ่านไม้ไผ่ พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรไรต์

<b>Thesis Title</b>	Properties of Polymer Composite from Bamboo Charcoal Powder and Polylactic Acid
<b>Name – Surname</b>	Mr. Anupon Putsont
<b>Program</b>	Textiles Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Mr. Natee Srisawat, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2019

## ABSTRACT

This research is to study feasibility of fiber forming and their properties using bamboo charcoal polylactic polymer compounds. The materials used in the experiments are polylactic virgin (PLA), bamboo-charcoal polylactic compounds (bamboo-charcoal PLA), and compatibilizer polylactic compounds (PE-g-MA PLA). The compound ratio between the three materials were altered to conduct 13 experiments to study feasibility of their fiber forming using single screw extruder machine with 24-holes spinneret, screw speed 8 rpm, temperature at 230°C, and winding speed 400 m/min.

The polymer compound that had the highest persistence extrusion is the PLA polymer compound with 1.0% of bamboo-charcoal. The fiber extrusion from the PLA polymer compounds with 3.0% of bamboo-charcoal had tendency to break after a few minute of the production. The PLA polymer compound with 5.0% of bamboo-charcoal faced difficulty of fiber breaking soon after emerge from the spinneret.

The compound fiber with the highest tensile strength property, 30 MPa, is the fiber with 1.0% bamboo charcoal and 1.5% PE-g-MA, due to the least percentage of bamboo-charcoal and the highest percentage of the compitibilizer. The compound fiber with the highest sonic modulus, 1.92Km/sec is the fiber with 5.0% bamboo charcoal and 1.5% PE-g-MA, due to bamboo-charcoal particles that thoroughly scattered in the fibers. On the other hand, the compound fiber with 5.0% bamboo charcoal and 1.5% PE-g-MA has the lowest moisture content, 0.37% by weight. The assumption of this research was to product the compound fiber with the highest feasibility and adequate properties, therefore, the fiber with 1.0% bamboo charcoal and 1.5% PE-g-MA is the most practicable.

**Keyword:** Polylactic Acid (PLA), bamboo charcoal powder, PE-g-MA

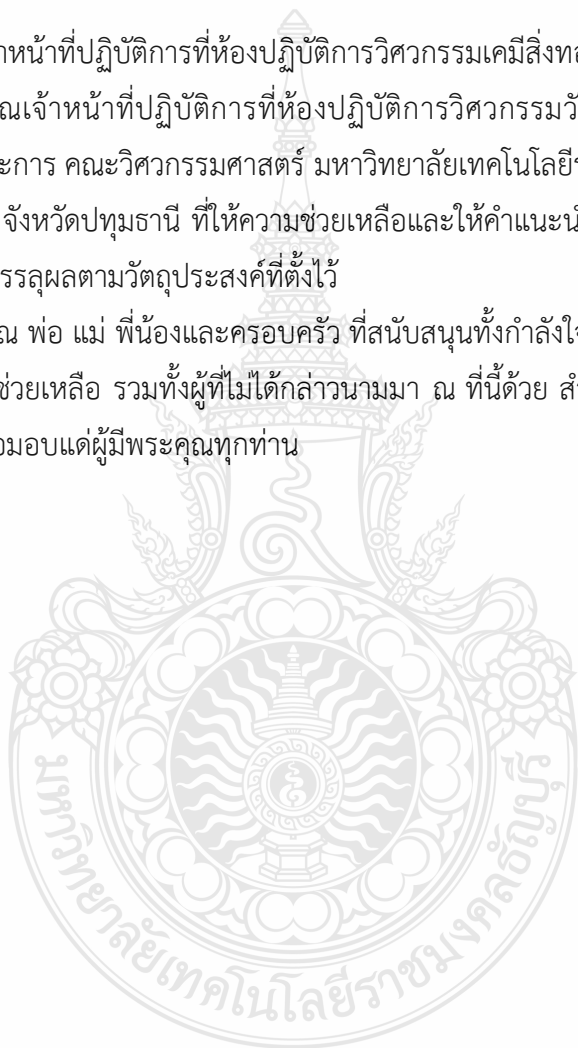
## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของ ดร.นที ศรีสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้เป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ-การผลิตเส้นใยสังเคราะห์ และขอขอบขอบขอบคุณเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้บรรลุผลตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ พี่น้องและครอบครัว ที่สนับสนุนทั้งกำลังใจและกำลังทรัพย์ทุกท่านที่มีส่วนให้ความสนับสนุนช่วยเหลือ รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ด้วย สำหรับคุณความดีอันเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อนุพล พุ่มซ้อน



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	13
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.2 พอลิแลคติกแอซิด.....	17
2.3 ถ่านไม้ไผ่.....	21
2.4 เส้นใย.....	24
2.5 สมบัติของเส้นใย.....	26
2.6 กระบวนการอัดรีดพอลิเมอร์.....	27
2.7 เทคนิคการปั่นเส้นใย.....	35
2.8 การปั่นแบบหลอมเหลว.....	36
2.9 การปั่นแบบเปียก.....	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ.....	42
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	44
3.3 วิธีดำเนินงาน.....	45
3.4 สถานที่ทำการศึกษา.....	66
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์.....	67

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1 การทดสอบค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม.....	67
4.2 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก.....	69
4.3 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง.....	72
4.4 ลักษณะเส้นใย.....	75
4.5 การทดสอบความต้านทานแรงดึงเส้นใย.....	76
4.6 การทดสอบค่าการเรียงตัวของโมเลกุลตามความยาวของเส้นใย.....	79
4.7 การทดสอบความชื้นของเส้นใย.....	81
4.8 การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ของเส้นใย.....	83
4.9 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	87
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	89
5.1 สรุปการวิจัย.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	91
บรรณานุกรม.....	92
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	95



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ชื่อทางการค้าของ PLA ตามบริษัทของผู้ผลิต.....	20
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของถ่านไม้ไผ่.....	23
ตารางที่ 2.3 ลักษณะของพลาสติก.....	28
ตารางที่ 2.4 Spinning Techniques.....	36
ตารางที่ 3.1 วิธีคำนวณทั้ง 13 ตัวอย่าง.....	48
ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการ Compound.....	49
ตารางที่ 3.3 แสดงวิธีการคำนวณทั้ง 13 ตัวอย่าง.....	55
ตารางที่ 3.4 สภาวะในการขึ้นรูปเส้นใย.....	55
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์.....	67
ตารางที่ 4.2 แสดงกลุ่มตัวอย่างผงถ่านไม้ไผ่.....	68
ตารางที่ 4.3 แสดงความต้านทานแรงกระแทก.....	70
ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราส่วนของขึ้นทดสอบ.....	72
ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราส่วนที่สามารถขึ้นรูปเส้นใยได้.....	76
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าการเรียงตัวของโมเลกุลตามความยาวของเส้นใย.....	79
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าทดสอบความชื้นของเส้นใย.....	81

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกรดแล็กติก.....	17
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการผลิตและการย่อยสลายของ PLA.....	19
รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตถ่านไม้ไผ่.....	21
รูปที่ 2.4 ผังกระบวนการ Carbonization.....	22
รูปที่ 2.5 ผังกระบวนการ Finishing process.....	22
รูปที่ 2.6 ลักษณะรูปพรุนของถ่านไม้ไผ่.....	23
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส.....	25
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของเอมิเซลลูโลส.....	25
รูปที่ 2.9 การแบ่งเครื่องเอ็กซ์ทรูด.....	29
รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว.....	30
รูปที่ 2.11 ลักษณะสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว.....	31
รูปที่ 2.12 ความดันของพลาสติกหลอม.....	31
รูปที่ 2.13 สกรูแบบสองชั้น.....	32
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างสกรูที่ใช้ในการผสม.....	32
รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางตะแกรงกรองแผ่นเบรกเกอร์.....	33
รูปที่ 2.16 ลักษณะของสปินเนอร์เร็ท.....	35
รูปที่ 2.17 Polymer in powdered of Chip.....	37
รูปที่ 2.18 Conventional Spinning plant.....	37
รูปที่ 2.19 Longitudinal Cross-Section of Spinneret Holes.....	38
รูปที่ 2.20 Spinneret Hole.....	38
รูปที่ 2.21 กระบวนการปั่นเปียก.....	39
รูปที่ 2.22 กระบวนการปั่นแห้ง.....	40
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนและการดำเนินงาน.....	44
รูปที่ 3.2 Masterbatch ผงถ่านไม้ไผ่ 20%.....	45
รูปที่ 3.3 ออบเม็ดพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	46
รูปที่ 3.4 พอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการขึ้นรูป.....	46
รูปที่ 3.5 PLA+(PE-g-MA) Masterbatch 50% w/w.....	47

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 ชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วน.....	48
รูปที่ 3.7 อ่างน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม.....	49
รูปที่ 3.8 การดึงเส้นและม้วนเก็บ.....	50
รูปที่ 3.9 พอลิเมอร์ผสมทั้ง 13 ตัวอย่าง.....	50
รูปที่ 3.10 การตัดพอลิเมอร์ผสมให้เป็นเม็ดเล็ก.....	51
รูปที่ 3.11 พอลิเมอร์ผสมทั้ง 13 ตัวอย่างที่ทำการตัด.....	51
รูปที่ 3.12 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบพอลิเมอร์ผสม.....	52
รูปที่ 3.13 แม่พิมพ์เข้าเครื่อง Compression Molding.....	52
รูปที่ 3.14 แกะขึ้นทดสอบจากแม่พิมพ์.....	53
รูปที่ 3.15 ขึ้นทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูป.....	53
รูปที่ 3.16 เตรียมการอบ PLA Masterbatch ถ่านไม้ไฟ และ Masterbatch PE-g-MA.....	54
รูปที่ 3.17 Fiber melt spinning system.....	56
รูปที่ 3.18 การขึ้นรูปเส้นใยอัดรีดผ่านสปินเนอร์เรท (spinneret) 24 holes.....	56
รูปที่ 3.19 เครื่อง Melt Flow Index.....	57
รูปที่ 3.20 เครื่อง Tensile Strength Testing Machine.....	58
รูปที่ 3.21 เครื่อง Izod Impact Testing Machine.....	59
รูปที่ 3.22 เครื่อง Tensile Strength Testing Machine.....	60
รูปที่ 3.23 การแยกเส้นใยไปติดกับแบบ (Template) .....	61
รูปที่ 3.24 เครื่อง Sonic Modulus Tester.....	62
รูปที่ 3.25 การทดสอบความชื้น (Moisture content) .....	63
รูปที่ 3.26 Microtome และ กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope, OM) .....	64
รูปที่ 3.27 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) .....	65
รูปที่ 4.1 การทดสอบดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ Melt Flow Rate.....	68
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่า MFR กับปริมาณ PE-g-MA.....	69
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบทดสอบการทนแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสม.....	70
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบทดสอบการทนแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสม.....	71
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสม.....	73

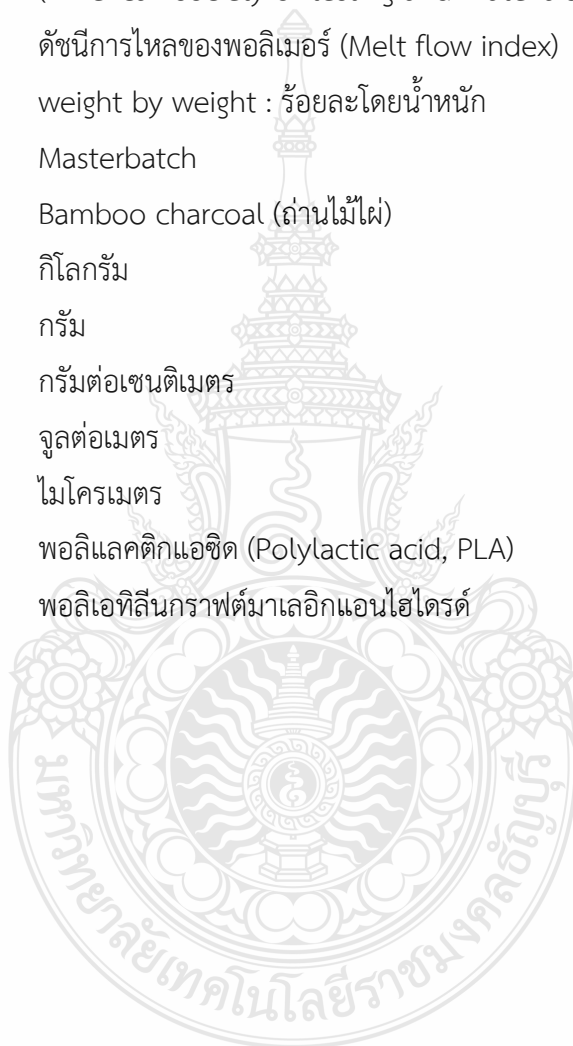
## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าความเครียดของพอลิเมอร์ผสม.....	73
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าการยืดตัวของพอลิเมอร์ผสม.....	74
รูปที่ 4.8 เส้นใยของพอลิเมอร์ผสม.....	75
รูปที่ 4.9 ค่า Tensile Strength ของเส้นใยที่มีส่วนผสมของผงถ่านไม้ไฟ 1%.....	77
รูปที่ 4.10 ค่า Tensile Strength ของเส้นใย ที่มีส่วนผสมของผงถ่านไม้ไฟ 3%.....	77
รูปที่ 4.11 ค่า Tensile Strength ของเส้นใย ที่มีส่วนผสมของผงถ่านไม้ไฟ 5%.....	78
รูปที่ 4.12 ค่า Sonic Velocity ของเส้นใย.....	80
รูปที่ 4.13 ค่า Sonic Modulus ของเส้นใย .....	80
รูปที่ 4.14 ค่าความชื้นของเส้นใย.....	82
รูปที่ 4.15 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดโดยไม่ผสมผงถ่านไม้ไฟ ที่ขนาดกล้อง 10X.....	83
รูปที่ 4.16 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไฟที่อัตราส่วน BC1%.....	84
รูปที่ 4.17 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไฟที่อัตราส่วน BC3 %.....	85
รูปที่ 4.17 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไฟที่อัตราส่วน BC5 %.....	86
รูปที่ 4.18 พอลิเมอร์ผสมและเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไฟ.....	88



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	มาตรฐานการทดสอบของประเทศสหรัฐอเมริกา (American society of testing and materials)
MFI	ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt flow index)
w/w	weight by weight : ร้อยละโดยน้ำหนัก
MB	Masterbatch
BC	Bamboo charcoal (ถ่านไม้ไผ่)
Kg	กิโลกรัม
g	กรัม
g/cm	กรัมต่อเซนติเมตร
J/m	จูลต่อเมตร
µm	ไมโครเมตร
PLA	พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA)
PE-g-MA	พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในชีวิตประจำวันพลาสติกถูกนำมาใช้งานในหลาย ๆ ด้านส่วนใหญ่เป็นพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมี (Petroleum based plastics) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น เกิดปัญหาขยะล้นเมือง ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกจึงสนใจที่จะนำพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ (Bioplastics) มาใช้ทดแทนพลาสติกทั่ว ๆ ไป เพื่อลดปัญหาดังกล่าว พอลิแลคติกแอซิด เป็นหนึ่งในพลาสติกชีวภาพที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพและสามารถผลิตได้จากผลผลิตทางการเกษตร เช่น ข้าวโพด และมันสำปะหลัง เป็นต้น อย่างไรก็ตามพอลิแลคติกแอซิดยังคงมีข้อด้อยในเรื่องสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างต่ำมีความเปราะและแตกหักง่ายจึงการนำพอลิแลคติกแอซิดไปผสมกับสารอื่น ๆ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังพบว่า มีการนิยมนำพอลิแลคติกแอซิดไปผสมหรือคอมพอสิต กับผงต่าง ๆ โดยเฉพาะผงจากธรรมชาติ เช่น ผงจากไม้ผงจากปาล์ม เป็นต้น ผงและสารที่เราสนใจนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ผงถ่านไม้ไฟ ชนิดบดละเอียด 300 mesh ที่มีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 85% ความชื้นน้อยกว่า 5% และ สารช่วยผสม คือ พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) ซึ่งเพิ่มสมบัติความยืดหยุ่นระหว่างพอลิเมอร์ที่มีความต่างชนิดกันได้ดี ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดการใช้ผงถ่านไม้ไฟ และพอลิเอทิลีนมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตให้ดีขึ้น

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมผงถ่านไม้ไฟ และพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์กับพอลิแลคติกแอซิด เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล และลักษณะผิวของเส้นใย นอกจากนี้ยังศึกษาปริมาณที่เหมาะสมที่ให้สมบัติเชิงกลสูงสุด และการขึ้นรูปเส้นใยของผงถ่านไม้ไฟและพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์อีกด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไฟ

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมผงถ่านไม้ไฟ

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ใช้เม็ดพอลิแลคติกแอซิด Ingeo Biopolymer 6100D, จาก Naturework Company

1.3.2 ใช้ผงถ่านไม้ไผ่ คัดขนาดที่ 300 mesh ยี่ห้อ บันตัน (Bunton) บริษัท ชาร์โคล โสมจำกัด

1.3.3 ใช้พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) เป็นสารช่วยความเข้ากันได้

1.3.4 ขึ้นรูปเส้นใยด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยว (Single screw extruder :ThermoHaake)

1.3.5 สมบัติของพอลิเมอร์

- ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (MFI)
- ค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ (Tensile strength)
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ (Impact strength)

1.3.6 สมบัติของเส้นใย

- ความแข็งแรงของเส้นใย (Tensile strength)
- ขนาดของเส้นใย (Diameter)
- ค่าการเรียงตัวของโมเลกุลตามความยาวของเส้นใย (Molecular orientation)
- สัณฐานวิทยาของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Morphological properties)

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีสมบัติดีขึ้น

1.4.2 ได้เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดไปให้นำใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น

1.4.3 ได้อัตราร้อยที่ผสมในการขึ้นรูปเส้นใย

1.4.4 สามารถเพิ่มมูลค่าของผงถ่านไม้ไผ่และพอลิแลคติกแอซิด

## บทที่ 2

### เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุปราณี และ ศิริเดช [1] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตชีวภาพที่ผลิตจากพอลิแลคติกแอซิดโดยมีเส้นใยสับปะรด (PALF) เป็นสารเสริมแรง เส้นใยสับปะรดที่ใช้สกัดได้จากใบสับปะรดด้วยวิธีเชิงกล (ใช้เครื่องชูด ใบ) ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพื้นผิวและสมบัติความทนต่อแรงดึงของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ ก่อนเตรียมคอมพอสิต เส้นใยสับปะรดจะถูกตัดให้มีความยาว ประมาณ 1-3 มม. และผสมกับพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) ในปริมาณเส้นใยร้อยละ 10-50 ก่อนที่จะขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบฉีด (Injection molding) การทดสอบแรงดึงของคอมพอสิตตามวิธีมาตรฐาน ASTM D638 พบว่าค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) ของคอมพอสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น โดยคอมพอสิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 50 มีค่าโมดูลัสของยัง เพิ่มขึ้นจาก PLA ร้อยละ 68 ส่วนคอมพอสิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 40 มีค่าโมดูลัสของยังเพิ่มขึ้น จาก PLA ร้อยละ 48 แต่มีค่าความหนืดขณะหลอม (Melt viscosity) ต่ำกว่าคอมพอสิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 50 นอกจากนี้ เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของ PLA กับเส้นใย งานวิจัยนี้ยังได้เติมสารคู่ควบ (Coupling agent) มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ร้อยละ 10 ลงในคอมพอสิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 40 ผลที่ได้พบว่าค่าโมดูลัสของยังของ คอมพอสิตเพิ่มจาก 3.8 เป็น 5.1 GPa หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 34

ธีราวัฒน์และคณะ [2] ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับผงถ่านไม้ไฟ ซึ่งในการศึกษาจะใช้วัสดุ 4 ชนิด คือ ผง PP (RPPP 11), เม็ด PP (500N), ผงถ่านไม้ต่ง,ผงถ่านไม้สีสุก จากนั้นนำถ่านทั้ง 2 ชนิด มาทำการบดด้วยครกและคัดขนาดให้ได้ 3 ขนาด (A,B,C) ด้วยเครื่องคัดแยกขนาด หลังจากนั้นนำผง PP (RPPP 11) มาผสมกับถ่านไม้ไฟทั้ง 2 ชนิด ชนิดละ 3 ขนาด จากนั้นนำไปคอมปาวด์เพื่อให้วัสดุผสมเข้ากัน ด้วยเครื่อง Single screw extrusions แล้วทำเป็นเม็ด Master batch 20% content ของผงถ่าน ต่อจากนั้นนำเม็ด Master batch ที่ได้มาผสมกับเม็ด PP (500N) ด้วยเครื่อง Single screw extrusions โดยมีการลดปริมาณของผงถ่านจาก 20% content ของผงถ่านให้เหลือปริมาณของผงถ่าน 0.5, 1, 2, 3% ของผงถ่านในเนื้อของพอลิเมอร์ PP โดยแบ่งการทดสอบ



เป็น 2 ลักษณะ คือ 1.การทดสอบเส้นใย 2.การทดสอบเม็ดพอลิเมอร์ (MFI, DSC, Impact Strength, Tensile Strength)

อริวัชร [3] งานวิจัยนี้ศึกษาความเสถียรต่อสภาพแวดล้อมของวัสดุคอมพอสิต พอลิแลคติกแอซิด ที่ผสมผงไม้ธรรมชาติ โดยใช้ผงไม้สนเป็นสารเสริมแรง โดยงานวิจัยนี้มีการปรับปรุง ผิวดมไม้ด้วยสารละลาย NaOH และมีการย้อมสีธรรมชาติทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ สีเหลืองจากแก่นขนุน, สีแดงจากแก่นไม้ฝาง และสีน้ำเงินจากคราม ผงไม้ทุกชนิดจะมีการปรับปรุงผิวดมด้วยสารเชื่อมประสาน 3-TEPA เพื่อเพิ่มความเข้ากันระหว่าง PLA และผงไม้สน จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน dog bone และจะนำวัสดุคอมพอสิตทั้งหมดไปผ่านการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน

กริชตฤณ และสมาน [4] ปริมาณพินธน์นี้ได้ทำการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่าง พอลิพรอพิลีนผสมปูนปลาสเตอร์ใน อัตราส่วน 5, 10, 15, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีการใช้ตัวเชื่อมประสาน PP-g-MA ในปริมาณ 3 และ 5 phr โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสอง ลูกกลิ้ง แล้วทำการทดสอบ สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมพอสิต ได้แก่ ทดสอบการทนต่อแรงดึง การทนต่อแรงดัดงอ การทนต่อแรงกระแทก และความแข็ง จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อทำการผสมปูนปลาสเตอร์ลงในพอลิพรอพิลีนส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยัง สัมมอดูลัสของการดัดงอ ความต้านทานแรงกระแทกและ ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นและสมบัติเชิงกลเหล่านี้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ตัวเชื่อมประสาน PP-g-MA ในส่วนของค่าความต้านทานต่อแรงดัดงอนั้นมีค่าสูงขึ้นเมื่อเติมปูนปลาสเตอร์ใน อัตราส่วน 5-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเติมปูนปลาสเตอร์ในปริมาณมากขึ้นนั้นผงปูนปลาสเตอร์ที่เติมเข้าไปจะมีการจับตัวกันเป็นก้อนจึงส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดัดงอมีค่าลดลง จากการทดลองครั้งนี้พบว่า การใช้ตัวเชื่อมประสาน PP-g-MA ในพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิพรอพิลีนและปูนปลาสเตอร์สามารถ ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุได้และเมื่อใช้ปริมาณ PP-g-MA ที่มากขึ้น ก็จะมีส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น ทั้งนี้เพราะตัวเชื่อมประสาน PP-g-MA ช่วยทำให้การจับตัวเป็นก้อนของผงปูนปลาสเตอร์น้อยลงนั่นเอง

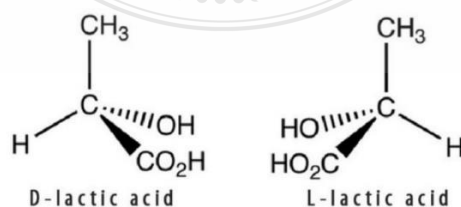
นายเจตริน, วสุนิสาและ ณีฎฎานันท์ [5] ในปริมาณพินธน์นี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการ เสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับ พอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) เป็นตัวเชื่อมประสาน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมกับแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 80/20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมกับพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ในอัตราส่วน 80/20, 20/80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโดยใช้พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณ 1 phr จากนั้น

ทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่อง Two-roll-mill แล้วนำไปขึ้นรูปโดยเครื่องอัดขึ้นรูปและนำไปตัด โดยเครื่องตัดจะได้ชิ้นงานทดสอบออกมา การทดสอบการเสื่อมสภาพชิ้นงานโดยการตากแดด ฝังดิน 5 เดือน นอกจากนี้ยังมีการแช่น้ำ 5, 15, 25 วัน กระบวนการเสื่อมสภาพสามารถตรวจสอบคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการทดสอบ SEM และการทดสอบคุณสมบัติทางกลรวมทั้ง การทดสอบความแข็ง การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบแรงดึง ผลของการทดสอบการตากแดดและการฝังดินชี้ให้เห็นว่าคุณสมบัติเชิงกลลดลงทั้งหมด เมื่อเทียบกับที่ไม่ได้ผ่านการเสื่อมสภาพ อย่างไรก็ตาม วิธีการตากแดดเป็นการเสื่อมสภาพที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับ PLA/LDPE ในกรณีของการฝังดินเป็นการเสื่อมสภาพที่ดีที่สุดสำหรับ LDPE/แป้งมันสำปะหลัง ตัวที่สามารถดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นกับระยะเวลาที่ต่อเนื่อง จะทำให้คุณสมบัติทางกลลดลงรวมทั้งคุณสมบัติแรงกระแทก และความแข็งด้วย

## 2.2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 พอลิแลคติกแอซิด (Poly lactic acid, PLA) [6]

เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งจัดอยู่ใน กลุ่มพอลิเอสเตอร์ที่มีสายโซ่ตรง (Aliphatic polyester) สังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก (Lactic acid) ซึ่งกรดแลคติกสามารถผลิตได้จากการหมัก แป้งหรือน้ำตาล ดังนั้นพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาล เป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวสาลี หรืออ้อย เริ่มแรกการนำ PLA ไปประยุกต์ใช้งานจะถูกจำกัดในวงแคบ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่สูง สังเคราะห์ได้ปริมาณน้อย และมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ภายหลังจากการใช้งาน ผลิตภัณฑ์จากพอลิแลคติกแอซิด สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เมื่อนำไปฝังกลบในดินโดยใช้ระยะเวลาอันสั้น เมื่อเทียบกับพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบจาก อุตสาหกรรมปิโตรเคมี แต่ในปัจจุบันนักวิจัยได้ค้นพบเทคนิคการผลิต PLA ที่สามารถทำให้ได้น้ำหนักโมเลกุลสูงและมีต้นทุนการผลิตที่เหมาะสม จึงส่งผลให้ PLA นั้นถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายมากขึ้น และ เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิด เป็นพอลิเมอร์ที่สลายตัวได้และผลิตได้จากวัตถุดิบที่สร้างทดแทนใหม่ได้ จึงคาดกันว่าการ ใช้วัสดุชนิดนี้จะช่วยลดปัญหาขยะลงได้ อีกทั้งถูกใช้เป็นวัสดุสำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคอื่นๆ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกรดแลคติก [6]

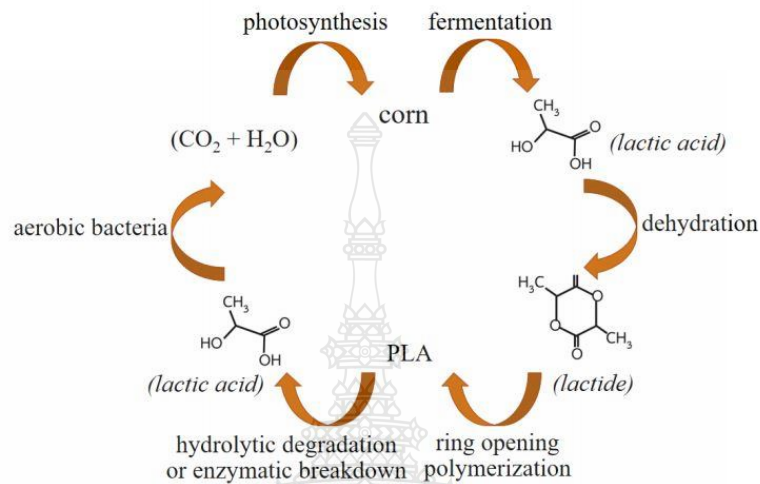
### 2.2.1.1 กระบวนการผลิตพอลิแลคติกแอซิด [6]

การผลิต PLA สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การผลิตโดยการหมักจากวัตถุดิบทางธรรมชาติและการผลิตโดยการสังเคราะห์โดยการผลิต PLA โดยวิธีการหมักจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคือ แป้งที่มาจากแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่เกิดขึ้นใหม่ได้ (Renewable resource) ได้แก่ พืชที่มีแป้งเป็น องค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด และ มันสำปะหลัง โดยมีกระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการบดหรือโม่พืชนั้นให้ ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นทำการย่อยแป้งให้ได้เป็น น้ำตาล และนำไปหมัก (Fermentation) ด้วยจุลินทรีย์เกิด เป็นกรดแลคติก (Lactic acid :  $C_3H_6O_3$ ) ซึ่งมีกรรมวิธีคล้ายกับการหมักเบียร์ จากนั้นนำกรดแลคติกที่ได้มาผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นสารใหม่ที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน เรียกว่า แลคไทด์ (Lactide) หลังจากนั้นนำมากลั่นในระบบสุญญากาศเพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ของแลคไทด์ที่เป็น สายยาวขึ้น เรียกว่า พอลิแลคติกแอซิด โดยคุณสมบัติของ PLA ขึ้นอยู่กับการกำหนดความยาวของสายพอลิเมอร์ ทั้งนี้ PLA สามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกได้เช่นเดียวกับเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียม

การผลิตพอลิแลคติกแอซิดกระทำ โดยสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิก (Azeotropic dehydrative condensation) ปฏิกิริยาการควบแน่นโดยตรง (Direct condensation polymerization) หรือการสังเคราะห์ผ่านการเกิดแลคไทด์ (Lactide formation) พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนัก โมเลกุลสูง (มากกว่า 100,000 ดาลตัน) ในเชิง พาณิชยสังเคราะห์ได้โดยผ่านการเปิดวง (Ring opening polymerization) ของแลคไทด์ การผลิต PLA จากปฏิกิริยาการควบแน่นเริ่มต้นจากการนำแลคติกแอซิดซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่คาร์บอกซิลิก ( $-CO_2H$ ) จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นได้ด้วยตัวเอง กระบวนการนี้ไปประกอบด้วย สารละลาย เช่น น้ำและตัวทำละลายออร์แกนิก เพื่อกำจัดน้ำที่เกิดจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน ปฏิกิริยา การควบแน่นโดยตรงประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การกำจัดน้ำออก (Removal of water) การควบแน่นของโอลิโกเมอร์ (Polycondensation of oligomer) และการควบแน่นแบบหลอมเหลว (Melt condensation) ซึ่งกระบวนการนี้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ น้ำ ซึ่งน้ำที่เกิดขึ้นจะกลับมาทำให้ PLA ที่ผลิตขึ้นมานั้นเสื่อมสภาพ

ถึงแม้ว่าพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จากทั้งสองกระบวนการนี้จะมีโครงสร้างและสมบัติต่าง ๆ เหมือนกันทุกประการ แต่ก็มีรายละเอียดและขั้นตอนของกระบวนการสังเคราะห์ที่ต่างกัน จึงเป็นที่มาของการเรียกชื่อพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการแรกมักจะเรียกว่า พอลิแลคติกแอซิด ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการนี้เริ่มต้นจากการใช้กรดแลคติกโดยตรงจนได้พอลิเมอร์ ในขั้นตอนสุดท้าย แต่ในกระบวนการที่สองจะมีการเปลี่ยนกรดแลคติกโดยปฏิกิริยาการรวมตัวของกรด

แลกติก 2 โมเลกุล แล้วเกิดเป็นสารประกอบแบบวงที่มีชื่อว่า แลกไทด์ (Lactide) ก่อน จากนั้นนำเอาวงแหวนแลกไทด์นี้มาสังเคราะห์เป็นสายโซ่ยาวพอลิเมอร์ในขั้นตอนต่อมาด้วยเหตุนี้จึงเรียกชื่อผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์จากกระบวนการนี้ว่า พอลิแลกไทด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการผลิตและการย่อยสลายของ PLA [6]

### 2.2.1.2 สมบัติของ PLA [3]

ความบริสุทธิ์เชิงแสง (Optical purity) ของ PLA ส่งผลอย่างมากต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว (Barrier properties) PLA ที่มีสัดส่วนของแอล-ไอโซเมอร์สูงกว่าร้อยละ 90 มีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีดี-ไอโซเมอร์ในองค์ประกอบเพิ่มขึ้น มีความบริสุทธิ์เชิงแสงต่ำลงและมี แนวโน้มเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) PLA มีความคงทนต่อการกระแทก (Impact strength) ต่ำ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PVC ที่ไม่มีการเติมสารเสริมแรงพลาสติก มีความแข็งความคงทนต่อแรงกระแทก และความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับ PET สัดส่วนของไอโซเมอร์ที่แตกต่างกันใน สายโซ่พอลิเมอร์ทำให้พอลิแลกติกแอซิดที่ สังเคราะห์ขึ้นนั้นมีสมบัติได้หลากหลาย จึง สามารถปรับให้รองรับความต้องการการใช้งานได้กว้างขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ผลิต จากวัตถุดิบที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) และ พอลิสไตรีน (PS) พอลิแลกติกแอซิดมีความใส และมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซใกล้เคียงกัน PLA มีชื่อทางเคมีคือ Poly(lactic acid), polylactic acid และ polylactide และชื่อทางการค้าของ PLA จะขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิต ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** ชื่อทางการค้า (Trade name) ของ PLA ตามบริษัทผู้ผลิต

Manufacturers	Trade name
NatureWorks LLC	NatureWorks® PLA, Ingeo® Fiber
Chronopol	Heplon™
PURAC	Purasorb®
Biomer	Biomer®
Hycail BV	Hycail®
Unitika Ltd.	Terramac®
Torey Industries, Inc.	Ecodear®
Mitsui Chemical, Inc.	Lacea®
Mitsubishi Plastic, Inc.	Ecoloju
Toyota Motor Corp. (TMC)	Toyota Eco-Plastics

2.2.1.3 ข้อดีของ PLA [3]

- 1.) มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-friendly) เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีในธรรมชาติซึ่งสามารถผลิตทดแทนได้
- 2.) มีความเข้ากันทางชีวภาพ (Biocompatibility) ปัจจุบันการนำ PLA มาใช้ในทางการแพทย์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต และไม่เป็นพิษ
- 3.) สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ (Processability) โดย PLA สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการที่ใช้กันทั่วไป เช่น การฉีดแบบ (Injection molding) การอัดแบบ (Compression molding) การอัดรีดฟิล์ม (film extrusion) การเป่าแบบ (Blow molding) และเทอร์โมฟอร์มม (Thermoforming) เป็นต้น
- 4.) ประหยัดพลังงานในการผลิต (Energy saving) โดยใช้พลังงานในการผลิต PLA น้อยกว่าการผลิตพลาสติกจากปิโตรเลียมประมาณ 20-25% และคาดว่าจะสามารถได้อีก 10% ในอนาคต

2.2.1.4 ข้อเสียของ PLA [3]

- 1.) PLA เป็นพอลิเมอร์ที่แข็งและเปราะ โดยมีความสามารถในการยืดตัวต่ำกว่า 10% ถึงแม้ว่ามีความทนต่อแรงดึงและมอดุลัสเทียบได้กับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตก็ตาม แต่มีสมบัติความเหนียวต่ำกว่า จึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน

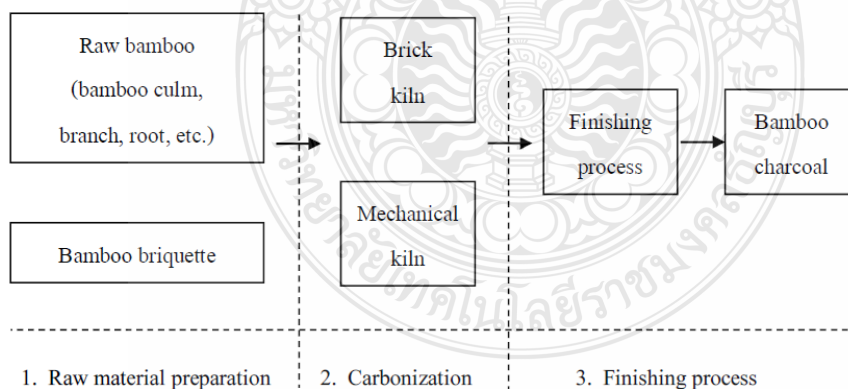
2.) PLA มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ไม่ชอบน้ำ และมีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับความเป็นผลึก น้ำหนักโมเลกุล การกระจายน้ำหนักโมเลกุล

3.) มีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) PLA เป็นวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ มีมุมสัมผัสกับน้ำประมาณ 80 องศาเซลเซียส การใช้งานของ PLA ในร่างกายของสิ่งมีชีวิตอาจก่อให้เกิดการอักเสบ เนื่องจากไม่เกิดการไหลเวียนของของเหลวภายในเซลล์

4.) การปรับปรุงพื้นผิวของ PLA ทำได้ยาก เนื่องจากผิว PLA มีความเฉื่อย PLA มีราคาแพงเมื่อเทียบกับพลาสติกทางการค้าทั่วไป ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งานเชิงพาณิชย์ จึงได้มีการนำ PLA ไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ที่มีราคาต่ำกว่า เพื่อปรับปรุงสมบัติและลดต้นทุนการผลิต

### 2.2.2 ถ่านไม้ไผ่ (Bamboo charcoal) [7]

ถ่านไม้ไผ่ประกอบไปด้วยแร่ธาตุและสารต่าง ๆ เมื่อนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงในรูปของถ่าน โดยนำไปเผา ในขณะที่เผาไหม้ส่วนประกอบของแร่ธาตุและ สารต่าง ๆ จะระเหยออกมาในรูปแบบของไอ ร้อนและกลิ่น ถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านกรรมวิธีการผลิตด้วยอุณหภูมิภายในเตาสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเผาประมาณ 8 ชั่วโมง ถ่านไม้ไผ่มีสมบัติในการดูดซับกลิ่น ความชื้น สารพิษ ช่วยฟอกอากาศ และ กำจัดแบคทีเรีย ช่วยปลดปล่อยประจุลบและอินฟราเรดคลื่นยาว มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำไม่เกิน 100 โอห์ม และมีคาร์บอนคงตัวสูงมากกว่าร้อยละ 85 โดยผ่านกรรมวิธีการผลิตถ่านไม้ไผ่แสดงดังรูปที่ 2.3

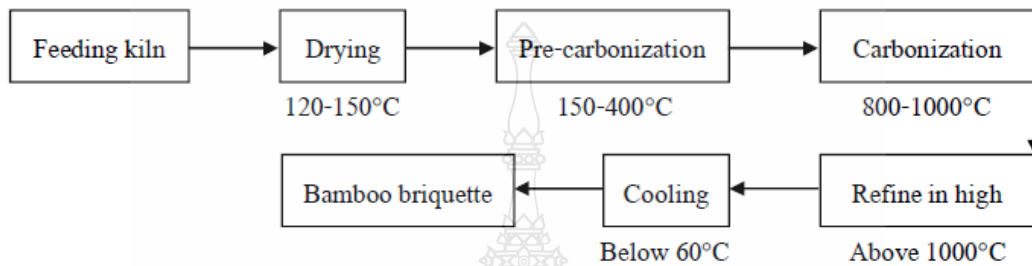


## รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตถ่านไม้ไผ่ [7]

### 2.2.2.1 กระบวนการผลิตถ่านไม้ไผ่ [7]

ได้แบ่งกระบวนการผลิตถ่านไม้ไผ่ออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ Raw material

preparation เป็นการเตรียมวัตถุดิบใน โดยวัตถุดิบที่ใช้จะใช้ส่วนที่เป็นลำต้น กิ่ง หรือรากของต้นไม้ที่มีอายุ 4 ปี ขึ้นไป โดยนำไปอบให้ปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 15-20 ขั้นตอน Carbonization เป็นขั้นตอนในการนำไม้ไฟที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดคาร์บอนซึ่งกระบวนการทำ Carbonization ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนผังกระบวนการ Carbonization [7]

Finishing process เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการทำถ่านไม้ไฟโดยแสดงขั้นตอนดังรูปที่ 2.5

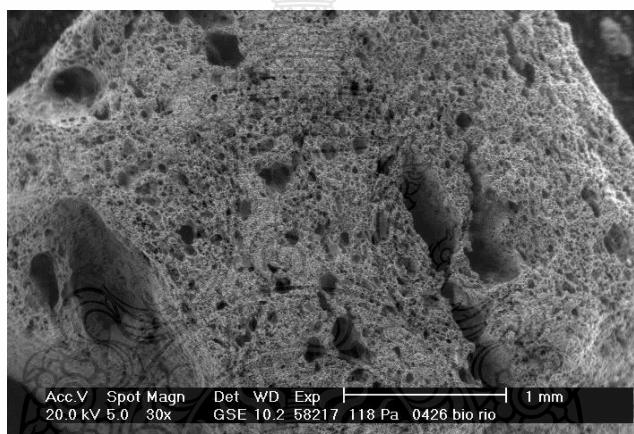


รูปที่ 2.5 แผนผังกระบวนการ Finishing process [7]

โดยถ่านที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีลักษณะพิเศษ คือ มีรูพรุนสูง หากนำมาแผ่กระจายออกเป็นพื้นที่จะได้พื้นที่มากถึง 300-700 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถ้าเป็นถ่านไม้ทั่วไป จะได้พื้นที่ประมาณ 50 ตารางเมตรต่อกรัม ถ่านไม้ไฟจึงมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอน และไนโตรเจนได้สูงมาก และถ่านไม้ไฟจึงเหมาะสมในการนำมาบำบัดน้ำเสีย ซึ่งองค์ประกอบของถ่านไม้ไฟแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของถ่านไม้ไผ่ [7]

ชนิดไม้	อายุ	ร้อยละความชื้น	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
			เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว
ไม้ตรง	1 ปี	3.89	9.52	61.33	29.15
	2 ปี	2.22	10.00	57.35	32.65
	3 ปี	3.61	6.92	52.41	40.67
ไม้หมาจู	1 ปี	4.27	9.15	54.73	36.12
	2 ปี	6.64	7.02	40.70	52.28
	3 ปี	5.2	9.36	48.98	41.66



รูปที่ 2.6 ลักษณะรูพรุนของถ่านไม้ไผ่ [8]

### 2.2.3 ประโยชน์ของถ่านไม้ไผ่ [8]

#### 2.2.3.1 ประโยชน์จากรูพรุนในถ่านไม้ไผ่

ถ่านไม้ไผ่ มีความสามารถในการดูดซับกลิ่นได้ดี เนื่องจาก โครงสร้างของ ถ่านไม้ไผ่ มีลักษณะเป็นรูพรุนเล็ก ๆ มากมาย โดยกลิ่นเหม็นอับต่าง ๆ จะแทรกเข้าไปในรูพรุนเหล่านี้ ทำให้เกิดการดูดซับกลิ่นเหล่านั้นไว้ตามผนังและในรูพรุน หากถ่านมีรูพรุนมาก ๆ ก็จะทำให้ดูดซับกลิ่น ได้มากตามไปด้วย ดังนั้น ลักษณะพิเศษของถ่านไม้ไผ่ที่มีรูพรุนมากกว่าถ่านไม้ชนิดอื่น ๆ ถึง 10 เท่า จึง ทำให้ถ่านไม้ไผ่มีความสามารถในการดูดกลิ่นไม่พึงประสงค์ต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี



### 2.2.3.2 ถ่านไม้ไฟสำหรับดูดซับกลิ่น

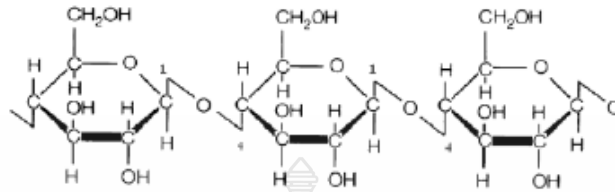
ใช้ดูดซับกลิ่นในอากาศ เช่น ตู้เสื้อผ้า รองเท้า ตู้เย็น รถยนต์ ฯลฯ ทำได้โดยการนำผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากถ่านไม้ไฟ เช่น แจกันถ่านไม้ไฟหรือ ตะกร้าถ่านไม้ไฟ มาตั้งไว้ในบริเวณที่มีกลิ่นอับชื้น ถ่านไม้ไฟจะช่วยดูดซับกลิ่นอับ เข้าไปไว้ในตัวถ่านไม้ไฟ และนำถ่านไม้ไฟที่ผ่านการใช้งานแล้วมาตั้งตากแดด ถ่านไม้ไฟจะสามารถนำกลับไปใช้งานใหม่ได้เหมือนเดิม

### 2.2.4 เส้นใย [9]

เส้นใย หมายถึง วัสดุหรือสารใด ๆ ทั้งที่เกิดจากธรรมชาติหรือมนุษย์สร้างขึ้น มีอัตราส่วน ระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) เท่ากับหรือมากกว่า 100 สามารถแบ่งได้ตาม แหล่งกำเนิดของเส้นใยออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ เส้นใยธรรมชาติและเส้นใยประดิษฐ์

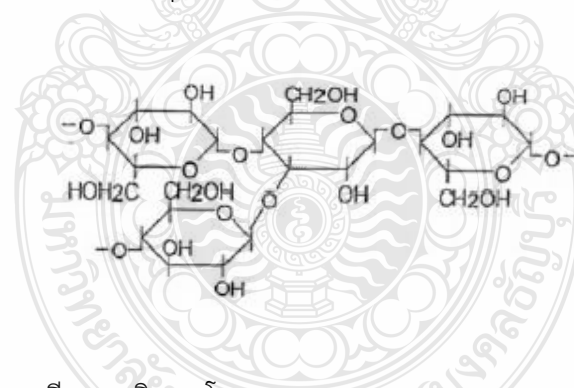
#### 2.2.4.1 เส้นใยจากธรรมชาติ (Natural fibers) เส้นใยธรรมชาติเป็นอินทรีย์วัตถุที่สำคัญ ที่หาได้ง่ายจากธรรมชาติ ได้จากพืช สัตว์ หรือ ธาตุ มีปริมาณมากและสามารถเกิดขึ้นได้ใหม่เรื่อยๆ เส้นใยธรรมชาติมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ สามารถนำมาทำประโยชน์ในการทำคอมพอสิต (Composite) มีประโยชน์อย่างมากต่อการเสริมประสิทธิภาพและความแข็งแรงของพอลิเมอร์ เส้นใยธรรมชาติ สามารถแบ่งได้เป็นเส้นใยจากพืช ได้แก่ เส้นใยจากเซลลูโลส เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลสซึ่งได้จากส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ป่าน ปอ ลินิน ไยสับปะรด ไยมะพร้าว ฝ้าย นุ่น เป็นต้น เส้นใยจากสัตว์ ได้แก่ เส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ (Wool) ไหม (Silk) ผม (Hair) เล็บ เขา ไยไหม เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้ มีสมบัติ คือ เมื่อเปียกน้ำ ความเหนียวและความ แข็งแรงจะลดลงถ้าสัมผัสแสงแดดนานๆ จะสลายตัวเส้นใยจากสินแร่ เช่น แร่ใยหิน (Asbestos) ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนไฟ ไม่นำไฟฟ้าเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืชส่วนใหญ่มีโครงสร้างและองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญ คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) เส้นใยธรรมชาติจากพืชทุกชนิดจัดเป็นเส้นใยประเภทเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบด้วยธาตุหลัก คือ คาร์บอน 44.4% ไฮโดรเจน 6.2% และออกซิเจน 49.4% มีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยขั้นพื้นฐานเรียกว่า Anhydro-d-Glucose ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub> ยึดเกาะด้วย 1, 4-B-D-Anhydroglucosidic Bonding ต่อกันเป็นลูกโซ่ โมเลกุลยาว แต่ละหน่วยของกลูโคส ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทั้งหมด 3 หมู่ด้วยกัน ซึ่งเหมือนกับโครงสร้างของน้ำตาลทั่วไป แต่เนื่องจากโมเลกุลต่อกันยาวเป็นลูกโซ่ทำให้ไม่สามารถละลายน้ำได้เหมือนกับที่เกิดขึ้นกับน้ำตาล โครงสร้างทางเคมีนี้นับว่ามีบทบาทอย่างยิ่งต่อการกำหนดสมบัติของเส้นใย และลักษณะของการเรียงตัวเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาว จะทำให้มีความแข็งแรงสูงไปด้วย เซลลูโลสไม่ละลายน้ำแต่สามารถละลายได้ในกรดเข้มข้น และถ้ามีความเข้มข้นของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนืดของ เซลลูโลส

เพิ่มขึ้นตามไปด้วย และส่วนใหญ่จะมีการดูดซับความชื้นโดยปริมาณความชื้นที่เซลลูโลส ดูดซับมีผลต่อสมบัติกายภาพบางประการของเส้นใย เช่น เมื่อความชื้นสูงเส้นใยจะมีค่าทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น เป็นต้น



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ซึ่งคล้ายกับเซลลูโลส มีสูตรทางเคมี คือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  เฮมิเซลลูโลสสามารถพบได้ในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่ กับสารประกอบอื่น ๆ เช่น ลิกนินและเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสจะมีโครงสร้างแบบบอสัญฐาน ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยและถูกไฮโดรไลซิสได้ง่ายในกรดเจือจาง มีสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ คือมีความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity) และสามารถแลกเปลี่ยนแคทไอออน (Cation exchange) ได้ในกระเพาะอาหารและลำไส้ของมนุษย์



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส

2.2.4.2 เส้นใยสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น เป็นเส้นใยที่ได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ ประกอบด้วยโมเลกุลที่การเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบ แบ่งเป็น 4 ประเภท เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เป็นเส้นใยที่นิยมใช้ มีชื่อทางการค้าว่า ดาครอนหรือโทเรเททรอน ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนไกลคอลกับไดเมทิลเทเรพทาเรต ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น มีสมบัติทนความร้อนและแสงแดด ทนสารเคมี ไม่ยับ ซักแล้วไม่ต้องรีด เส้นใยพอลิเอไมด์ เช่น ไนลอน (Nylon) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น ไนลอน 6,6 ไนลอน 6,10 ไนลอน 6 ซึ่งตัวเลขที่เขียนกำกับ

หลังชื่อจะแสดงจำนวนคาร์บอนอะตอมในมอนอเมอร์ของเอมีนและกรดคาร์บอกซิลิก ไนลอนจัดเป็นพวกเทอร์โมพลาสติก มีความแข็งมากกว่าพอลิเมอร์แบบเติมชนิดอื่น เป็นสารที่ติดไฟยาก ประโยชน์ของไนลอน ใช้ในการทำเสื้อผ้า ถุงเท้า ถุงน่อง ขนแปรงต่างๆ สายกีตาร์ สายเอ็น ไม้แร็กเก็ต เป็นต้น เส้นใยอะคริลิก เช่น ออร์ลีใช้ในการทำเสื้อผ้า ผ่านวม ผ้าขนแกะเทียม ร่มชายหาด หลังคากันแดด ผ้าม่าน พรหม เป็นต้น เซลลูโลสอะซีเตต เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากการใช้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติกเข้มข้น โดยมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ประโยชน์จากเซลลูโลสอะซีเตต เช่น ผลิตเป็นเส้นใยอาร์แนล 60 ผลิตเป็นแผ่นพลาสติกที่ใช้ทำแผงสวิทช์และหุ้มสายไฟ

#### 2.2.5 สมบัติของเส้นใย [9]

โครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยมีทั้งชนิดสั้นและยาว ซึ่งความยาวของเส้นใยจะมีผลต่อสมบัติและการนำไปใช้งาน ลักษณะของเส้นใยสั้นจะเป็นเส้นใยที่ความยาวอยู่ระหว่าง 2-46 เซนติเมตร หรือ 18 นิ้ว เส้นใยธรรมชาติทั้งหมดยกเว้นไหมเป็นเส้นใยสั้น ส่วนเส้นใยสั้นหรือโครงสร้างทางสัณฐาน (Morphology) ของเส้นใยสามารถสังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์ ที่มีกำลังขยาย 250- 1000 เท่า โครงสร้างทางกายภาพนั้นครอบคลุมถึง ความยาว ขนาดหรือเส้นผ่านศูนย์กลาง รูปร่างภาคตัดขวาง (Cross sectional shape) รูปร่างของผิวเส้นใย และความหยักของเส้นใยที่มาจาก เส้นใยประดิษฐ์มักจะทำเป็นเส้นยาวก่อนแล้วค่อยตัดเป็นเส้นใยสั้นตามกำหนด เส้นใยยาวส่วนใหญ่ จะเป็นเส้นใยประดิษฐ์ ยกเว้นไหมซึ่งเป็นเส้นใยยาวที่มาจากธรรมชาติ เส้นใยยาวอาจเป็นชนิดเส้นยาวเดี่ยว (Monofilament) ที่มีเส้นใยเพียงเส้นเดียว หรือเส้นใยยาวกลุ่ม (Multi-filament) ซึ่งจะมีเส้นใยมากกว่า 1 เส้นรวมอยู่ด้วยกันตลอดความยาวขนาดของเส้นใย เส้นใยที่มีขนาดใหญ่จะให้ความรู้สึกที่หยابและแข็ง แต่ในขณะเดียวกันก็ให้ความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยชนิดเดียวกันที่มีขนาดเล็กกว่า ขนาดของเส้นใยจึงมีผลต่อสมรรถนะการใช้งานและสมบัติทางผิวสัมผัส เส้นใยธรรมชาตินั้นมักมีขนาดไม่สม่ำเสมอ คุณภาพของเส้นใยธรรมชาติมักจะวัดจากความละเอียดของเส้นใย เส้นใยที่มีความละเอียด (ขนาดเล็ก) จะมีคุณภาพที่ดีกว่า ส่วนเส้นใยประดิษฐ์ขนาดของเส้นใยจะขึ้นอยู่กับปัจจัย หลายอย่าง เช่น ขนาดของรูในหัวฉีด การดึงยึดขณะที่ปั่นเส้นใยและหลังการปั่นเส้นใย รวมไปถึงปริมาณและความเร็วของการอัดน้ำพลาสติกผ่านหัวฉีดในกระบวนการปั่นเส้นใย เส้นใยประดิษฐ์สามารถควบคุมความสม่ำเสมอของเส้นใยได้ดีกว่าเส้นใยธรรมชาติ แต่ก็ยังมีส่วนที่ไม่สม่ำเสมอบ้าง เนื่องจากความไม่คงที่ (Irregularity) ของกระบวนการผลิตรูปร่างหน้าตัดขวางของเส้นใย เส้นใยมีรูปร่างหน้าตัดที่หลากหลาย เช่น วงกลมสามเหลี่ยม ทรงคล้ายกระดูก (Dog bone) ทรงรูปถั่ว (Bean-shaped) เป็นต้น รูปร่างหน้าตัดขวางของ เส้นใยมีผลต่อความเป็นมันวาวและสมบัติต่อผิวสัมผัส ความแตกต่างของรูปร่างหน้าตัดขวางของ เส้นใยธรรมชาติ เกิดจากลักษณะการสร้างเซลลูโลสในขณะที่พืชเจริญเติบโต







ส่วนเส้นใยประดิษฐ์ รูปร่างหน้าตัดของเส้นใยขึ้นอยู่กับรูปร่างของรูในหัวฉีดตอค์ประกอบทางเคมีและการเรียงตัวของโมเลกุล เส้นใยประกอบด้วยโมเลกุลจำนวนมาก โมเลกุลเหล่านี้มีลักษณะเป็นเส้นยาว เรียกว่า พอลิเมอร์ ที่เกิดจากการเรียงตัวของหน่วย โมเลกุลเล็ก ๆ คือ มอนอเมอร์และเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมีด้วยกระบวนการสังเคราะห์ที่เรียกว่า พอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ขนาดของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับความยาวของโมเลกุลซึ่งบอกได้ จากจำนวนของมอนอเมอร์ที่อยู่ในพอลิเมอร์นั้น พอลิเมอร์ที่มีเส้นโมเลกุลยาวจะมีน้ำหนักโมเลกุล มากกว่าพอลิเมอร์ที่มีเส้นโมเลกุลสั้น เนื่องจากจำนวนมอนอเมอร์ที่มากกว่านั่นเองซึ่งจะมีผลต่อ ความแข็งแรงของเส้นใยที่พอลิเมอร์นั้นเป็นองค์ประกอบอยู่ โมเลกุลหรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในเส้นใย จะมีการเรียงตัวแตกต่างกัน เมื่อแต่ละโมเลกุลมีการเรียงตัวอย่างไร้ทิศทาง ก็จะทำให้เส้นใยบริเวณ นั้นมีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ส่วนในบริเวณที่โมเลกุลมีการเรียงซ้อนกันอย่างเป็น ระเบียบก็จะเป็นผลึกเกิดขึ้น เส้นใยที่มีความเป็นผลึกมากก็จะมี ความแข็งแรงมากกว่าเส้นใย ที่มีความเป็นผลึกน้อย การจัดเรียงตัวโมเลกุลที่อยู่ในทิศทางที่ขนานกับ แกนตามความยาวของเส้นใย ก็จะช่วยทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงมาก เนื่องจากโมเลกุลเรียงตัวในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำต่อเส้นใย

#### 2.2.6 กระบวนการอัดรีดพอลิเมอร์ (Extrusion processes) [10]

การเอ็กซ์ทรูดเป็นกระบวนการแปรรูปหลักของอุตสาหกรรมพลาสติกชนิดหนึ่ง โดยทั่วไป จะนิยามกระบวนการแปรรูปชนิดนี้ว่า การทำให้วัสดุมีรูปร่างตามที่ต้องการโดยการอัดพลาสติก หลอมไหลผ่านหัวตายที่มีรูปร่างที่เหมาะสมการแปรรูปพลาสติกโดยการเอ็กซ์ทรูด จัดเป็น กระบวนการแปรรูปแบบต่อเนื่อง (Continuous process) และผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่ก็จะเป็น ผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (Semi-finished product) ที่จะต้องนำไปเข้ากระบวนการชนิดอื่นต่อเพื่อผลิตเป็นชิ้นงาน สุกท้าย (Finished product) ก่อนจะนำไปใช้งานนอกจากอุตสาหกรรมการแปรรูปและ การผลิต พอลิเมอร์แล้ว ยังมีการใช้เทคนิคการเอ็กซ์ทรูดในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การผลิต เซรามิกส์ การผลิตอิฐสำหรับงานก่อสร้าง และการแปรรูปอาหาร เป็นต้น การเอ็กซ์ทรูดเทอร์โม พลาสติก ทำโดยการให้พลาสติกผง (Powder) หรือเม็ด (Pellets) หลอมเป็นเนื้อเดียว แล้วผลึกกัน โดยการหมุนของสกรูให้ พลาสติกหลอมไหลผ่านหัวตาย ที่มีรูปร่างตามลักษณะชิ้นงานที่ต้องการผลิตพลาสติกหลอมจะแข็งตัว เมื่อออกจากตาย เนื่องจากการหล่อเย็น การเอ็กซ์ทรูดที่ยังไม่วัลคาไนซ์และพลาสติกที่ในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก ก็สามารถกระทำได้ แต่พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเนื่องจากความร้อน ในขณะที่ทำการเอ็กซ์ทรูด ในการเอ็กซ์ทรูดสามารถใช้การผลิตพลาสติกในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ผลิต เส้นใย (Fiber) ท่อขนาดเล็ก (Tube) ท่อขนาดกลางและท่อขนาดใหญ่ (Pipe) แผ่นพลาสติก (Sheet) फिल्मพลาสติก (Film) และชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นโปรไฟล์ (Profile) รูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงตัวอย่าง

ชิ้นงานในลักษณะต่าง ๆ ในตารางที่ 2.3 ความหมายของชิ้นงานจากการเอ็กซ์ทรูดที่เป็นโพรไฟล์ในเทคโนโลยียางและพลาสติก หมายถึง ผลิตภัณฑ์จากการเอ็กซ์ทรูดแบบกึ่งสำเร็จรูปทั้งหมด ยกเว้น กลุ่มชิ้นงานที่ผลิตจากตายรูปวงแหวนในกรณีผลิตท่อ ตายกลมซึ่งใช้ในการผลิตแท่งพลาสติกกลม ตายที่มีทางออกเป็นแท่งสี่เหลี่ยม และตายสำหรับผลิตแผ่นและฟิล์มพลาสติกนอกจากการแปรรูปพลาสติกโดยตรงแล้ว ยังใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดเป็นอุปกรณ์หลักในเครื่องแปรรูปพลาสติกในชนิดต่าง ๆ เช่น การเคลือบพลาสติกลงบนชิ้นวัสดุชนิดอื่น (Extrusion covering process) การเอ็กซ์ทรูดเป่า (Extrusion blow molding) และการเป่าฟิล์ม (Extrusion blow film process) เป็นต้นนอกจากเครื่องเตรียมคอมพาวด์พลาสติก โดยการผสมพลาสติกกับสารเติมแต่ง(Additives) และสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเป็นการเตรียมวัสดุสำหรับการแปรรูปโดยเทคนิคต่าง ๆ

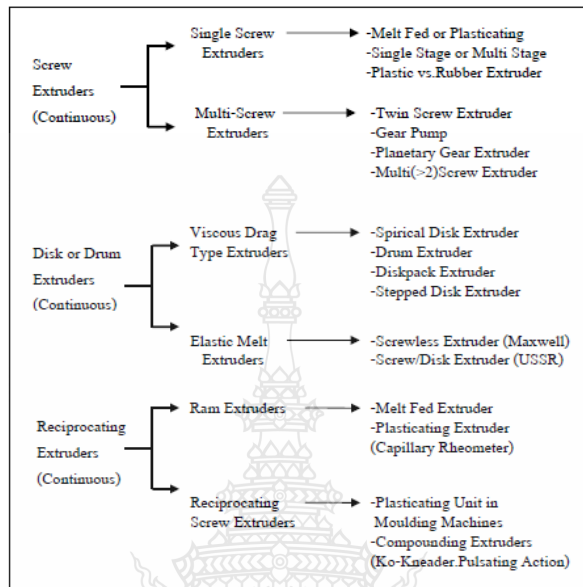
ตารางที่ 2.3 ลักษณะของผลิตภัณฑ์พลาสติกที่แปรรูปโดยการเอ็กซ์ทรูด [10]

ชนิดผลิตภัณฑ์	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์
ฟิล์ม	
แผ่นบาง	
เส้น (Solid Melt Strand Profiles)	
โพรไฟล์แบบเปิด (Open Profile)	
โพรไฟล์กลวง (Hollow-Chamber Profiles)	
ท่อ (Tube)	

#### 2.2.6.1 เครื่องเอ็กซ์ทรูด (Extruder) [10]

เครื่องเอ็กซ์ทรูดที่ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกมีหลายชนิดในรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นการสรุปเครื่องเอ็กซ์ทรูดชนิดต่าง ๆ จะเห็นว่าข้อแตกต่างระหว่างเครื่องเอ็กซ์ทรูดต่างๆ เหล่านี้ คือ ลักษณะการใช้งาน (Mode of operation) ของเครื่อง ซึ่งแบ่งออกเป็นการใช้งานแบบต่อเนื่อง และแบบไม่ต่อเนื่อง เครื่องเอ็กซ์ทรูดที่ทำงานในลักษณะต่อเนื่อง เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบที่มีสกรู (Screw extruder) และแบบดิสก์ (Disk extruder) ส่วนเครื่องเอ็กซ์ทรูดที่ทำในลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง เป็นเครื่องที่มีสกรูเลื่อนไปเลื่อนมาในแนวแกนของสกรูได้ และเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบลูกสูบ (Ram extruder) เครื่องเอ็กซ์ทรูดที่จะมีสกรูเลื่อนไปมาได้ใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญของ

กระบวนการฉีด พลาสติกเข้าแก้ว (Injection molding) ส่วนเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบลูกสูบนิยมใช้เป็นเครื่องทดสอบรีโอโลยีของพอลิเมอร์ เช่น เครื่องทดสอบดัชนีการไหล (MFI tester)



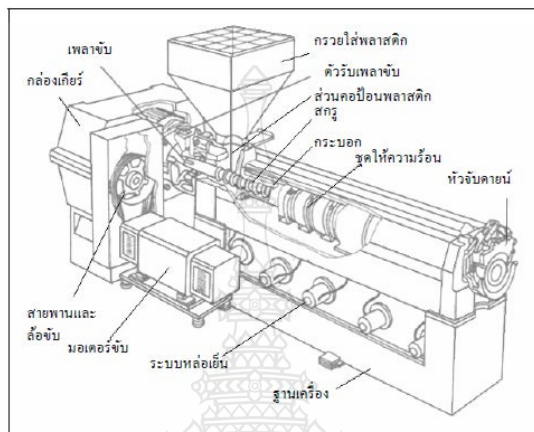
รูปที่ 2.9 การแบ่งเครื่องเอ็กซ์ทรูดสำหรับการแปรรูปพอลิเมอร์ [10]

เครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูที่มีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่อง และเครื่องเอ็กซ์ทรูดที่มีการเคลื่อนที่ของสกรูในแนวแกน เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูดที่ใช้ในกระบวนการผลิต และแปรรูปพลาสติกมากที่สุด รายละเอียดของเครื่องเอ็กซ์ทรูดที่มีการเคลื่อนที่ของสกรูในแนวแกนของสกรูจะอธิบาย ลักษณะการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูดที่ใช้มีลักษณะการทำงานแบบต่อเนื่อง ซึ่งแบ่งเครื่องเอ็กซ์ทรูดชนิดนี้ออกเป็น 3 ชนิดตามจำนวนสกรูที่อยู่ในกระบอก (Barrel) ของเครื่องดังนี้ คือ เครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder), เครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) และเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบหลายสกรู (Multi Screw Extruder) ในอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเมอร์ และการแปรรูปพลาสติก มักจะใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดสองชนิดแรก คือ เครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบ สกรูเดี่ยวและสกรูคู่มากที่สุด ส่วนเครื่องเอ็กซ์ทรูดชนิดที่ 3 ใส่สกรูจำนวนมากกว่ามีการใช้กันน้อย

### 2.2.6.2 เครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) [10]

ส่วนประกอบหลักของเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว รายละเอียดในรูปที่ 2.10 ซึ่ง ประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

1.) สกรู (Extruder screw) สกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูดเป็นสกรูแบบ อาคิมิเดียน (Archimedean screw) ซึ่งสกรูที่ใช้ในการแปรรูปเทอร์โมพลาสติก มีเส้นผ่านศูนย์กลางจะ อยู่ในช่วง 25 ถึง 200 มิลลิเมตร มีความยาวเป็น 20 ถึง 40 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (20-30 D) และ ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อน ในช่วง 5 ถึง 500 กิโลวัตต์ หน้าที่หลักของสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูด



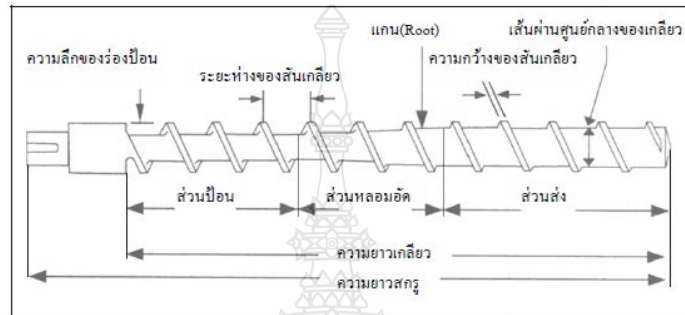
รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบหลักของเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว [10]

สกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว มักจะมีส่วนต่าง ๆ แยกออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนป้อนส่งสาร (Feeding section) ในบริเวณนี้สกรูจะมีสันสกรู (Flight) ที่มีความลึกมากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่น ๆ และวัสดุในบริเวณนี้ส่วนใหญ่จะยังคงอยู่ในสถานะของแข็ง ส่วนหลอมอัด (Compression or transition or plasticating section) สันสกรูในบริเวณนี้จะมีความลึกลดลงเป็นเส้นตรงจากส่วนป้อนส่งสารไปจนถึงส่วนส่งรีด วัสดุ ในบริเวณนี้จะถูกเปลี่ยนจากสถานะของแข็งไปเป็นพอลิเมอร์หลอม ส่วนส่งพลาสติก (Metering section) ในบริเวณนี้ สันสกรูจะมีความตื้นมากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่น ๆ พอลิเมอร์หลอมจากส่วนกดอัดจะถูกลำเลียงมาที่บริเวณนี้เพื่อส่งเข้าหัวอัดรีดต่อไป

การบอกความยาวของสกรูมักจะนิยมบอกในรูปของอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของสกรู ซึ่งมักจะเรียกว่า Length-to-diameter ratio หรือ L/D สำหรับ L/D ของสกรู โดยทั่วไป มักจะอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 1.25 เซนติเมตร ถึง 50 เซนติเมตร สำหรับ L/D ที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ 24:1 สำหรับสกรูที่มี L/D ในช่วง 35-40 จะใช้ในวัตถุประสงค์เพื่อการสกัดเอาสารระเหยออก

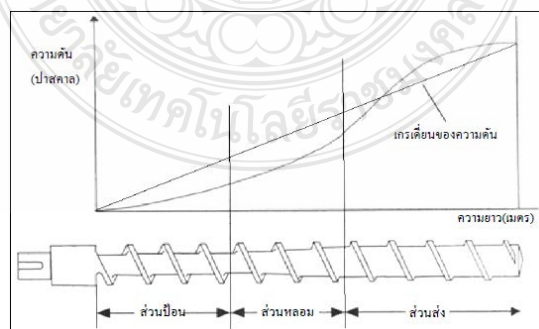
ถ้าแบ่งความยาวของสกรูมาตรฐานที่มี L/D เท่ากับ 24:1 ตามโครงสร้างของสกรูที่แตกต่างกัน 3 ส่วนจะพบว่า ส่วนป้อนส่งจะมีความยาวประมาณ 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู ส่วนกดอัดมีความ

ยาวประมาณ 9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางสกรูและส่วนส่งรีดจะมีความยาวประมาณ 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู อย่างไรก็ตามความยาวของส่วนต่าง ๆ ของสกรูทั้ง 3 ส่วนนี้อาจมีการปรับให้เหมาะสมต่อลักษณะของการขึ้นรูปและวัสดุที่ใช้



รูปที่ 2.11 ลักษณะสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว [10]

ความดันที่เกิดขึ้นในขณะที่สกรูหมุนนั้น มีความสำคัญต่อการส่งพลาสติกจากกรวยเติมพลาสติก ไปยังหัวดายมาก เพราะลักษณะการเพิ่มของความดันของพลาสติกที่ส่วนต่าง ๆ ของสกรูดังรูปที่ 2.12 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความดันนั้นจะเพิ่มขึ้นจากส่วนป้อน และมีค่าสูงสุดที่ส่วนปลายของสกรู ถ้าเป็นสกรูที่มีส่วนส่งสั้นอาจจะทำให้เกิดความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีลักษณะเป็นพีคที่บริเวณปลายสกรู ดังนั้นจึงต้องกำหนดความยาวของสกรูในส่วนต่าง ๆ ให้เหมาะสม ซึ่งมักจะขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกที่ทำการเอ็กซ์ทรูด



รูปที่ 2.12 ความดันของพลาสติกหลอมที่ส่วนต่าง ๆ ของสกรู [10]

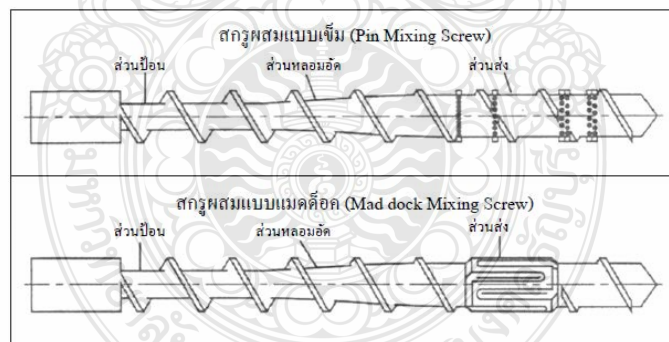


ในเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยวนอกจากใช้สกรู ดังในภาพที่ 2.13 ซึ่งเป็นสกรูแบบแบบขั้นเดียว (Single-stage Screw) แล้วในการเอ็กซ์ทรูดพอลิเมอร์บางชนิดจำเป็นต้องใช้สกรูแบบ สองขั้น (Two-stage screw) ซึ่งมีเพิ่มส่วนที่ใช้ในการไล่ก๊าซออก (Venting zone) นอกจากนี้ยังมี ส่วนหลอมอัดและส่วนส่งส่วนที่สอง ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 สกรูแบบสองขั้น (Two-stage venting screw) [10]

นอกจากนี้ การเอ็กซ์ทรูดพลาสติกบางชนิดทำให้พลาสติกหลอมเหลวเป็นเนื้อเดียวได้ยากมาก จึงต้องออกแบบส่วนของสกรู ที่ช่วยในการผสมเรียกสกรูในกลุ่มนี้ว่าสกรูผสม (Mix screw) ตัวอย่างของสกรูในกลุ่มนี้ เช่น สกรูผสมแบบเข็ม (Pin mixing screw) และสกรูผสมแบบแมดด็อก (Mad dock mixing screw) เป็นต้น ลักษณะของสกรูสองชนิดนี้ ดังในรูปที่ 2.14

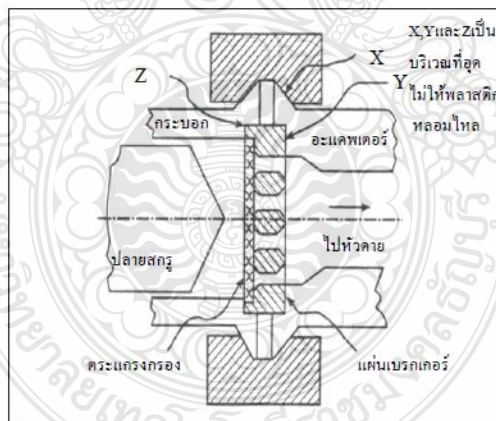


รูปที่ 2.14 สกรูผสมแบบเข็มและสกรูผสมแบบแมดด็อก [10]

2.) กระบอกร (Cylinder หรือ Barrel) หน้าที่ของกระบอกรในเครื่องเอ็กซ์ทรูด คือเป็นตัวบรรจุสกรู ไว้ภายใน และเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนแก่พลาสติก ขนาดกระบอกรของเครื่องเอ็กซ์ทรูดโดยทั่วไปมีตั้งแต่ขนาดเล็ก เช่น มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ สำหรับเครื่องเอ็กซ์ทรูดที่ใช้กันทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม

มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 65 ถึง 150 มิลลิเมตร แต่ยังมีเครื่องเอ็กซ์ทราดที่มี ขนาดใหญ่มาก คือ กระจกมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 600 มิลลิเมตร ซึ่งมีความยาวประมาณ 15 เมตร ซึ่งใช้ใน โรงงานผลิตพลาสติก

3.) แผ่นเบรกเกอร์ ตะแกรง และอะแดปเตอร์ (Breaker plate, dcreen pack, adapter) ส่วนปลายของกระจกของเครื่องเอ็กซ์ทราด จะมีอะแดปเตอร์ยึดตะแกรงกรองและ แผ่นเบรกเกอร์ ซึ่งรายละเอียดดังรูปที่ 2.15 แผ่นเบรกเกอร์เป็นแผ่นโลหะกลมที่เจาะรูที่มีเส้นผ่าน ศูนย์กลางประมาณ 3 ถึง 5 มิลลิเมตร จำนวนมาก ทำหน้าที่ในการปรับเปลี่ยนลักษณะการไหลเป็น เกลียวเนื่องจากการ หมุนของสกรูให้มีลักษณะการไหลที่เป็นลามินาร์มากขึ้น และช่วยให้พลาสติกหลอม เกิดการผสม เป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น พลาสติกที่ไหลออกมาจากแผ่นเบรกเกอร์มีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน มากขึ้น นอกจากนี้แผ่นเบรกเกอร์ยังทำหน้าที่ในการรองรับตะแกรงกรอง ซึ่งทำหน้าที่ในการกรองไม่ให้ สิ่งสกปรกและพลาสติกที่ไม่หลอมไหลผ่านหัวตาย ซึ่งวัสดุเหล่านี้ถ้าหลุดไปในตายจะทำให้ชิ้นงานมี จุดบกพร่องตะแกรงกรองมักจะใช้ประมาณ 3 ถึง 5 ชั้นวางซ้อนกัน มักจะทำมาจากโลหะหรือผ้าชนิด พิเศษโดยวางเรียงให้ตะแกรงที่มีรูขนาดใหญ่ที่สุด (20 ถึง 40 เมท) จะอยู่ติดกับเบรกเกอร์ แล้ว ซ้อน ตะแกรงที่มีรูขนาดเล็กลงตามลำดับ เช่น ขนาด 40, 60 และ 80 เมท ตามลำดับ อะแดปเตอร์ทำ หน้าที่ ในการยึดแผ่นเบรกเกอร์



รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางแสดงตะแกรงกรองแผ่นเบรกเกอร์และอะแดปเตอร์ของเครื่องเอ็กซ์ทราดแบบ สกรูเดี่ยว [10]

4.) ชุดรองรับแรงเนื่องจากความดันของพลาสติกหลอม (Thrust bearing) การหมุนของสกรูทำให้เกิดความดันของพลาสติกหลอมภายในกระจก จึงต้องออกแบบให้กระจกสูบ มีความหนา พอที่จะรองรับความดันที่เกิดขึ้นได้ ส่วนของสกรูด้านตรงข้ามกับหัวตายจะเป็นส่วนที่

รองรับแรงที่ เกิดขึ้นเนื่องจากความดันในกระบอก ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความดันในกระบอก ตัวอย่างกรณีสกรูที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.5 นิ้ว ถ้าสกรูหมุนจนพลาสติกหลอมมีความดันภายในกระบอก 20 MPa ทำให้เกิดแรงในทิศทางตรงกันข้ามที่ส่วนหลังของสกรูถึง 205 กิโลนิวตัน (20.5 ตัน) ซึ่งเป็นแรงในระดับที่สูงมากการรับแรงที่ส่วนหลังของสกรู จำเป็นต้องใช้ชุดอุปกรณ์ ที่มีความสามารถในการรองรับแรง ซึ่งวางตัวอยู่ส่วนหลังของเครื่องเอ็กซ์ทรูดติดกับสกรู โดยทั่วไปส่วนท้ายของสกรูจะถูกล็อคเข้ากับเพลาขับ (Thrust shaft) วางตัวผ่านแนวของชุดรองรับแรง (Thrust bearing) ซึ่งอาจเป็นแบบลูกกลิ้ง (Roller bearing) ลูกปลาย (Ball bearing) หรือ บรอนซ์ (Bronze bearing)

#### 5.) ระบบเกียร์ทดและมอเตอร์ขับ (Reduction gear and drive motor)

กำลังที่ใช้ในการขับสกรูให้หมุน ได้มาจากมอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็วของการหมุนได้ โดยมอเตอร์จะต่อกับระบบ เกียร์ทดและเพลาขับ เพื่อกำหนดความเร็วในการหมุน และทอร์กของสกรู อัตราเร็วของการหมุน สกรูจะอยู่ในช่วง 5 ถึง 150 รอบต่อนาที โดยทั่วไประบบเกียร์ทด และมอเตอร์จะต้องให้สกรูหมุน ด้วยอัตราคงที่มีทอร์กสูงที่ทุกค่าของอัตราหมุน และไม่มีการกระตุกของสกรูขณะทำการเปลี่ยนอัตราการหมุนอย่างต่อเนื่อง มอเตอร์ที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นมอเตอร์แบบคอมมิวเตเตอร์ (Commutator motor) และมอเตอร์กระแสตรง (DC - motor) ซึ่งมีกำลังขับอยู่ในช่วง 5 กิโลวัตต์ (ที่ใช้กับสกรูที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร) ถึง 500 กิโลวัตต์

#### 6.) กรวยเติมพลาสติก (Feed hopper) อุปกรณ์ใช้เติมพลาสติกในกระบอก และสกรูโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นกรวยเม็ดหรือผงพลาสติกจะตกลงที่สกรู เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ดังนั้นผิวภายในของกรวยเติมจะมีความมันเพื่อลดแรงเสียดทาน และมักจะมี ความชันมากพอที่จะให้พลาสติกไหลลงได้ เพื่อประสิทธิภาพในการใช้งาน กรวยเติมมักจะมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

#### 7.) ดายของเครื่องเอ็กซ์ทรูด (Extrusion die) ดายของเครื่องเอ็กซ์ทรูด เป็นส่วนที่ยึดติดกับส่วนปลายของกระบอกต่อจากแผ่นเบรกเกอร์ และตะแกรงกรองคายทำหน้าที่ในการเปลี่ยน พลาสติกหลอมให้มีรูปร่างตามลักษณะของหัวดาย ซึ่งโดยทั่วไปชิ้นงานพลาสติกจากการเอ็กซ์ทรูด มีรูปร่างหลายแบบขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นดายของเครื่อง เอ็กซ์ทรูดจะมีลักษณะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับรูปร่างของชิ้นงานที่ทำการเอ็กซ์ทรูด ซึ่งสามารถแบ่ง ชนิดของดายออกตามชนิดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นโพรไฟล์ และผลิตภัณฑ์พลาสติกจากการเคลือบ เป็นต้น

การผลิตเส้นใยพลาสติกผลิตจากดายที่มีลักษณะเป็นแผ่น (Plate die) และเจาะรู จำนวนมาก ลักษณะของรูอาจมีรูปร่างต่าง ๆ เช่น เป็นคาบิลลารี รูปสามเหลี่ยม รูปหกเหลี่ยม และรูปแปดเหลี่ยม เป็นต้น เรียกดายในลักษณะนี้ว่า สปินเนอร์เรท (Spinneret) ดังลักษณะดังรูปที่ 2.16 วิธีการ ผลิตเส้น

โยทำได้โดยการเอ็กซ์ทรูดให้พลาสติกหลอมไหลผ่านรูของสปินเนอร์เร็ท แล้วพันด้วยลูกล้อ ม้วนหลังจากนั้นดึงให้ยืดออกประมาณ 10 ถึง 15 เท่าในขณะที่ทำการหล่อเย็น ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในการผลิตเส้นใย เช่น ไนลอน พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) และพอลิโพรไพลีน



รูปที่ 2.16 ลักษณะของสปินเนอร์เร็ท (Spinneret)

#### 2.2.7 เทคนิคในการปั่นเส้นใย (Spinning technique) [11]

ในการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ การปั่นเส้นใยจะรวมตั้งแต่การอัดรีดและการขึ้นรูปเส้นใย (Fiber formation) ด้วยเหตุที่พอลิเมอร์ ที่ได้จากรวมชาติจะเกิดการเสถียรภาพได้ง่ายในสภาวะความร้อนสูงที่จุดหลอมเหลว ซึ่งทำให้สภาวะที่เหมาะสมในการปั่นเส้นใยต้องทำในรูปแบบที่เป็นสารละลายเท่านั้นซึ่งสามารถแยกได้เป็น 2 กลุ่มคือ การปั่นแบบหลอมเหลว และการปั่นแบบสารละลาย (การปั่นแบบเปียกและแบบแห้ง) ซึ่งเส้นใยแต่ละประเภทจะมีการปั่นเส้นใยที่แตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2.4 โดยการปั่นแบบหลอมเหลวเป็นเทคนิคที่เป็นที่นิยม และคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ จะคุ้มค่ามากที่สุดแต่ก็ใช้ได้กับพอลิเมอร์ที่สามารถอ่อนหลอมตัวได้ ซึ่งไม่ทำให้โครงสร้างหรือสมบัติเปลี่ยนไป ส่วนการปั่นแบบแห้งสารละลายพอลิเมอร์ ที่ตัวทำละลายกับพอลิเมอร์ จะถูกอัดรีดผ่านสปินเนอร์เร็ทแล้วผ่านไปยังส่วนที่ทำให้ตัวทำละลายเกิดการระเหยออกจากเส้นใยขณะปั่น ทำให้เส้นใยแข็งตัวส่วนการปั่นแบบเปียกนั้นสารละลายพอลิเมอร์ จะถูกอัดรีดผ่านสปินเนอร์เร็ทผ่านไปยังอ่างของเหลวที่ไม่ใช่ตัวทำละลาย เส้นใยก็จะเกิดการตกตะกอน โดยอาจจะเป็นได้ทั้งที่ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (เปลี่ยนสภาพทางกายภาพ) และเกิดปฏิกิริยาเกิดการกลับสู่ สภาวะเดิม (Regenerate) ดังเช่นการเกิดเป็นเกลือ

## ตารางที่ 2.4 Spinning techniques [11]

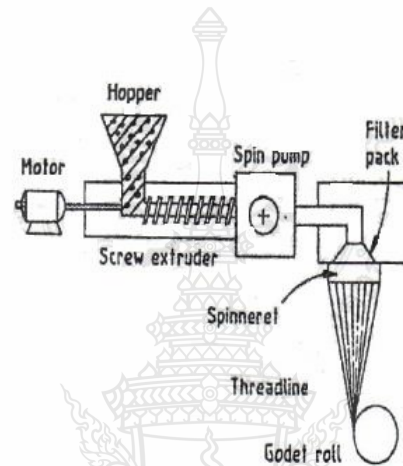
Melt Spinning	Dry Spinning	Wet Spinning
Nylon	Acetate	Viscose
Polyester	Triacetate	Cupro
Polypropylene	Acrylic	Acrylic
Polyethylene	Spandex	Spandex

1.) การปั่นแบบหลอมเหลว (Melt spinning) การปั่นแบบหลอมเหลวได้ถูกพัฒนาตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1930 เพื่อ ในการผลิตเส้นใยไนลอน 6 และไนลอน 6,6 และปัจจุบันก็นำมาผลิตเส้นใยอยู่หลายประเภทในช่วงต้นจะเรียกว่าเป็น Grid spinning โดยเป็นที่นิยมมากในการผลิตเส้นใยไนลอนและพอลิเอสเตอร์ ในกระบวนการผลิตนี้ Grid จะประกอบด้วยท่อเหล็กหรือแท่งเหล็กที่ร้อน (ด้วยไฟฟ้า หรือวิธีอื่น) เพื่อทำให้เม็ดชิพเกิดการหลอมตัวแล้วตกลงสู่อ่างหลอมเหลว แล้วจะถูกบีบผ่านไปยังรู เล็ก ๆ แล้วทำให้แข็งตัวเป็นเส้นใย และเพื่อไม่ให้เกิดการเสื่อมและเกิดการพอลิเมอร์ไรซ์เพิ่มขึ้นอีกของพอลิเมอร์ อาจต้องมีการหล่อด้วยก๊าซที่เฉื่อย (ปราศจากออกซิเจน) ซึ่งก็คือก๊าซไนโตรเจน โดยเฉพาะกับไนลอน ในช่วงหลังของการพัฒนายังมีการปรับเปลี่ยนการหลอมตัวพอลิเมอร์ โดยอาศัยเกลียวหนอน (Extrusion screw) ทำให้เกิดการหลอมตัวและทำให้เกิดความดันให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านไปยังสปินเนอร์เร่ท ดังรูปที่ 2.17 ซึ่ง Extruder ตัวเดียวกันยังสามารถแบ่งไปสู่สายการผลิตได้หลายตัวได้ ดังรูปที่ 2.18

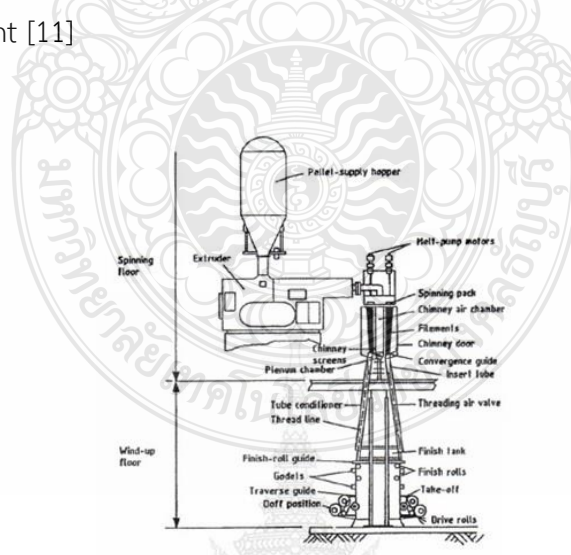
เส้นใยพอลิเอสเตอร์ และไนลอนปัจจุบันจะมีการใช้ วิธีการปั่นแบบหลอมเหลวแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะไม่ทำให้พอลิเมอร์ ที่สังเคราะห์ได้ทำให้แข็งตัวเป็นเม็ดชิพ แต่จะส่งผ่านพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านไปยัง Manifold แล้วส่งไปยังส่วนการปั่นเลยโดยตรง โดยการปั่นนี้ส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งก็คือ Metering gear pump เพื่อควบคุมการไหลของพอลิเมอร์ ที่คงที่สู่ส่วนกรองและผ่านสปินเนอร์เร่ทใน Spin pack

ก่อนที่พอลิเมอร์หลอมจะผ่านไปยังสปินเนอร์เร่ทต้องมีการกรองเพื่อกำจัดอนุภาคแปลกปลอม วัสดุใหญ่หรือพอลิเมอร์ ที่ไม่ได้รับการหลอมตัว (Gel particle) เพราะจะทำให้เกิดการอุดตันรูสปินเนอร์เร่ทได้ หรือหากผ่านรู ไปได้ อาจทำให้มีขนาดของเส้นใยที่ไม่ได้ตามต้องการ และอนุภาคก็อาจแสดงเป็นจุดบกพร่องทำให้เส้นใยอ่อนแอได้

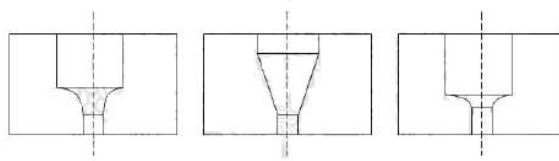
เมื่อผ่านส่วนกรองแล้วพอลิเมอร์ ก็ผ่านไปยังสปินเนอร์เร็ท ซึ่งเป็นแผ่นโลหะบางมีรู เล็กจำนวนมากตามจำนวนเส้นใยที่ต้องการโดยการนำผ่านนั้นอาจต้องใช้ความดันจาก Extruder มากถึง 20 เมกะปาสคาล เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกของรูสปินเนอร์เร็ทมีตั้งแต่ 175 - 750 ไมโครเมตร ส่วนมากมักเล็กกว่าความหนาของแผ่นสปินเนอร์เร็ทซึ่งในกรณีของปั่นแบบหลอมเหลวนี้ จะประมาณ 3 - 10 มิลลิเมตร โดยทางเข้ารู จะกว้างกว่าแล้วแคบเข้าเพื่อให้การไหลของพอลิเมอร์ หลอมเหลวไหล อย่างไม่ติดขัดดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 Polymer in Powdered or Chip form can be Fed Directly to Melt-Spinning Equipment [11]



รูปที่ 2.18 Conventional spinning plant [11]



รูปที่ 2.19 Longitudinal cross-section of spinneret holes showing streamlining of polymer flow [11]

จำนวนรูจะมีตั้งแต่รูเดียวไปจนถึงหลายพันรู ต่อหนึ่งแผ่นสปินเนอร์เร็ทในการผลิตเส้นใยยาวมักมีจำนวนสิบไปถึงจำนวนหลักร้อย แต่ในการผลิตเส้น เพื่อตัดเส้นใยยาวเป็นเส้นใยสั้นจะมีจำนวนหลายร้อยไปจนถึงเป็นพันรู และรูปร่างรู มีตั้งแต่รูกลมไปจนถึงหลายรูปร่างเป็น Profile หรือมีรูกลวง (Hollow) ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติที่พิเศษที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 2.20

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

รูปที่ 2.20 Spinneret hole (Orifice) cross-section and Its relation to the fiber cross-section [11]

รูของสปินเนอร์เร็ทไม่ได้ควบคุมความละเอียด (ขนาด) ของเส้นใยโดยตรงโดยที่ความละเอียดจะถูกควบคุมโดยอัตราการไหล (Throughput or output) ของพอลิเมอร์ผ่านรูหนึ่งๆ (W, g/min) และความเร็วของการม้วนเก็บ (Winding speed or take up speed: V, m/min) ความละเอียดเส้นใย (Tex) ของเส้นใยที่ปั่นได้ (Melt-spun filament) จะเท่ากับ  $103 W/V$

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรูสปินเนอร์เร็ท และความละเอียดของเส้นใย Linear density จะเกี่ยวข้องกับอัตราการยืดตัว (Stretch ratio) ระหว่างเส้นใยที่ออกจากรูกับเส้นใยที่ม้วนเก็บ ( $V_0/V$ ) ซึ่ง  $V_0$  คือความเร็วในการอัดรีดเฉลี่ย (Mean extrusion velocity)

$$\text{Linear density} = \frac{A\rho W_p V_o}{V}$$

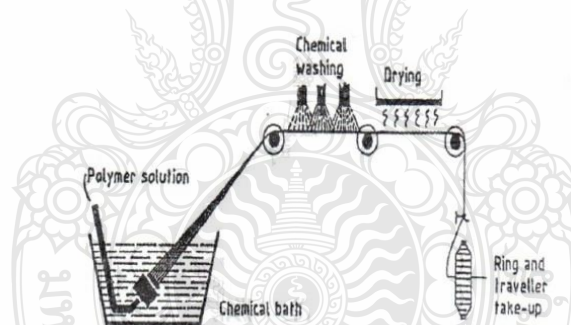
โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของรู (ตารางมิลลิเมตร)

$\rho$  คือ ความถ่วงจำเพาะของพอลิเมอร์ หลอมเหลว ณ อุณหภูมิการอัดรีดมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$W_p$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนัก (Weight fraction) ของพอลิเมอร์ในส่วนที่ออกมาจากรู (Extrudate) ขณะที่ออกมาจากรู สปินเนอร์เร็ทซึ่งสำหรับการปั่นแบบหลอมเหลว  $W_p = 1$

## 2.) การปั่นแบบเปียก (Wet-spinning)

เริ่มจากการเตรียมสารละลายพอลิเมอร์แล้วฉีดผ่านสปินเนอร์เร็ท ที่จุ่มอยู่ในอ่างของสารละลายตกตะกอน (coagulation bath) เส้นใยที่ตกตะกอนออกมาจากสารละลาย (coagulation bath) จะถูกดึงยืดเพื่อเพิ่มความแข็งแรง แล้วทำให้แห้งโดยการใช้น้ำร้อนเป่า



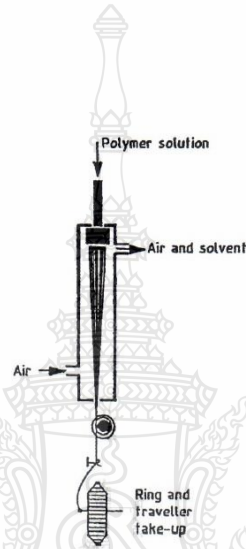
รูปที่ 2.21 กระบวนการปั่นเปียก (Wet spinning) [11]

อัตราการลดขนาดที่เส้นใยเมื่อออกมาจากรูสปินเนอร์เร็ท โดยปราศจากการขาดของการปั่นแบบเปียกช้ากว่าในการปั่นแบบหลอมเหลวและการปั่นแบบแห้ง การปั่นแบบเปียกแยกได้เป็น 2 วิธีกว้างๆดังนี้ คือ ระบบ Solvent/non-solvent และ Chemical reaction เพื่อสารละลายและการตกตะกอนของพอลิเมอร์ โดยเส้นใยอะคริลิกและไมตาคริลิกจะใช้วิธีแรก ส่วนเส้นใยวิสคอสจะใช้วิธีที่ 2



### 3.) การปั่นแบบแห้ง (Dry-spinning)

เริ่มจากการเตรียมสารละลายพอลิเมอร์แล้วฉีดผ่านสปินเนอร์เร็ว สู่ก๊าซร้อนหรืออากาศร้อน ทำการระเหยตัวทำละลายส่วนที่เหลือในเส้นใยที่ฉีดออกมาโดยการใช้ลมร้อน (hot air) เป่าเพื่อทำให้ตัวทำละลายในสารละลายพอลิเมอร์ออกมาทำให้เปลี่ยนไปเป็นเส้นใย ตัวทำละลายตัวแรกที่น่ามาใช้คือ Acetone และ Methylene chloride จากนั้นทำการดัดยัดเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเส้นใย ตัวอย่างเส้นใยที่ขึ้นรูปโดยวิธีนี้ได้แก่ อะคริลิก (Acrylic) สเปนเดกซ์ (Spandex) ไตรอะซิเตต (Acetate)



รูปที่ 2.22 กระบวนการปั่นแห้ง (Dry-spinning) [11]

### 4.) การปั่นด้วยวิธีอื่น

วิธีที่มีการใช้กันมากขึ้นคือ การผลิตเส้นใยจากแผ่นฟิล์ม เป็นเพราะว่าทางเศรษฐศาสตร์ จะคุ้มค่าที่สุดทั้งกรรมวิธีการผลิตและผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลาย วิธีการนี้จะมีการอัดรีดออกมาเป็นแผ่นโดยใช้ Slit die ขึ้นรูปเป็นแผ่น จากนั้นจะทำให้เป็นเส้นใยได้หลายเครื่องมือโดยพื้นฐานเส้นใยจะผลิตโดยการยืดตัวและการเรียงตัวฟิล์ม แล้วทำการตัดแยกออกให้เป็นเส้นใย ปัจจุบันเส้นใยพอลิโพรไพลีนใช้วิธีการนี้ในการผลิตเป็นเส้นใยแล้วนำมาทอเป็นกระสอบ เป็นต้น

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

ศึกษา และรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ในด้านสมบัติทางกายภาพทางกล และการขึ้นรูปเส้นใย นำผงถ่านไม้ไผ่ (Bamboo charcoal) นำไปผสมกับเม็ดพอลิแลคติกแอซิด โดยมีพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) เป็นสารช่วยความเข้ากันได้ จากนั้นนำไปขึ้นรูปเส้นใย และทดสอบสมบัติ ในขั้นตอนการดำเนินการวิจัยจะกล่าวถึงรายละเอียด ขั้นตอนการดำเนินงาน แผนการดำเนินงาน ระยะเวลาในการทดสอบ วิธีการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ตามแผนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

#### 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.1.1 วางแผนการดำเนินงาน

3.1.2 เตรียมวัสดุดิบ จัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.3 เตรียมเม็ดพลาสติกและสารเคมี เม็ดพลาสติกที่เลือกใช้คือ เม็ดพลาสติก

พอลิแลคติกแอซิด ผงถ่านไม้ไผ่ และสารช่วยความเข้ากันได้ (Compatibilizer) พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ PE-g-MA

3.1.4 ทำ Masterbatch เม็ดพอลิแลคติกแอซิด และสารช่วยความเข้ากันได้ PE-g-MA ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวเดี่ยว (Single screw extruder:ThermoHaake)

3.1.5 ทำ Masterbatch เม็ดพอลิแลคติกแอซิดและผงถ่านไม้ไผ่ ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวคู่ (Twin screw extruder) โดยบริษัท บริษัท สาลี คัลเลอร์ จำกัด (มหาชน)

3.1.6 นำพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Single screw extruder:ThermoHaake ทำการ Compress เป็นชิ้นทดสอบ

3.1.7 การทดสอบพอลิเมอร์ผสม

(1) ทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt flow Index, MFI)

(2) ทดสอบสมบัติความต้านแรงกระแทก (Izod impact strength tester)

(3) ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (Tensile strength)

3.1.8 ขึ้นรูปเส้นใย ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวเดี่ยว Single screw extruder:ThermoHaake

3.1.9 การทดสอบเส้นใย

- (1) ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใย (Tensile strength)
- (2) ทดสอบขนาดของเส้นใย (Diameter)
- (3) ทดสอบค่าการเรียงตัวของโมเลกุลตามความยาวของเส้นใย (Sonic modulus)
- (4) ทดสอบความชื้นของเส้นใย (Moisture content)
- (5) ทดสอบสัณฐานวิทยาของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope, OM)
- (6) ทดสอบสัณฐานวิทยาของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM)

#### 3.1.10 วิเคราะห์และจัดทำรายงานสรุปผลวิจัย

### 3.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ

#### 3.2.1 วัสดุดิบ

- พอลิแลคติกแอซิด Ingeo Biopolymer 6100D, จาก NatureWork Company
- ผงถ่านไม้ไผ่ Bamboo Charcoal ยี่ห้อ บันตัน บริษัท ชาร์โคล โสม จำกัด
- พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ PE-g-MA (Sigma-aldrich, Saint Louis, USA.)
- Masterbatch พอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไผ่ (Compound) 20% บริษัท สาลี คัลเลอร์ จำกัด (มหาชน)

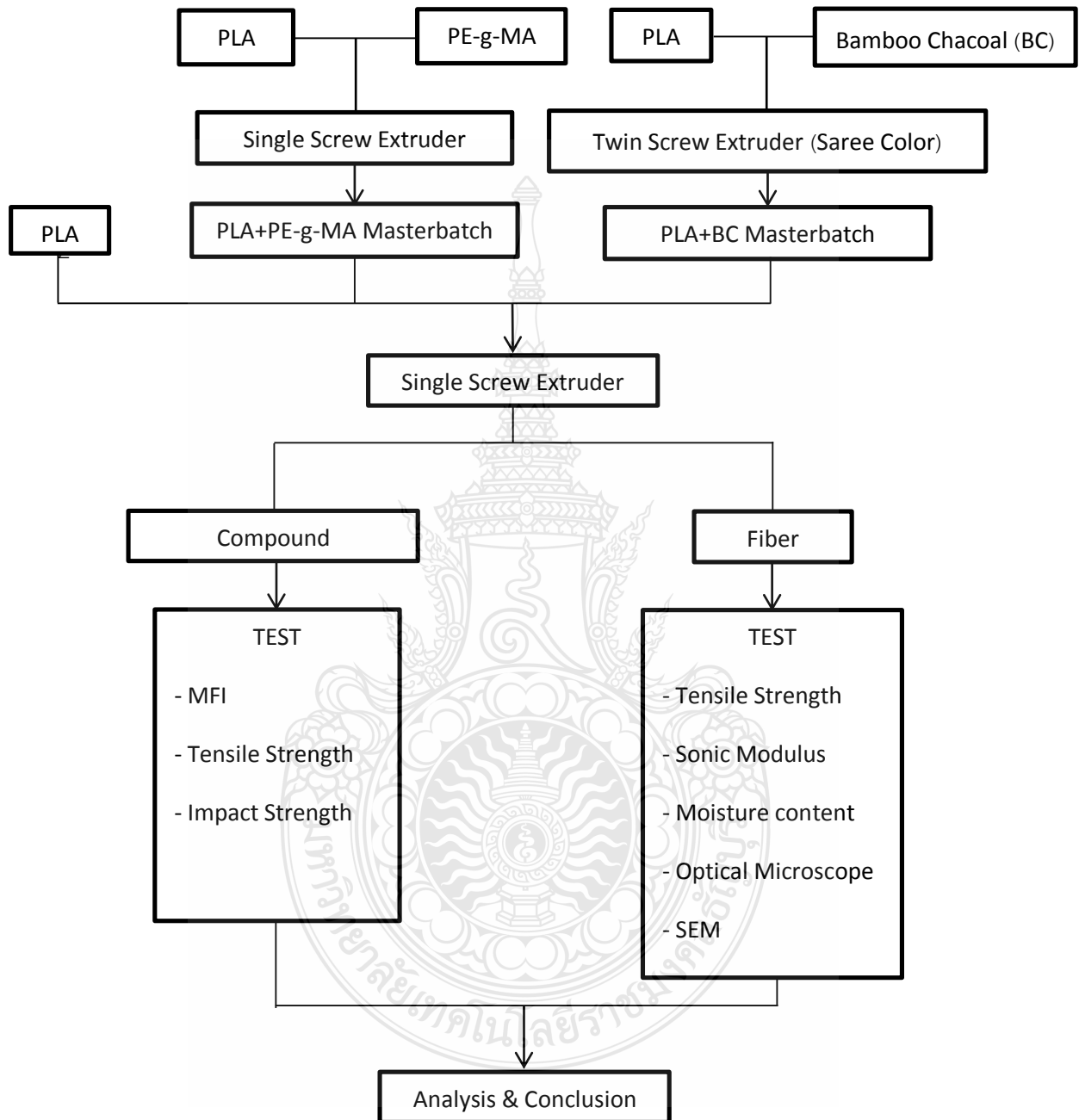
#### 3.2.2 อุปกรณ์ และสารเคมี

1. Mold dogbone
2. ค้อนหัวยาง
3. เกรียง
4. แผ่นอลูมิเนียม
5. ถุงมือ
6. คัตเตอร์
7. ซิลิโคนสเปรย์

### 3.2.3 เครื่องมือ

1. ตู้อบแบบลมร้อนของ บริษัท ไชแอนติฟิคโพรโมชั่น จำกัด รุ่น FD115
2. เครื่องอบลมร้อน Hot air oven รุ่น UN30 ยี่ห้อ MEMMERT
3. อุปกรณ์คัดแยกขนาด (ตะแกรงขนาด 300 mesh)
4. เครื่องอัดรีดเกลียวเดี่ยว Single screw extruder: ThermoHaake รุ่น PolyDrive R252 Extruder
5. ชุดม้วนเก็บ (Winder) บริษัท Leeson Burlington 2391 Model 967 Order B18513
6. เครื่องตัดเม็ดพลาสติก
7. เครื่อง Compression molding บริษัท LAB TACH ENGINEERING CO.,LTD รุ่น LP-20M
8. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Analytical balance) ของบริษัท ชาร์ทีเรียส (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น BSA3202S
9. เครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt flow index, MFI) ตามมาตรฐาน ASTM D1238-98 รุ่น XRL-400 บริษัท C.B.N Material Test CO.,LTD
10. เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength tester) บริษัท Lloyd Instrument รุ่น LR10K Plus
11. เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength tester) บริษัท Instron
12. เครื่องทดสอบสมบัติความต้านแรงกระแทก (Izod impact strength tester) บริษัท CEAST
13. เครื่องทดสอบการเรียงตัวของโมเลกุลตามความยาวของเส้นใย (Sonic modulus Tester : Lawson and hemphil)
14. กล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope, OM) ยี่ห้อ Olympus Cx41
15. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL Scanning electron microscope (SEM) รุ่น JSM-5410LV

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังขั้นตอนและการดำเนินงาน

### 3.4 วิธีการดำเนินงาน

3.4.1 วิธีการเตรียมเม็ดพอลิแลคติกแอซิด PLA ผงถ่านไม้ไผ่ Bamboo Charcoal และพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ PE-g-MA ผู้จัดทำได้คัดเลือกเม็ดพอลิแลคติกแอซิดเกรดเส้นใยและเลือกใช้ผงถ่านไม้ไผ่สำเร็จรูป และ เม็ดพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA)

3.4.2 นำผงถ่านไม้ไผ่มาผสมกับพอลิแลคติกแอซิดเพื่อทำ Masterbatch 20% w/w ในขั้นตอนนี้ทางผู้จัดทำได้ส่งวัตถุดิบให้กับบริษัท สาลีคัลเลอร์ จำกัด จัดทำเป็น Masterbatch 20% w/w โดยที่ 20% w/w คือ ในน้ำหนัก 100 กรัม ของน้ำหนัก Masterbatch จะมีพอลิแลคติกแอซิดผสมอยู่ 80 กรัม และมีผงถ่านไม้ไผ่ 20 กรัม

#### รูปที่ 3.2 Masterbatch ผงถ่านไม้ไผ่ 20%

3.4.3 นำเม็ดพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ PE-g-MA เพื่อทำ Masterbatch 50% w/w นำเม็ดพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ PE-g-MA อย่างละ 200 กรัม มาทำการอบไล่ความชื้นโดยใช้อุณหภูมิในการอบที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้ นำเม็ดพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ PE-g-MA พร้อมใช้งาน



รูปที่ 3.3 เตรียมการอบ เม็ดพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

3.4.4 นำพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ มาผสมให้เข้ากัน โดยจะใส่ในถุงและเขย่าคลุกเคล้าให้เข้ากัน

3.4.5 นำเม็ดที่ผสมกันจนเข้ากันแล้วนำไปเข้าเครื่อง Single screw extruder เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสม โดยมีส่วนผสมของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์



รูปที่ 3.4 พอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการขึ้นรูป

3.4.6 นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้นำไปตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก

3.4.7 หลังจากตัดพอลิเมอร์ผสมเป็นเม็ดเรียบร้อยแล้วจะได้พอลิเมอร์ผสม หรือ Masterbatch 50% w/w โดยมีส่วนผสมของพอลิแลคติกแอซิด PLA และพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ PE-g-MA



รูปที่ 3.5 PLA+(PE-g-MA) Masterbatch 50% w/w

3.4.8 ขั้นตอนนี้จะเป็นการคำนวณสัดส่วนต่าง ๆ ของแต่ละตัวอย่างเป็นการลดจำนวนของ BC กับ PE-g-MA ให้ได้ตามสัดส่วนที่ต้องการโดยที่ MBBC มี 20% และ MBPE-g-MA มี 50% โดยมีวิธีการคำนวณดังตารางต่อไปนี้



ตารางที่ 3.1 แสดงวิธีการคำนวณทั้ง 13 ตัวอย่างในสัดส่วนที่แตกต่างกันไป

ลำดับ	รหัสตัวอย่าง	อัตราส่วน
1	PLA100	PLA100%
2	PLA98.5BC1PEMA0.5	PLA98.5%BC1%PE-g-MA0.5%
3	PLA98BC1PEMA1	PLA98%BC1%PE-g-MA1%
4	PLA97.5BC1PEMA1.5	PLA97.5%BC1%PE-g-MA1.5%
5	PLA96.5BC3PEMA0.5	PLA96.5%BC3%PE-g-MA0.5%
6	PLA96.BC3PEMA1	PLA96%BC3%PE-g-MA1%
7	PLA95.5BC3PEMA1.5	PLA95.5%BC3%PE-g-MA1.5%
8	PLA94.5BC5PEMA0.5	PLA94.5%BC5%PE-g-MA0.5%
9	PLA94BC5PEMA1	PLA94%BC5%PE-g-MA1%
10	PLA93.5BC5PEMA1.5	PLA93.5%BC5%PE-g-MA1.5%
11	PLA99BC1	PLA99%BC1%PE-g-MA0%
12	PLA97BC3	PLA97%BC3%PE-g-MA0%
13	PLA95BC5	PLA95%BC5%PE-g-MA0%

3.4.9 นำส่วนผสมต่าง ๆ มาชั่งน้ำหนักผสมให้เข้ากันโดยจะใส่ในถุงและเขย่าคลุกเคล้าให้เข้ากัน



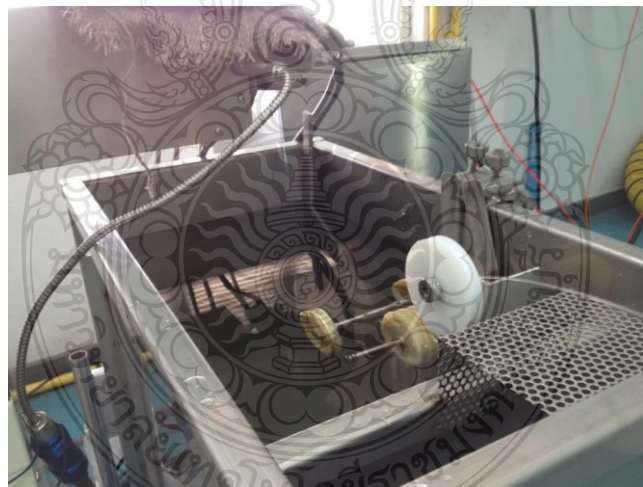
รูปที่ 3.6 ชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนต่าง ๆ

3.4.9 นำส่วนผสมที่คลุกเคล้าจนเข้ากันนำไปเข้าเครื่อง Single screw extruder เพื่อขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมโดยที่กำหนดสภาวะดังนี้

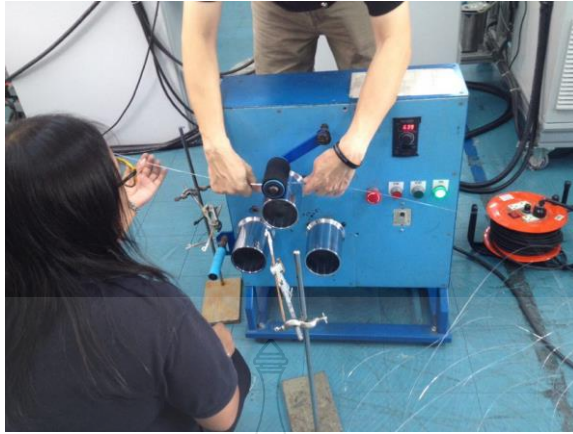
**ตารางที่ 3.2** สภาวะที่ใช้ในการ Compound โดยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (Single screw extrusion: ThermoHaake PolyDrive)

Zone	Temp (°C)	รอบสกรู (rpm)	Hold	Diameter (mm.)
1	180			
2	200			
3	210	60	1	3
4	220			
5	230			

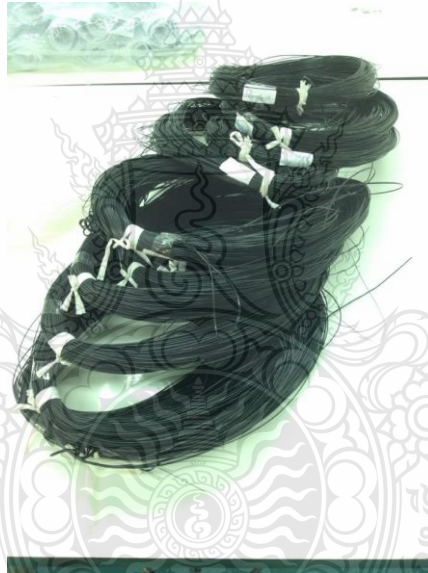
3.4.10 ทำการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมแต่ละทำการดึงเส้นพอลิเมอร์ผสมให้ผ่านน้ำเพื่อให้เส้นพอลิเมอร์ผสมทำการเซตตัวแล้วม้วนเก็บ



**รูปที่ 3.7** อ่างน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 3.8 การดึงเส้นและม้วนเก็บ



รูปที่ 3.9 พอลิเมอร์ผสมทั้ง 13 ตัวอย่าง

3.4.11 เมื่อได้เส้นพอลิเมอร์ผสมครบทั้ง 13 ตัวอย่างแล้วนำพอลิเมอร์ผสมไปตัดเป็นเม็ดเล็กด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก



รูปที่ 3.10 การตัดพอลิเมอร์ผสมให้เป็นเม็ดย่อย



รูปที่ 3.11 พอลิเมอร์ผสมทั้ง 13 ตัวอย่างที่ทำการตัดเรียบร้อยแล้ว

#### 3.4.12 ขั้นตอนการขึ้นรูปขึ้นทดสอบพอลิเมอร์ผสม

3.4.12.1 ผสมพอลิเมอร์ผสมตามสูตรทั้ง 13 ตัวอย่าง

3.4.12.2 นำเม็ดพอลิเมอร์ที่จะทำการขึ้นรูปลงบนแม่พิมพ์



รูปที่ 3.12 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นทดสอบพอลิเมอร์ผสม

3.4.12.3 จากนั้นนำแม่พิมพ์ใส่เครื่อง Compression molding ตั้งค่าอุณหภูมิที่ใช้  
หลอมเหลว 210 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการ Compression 5 นาที

3.4.12.4 ใช้เวลาหล่อเย็น 4 นาที

3.4.12.5 นำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องแล้วแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 3.13 นำแม่พิมพ์เข้าเครื่อง Compression molding



รูปที่ 3.14 แกะชิ้นทดสอบจากแม่พิมพ์

3.4.12.6 แม่พิมพ์จะมี ชิ้นทดสอบแรงดึง Tensile strength จำนวน 3 ชิ้น และ ชิ้นทดสอบแรงกระแทก 4 ชิ้น



รูปที่ 3.15 ชิ้นทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูป

3.4.13 เตรียมพอลิแลคติกแอซิด Masterbatch ถ่านไม้ไฟ และ พอลิเอทิลีนกราฟต์ มาเลือกแอนไฮไดรตในการขึ้นรูปเส้นใย

นำเม็ดพอลิแลคติกแอซิดเกรด 6100D Masterbatch ถ่านไม้ไฟ และ PE-g-MA มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ทำการผสม PLA MBBC และ PE-g-MA ตามอัตราส่วน ตารางที่ 3.1 ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (Single screw extrusion: ThermoHaake PolyDrive)



รูปที่ 3.16 เตรียมการอบ PLA เกรด 6100D Masterbatch ถ่านไม้ไผ่ และ Masterbatch PE-g-MA

#### 3.4.14 การขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงถ่านไม้ไผ่

นำพอลิเมอร์ผสมจาก 3.4.12 ดังตาราง 3.3 มาขึ้นรูปเส้นใยแบบหลายเส้น (Muti-filament) โดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (Single screw extrusion: ThermoHaake PolyDrive) แสดงสภาวะดังตารางที่ 3.4 และกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นแบบหลอมเหลว ดังรูปที่ 3.17

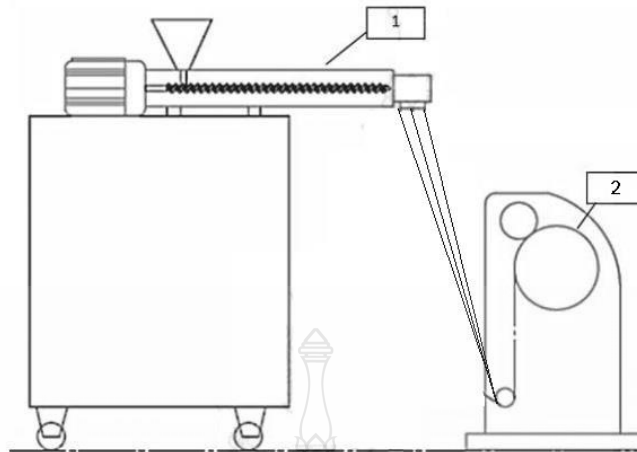
**ตารางที่ 3.3** แสดงวิธีการคำนวณทั้ง 13 ตัวอย่างในสัดส่วนที่แตกต่างกันไป

ลำดับ	รหัสตัวอย่าง	อัตราส่วน
1	PLA100	PLA100%
2	PLA98.5BC1PEMA0.5	PLA98.5%BC1%PE-g-MA0.5%
3	PLA98BC1PEMA1	PLA98%BC1%PE-g-MA1%
4	PLA97.5BC1PEMA1.5	PLA97.5%BC1%PE-g-MA1.5%
5	PLA96.5BC3PEMA0.5	PLA96.5%BC3%PE-g-MA0.5%
6	PLA96.BC3PEMA1	PLA96%BC3%PE-g-MA1%
7	PLA95.5BC3PEMA1.5	PLA95.5%BC3%PE-g-MA1.5%
8	PLA94.5BC5PEMA0.5	PLA94.5%BC5%PE-g-MA0.5%
9	PLA94BC5PEMA1	PLA94%BC5%PE-g-MA1%
10	PLA93.5BC5PEMA1.5	PLA93.5%BC5%PE-g-MA1.5%
11	PLA99BC1	PLA99%BC1%PE-g-MA0%
12	PLA97BC3	PLA97%BC3%PE-g-MA0%
13	PLA95BC5	PLA95%BC5%PE-g-MA0%

**ตารางที่ 3.4** สภาวะในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ผสมด้วยกระบวนการปั่นแบบหลอมเหลว

Die	24 holds (diameter has 0.32 mm/hole)
Temperature (°C)	180,200,210 (Zone Extruder) 220 (Connector) and 230 (Die)
Screw speed	8 rpm
Winding speed (m/min)	400





รูปที่ 3.17 Fiber melt spinning system: (1) Extruder, (2) winding unit

จากรูปที่ 3.17 เป็นกระบวนการปั่นเส้นใยแบบหลอมเหลว โดยให้ความร้อนกับพอลิเมอร์ผสม และอัดรีดผ่านสปินเนอร์เร็ท (Spinneret) จากนั้นทำให้เส้นใยเย็นตัวและตกลงมาอย่างอิสระ และม้วนเก็บเส้นใยด้วยเครื่องมือม้วนเก็บเส้นใย (Winding) ตามความเร็วที่กำหนด โดยความเร็วในการม้วนเก็บนั้น จะมีผลต่อความแข็งแรงของเส้นใยด้วย



รูปที่ 3.18 การขึ้นรูปเส้นใยอัดรีดผ่านสปินเนอร์เร็ท 24 holes

### 3.4.15 นำไปทดสอบสมบัติต่างๆ

#### 3.4.13.1 การทดสอบความสามารถในการไหล (Melt flow index : MFI)

##### 1) วัสดุที่ใช้

- โพลีแลคติกแอซิด PLA
- PLA/PE-g-MA masterbatch
- PLA/Bamboo charcoal masterbatch

##### 2) เครื่องมือที่ใช้ ทดสอบความสามารถในการไหล (Melt flow index : MFI)

รุ่น Model XRL-400A บริษัท C.B.N Material test Co.,Ltd.



รูปที่ 3.19 เครื่อง Melt flow index (MFI)

##### 3) วิธีการทดสอบ

- มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ ASTM D1238-98
- ตั้งค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ 210 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการตัด คือ 10 วินาทีโดยใช้เหล็กถ่วงน้ำหนักขนาด 2.16 kg.
- นำเม็ดพอลิเมอร์ที่เตรียมไว้วางบนแท่ง Piston รอจนถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้
- เครื่องจะทำการตัดพอลิเมอร์ที่ถูกอัดรีดลงมา 10 วินาที/ครั้ง นำเส้นที่ตัดไปชั่งน้ำหนักแล้วหาค่าเฉลี่ยนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาบันทึกลงเครื่องประมวลผลจะได้ค่าดัชนีการไหลเป็นจำนวนกรัมต่อเวลา 10 นาที

### 3.4.16 นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปทำการทดสอบ

#### 3.4.16.1 ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

##### 1) วัสดุที่ใช้

- ชิ้นทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูป Compression molding พอลิเมอร์ PLA 6100D

- ชิ้นทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูป Compression molding PLA+ (PE-g-MA)+bamboo charcoal MB 20% ทั้ง 13 ตัวอย่าง

##### 2) เครื่องมือที่ใช้ Tensile strength testing machine



รูปที่ 3.20 เครื่อง Tensile strength testing machine

##### 3) วิธีการทดสอบ

- มาตรฐานการทดสอบ ASTM D638

- นำชิ้นทดสอบยึดด้วยแท่นจับของเครื่องทดสอบ

- ชิ้นทดสอบขนาดที่เตรียม ระยะห่างระหว่างที่จับยึด (Distance between grips) 115 mm ความยาวเกจ (Gauge length: L) 50 มิลลิเมตร ความเร็วในการทดสอบ (Speed testing) 50 มิลลิเมตรต่อนาที (Load cell) 5 กิโลนิวตัน (kN) ที่อุณหภูมิห้อง เครื่องจะดึงชิ้นทดสอบจนขาด จำนวนชิ้นทดสอบใช้ตัวอย่างละ 5 ชิ้น

- ทำการทดสอบแล้วบันทึกผล

### 3.4.16.1 ทดสอบสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก (Izod impact)

#### 1) วัสดุที่ใช้

- ชิ้นทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูป Compression molding พอลิเมอร์

PLA 6100D Pure

- ชิ้นทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูป Compression molding PLA+(PE-g-MA) +Bamboo Charcoal MB 20% ทั้ง 13 ตัวอย่าง

#### 2) เครื่องมือที่ใช้ Izod Impact testing machine



รูปที่ 3.21 เครื่อง Izod impact testing machine

#### 3) วิธีการทดสอบ

- มาตรฐานการทดสอบ ASTM D256
- ตั้งค่าเครื่องทดสอบตามมาตรฐาน
- ชิ้นทดสอบขนาดที่เตรียม มีความยาว 8 เซนติเมตร กว้าง 1 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร จำนวนชิ้นทดสอบใช้ตัวอย่างละ 5 ชิ้น
- ก่อนการทดสอบทำรอยบากโดยใช้เครื่องมือทำรอยบากด้านข้างที่จุดกึ่งกลางประมาณ 2 มิลลิเมตร
- กำหนดค่าความฝืดค้อนเปล่าที่ 0.008 J และขนาดของหัวเหวี่ยงที่ 2 J เพื่อนำไปลบกับค่าที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานจะได้ค่าพลังงานที่แท้จริง
- นำชิ้นทดสอบใส่แทนจับชิ้นงานของเครื่องทดสอบให้รอยบากอยู่ตรง ตำแหน่งที่กำหนดไว้จากนั้นทำการทดสอบและบันทึกผล

### 3.4.17 นำเส้นใยที่ได้ไปทำการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

#### 1) วัสดุที่ใช้

- เส้นใยที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นแบบ

หลอมเหลว PLA 6100D

- เส้นใยที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นแบบ

หลอมเหลว PLA+(PE-g-MA)+Bamboo Charcoal MB 20% ทั้ง 13 ตัวอย่าง

#### 2) เครื่องมือที่ใช้ Tensile strength testing machine



รูปที่ 3.22 เครื่อง Tensile strength testing machine

#### 3) วิธีการทดสอบ

ใช้ตัวอย่างทดสอบที่เป็นเส้นใยเดี่ยวโดยใช้เครื่องทดสอบจากบริษัท Instron ดังรูปที่ 3.22 มีวิธีการทดสอบดังนี้

- แยกเส้นใยจากเส้นด้ายที่เตรียมไว้ ไปติดกับแบบที่ให้ (Template) โดยกระดาษกาวด้านบนและด้านล่างโดยที่หนึ่ง ตัวอย่างการทดลองจะต้องทำอย่างน้อย 10 ชิ้นตัวอย่างจากนั้น นำค่ามาหาค่าเฉลี่ย
- ทดสอบเส้นใยเดี่ยวโดยใช้มาตรฐาน ASTM D 3822 โดยเส้นใย จะมีความยาวเส้นด้ายทดสอบ Gauge length เท่ากับ 25

มิลลิเมตร และใช้ความเร็วของการดึง (Crosshead speed)  
เท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อนาที

- ทำการจดบันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 3.23 การแยกเส้นใยไปติดกับแบบ (Template) เพื่อใช้ในการทดสอบ

3.4.18 การทดสอบการเรียงตัวของโมเลกุลตามความยาวของเส้นใย

1) วัสดุที่ใช้

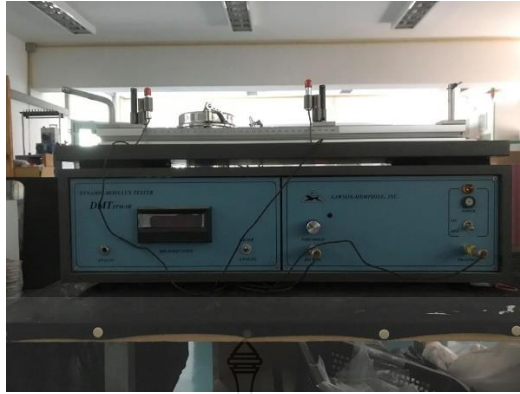
- เส้นใยที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นแบบ

หลอมเหลว PLA 6100D

- เส้นใยที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นแบบ

หลอมเหลว PLA+(PE-g-MA)+Bamboo Charcoal MB 20% ทั้ง 13 ตัวอย่าง

2) เครื่องมือที่ใช้ (Sonic modulus tester : Lawson and Hemphil)



รูปที่ 3.24 Sonic modulus tester : (Lawson and Hemphil)

### 3. วิธีทดสอบ

- ทดสอบหา Elastic modulus เส้นใยโดยการวัดความเร็วเสียงที่วิ่งผ่านวัสดุ เป็นจังหวะ ๆ โดยให้เสียงผ่านวัสดุ ซึ่งความเร็วที่วิ่งผ่านจะสะท้อนถึงลักษณะ โครงสร้าง การจัดเรียงตัวและองค์ประกอบของวัสดุนั้น โดยความเร็วเสียงนั้น จัดเป็นพลังงานเชิงกลอย่างหนึ่ง โดยการวัดความเร็วเสียงที่แม่นยำจะทำให้ทราบถึงโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุนั้นๆ

#### 3.4.19 การทดสอบความชื้นของเส้นใย (Moisture content)

##### 1) วัสดุที่ใช้

- เส้นใยที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นแบบ หลอมเหลว PLA 6100D
- เส้นใยที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นแบบ หลอมเหลว PLA+(PE-g-MA)+bamboo charcoal MB 20% ทั้ง 7 ตัวอย่าง

- ##### 2) เครื่องมือที่ใช้
- เครื่องอบลมร้อน Hot air oven รุ่น UN30 ยี่ห้อ MEMMERT และ เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Analytical balance) ของบริษัท ซาร์โทเรียส (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น BSA3202S



รูปที่ 3.25 การทดสอบความชื้น (Moisture content)

### 3) วิธีการทดสอบ

- นำเส้นใยมาตัดใส่ปิกรเกอร์ตัวอย่างละ 3 ปิกรเกอร์
- ทำการจดบันทึกน้ำหนักเส้นใยก่อนนำเข้าไปอบ
- ทำการอบเส้นใยด้วยตู้อบ Hot air oven รุ่น UN30 ยี่ห้อ MEMMERT ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
- ทำการจดบันทึกน้ำหนักเส้นใยหลังนำเข้าไปอบ
- ทำการจดบันทึกผลการทดลอง

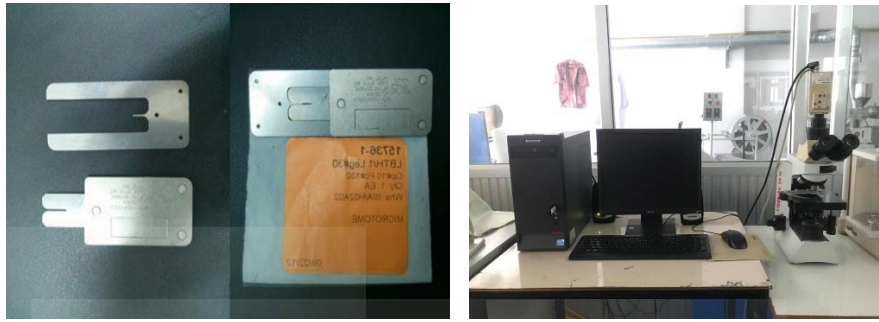
### 3.4.20 การศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นใยผสมผงถ่านไม้ไฟที่ขึ้นรูปได้

#### 1) วัสดุที่ใช้

- เส้นใยที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นแบบ หลอมเหลว PLA 6100D
- เส้นใยที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นแบบ หลอมเหลว PLA+(PE-g-MA)+bamboo charcoal MB 20% ทั้ง 13 ตัวอย่าง

2) เครื่องมือที่ใช้ Microtome และ กล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope, OM)





รูปที่ 3.26 Microtome และ กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope, OM)

### 3) วิธีการทดสอบ

เส้นใยผสมผงถ่านไม้ไผ่ที่ได้จากการผ่านกระบวนการแล้วจะถูกนำมา  
 ดูลักษณะภาพตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์ดังรูปที่ 3.23 โดยการดูลักษณะ  
 ภาพตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์มีการเตรียมตัวอย่างดังนี้

- นำเส้นใยมาใส่ในอุปกรณ์ตัดเส้นใย Microtome จากบริษัท Hill, Inc.
- จากนั้นใช้ใบมีดโกนตัดเส้นใยตามแนวขวาง
- นำตรวจสอบลักษณะของภาพตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์

### 3.4.21 การทดสอบสัณฐานวิทยาการศึกษาสัณฐานวิทยากล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

#### 1) วัสดุที่ใช้

- เส้นใยที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นแบบ  
 หลอมเหลว และ ขึ้นทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูป Compression molding พอลิเมอร์

#### 2) เครื่องมือที่ใช้ JEOL Scanning electron microscope (SEM) รุ่น

JSM-5410LV



รูปที่ 3.27 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM)

3) วิธีการทดสอบ

- ตรวจสอบสัณฐานวิทยากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ JEOL Scanning electron microscope (SEM) รุ่น JSM-5410LV ที่กำลังขยาย 1000 และ 2000 เท่า ใช้กระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์

### 3.5 สถานที่ทำการศึกษา

3.5.1 ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ-การผลิตเส้นใยสังเคราะห์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

3.5.2 ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี



## บทที่ 4

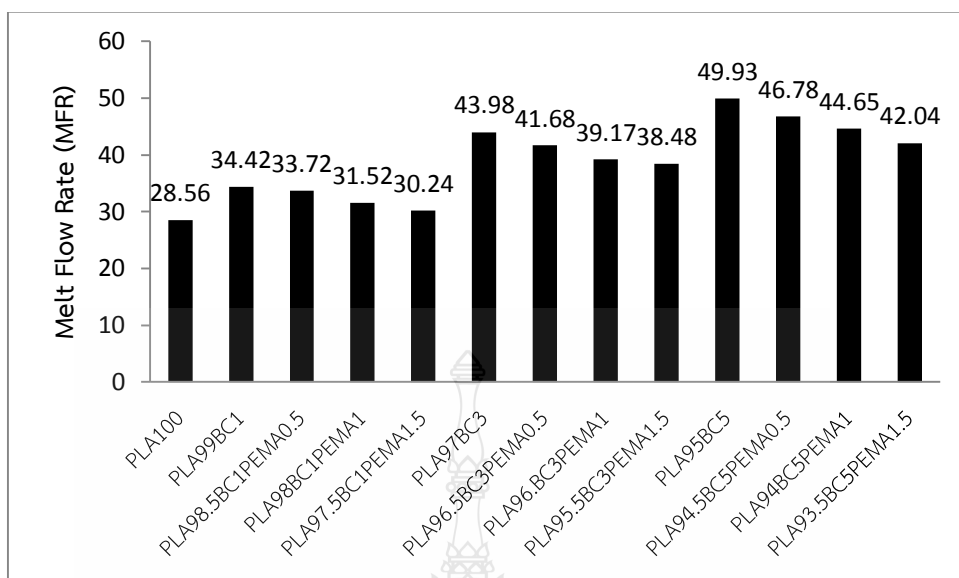
### ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

#### 4.1 การทดสอบค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม (Melt flow index : MFI)

จากการทดสอบการไหลของพอลิเมอร์ผสมตามมาตรฐาน ASTM D1238 นำค่าอัตราการไหลของมวลไหลอม (MFR) มาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม

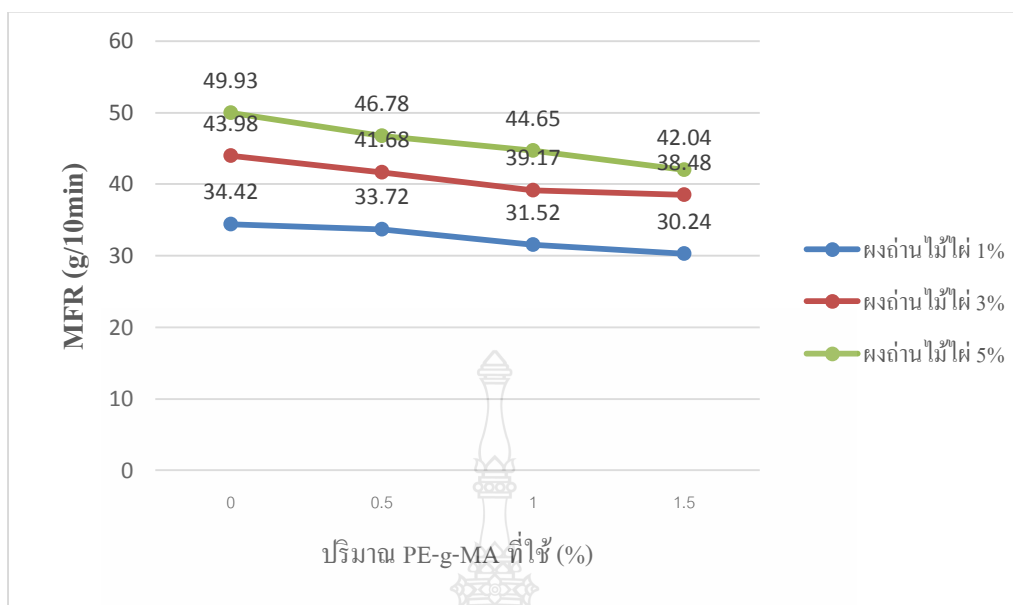
ลำดับ	รหัสตัวอย่าง	Melt Temp (°C)	น้ำหนัก	MFR
		Load (Kg)	(กรัม)	(g/10min)
1	PLA100	210/2.16	0.4767	28.56
2	PLA99BC1	210/2.16	0.5736	34.42
3	PLA98.5BC1PEMA0.5	210/2.16	0.5620	33.72
4	PLA98BC1PEMA1	210/2.16	0.5253	31.52
5	PLA97.5BC1PEMA1.5	210/2.16	0.5041	30.24
6	PLA97BC3	210/2.16	0.7332	43.98
7	PLA96.5BC3PEMA0.5	210/2.16	0.6946	41.68
8	PLA96.BC3PEMA1	210/2.16	0.6528	39.17
9	PLA95.5BC3PEMA1.5	210/2.16	0.6413	38.48
10	PLA95BC5	210/2.16	0.8321	49.93
11	PLA94.5BC5PEMA0.5	210/2.16	0.7796	46.78
12	PLA94BC5PEMA1	210/2.16	0.7741	44.65
13	PLA93.5BC5PEMA1.5	210/2.16	0.7006	42.04



รูปที่ 4.1 การทดสอบดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ Melt flow rate (MFR) (g/10min)

ตารางที่ 4.2 แสดงกลุ่มตัวอย่างผงถ่านไม้ไผ่

กลุ่มตัวอย่าง	ปริมาณ PE-g-MA ที่ใช้ (%)			
	0	0.5	1	1.5
ผงถ่านไม้ไผ่ 1%	34.42	33.72	31.52	30.24
ผงถ่านไม้ไผ่ 3%	43.98	41.68	39.17	38.48
ผงถ่านไม้ไผ่ 5%	49.93	46.78	44.65	42.04



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่า MFR กับปริมาณ PE-g-MA (%)

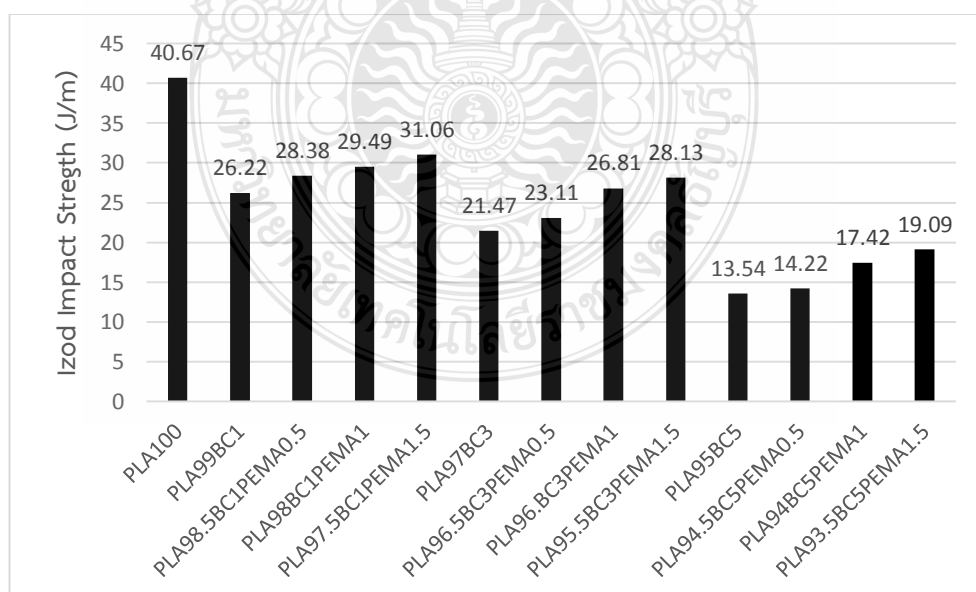
ผลการทดสอบสมบัติดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผงถ่านไม้ไฟ (BC) และพอลิกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ PE-g-MA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยนำค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่างมาเปรียบเทียบ พบว่าเมื่อผสมผงถ่านไม้ไฟมากขึ้น และพอลิกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ลดลงจะทำให้พอลิเมอร์มีการไหลตัวที่สูงขึ้น โดยสมบัติการไหลของ PLA จะอยู่ที่ 28.56 g/10min ซึ่งค่าที่ได้ทำให้ต้องพิจารณาหากนำไปใช้งาน เพราะ Injection ต้องการการไหลที่ดี ส่วน Extrusion ต้องการความหนืด ดังนั้น ถ้าเติมผงถ่านไม้ไฟจะทำให้สมบัติการไหลดีขึ้น ส่วนการเติม PE-g-MA จะทำให้การไหลน้อยลง การนำพอลิเมอร์ไปขึ้นรูปที่ต้องการไหลที่ดี เช่น Injection หรือ Extrusion จะมีผลต่อขึ้นงานได้

#### 4.2 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Izod impact strength)

ผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D256 ทดสอบโดยเครื่องบริษัท CEAST ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.3 และทำกราฟเปรียบเทียบโดยแบ่งกลุ่มตามรูปที่ 4.4

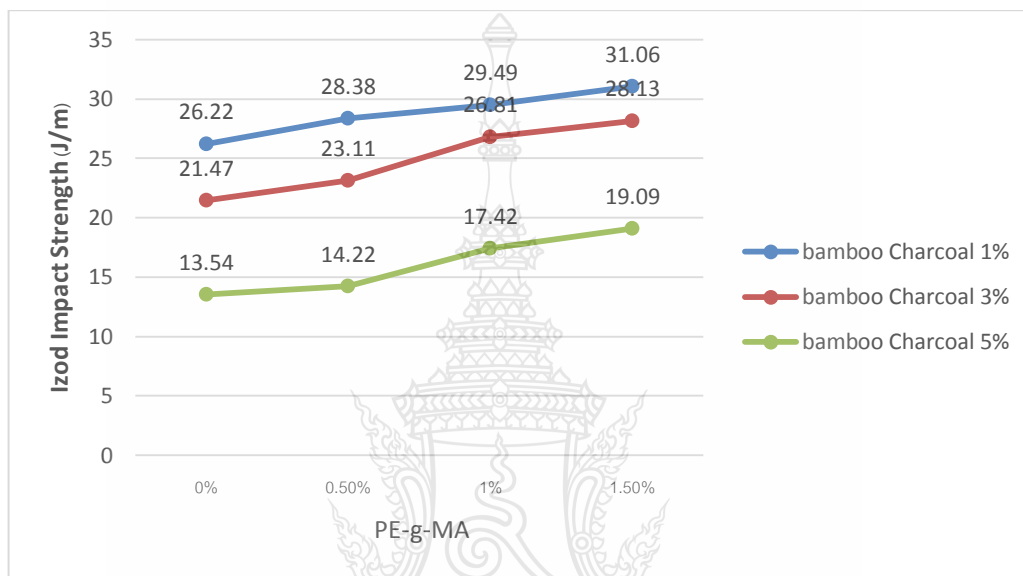
ตารางที่ 4.3 แสดงความต้านทานแรงกระแทก (Izod impact strength) ของพอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไฟ

ลำดับ	รหัสตัวอย่าง	ความหนา (M)	Energy (J)	Impact strength (J/m)
1	PLA100	0.00299	0.160	40.67
2	PLA99BC1	0.00298	0.105	26.22
3	PLA98.5BC1PEMA0.5	0.00298	0.104	28.38
4	PLA98BC1PEMA1	0.00299	0.101	29.49
5	PLA97.5BC1PEMA1.5	0.00299	0.077	31.06
6	PLA97BC3	0.00297	0.109	21.47
7	PLA96.5BC3PEMA0.5	0.00299	0.103	23.11
8	PLA96.BC3PEMA1	0.00297	0.092	26.81
9	PLA95.5BC3PEMA1.5	0.00300	0.065	28.13
10	PLA95BC5	0.00298	0.074	13.54
11	PLA94.5BC5PEMA0.5	0.00298	0.136	14.22
12	PLA94BC5PEMA1	0.00300	0.065	17.42
13	PLA93.5BC5PEMA1.5	0.00298	0.091	19.09



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบการทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม (Izod impact strength)

ผลการทดสอบการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม พบว่าสมบัติของพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงคือ เมื่อเติมผงถ่านไม้ไผ่จะทำให้ความคงทนต่อแรงกระแทกลดลงตามปริมาณของผงถ่านไม้ไผ่ที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเติม สารช่วยผสม PE-g-MA เข้าไปในส่วนผสมของพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์มีการเชื่อมประสานดีขึ้นจึงทำให้ความคงทนต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มที่สูงขึ้นมากกว่าไม่ได้เติม PE-g-MA ดังนั้น PE-g-MA มีผลทำให้ค่าความคงทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบทดสอบการทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม (Izod impact strength)

โดยทำการแบ่งกลุ่มเพื่อให้ดูง่ายในการเปรียบเทียบ ดังนี้ กลุ่มที่ 1 Bamboo charcoal 1% กลุ่มที่ 2 Bamboo charcoal 3% และกลุ่มที่ 3 Bamboo charcoal 5% ตามลำดับ จากกราฟแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงในอัตราส่วนผสมของผงถ่านไม้ไผ่ในแต่ละอัตราส่วนที่กำหนดไว้ และรวมถึงปริมาณ PE-g-MA มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนแสดงอยู่ในตารางที่ 4.3

สาเหตุที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุผสมลดลงนั้นเกิดจากผงถ่านไม้ไผ่ซึ่งเป็นของแข็งและไม่หลอมละลายกระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ PLA ที่หลอมละลายจึงทำให้วัสดุผสมเกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุลซึ่งช่องว่างระหว่างโมเลกุลที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุทั้งสองชนิดซึ่งทำให้เกิดการแยกเฟสเป็นผลทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลงและเมื่อเติมสารช่วยพา PE-g-MA เข้าไปตัว PE-g-MA จะเข้าไป กระจายตัวในพอลิเมอร์และทำให้ช่องว่างระหว่าง



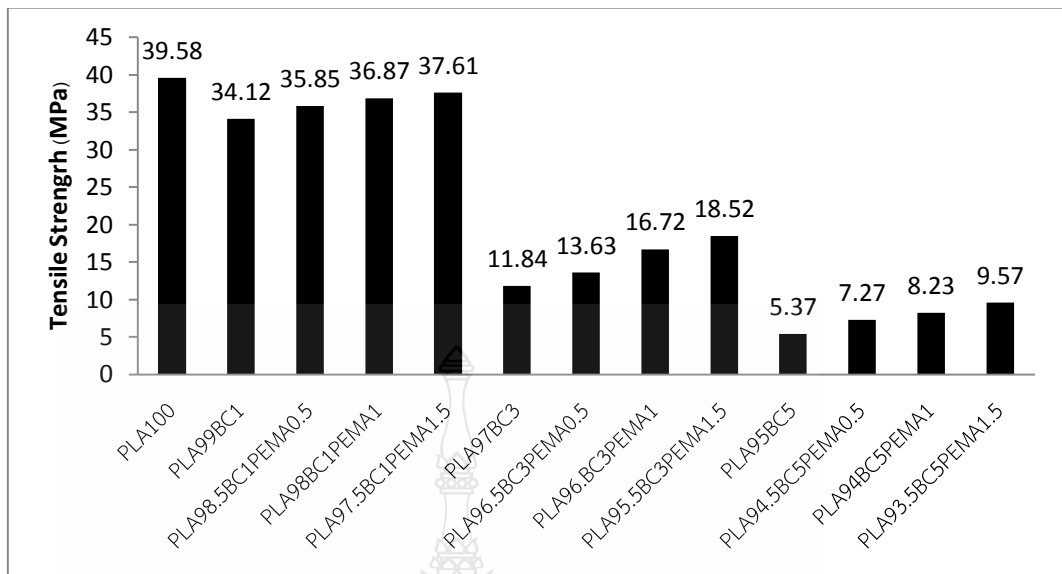
เนื้อพอลิเมอร์และผงถ่านไม้ผงเล็กกลองและรวมตัวกันได้ดีขึ้น ซึ่งค่าจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.4 จึงเป็นไปได้ว่า PE-g-MA มีส่วนช่วยทำให้พอลิเมอร์และผงถ่านไม้ผงเกิดรวมตัวที่ดีขึ้น

### 4.3 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

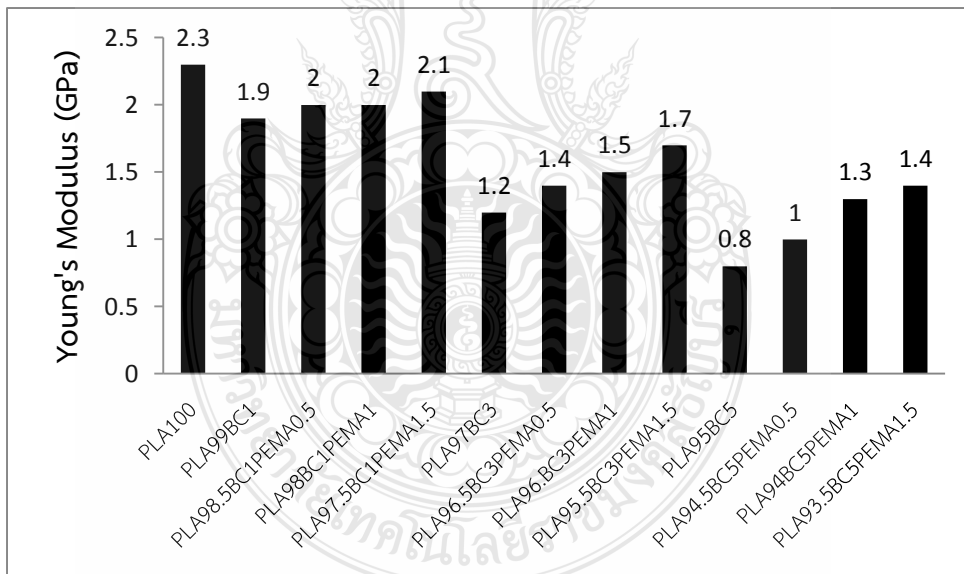
ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม มาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 ทดสอบโดยเครื่องบริษัท Lloyd Instrument รุ่น LR10K Plus โดยทำการทดสอบตัวอย่างละ 6 ครั้ง และนำผลมาหาค่าเฉลี่ย ได้ผลการทดสอบ Tensile Strength, Young's Modulus, Elongation ดังตารางที่ 4.4 และทำกราฟเปรียบเทียบแต่ละตัวอย่าง

ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราส่วนของชิ้นทดสอบ

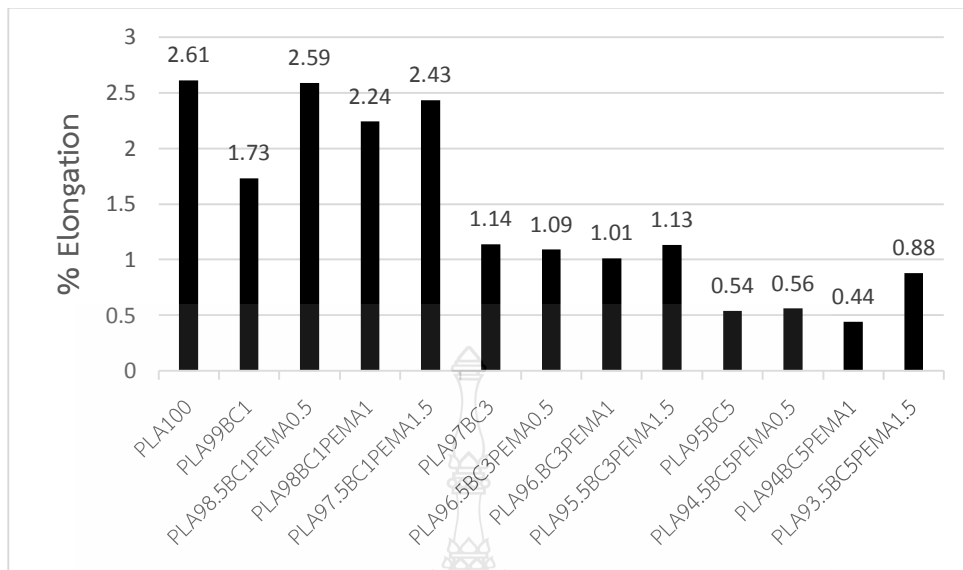
Simple	รหัสตัวอย่าง	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	%Elongation
1	PLA100	39.58	2.3	2.61
2	PLA99BC1	34.12	1.9	1.73
3	PLA98.5BC1PEMA0.5	35.85	2.0	2.59
4	PLA98BC1PEMA1	36.87	2.0	2.24
5	PLA97.5BC1PEMA1.5	37.61	2.1	2.43
6	PLA97BC3	11.84	1.2	1.14
7	PLA96.5BC3PEMA0.5	13.63	1.4	1.09
8	PLA96.BC3PEMA1	16.72	1.5	1.01
9	PLA95.5BC3PEMA1.5	18.52	1.7	1.13
10	PLA95BC5	5.37	0.8	0.54
11	PLA94.5BC5PEMA0.5	5.27	1.0	0.56
12	PLA94BC5PEMA1	8.23	1.3	0.44
13	PLA93.5BC5PEMA1.5	9.57	1.4	0.88



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสม PLA, Bamboo charcoal powder, PE-g-MA



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าความเครียดของพอลิเมอร์ผสม PLA, Bamboo charcoal powder, PE-g-MA



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าการยืดตัวของพอลิเมอร์ผสม PLA, Bamboo charcoal powder, PE-g-MA

ตารางที่ 4.4 แสดงตัวอย่างและอัตราส่วนทั้ง 13 ตัวอย่าง รูปที่ 4.5 แสดงสมบัติเชิงกล ของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสม จากการทดสอบด้วยตัวอย่างชิ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดความร้อน ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) รูปที่ 4.6 แสดงค่าความเครียด (Young's modulus) และรูปที่ 4.7 แสดงค่าการยืดตัว (Elongation) โดยนำค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่างมาเปรียบเทียบ พอลิเมอร์ผสมจากรูปพบว่าค่า PLA มีค่าสูงที่สุดโดยที่ค่าโมดูลัสของพอลิเมอร์ จะลดลงเมื่อปริมาณ ผงถ่านไม้ไฟเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความแข็งแรงดึง Tensile strength ให้ผลการทดลองในแบบเดียวกัน คือค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อ ปริมาณผงถ่านไม้ไฟเพิ่มมากขึ้น และเมื่อผสม PE-g-MA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่กำหนด จากรูปแสดงค่าโมดูลัส ค่าความแข็งแรงดึง และค่า Elongation ของพอลิเมอร์ผสม เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PE-g-MA ในพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น น่าจะเป็นผลมาจาก PE-g-MA เป็นสารช่วยผสมช่วยเพิ่มการยึดเกาะ PLA และ ผงถ่านไม้ไฟ ทำให้สมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น

#### 4.4 ลักษณะเส้นใยของพอลิเมอร์ผสม PLA/Bamboo charcoal powder

##### 4.5.1 วัสดุที่ใช้

- เม็ด PLA / MBBC / MBPE-g-MA ได้จากการขึ้นรูปเส้นใย



รูปที่ 4.8 เส้นใยของพอลิเมอร์ผสม PLA/Bamboo charcoal powder

รูปที่ 4.8 แสดงเส้นใยของพอลิเมอร์ผสมบางส่วนที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยวที่ต่อกับหัวสปินเนอร์เรทแบบ Multi-filament 24 รู จากการขึ้นรูปสามารถเก็บเส้นใยได้ไม่ครบตามจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 13 ตัวอย่างเนื่องจากอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มี PE-g-MA ผสมอยู่ด้วยนั้นไม่สามารถทำการเก็บเส้นใยได้ และผงถ่านไม้ไฟดูดตันที่หัวสปินเนอร์เรทเนื่องจากผงถ่านไม้ไฟมีขนาดไม่เท่ากันทำให้ไม่สามารถเก็บเส้นใยได้เช่นเดียวกัน ผลจากการขึ้นรูปเส้นใยในการเก็บเส้นใยทำให้เห็นว่าขนาดของผงถ่านไม้ไฟ และ PE-g-MA มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยสัดส่วนที่สามารถขึ้นรูปได้ตามตารางที่ 4.5

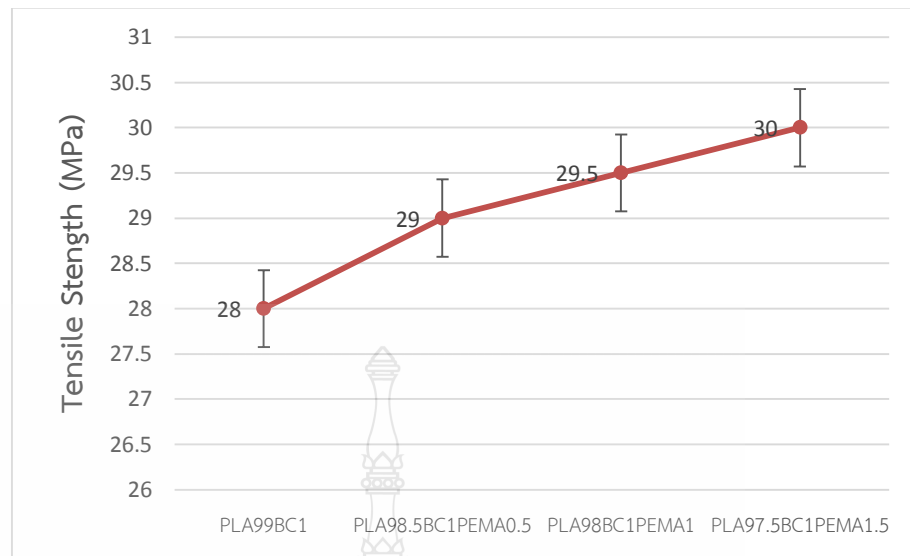
ตารางที่ 4.5 แสดงสัดส่วนที่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้

Simple	รหัสตัวอย่าง	ขึ้นรูปได้	ขึ้นรูปไม่ได้
1	PLA100	/	
2	PLA99BC1	/	
3	PLA98.5BC1PEMA0.5	/	
4	PLA98BC1PEMA1	/	
5	PLA97.5BC1PEMA1.5	/	
6	PLA97BC3	/	
7	PLA96.5BC3PEMA0.5	/	
8	PLA96.BC3PEMA1	/	
9	PLA95.5BC3PEMA1.5	/	
10	PLA95BC5		/
11	PLA94.5BC5PEMA0.5		/
12	PLA94BC5PEMA1		/
13	PLA93.5BC5PEMA1.5		/

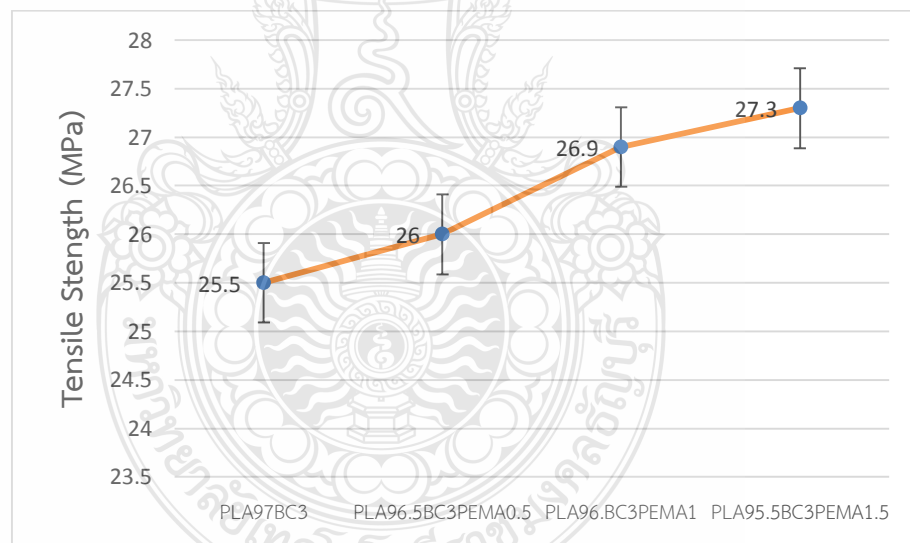
หมายเหตุ : เส้นใยตัวอย่างที่ 10, 11, 12, 13 สามารถขึ้นรูปได้แต่ไม่ต่อเนื่อง

#### 4.5 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของเส้นใย (Tensile strength)

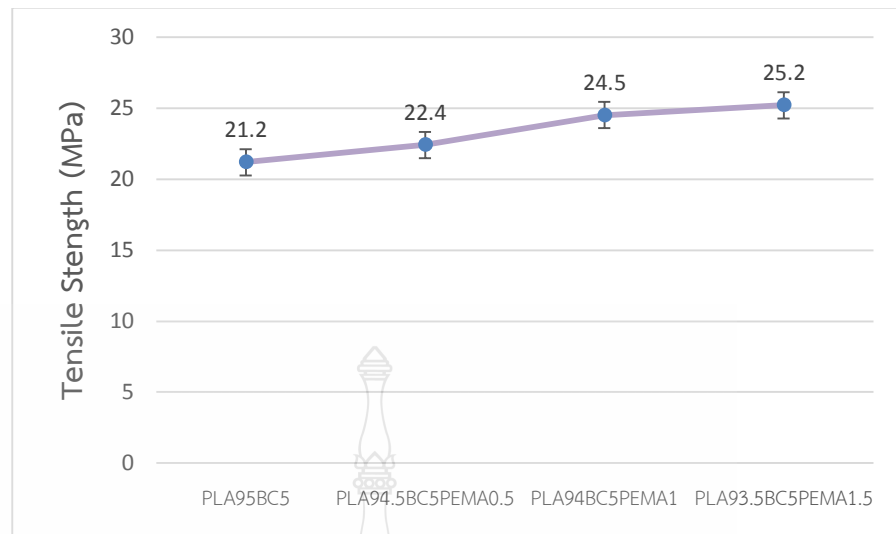
ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของเส้นใย ทดสอบเส้นใยเดี่ยวโดยใช้มาตรฐาน ASTM D 3822 ทดสอบโดยเครื่องบริษัท Instron โดยทำการทดสอบตัวอย่างละ 10 ครั้ง และนำผลมาหาค่าเฉลี่ย ได้ผลการทดสอบ Tensile strength และทำกราฟเปรียบเทียบแต่ละตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.9, รูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 โดยแบ่งตามส่วนผสมของผงถ่านไม้ไฟ 1, 3, และ 5%



รูปที่ 4.9 ค่า Tensile strength ของเส้นใยที่มีส่วนผสมของผงถ่านไม้ไฟ 1% และ PE-g-MA 0,0.5,1,1.5 % ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ค่า Tensile strength ของเส้นใย ที่มีส่วนผสมของผงถ่านไม้ไฟ 3% และ PE-g-MA 0,0.5,1,1.5 % ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ค่า Tensile strength ของเส้นใย ที่มีส่วนผสมของผงถ่านไม้ไผ่ 5% และ PE-g-MA 0,0.5,1,1.5 % ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.9, รูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าค่า Tensile strength ของเส้นใยมีค่าลดลงเมื่อเติมผงถ่านไม้ไผ่ลงไป 1 3 5 % พบว่าเส้นใยมีความแข็งแรงลดลงเมื่อดูจากแนวโน้มของกราฟ ทั้งนี้เพราะว่าผงถ่านไม้ไผ่มีขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ PLA จะเกิดการแยกเฟสระหว่างการหลอมละลายของผงถ่านไม้ไผ่ในเนื้อพอลิเมอร์ของ PLA จึงทำให้วัสดุผสมระหว่าง PLA และผงถ่านไม้ไผ่มีค่าลดลง แต่เมื่อเราเติมสารช่วยผสม PE-g-MA ซึ่งมีคุณสมบัติทำให้วัสดุผสมเชื่อมกันได้ดี ยิ่งขึ้นจากรูปจะเห็นว่าเมื่อเราเติม PE-g-MA ในปริมาณที่ ซึ่งดูจากรูปมีเส้นใยมีแนวโน้มดีขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง ของพอลิเมอร์ผสม เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PE-g-MA ในพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น น่าจะเป็นผลมาจาก PE-g-MA เป็นสารช่วยผสมช่วยเพิ่มการยึดเกาะ PLA และ ผงถ่านไม้ไผ่ ทำให้สมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น

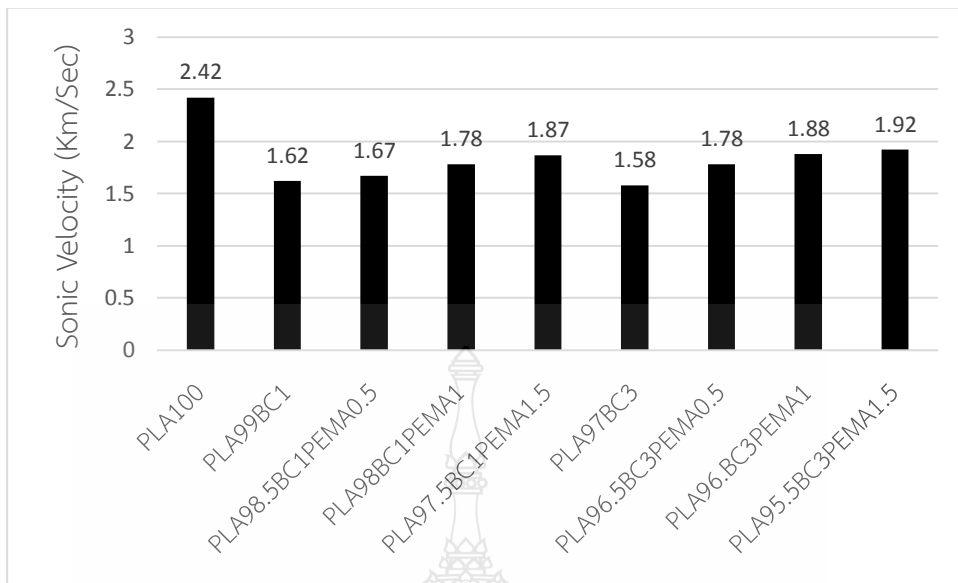
#### 4.6 การทดสอบค่าการเรียงตัวของโมเลกุลตามความยาวของเส้นใย (Sonic modulus)

ผลการทดสอบค่าการเรียงตัวของโมเลกุลตามความยาวของเส้นใย (Sonic modulus) ทดสอบโดยเครื่องบริษัท (Sonic modulus tester : Lawson and Hemphil) และนำผลมาหาค่าเฉลี่ยได้ผลการทดสอบ Sonic velocity และ Modulus in g/denier ดังตารางที่ 4.6 และกราฟเปรียบเทียบแต่ละตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.13, และรูปที่ 4.14

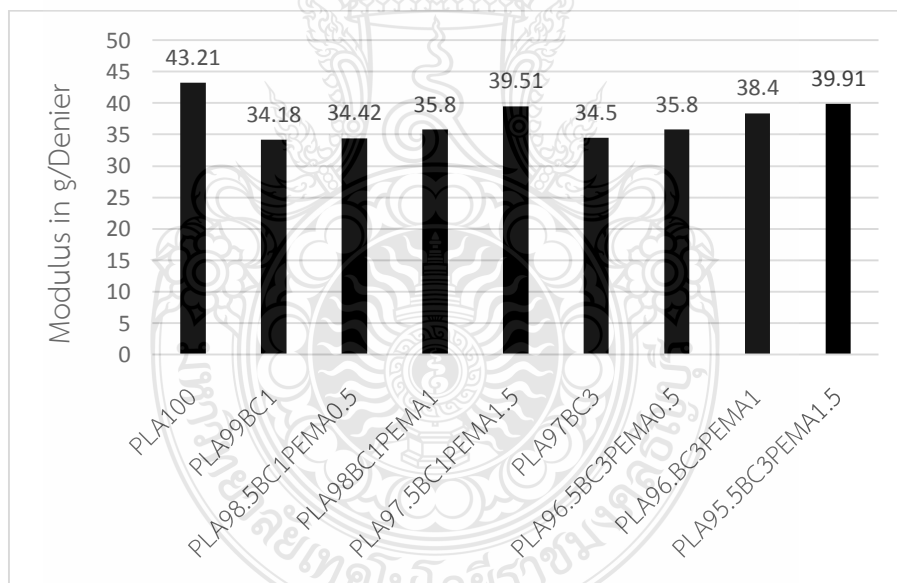
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าการเรียงตัวของโมเลกุลตามความยาวของเส้นใย (Sonic modulus) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไผ่

รหัสตัวอย่าง	Sonic Velocity (Km/Sec.)	Modulus in g/denier
PLA100	2.42	43.21
PLA99BC1	1.62	34.18
PLA98.5BC1PEMA0.5	1.67	34.42
PLA98BC1PEMA1	1.78	35.8
PLA97.5BC1PEMA1.5	1.87	39.51
PLA97BC3	1.58	34.5
PLA96.5BC3PEMA0.5	1.78	35.8
PLA96.BC3PEMA1	1.88	38.4
PLA95.5BC3PEMA1.5	1.92	39.91





รูปที่ 4.12 ค่า Sonic velocity ของเส้นใยที่มีส่วนผสมของผงถ่านไม้ไผ่



รูปที่ 4.13 ค่า Sonic modulus ของเส้นใยที่มีส่วนผสมของผงถ่านไม้ไผ่

จากผลการทดสอบค่าการเรียงตัวของโมเลกุลตามความยาวของเส้นใยของเส้นใยพอลิแลกติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไผ่ รูปที่ 4.13 พบว่า มีค่าค่าความเร็วของเสียงที่วิ่งผ่านเส้นใย มีค่าลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายตัวของ ผงถ่านไม้ไผ่นั้นกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อมีการเติม

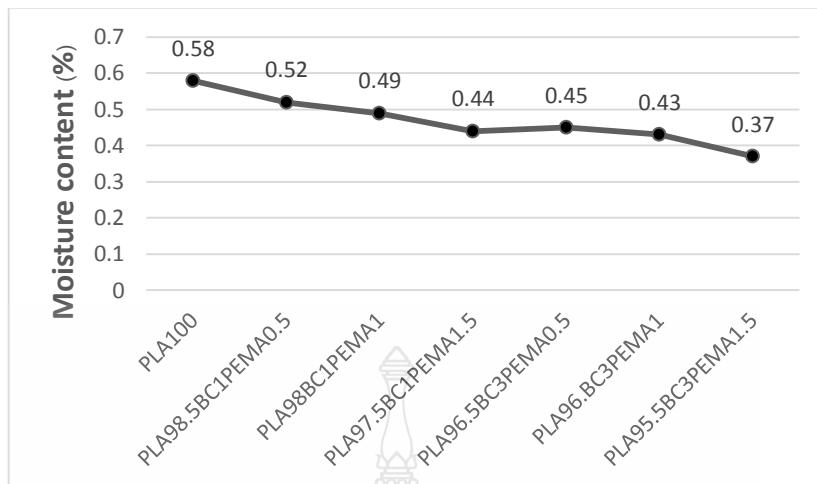
PE-g-MA เป็นสารช่วยความเข้ากันได้ของพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไฟช่วยทำให้การกระจายตัวที่กระจัดกระจายในเนื้อพอลิเมอร์มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวของ PE-g-MA ช่วยทำให้ผงถ่านไม้ไฟเข้าไปกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น จึงทำให้ค่า Sonic modulus มีค่าที่สูงขึ้นตามลำดับ โดยค่า Sonic velocity และ Modulus in g/Denire จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

#### 4.7 การทดสอบความชื้นของเส้นใย (Moisture content)

ผลการทดสอบความชื้นของเส้นใย ทดสอบโดยเครื่องอบลมร้อน Hot air oven รุ่น UN30 ยี่ห้อ MEMMERT และ เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Analytical balance) ของบริษัท ชาร์โทเรียส (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น BSA3202S และนำผลมาหาค่าเฉลี่ยได้ผลการทดสอบค่าความชื้นของเส้นใยดังตารางที่ 4.7 และกราฟเปรียบเทียบแต่ละตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.14

**ตารางที่ 4.7** แสดงค่าทดสอบความชื้นของเส้นใย (Moisture content) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไฟ

รหัสตัวอย่าง	ก่อนอบ			หลังอบ		
	1	2	3	1	2	3
PLA100	0.3713	0.5233	0.7650	0.3678	0.5149	0.7593
PLA98.5BC1PEMA0.5	0.4120	0.5432	0.4090	0.4068	0.5375	0.4042
PLA98BC1PEMA1	0.4255	0.4454	0.4287	0.4201	0.4412	0.4236
PLA97.5BC1PEMA1.5	0.4325	0.4365	0.4875	0.4285	0.4301	0.4845
PLA96.5BC3PEMA0.5	0.3578	0.3662	0.3587	0.3527	0.3622	0.3542
PLA96.BC3PEMA1	0.3957	0.3847	0.3796	0.3922	0.3793	0.3754
PLA95.5BC3PEMA1.5	0.3620	0.3453	0.5395	0.3587	0.3418	0.5350



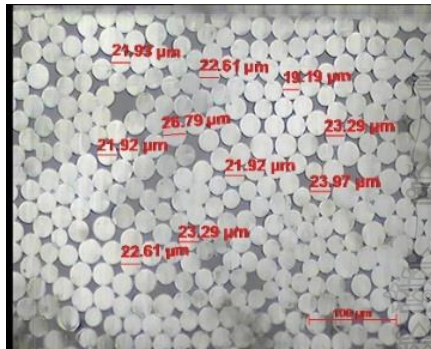
รูปที่ 4.14 ค่าความชื้นของเส้นใย (Moisture content) ของเส้นใยที่มีส่วนผสมของผงถ่านไม้ไผ่

ผลการทดสอบค่าความชื้นของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไผ่ จากรูปที่ 4.14 พบว่าค่าความชื้นของเส้นใยมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากมีปริมาณของผงถ่านไม้ไผ่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าความชื้นที่อยู่ในเส้นใยมีค่าลดลง และ PE-g-MA ก็มีผลทำให้ความชื้นลดลงโดย PE-g-MA ทำให้การเรียงตัวของพอลิเมอร์และผงถ่านไม้ไผ่เข้ากันได้ดีมากขึ้นทำให้ช่องว่างระหว่างพอลิเมอร์และผงถ่านไม้ไผ่ลดลง ทำให้มีผลต่อค่าความชื้นในเส้นใย

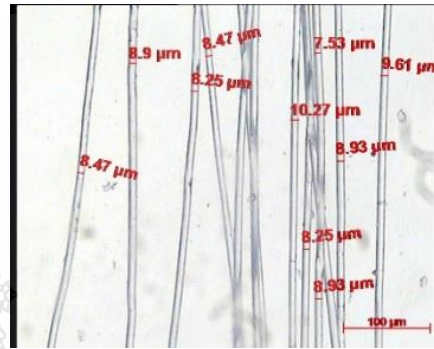
## 4.8 ทดสอบพื้นผิวเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope, OM)

### 4.3.1 วัสดุที่ใช้

- เส้นใยพอลิแลคติกแอซิด เกรด 6100D
- เส้นใย PLA / MBBC / MBPE-g-MA ได้จากการขึ้นรูปเส้นใย



(ก)



(ข)

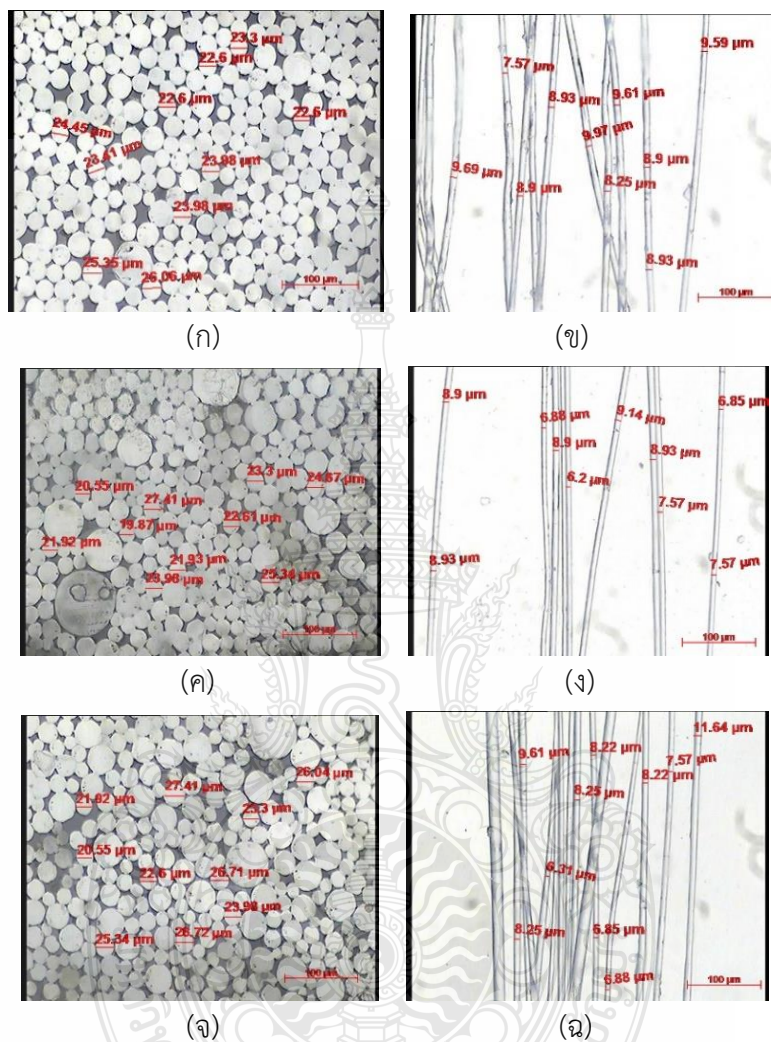
รูปที่ 4.15 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดโดยไม่ผสมผงถ่าน ที่ขนาดกล้อง 10X

(ก) เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดตามแนวขวาง

(ข) เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดตามแนวยาว



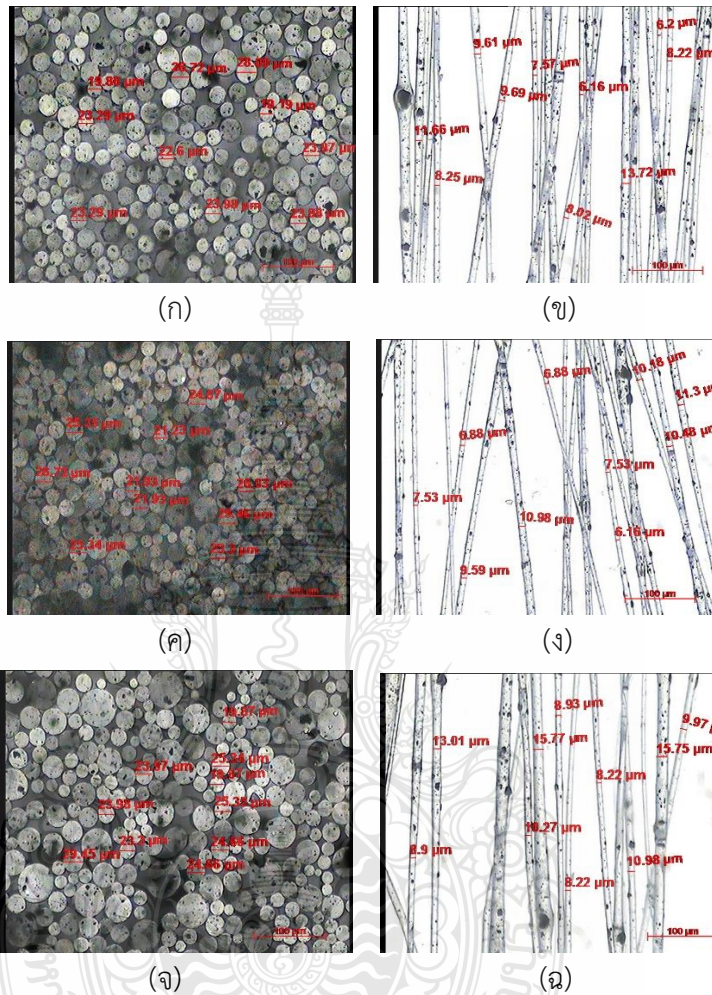
- เส้นใย PLA / MBBC / PE-g-MA ได้จากการ Compound ที่อัตราส่วน BC1% PE-g-MA 0.5%,1%,1.5%



รูปที่ 4.16 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไผ่ที่อัตราส่วน BC1% PE-g-Ma 0.5%, 1%, 1.5% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดกล้อง 10X

- (ก) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 1% / PE-g-Ma 0.5 % (ภาพตัดขวาง)
- (ข) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 1% / PE-g-Ma 0.5 % (ภาพตามแนวยาว)
- (ค) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 1% / PE-g-Ma 1 % (ภาพตัดขวาง)
- (ง) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 1% / PE-g-Ma 1 % (ภาพตามแนวยาว)
- (จ) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 1% / PE-g-Ma 1.5 % (ภาพตัดขวาง)
- (ฉ) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 1% / PE-g-Ma 1.5 % (ภาพตามแนวยาว)

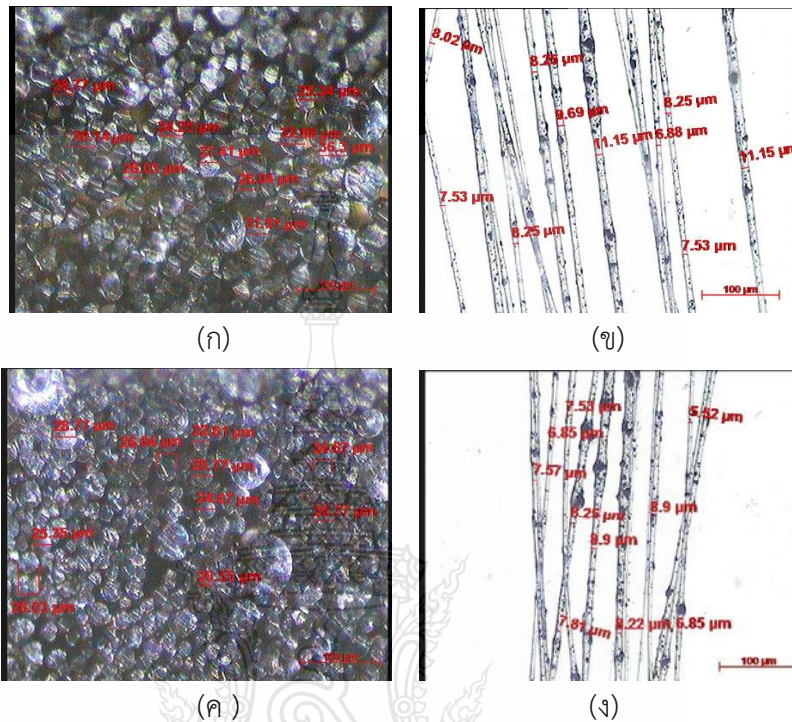
- เส้นใย PLA / MBBC / PE-g-MA ได้จากการขึ้นรูปเส้นใยที่อัตราส่วน BC3% PE-g-Ma 0.5%, 1%, 1.5%



รูปที่ 4.17 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไผ่ที่อัตราส่วน BC3% PE-g-Ma 0.5%, 1%, 1.5% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดกล้อง 10X

- (ก) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 3% / PE-g-MA 0.5 % (ภาพตัดขวาง)
- (ข) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 3% / PE-g-MA 0.5 % (ภาพตามแนวยาว)
- (ค) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 3% / PE-g-MA 1 % (ภาพตัดขวาง)
- (ง) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 3% / PE-g-MA 1 % (ภาพตามแนวยาว)
- (จ) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 3% / PE-g-MA 1.5 % (ภาพตัดขวาง)
- (ฉ) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 3% / PE-g-MA 1.5 % (ภาพตามแนวยาว)

- เส้นใย PLA / MBBC / PE-g-MA ได้จากการขึ้นรูปเส้นใย ที่อัตราส่วน BC5% PE-g-MA 0.5%, 1%, 1.5%



รูปที่ 4.18 เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไผ่ที่อัตราส่วน BC5% PE-g-Ma0.5%, 1%, 1.5% โดยน้ำหนัก ที่ขนาดกล้อง 10X

- (ก) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 5% / PE-g-MA 0.5 % (ภาพตัดขวาง)
- (ข) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 5% / PE-g-MA 0.5 % (ภาพตามแนวยาว)
- (ค) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 5% / PE-g-MA 1 % (ภาพตัดขวาง)
- (ง) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 5% / PE-g-MA 1 % (ภาพตามแนวยาว)

การขึ้นรูปเส้นใยที่ปริมาณผงถ่าน 1% การกระจายตัวของเม็ดผงถ่านไม้ไผ่มีการกระจายตัวอย่างทั่วถึง เมื่อปริมาณผงถ่านที่อัตราส่วน 3%, 5% ผงถ่านจะมีการเกาะกลุ่มเป็นก้อน ๆ อย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพะอย่างยิ่งที่ 5% ซึ่งก้อนของผงถ่านไม้ไผ่ที่เกาะกันเป็นก้อนมีขนาดเท่ากับเส้นใย ซึ่งจะทำให้เส้นใยไม่เรียบ และทำให้การขึ้นรูปเส้นใยที่ 5% เกิดการขึ้นรูปเส้นใยไม่ต่อเนื่อง เมื่อปริมาณของผงถ่านไม้ไผ่เพิ่มขึ้น 1%, 3%, 5% สีของเส้นใยที่ได้จะเข้มมากขึ้นตามปริมาณของผงถ่านไม้ไผ่ที่ใส่ลงไป จากสีขาวเป็นสีดำ โทนค่าที่วัดได้ คือปริมาณที่ผงถ่านไม้ไผ่ 1% มีขนาดตามขวางเฉลี่ยอยู่ที่ 23.83  $\mu\text{m}$

และตามความยาวเฉลี่ยอยู่ที่ 9.3  $\mu\text{m}$  ผงถ่านไม้ไฟ 3% มีขนาดตามขวางเฉลี่ยอยู่ที่ 23.49  $\mu\text{m}$  และตามความยาวเฉลี่ยอยู่ที่ 8.9  $\mu\text{m}$

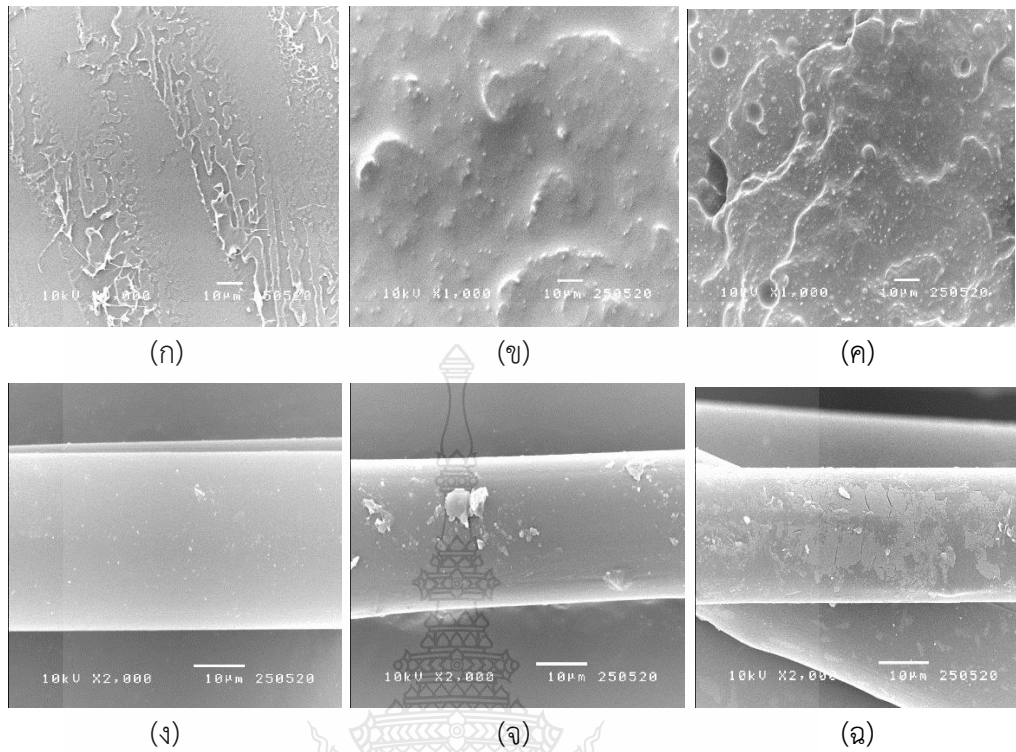
#### 4.9 การศึกษาพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- ชิ้นทดสอบ Izod impact
- เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดเกรด 6100D
- เส้นใย PLA / MBBC / MBPE-g-MA ได้จากการขึ้นรูปเส้นใย







รูปที่ 4.19 ภาพ SEM พอลิเมอร์ผสมและเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไผ่

- (ก) พอลิเมอร์ PLA กำลังขยาย 1000 เท่า
- (ข) พอลิเมอร์ผสม PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 1% / PE-g-MA 0.5 % กำลังขยาย 1000 เท่า
- (ค) พอลิเมอร์ผสม PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 1% / PE-g-MA 1.5 % กำลังขยาย 1000 เท่า
- (ง) เส้นใย PLA กำลังขยาย 2000 เท่า
- (จ) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 1% / PE-g-MA 0.5 % กำลังขยาย 2000 เท่า
- (ฉ) เส้นใย PLA / ผงถ่านไม้ไผ่ 1% / PE-g-MA 1.5 % กำลังขยาย 2000 เท่า

จากผลการศึกษาด้วยเทคนิค SEM ดังรูปที่ 4.19 แสดงภาพ SEM ของวัสดุพอลิเมอร์และเส้นใย ส่วนผสมของผงถ่านไม้ไผ่ที่กำลังขยาย 1000 เท่า และ 2000 เท่า พบว่า ลักษณะผิวของพอลิเมอร์ผสมมี ผงถ่านไม้ไผ่กระจายตัวอยู่ทั่วพอลิเมอร์ ในส่วนของเส้นใยมีลักษณะขรุขระเนื่องจากมีผงถ่านไม้ไผ่ผสม อยู่อย่างเห็นได้ชัดและมีผงถ่านไม้ไผ่บางส่วนที่เกาะตัวกันเป็นก้อน

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

ผลการทดลองการศึกษาสมบัติของวัสดุผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid)PLA) ผสมผงถ่านไม้ไผ่ที่อัตราส่วน 1, 3, 5% และพอลิเอทิลีนกราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ PE-g-Ma 0.5, 1, 1.5 % ซึ่งผลการทดลองจะสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลการทดสอบสมบัติดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) มาสเตอร์แบตช์ผงถ่านไม้ไผ่ (MBBC) และพอลิกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) ที่อัตราส่วนต่างๆโดยนำค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่างมาเปรียบเทียบ พบว่าเมื่อผสมผงถ่านไม้ไผ่ และพอลิกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เข้าไปมากขึ้นจะทำให้พอลิเมอร์มีการไหลตัวที่สูงขึ้น โดยสมบัติการไหลของ PLA ปกติจะอยู่ที่ 28.56 g/10 min ซึ่งค่าที่ได้ทำให้ต้องพิจารณาหากนำไปใช้งานด้านการอัดรีดที่ต้องใช้ความหนืดสูง มี MFI ต่ำหากนำไปใช้งานในการอัดรีดเพื่อขึ้นรูปเส้นใยก็สามารถใช้งานได้และจากการทดสอบค่า MFI ตัวอย่างที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยคือตัวอย่างที่ 5 เนื่องจากมีความหนืดที่สามารถขึ้นรูปเส้นใยได้และสามารถนำไปใช้งานได้

5.1.2 จากการทดสอบด้วยตัวอย่างขึ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดความร้อน ผลการทดสอบการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม พบว่าสมบัติของพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงคือเมื่อเติมผงถ่านไม้ไผ่จะทำให้ความคงทนต่อแรงกระแทกลดลงตามปริมาณของผงถ่านไม้ไผ่ที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเติม สารช่วยความเข้ากันได้ PE-g-MA เข้าไปในส่วนผสมของพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์มีการเชื่อมประสานดีขึ้นจึงทำให้ความคงทนต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มที่สูงขึ้นมากกว่าไม่ได้เติม PE-g-MA ดังนั้น PE-g-MA มีผลทำให้ค่าความคงทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

5.1.3 จากการทดสอบด้วยตัวอย่างขึ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดความร้อน ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และ ค่าโมดูลัส (Young's modulus) โดยนำค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่างมาเปรียบเทียบ พอลิเมอร์ผสม พบว่าค่า PLA มีค่าสูงที่สุดโดยที่ค่าโมดูลัสของพอลิเมอร์ จะลดลงเมื่อปริมาณ ผงถ่านไม้ไผ่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความแข็งแรงดึง Tensile strength ให้ผลการทดลองในแบบเดียวกัน คือค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อ ปริมาณผงถ่านไม้ไผ่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อผสม PE-g-MA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่กำหนด จากรูปแสดงค่าโมดูลัส และค่าความแข็งแรงดึง ของ

พอลิเมอร์ผสม เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PE-g-MA ในพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น น่าจะเป็นผลมาจาก PE-g-MA เป็นสารช่วยผสมช่วยเพิ่มการยึดเกาะ PLA และ ผงถ่านไม้ไผ่ ทำให้สมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น

5.1.4 จากผลการทดสอบค่าการเรียงตัวของโมเลกุลตามความยาวของเส้นใยของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไผ่ พบว่า มีค่าค่าความเร็วของเสียงที่วิ่งผ่านเส้นใย มีค่าลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายตัวของ ผงถ่านไม้ไผ่นั้นกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อมีการเติม PE-g-MA เป็นสารช่วยความเข้ากันได้ของพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ช่วยทำให้การกระจายตัวที่กระจุกกระจายในเนื้อพอลิเมอร์มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวของ PE-g-MA ช่วยทำให้ผงถ่านไม้ไผ่เข้าไปกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น จึงทำให้ค่า Sonic modulus มีค่าที่สูงขึ้นตามลำดับ โดยค่า Sonic velocity และ Modulus in g/Denier จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

5.1.5 การขึ้นรูปเส้นใยที่ปริมาณผงถ่าน 1% การกระจายตัวของเม็ดผงถ่านไม้ไผ่มีการกระจายตัวอย่างทั่วถึง เมื่อปริมาณผงถ่านที่อัตราส่วน 3%, 5% ผงถ่านจะมีการเกาะกลุ่มเป็นก้อน ๆ อย่งเห็นได้ชัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ 5% ซึ่งก้อนของผงถ่านไม้ไผ่ที่เกาะกันเป็นก้อนมีขนาดเท่ากับเส้นใย ซึ่งจะทำให้เส้นใยไม่เรียบ และทำให้การขึ้นรูปเส้นใยที่ 5% เกิดการขึ้นรูปเส้นใยไม่ต่อเนื่อง เมื่อปริมาณของผงถ่านไม้ไผ่เพิ่มขึ้น 1%, 3%, 5% สีของเส้นใยที่ได้จะเข้มมากขึ้นตามปริมาณของผงถ่านไม้ไผ่ที่ใส่ลงไป จากสีขาวเป็นสีดำ โดมน้ำที่วัดได้ คือปริมาณที่ผงถ่านไม้ไผ่ 1% มีขนาดตามขวางเฉลี่ยอยู่ที่  $23.83 \mu\text{m}$  และตามความยาวเฉลี่ยอยู่ที่  $9.3 \mu\text{m}$  ผงถ่านไม้ไผ่ 3% มีขนาดตามขวางเฉลี่ยอยู่ที่  $23.49 \mu\text{m}$  และตามความยาวเฉลี่ยอยู่ที่  $8.9 \mu\text{m}$

เส้นใยที่มีค่า Tensile strength สูงสุดคือเส้นใยที่มี Bamboo charcoal 1% PE-g-MA 1.5% โดยมีค่าอยู่ที่ 30 MPa เนื่องจากการเติม Bamboo charcoal ทำให้ค่า Tensile strength ลดลง แต่เมื่อเติม PE-g-MA เป็นสารช่วยเพิ่มการยึดเกาะ PLA และ Bamboo charcoal ทำให้สมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เส้นใยที่มีค่า Sonic modulus สูงสุดคือเส้นใยที่มี Bamboo charcoal 5% PE-g-Ma 1.5% โดยมีค่าเท่ากับ  $1.92 \text{ Km/sec}$  เนื่องจาก เมื่อเราเติม PE-g-MA ทำให้ค่า Sonic modulus มีแนวโน้มสูงขึ้นเพราะ PE-g-MA เข้าไปช่วยทำให้ความหนาแน่นและการกระจายตัวของผงถ่านไม้ไผ่ในเส้นใยที่มีค่า Moisture content ต่ำสุดคือเส้นใย Bamboo charcoal 5% PE-g-MA 1.5% อยู่ที่ 0.37% จากการทดสอบสมบัติโดยรวมเส้นใยและความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยคือ Bamboo charcoal 1% PE-g-MA 1.5 % เป็นเส้นใยที่เหมาะสมที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการ Compound ควรใช้เครื่อง Twin screw extruder แทนการใช้เครื่อง Single screw extruder เพราะจะทำให้พอลิเมอร์เกิดการรวมตัวกันดีกว่าเครื่อง Single screw extruder

5.2.2 ถ้าจะให้ผลที่ได้มีความแม่นยำถูกต้องที่สุดควรทำให้เสร็จตามระยะเวลา และแผนการทำงานที่วางไว้

5.2.3 ควรมีการตรวจสอบเครื่องมือทุกครั้งก่อนและหลังการปฏิบัติงานเพื่อผลที่ได้มีความแม่นยำ และเพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน

5.2.4 ควรทำความสะอาดอุปกรณ์และเครื่องมือ ทุกครั้งหลังจากปฏิบัติงานเสร็จ

5.2.6 ควรเพิ่มการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์และเส้นใย (Differential scanning calorimeter, DSC)

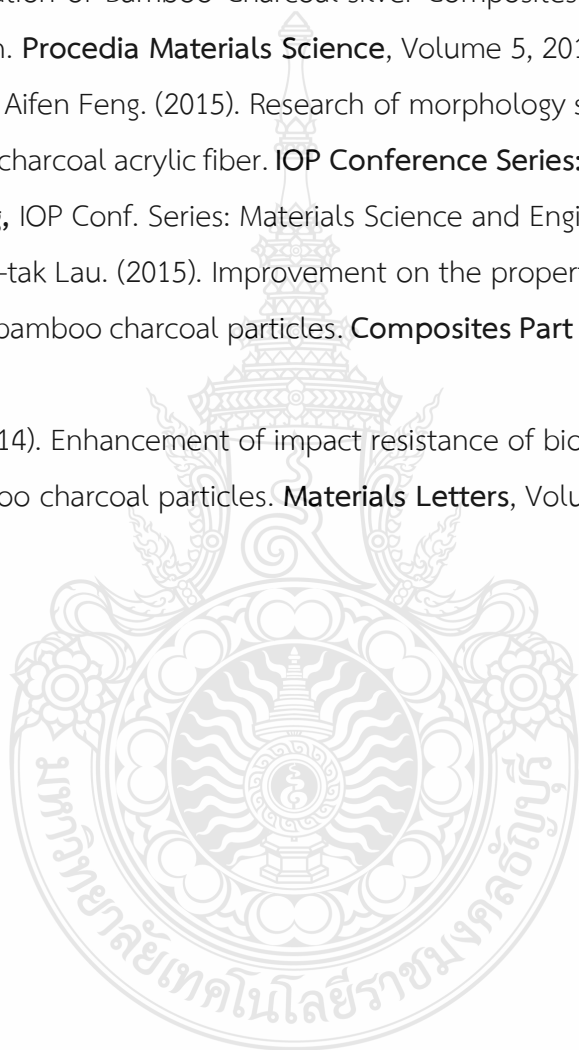


## บรรณานุกรม

- [1] สุปราณี และ ศิริเดช. (2557). **โครงการคอมโพสิตรักษ์สิ่งแวดล้อมจากพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยสับปะรด**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยบูรพา).
- [2] อธิวัฒน์และคณะ. (2557). **การศึกษาสมบัติวัสดุผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนกับผงถ่านไม้ไผ่**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี).
- [3] อธิวัชร วีริยะอมรชัย. (2554). **การศึกษาความเสถียรต่อสภาพแวดล้อมของวัสดุคอมโพสิตชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดและผงไม้ขี้เฒ่าธรรมชาติ**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร).
- [4] กริชตฤณ และสมาน. (2556). **สมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนผสมปูนปลาสเตอร์**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ).
- [5] นายเจตริน, วสุนิสา และณัฐภานันท์. (2556). **การศึกษาการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิก แอนไฮไดรด์เป็นตัวเชื่อมประสาน**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ).
- [6] **โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ รายงานการศึกษาระดับสมบูรณ์ (Final Report)**. บทที่ 4 พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid)) (น. 4-1 – 4-3). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [7] ชาศรียา อมาตยกุล. (2558). **การพัฒนาระบบน้ำบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมสำหรับบำบัดที่เคเอ็นจากน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ไนโตรเจนสูงโดยใช้ถ่านไม้ไผ่**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์).
- [8] ประจุล และ อินฟาเรดคลื่นยาวในถ่านไม้ไผ่. สืบค้นจาก <https://www.thainaturetrading.com/>
- [9] เจษฎาภรณ์ ชัยชนะ. (2558). **ผลของชนิดเส้นใยและโครงสร้างการทอต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุ**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์).
- [10] กาญจน์ แก้วกะปวง. (2551). **การออกแบบและสร้างเครื่องอัดรีดพอลิเมอร์แบบเกลียวทอนเดี่ยว**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา).

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] นที ศรีสวัสดิ์. (ม.ป.ป.). **กระบวนการผลิตพอลิเมอร์ และการขึ้นรูปเส้นใย**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [12] Soubhik K. Bardhan, B. Sogra Fathima, B. Raj Mohan. (2014). Synthesis and Characterization of Bamboo Charcoal-silver Composites with High Antibacterial Efficacy from. **Procedia Materials Science**, Volume 5, 2014. 558-566.
- [13] Yongjiu Zhang, Aifen Feng. (2015). Research of morphology structure and properties of bamboo charcoal acrylic fiber. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 87, 1-5.
- [14] Mei-po Ho. Kin-tak Lau. (2015). Improvement on the properties of polylactic acid (PLA) using bamboo charcoal particles. **Composites Part B: Engineering**, Volume 81. 14-25.
- [15] Mei-po Ho. (2014). Enhancement of impact resistance of biodegradable polymer using bamboo charcoal particles. **Materials Letters**, Volume 136. 122-125



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์







เกษตรกำแพงแสน ตามรอยพ่อ สานต่อศาสตร์แห่งแผ่นดิน

# Proceedings

## การประชุมวิชาการระดับชาติ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 16

The 16<sup>th</sup> KU-KPS National Conference

ระหว่างวันที่ 3 - 4 ธันวาคม 2562

ณ อาคารศูนย์เรียนรวม

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

### ผลงานทางวิชาการ 8 สาขา

1. พืชและเทคโนโลยีชีวภาพ
2. สัตว์และสัตวแพทย์
3. วิศวกรรมศาสตร์
4. ศึกษาศาสตร์และพัฒนศาสตร์
5. มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์
6. วิทยาศาสตร์สุขภาพและการกีฬา
7. วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม  
และความหลากหลายทางชีวภาพ
8. ส่งเสริมการเกษตร



**สารจากรองอธิการบดีวิทยาเขตกำแพงแสน**  
**การจัดสัมมนาและประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 16**  
**มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ประจำปี 2562**

---

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ได้จัดสัมมนาและประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 16 ระหว่างวันที่ 3-4 ธันวาคม 2562 ภายใต้คำขวัญ "เกษตรกำแพงแสน ตามรอยพ่อ สานต่อศาสตร์แห่งแผ่นดิน" โดยมีการนำเสนอผลงานวิจัยในสาขาต่าง ๆ จำนวน 8 สาขา ได้แก่ สาขาพืชและเทคโนโลยีชีวภาพ สาขาสัตว์และสัตวแพทย์ สาขาศึกษาศาสตร์และพัฒนศาสตร์ สาขาวิศวกรรมศาสตร์ สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพและการกีฬา สาขาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม และความหลากหลายทางชีวภาพ และสาขาส่งเสริมการเกษตร เพื่อให้อาจารย์ นักวิจัย นิสิต นักศึกษา ในระดับอุดมศึกษา ตลอดจนภาคเอกชนได้มีโอกาสเผยแพร่ผลงานทางวิชาการสู่สาธารณะ แลกเปลี่ยนความคิดเห็น และประสบการณ์เชิงวิชาการที่นำไปสู่การใช้ประโยชน์ได้จริง

ทั้งนี้ คณะกรรมการจัดสัมมนาและประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการจัดสัมมนาวิชาการและจัดประชุมวิชาการในครั้งนี้ให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการจัดกิจกรรมครั้งนี้จะนำไปสู่การพัฒนาให้เกิดประโยชน์ต่อไป

(รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.อนุชัย ภิญญภูมิมนตรี)

รองอธิการบดีวิทยาเขตกำแพงแสน

ประธานคณะกรรมการอำนวยการและดำเนินการ

จัดงานเกษตรกำแพงแสน ประจำปี 2562

39. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐรา นิธิกุลวรวงศ์
40. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นลินี อิมมัญตา
41. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทนา ช่วยชูวงศ์
42. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทราพร ภูมิรินทร์
43. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอชาติ บุญเอก
44. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิฑูรย์ โม่งพี
45. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริภาวี เจริญวัฒนศักดิ์
46. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสม อาตมางกูร
47. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยรัตน์ พลายมาศ
48. สัตวแพทย์หญิง ดร.ดวงใจ สุวรรณเจริญ
49. นายสัตวแพทย์ ดร.เนฎพล พร้อมขุนทด
50. นายสัตวแพทย์ ดร.วงศ์อนันต์ ณรงค์วานิชการ
51. นางสุกัญญา จิตตพรพงษ์
52. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุไร กุลบุญ
53. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรณีย์ เอี่ยมสมบูรณ์
54. รองศาสตราจารย์ ดร.ธนาทิพย์ แผลมคม
55. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ รอดคำ

**ผู้ทรงคุณวุฒิ สาขาวิศวกรรมศาสตร์**  
**ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน**

1. รองศาสตราจารย์ ดร.อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล
2. รองศาสตราจารย์ ดร.ประเทือง อุษาบริสุทธิ์
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิฑูรย์ ชัยประเสริฐ
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันรัฐ อับดุลลาฮาซิม
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พรรณ ปรี่องาม
6. รองศาสตราจารย์ ดร.บัญชา ขวัญยืน
7. รองศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ โมลิตสกุลชัย
8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศธร โสภากพันธ์
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ดอนเจดีย์
10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุพงศ์ แต่สมบัติ
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จระกานต์ ศิริวิชญ์มนตรี
13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธิรัตน์ สงวนเดือน
14. รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์
15. รองศาสตราจารย์ ดร.รังสิณี ไสธวิทย์

16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รณฤทธิ์ ฤทธิธิน
17. รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรีพิทย์ ชำของ
18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกัญญา วิชชุกิจ
19. รองศาสตราจารย์ ดร.เชาว์ อินทร์ประสิทธิ์
20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบศักดิ์ กาญจนางพงศ์กุล
21. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อมรเดช พุทธิพิพัฒน์เขจร
22. รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย กิจวัชรเวทย์
23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศ์วัลย์ ภัทรประภาวัฒน์
24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปนัดดา กสิกิจวัฒน์
25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทวัฒน์ ขมหวาน
26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมล อมรฟ้า
27. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริบุญญา ทองชาติ
28. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นที อธิคุณากร
29. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาลินี ลิ้มสวัสดิ์
30. ผู้ช่วยศาสตราจารย์บรรพต กุลสุวรรณ
31. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณะ จันทโรตติ
32. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐดนัย ตันจรัลวิทย์
33. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ
34. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา ปราบกฏมาก
35. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กัมตกรรณ์ เขาทอง
36. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนา ซีพลมทรง
37. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนมน จันทนา
38. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญญา กสานติกุล
39. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรัชย์ สุภาสุทธากุล
40. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติพงษ์ สติระเมธิกุล
41. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรฤทธิ์ พุทธิพิพัฒน์เขจร
42. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นุชนาฏ สัตยากวี
43. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผกาเกษ วัฒยา
44. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยมงคล ลิ้มเพียรชอบ
45. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชษฐา ชำมาบุญหล่อ
46. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาพรรณ เกษราพงศ์
47. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรินทร์ กลั่นเงิน
48. อาจารย์ ดร.วงศ์ผกา วงศ์รัตน์
49. อาจารย์ ดร.คณิต มานะธูระ

50. อาจารย์ ดร.วราญา เนื่องมัจฉา

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก**

1. รองศาสตราจารย์ ดร.วราวุธ วุฒิวณิชย์
2. รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เทียนอักษร
3. รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ไม้เรียง
4. รองศาสตราจารย์ ดร.ปานมนัส ศิริสมบุญ
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประทีป ทิมขำ
6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจ
7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนาจ
8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ รัตนเดช
10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นารัตระพี นาคะวัจนะ
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ยา ฤทธิมา
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรณพิมพ์ พุทธรักษา มะเปี่ยม
13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.सानิตย์ดา เตียวต้อย
14. รองศาสตราจารย์ ดร.สุนัน ปานสาคร
15. รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรนันท์ เจเนจรัสกุล
16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนาตล คงสมบุญ
17. รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช พูลเงิน
18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงชัย ชัยมูล
19. รองศาสตราจารย์ ดร.ณพล อยู่บรรพต
20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพันธุ์ เขียมมีปรีชา
21. รองศาสตราจารย์ ดร.ประสาน สถิตเรืองศักดิ์
22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศนพ กำเนิดทอง
23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพจน์ เวศพันธุ์
24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนฎบดี ศรีสังข์
25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัชพล จุ่งเจริญ
26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล
27. รองศาสตราจารย์ ดร.นมาศ อุซายาชาติ
28. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ชัยศรีเจริญ
29. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชามญช์ ศรีจำเริญรัตนา
30. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชรินทร์ ทิพย์วรรณกร
31. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต มณีศรี
32. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณศ พันธุ์สวาสดี
33. รองศาสตราจารย์ ดร. พูนพัฒน์ พูนน้อย

34. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนัฐมพงษ์ คงแก้ว
35. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทองกฤษ โดชัยวัฒน์
36. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวโรจน์ ใจสิน
37. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชรินทร์ นมรักษ์
38. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนา ม่วงรัตน์
39. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลยา กิตติเลิศไพศาล
40. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิสัน ขารี

**ผู้ทรงคุณวุฒิ สาขาศึกษาศาสตร์และพัฒนศาสตร์**

**ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน**

1. รองศาสตราจารย์ ดร.วินัย พูลศรี
2. รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ต้นพิชัย
3. รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สมิตร สุวรรณ
4. รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ ศรีสวนแดง
5. รองศาสตราจารย์ ดร.มยุรี ถนอมสุข
6. รองศาสตราจารย์ ดร.ธนรัตน์ แต้วัฒนา
7. รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ ใจอารีย์
8. รองศาสตราจารย์ ดร.พีทธไนท์ ธรรมชาติกรมยโชค
9. รองศาสตราจารย์ ดร.ชานนท์ จันทรา
10. รองศาสตราจารย์ ดร.สมบุญ ศิลป์รุ่งธรรม
11. รองศาสตราจารย์ ดร.ต่อศักดิ์ แก้วจรัสวิไล
12. รองศาสตราจารย์ ดร.อัจนรา ปุราคม
13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณิ์ เนียมหอม
14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทัศนีย์ วรรณเกตุศรี
15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนิ่นทร์ดี เครืออินทร์
16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พินดา วราสุนันท์
17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ศรีพรหม
18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แสงเดือน เจริญฉิม
19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ เตือนแจ้ง
20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ เกียรติเผ่า
21. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธารินทร์ กำแหงล้อม
22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำพร ขุนเนียม
23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงชัย อักษรคิด
24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชินศรภา เลิศอมรพงษ์
25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทัศน์ ผักเจริญผล

### สาขาวิศวกรรมศาสตร์

การศึกษาการเจริญเติบโตของเมล็ดงาในโรงเรือนที่คลุมด้วยผ้าถักแบบมีช่องว่างตรงกลาง จากเส้นด้ายฝ้าย 100% เปรียบเทียบกับโรงเรือนที่คลุมด้วยมุ้งตาข่ายไนลอน 40 ตา.....	2230
สมบัติของวัสดุผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่.....	2239
ผลของอัตราส่วนแป้งข้าวกล้องพื้นเมืองภาคใต้ต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยว ที่ผลิตด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์.....	2248
การออกแบบและพัฒนาเครื่องปลูกข้าวโดยใช้เมล็ดพันธุ์ด้วยการใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ.....	2256
การขึ้นรูปผ้าไหมทอจากเส้นใยฝ้าย 100 เปอร์เซ็นต์โดยวิธีการยัดดัดด้วยน้ำแรงดันสูง กรณีศึกษา: สมบัติในการกรองน้ำ.....	2263
การศึกษาการรับรู้สัมผัสผสมของผ้า ของเสื้อผ้าสำหรับตลาดสินค้าออนไลน์.....	2272

### สาขาศึกษาศาสตร์และพัฒนศาสตร์

การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาเคมี เรื่อง ไฟฟ้าเคมี ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 โดยใช้เกมบิงโก.....	2282
การพัฒนาหนังสืออิเล็กทรอนิกส์ เรื่องความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคอมพิวเตอร์ สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1.....	2292
การพัฒนาสื่อวีดิทัศน์สอนออกเสียงพินอินภาษาจีนร่วมกับหลักสัทศาสตร์ สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1.....	2300
การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน วิชาวัสดุก่อสร้าง ด้วยวิธีการจัดการเรียนรู้แบบร่วมมือ ของนักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงปีที่ 1 สาขางานโยธา วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี.....	2310
การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาวิทยาศาสตร์ เรื่อง อาหารหลัก 5 หมู่ โดยใช้สื่อโคมินิสารอาหาร สำหรับนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 2.....	2320
การพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาคณิตศาสตร์ โดยใช้วิธีการแก้โจทย์ปัญหาของโพลยา เรื่อง การประยุกต์ของสมการเชิงเส้นตัวแปรเดียว ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2.....	2328
การศึกษาผลการใช้ KWDL เพื่อการแก้โจทย์ปัญหาวิชาคณิตศาสตร์ เพื่อธุรกิจการเกษตร เรื่อง เลขดัชนี.....	2338
การพัฒนาความสามารถในการอ่านและเขียนภาษาอังกฤษ และความสนใจของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 5 ด้วยการจัดการเรียนการสอน แบบมุ่งประสบการณ์ภาษาในรูปแบบที่ 1 ชนิดวิธีการ.....	2346
การพัฒนาความสามารถในการคิดแก้ปัญหาด้วยกิจกรรมการเรียนรู้ ตามหลักอริยสัจ 4 ในรายวิชาสุขศึกษาของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2.....	2359

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 3-4 ธันวาคม 2562

**สมบัติของวัสดุผสมพอลิแลกติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่**  
**PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE FROM BAMBOO CHARCOAL POWDER AND**  
**POLYLACTIC ACID**

**อนุพล พุดซ้อน<sup>1</sup>, นที ศรีสวัสดิ<sup>1</sup>**  
**Anupon Putsont<sup>1</sup>, Natee Srisawat<sup>1</sup>**

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของวัสดุผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิด (PLA), ผงถ่านไม้ไผ่ (bamboo charcoal powder) ที่ การขึ้นรูปวัสดุผสมเป็นเส้นใย โดยการผสมของถ่านไม้ไผ่เพื่อศึกษาสมบัติกับเส้นใยพอลิแลกติกแอซิด โดยใช้สารช่วยผสม คือ พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราต (PE-g-MA) ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบ (drum bell) ด้วยเครื่องขึ้นรูปพอลิเมอร์แบบบีบอัดความร้อน (compression molding) และที่ การขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการหลอมละลาย (melt spinning) ด้วยเครื่องขึ้นรูปเกลียวเดี่ยว (single screw extruder) โดยก หนดอัตราส่วน ผงถ่านไม้ไผ่ 1, 3, 5% โดยน้ าหนัก และพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราต 0.5, 1, 1.5% โดยน้ าหนัก จากนั้นที่ การศึกษาสมบัติต่างๆ ของวัสดุผสมที่เตรียมได้ คือ สมบัติเชิงกล ดัชนีการไหล และที่ การทดสอบสมบัติเชิงกลของเส้นใยพอลิแลกติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไผ่

จากการศึกษาเมื่อผสมผงถ่านไม้ไผ่พอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราต ผสมในวัสดุผสม พบว่าสมบัติเชิงกลวัสดุผสมดีขึ้นเมื่อมีการใช้พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราต ปริมาณพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราตที่เหมาะสมให้ความแข็งแรง (tensile strength) สูงสุดคือ 1.5% โดยน้ าหนักค่าความแข็งแรง ที่ 33.06 MPa ความแข็งแรงต่อการกระแทก (impact strength) ที่ 31.06 (J/m) และมีค่าลดลง เมื่อมีปริมาณผงถ่านไม้ไผ่ที่มากขึ้น ปริมาณผงถ่านไม้ไผ่ที่เหมาะสมอยู่ที่ 1% โดยน้ าหนัก เมื่อที่ การขึ้นรูปเส้นใยสมบัติด้านความแข็งแรงมีค่าลดลงเมื่อมีอัตราส่วนของผงถ่านไม้ไผ่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราตสมบัติด้านความแข็งแรงมีแนวโน้มสูงขึ้นและ

จากการศึกษาพบว่าพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราตในการผสมพอลิแลกติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลดีขึ้น

**คำสำคัญ:** พอลิแลกติกแอซิด ผงถ่านไม้ไผ่ พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราต

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110  
Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani  
12110, Thailand



### Abstract

This research is the study of the property of polymer composite between Polylactic Acid (PLA) and Bamboo charcoal powder. Polymer composite is molded into fiber by mixing Bamboo charcoal powder in order to study the property to PLA fibers and using additive, i.e., maleic anhydride grafted polyethylene (PE-g-MA) for molding as Drum bell using compression molding machine and molding the fibers by Melt spinning process with Single Screw Extruder in the ratio of Bamboo charcoal powder of 1, 3, 5% by weight to PE-g-MA of 0.5, 1, 1.5% by weight. Then, the properties of the prepared polymer composite consisting of mechanical property and flow index, are studied. The mechanical property of PLA fibers mixed with Bamboo charcoal powder is tested.

According to the study upon mixing Bamboo charcoal powder, PLA and PE-g-MA into polymer composite, the finding indicated that the mechanical property of polymer composite improved upon the use of PE-g-MA. The appropriate content of PE-g-MA yielded highest tensile strength at 1.5% by weight. The value of tensile strength at 33.06 MPa and impact strength at 31.06 (J/m) were reduced upon an increase in the content of Bamboo charcoal powder. The appropriate content of Bamboo charcoal powder was at 1% by weight upon molding fibers. The value of tensile strength property was reduced upon an increase in the ratio of Bamboo charcoal powder. However, the strength property tended to be increased upon filling PE-g-MA. In addition, the finding of the study indicated that PE-g-MA in mixing PLA with Bamboo charcoal powder contributed to an improvement of the mechanical property.

Keyword: Polylactic Acid (PLA), bamboo charcoal powder, PE-g-MA

E-mail address: Aottz@hotmail.com

### คำนำ

ในชีวิตประจำวันพลาสติกถูกนำมาใช้งานในหลายๆด้านส่วนใหญ่เป็นพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมี (Petroleum based plastics) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น เกิดปัญหาขยะล้นเมือง ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกจึงสนใจที่จะนำพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ (bioplastics) มาใช้ทดแทนพลาสติกทั่วไป เพื่อลดปัญหาดังกล่าว พอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactic Acid), PLA) เป็นหนึ่งในพลาสติกชีวภาพที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ (Dorgan et al., 2001) และสามารถผลิตได้จากผลผลิตทางการเกษตร เช่น ข้าวโพด และมันสำปะหลัง เป็นต้น (Dorgan et al., 2004) อย่างไรก็ตามพอลิแลคติกแอซิดยังคงมีข้อด้อยในเรื่องสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างต่ำ มีความเปราะและแตกหักง่ายจึงการนำพอลิแลคติกแอซิดไปผสมกับสารอื่นๆ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Bondeson et al., 2007) นอกจากนี้ยังพบว่ามีการนิยมนำพอลิแลคติกแอซิดไปผสมหรือคอมโพสิตกับผงต่างๆ โดยเฉพาะผงจากธรรมชาติ เช่น ผงจากไม้ (Phetsamai et al.,) ผงจากปาล์ม (Periodicals et al., 2009) เป็นต้น ผงและสารที่เราสนใจนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ผงถ่านไม้ไผ่ ซึ่งผลิตจาก

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 3-4 ธันวาคม 2562

บริษัท ซาร์โคล โสม จำกัด ชนิดบดละเอียด 300 mesh ที่มีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 85% ความชื้นน้อยกว่า 5% และ สารช่วยผสม คือ พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราต (PE-g-MA) ซึ่งเพิ่มสมบัติความยืดหยุ่นระหว่างพอลิเมอร์ที่มีความต่างชนิดกันได้ดี ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดการใช้ผงถ่านไม้ไฟและพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราต เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตให้ดีขึ้น

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมผงถ่านไม้ไฟและพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราตกับพอลิแลคติกแอซิด เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล และลักษณะผิวของเส้นใย นอกจากนี้ยังศึกษาปริมาณที่เหมาะสมที่ให้สมบัติเชิงกลสูงสุดและการขึ้นรูปเส้นใยของผงถ่านไม้ไฟและพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราตอีกด้วย

### อุปกรณ์และวิธีการ

#### วัสดุและสารเคมี

- (Poly (lactic Acid), PLA) grade 6100D (NatureWorks, LLC, USA.)
- (PE-g-MA) viscosity 500 (Sigma-aldrich, Saint Louis, USA.)
- ผงถ่านไม้ไฟ Bamboo Charcoal Powder grade 300 mash บริษัท ซาร์โคล โสม จำกัด (Bunton, BNK, THAILAND)
- masterbatch พอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไฟ (compound) อัตราส่วน 80:20 บริษัท สาลี คัลเลอร์ จำกัด (มหาชน)

#### การเตรียม compound พอลิแลคติกแอซิดและพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราต

ทำการผสมวัสดุทั้งสองชนิดด้วย เครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดียวโดยภาวะที่เข็คือ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดียว : Thermo Hakke ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5mm จำนวน 4รู ที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 60 รอบต่อนาที เตรียมเม็ดพลาสติก PLA และ PE-g-MA เพื่อนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดียว โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PE-g-MA ที่อัตราส่วน 50:50 (%โดยน้ำหนัก)

#### การเตรียม compound พอลิแลคติกแอซิด มาสเตอร์แบตช์และพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราต

ทำการผสมวัสดุทั้ง 3 ชนิด มาผสมกันเพื่อนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดียว โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง 1.พอลิแลคติกแอซิด 2.masterbatchที่มีส่วนผสมของพอลิแลคติกแอซิดผสมผงถ่านไม้ไฟ และ3.masterbatchที่มีส่วนผสมของพอลิแลคติกแอซิดและ(PE-g-MA) ที่อัตราส่วนต่างๆดังนี้ PLA100:0:0%, 98.5:1:0.5%, 98:1:1%, 97.5:1:1.5%, 96.5:3:0.5%, 96:3:1%, 95.5:3:1.5%, 94.5:5:0.5%, 94:5:1%, 93.5:5:1.5%, 99:1:0%, 97:3:0%, และ95:5:0% ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 60 รอบต่อนาที และเส้นเป็นตัดเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องตัดพลาสติก (cutter) ความเร็ว 50 รอบนาที เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆต่อไป

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 3-4 ธันวาคม 2562

#### การเตรียมชิ้นทดสอบ

ก่อนการอัดขึ้นรูปจะทำการอบเม็ด (compound) เพื่อขจัดความชื้นที่ 80 องศาเซลเซียสอย่างน้อย 4 ชั่วโมง จากนั้นนำพอลิเมอร์ตัวอย่างมาทำการอัดขึ้นรูป (compression) โดยทำการใส่เม็ด compound ใส่ลงในแม่พิมพ์จนเต็มและปิดประกบแม่พิมพ์ที่เป็นแบบของชิ้นทดสอบ tensile strength แบบ drum bell และ ชิ้นทดสอบ izod impact ขนาดตามมาตรฐาน โดยทำชิ้นทดสอบขึ้นทั้งหมด 13 ตัวอย่าง คือ ชิ้นทดสอบแรงดึง ตัวอย่างละ 6 ชิ้น และชิ้นทดสอบแรงกระแทกตัวอย่างละ 8 ชิ้น ขนาดของแม่พิมพ์ที่ใช้ กว้าง 20 ซม. ยาว 20 ซม. โดยใช้เครื่อง Thermoplastics compression molding จากบริษัท LAB TECH ENGINEERING CO.,LTD. โดยทำการอัดขึ้นรูปใช้อุณหภูมิที่ 210°C ความดันที่ 200 kg/cm<sup>2</sup> ทำการ Preheat time 10 นาที, Full pressure 10 นาที และ Cooling time 10 นาที ซึ่งการเตรียมในแต่ละครั้งจะได้ชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบ Tensile 3 ชิ้น และ izod impact 4 ชิ้น ในการเตรียม 1 ครั้ง

#### วิธีการทดสอบและวิเคราะห์ผล

- ทดสอบดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (melt flow index, MFI) โดยใช้เครื่อง XRL-400 Plastic Melt Flow Index MFI Testing Machine จากบริษัท TIME-SHIJIN ในการทดสอบ นำเม็ดพอลิแลกติกแอซิดที่ได้รับการผสม (compounded) มาแล้วนั้นไปทำการทดสอบการไหล เพื่อหาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ที่ อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ที่น้ำหนักกดเท่ากับ 2.16 kg โดยค่า MFI ที่ได้ระบุเป็นน้ำหนักของพอลิเมอร์ภายในเวลา 10 นาที ซึ่งจะทำการซ้ำตัวอย่างละ 5 ครั้งและนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์

- การทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก (izod impact strength) โดยใช้เครื่อง izod impac Resil Pendulum Impact จากบริษัท CEAST ในการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D 256 โดยตัวอย่างสำหรับทำการทดสอบนั้นได้มาจากการอัดขึ้นรูป จากนั้นทำการบากตามมาตรฐาน ASTM D 256ของชิ้นงานก่อนการทดสอบ รอยบากนั้นจะต้องอยู่ในบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน ซึ่งทำซ้ำตัวอย่างละ 8 ชิ้น

- การทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 638 โดยใช้เครื่อง Lloyd LR10K Plus Materials Testing Machine จากบริษัท AMETEK Lloyd Instruments Ltd. ในการทดสอบ ตัวอย่างสำหรับทำการทดสอบจะทำการเตรียมชิ้นงานให้ตรงตามมาตรฐาน โดยชิ้นงานสำหรับทำการทดสอบนั้นได้มาจากการอัดขึ้นรูป ที่มีความกว้างอยู่ระหว่าง 19 mm. และความยาวประมาณ 165 mm. โดยที่ปลายทั้งสองด้านจะถูกจับด้วยเครื่องทดสอบและใส่ค่าความหนาและ (Gauge length) ที่ 50 มิลลิเมตรของชิ้นทดสอบลงในโปรแกรมทดสอบ ซึ่งทำซ้ำตัวอย่างละ 6 ชิ้น

#### ผลการทดลองและวิจารณ์

##### สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

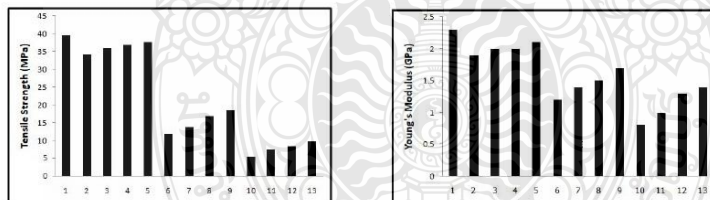
รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างทั้ง 13 ตัวอย่างโดยอัตราส่วนจะอยู่ที่ ตารางที่ 1 รูปที่ 1 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสม จากการทดสอบด้วยตัวอย่างชิ้นงานจากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดความร้อน รูปที่ 1 (a) ความแข็งแรงดึง (tensile strength) และ (b) แสดงค่าโมดูลัส (Young's modulus) โดยนำค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่างมาเปรียบเทียบ พอลิเมอร์ผสม จากรูปพบว่าค่า PLA มีค่าสูงที่สุดโดยที่ค่าโมดูลัสของพอลิเมอร์จะลดลงเมื่อปริมาณ ผงถ่านไม้ไม่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความแข็งแรงดึง (tensile strength) ให้ผลการทดลองใน

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 3-4 ธันวาคม 2562

แบบเดียวกัน คือค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อ ปริมาณ ผงถ่านไม้ไฟเพิ่มมากขึ้น และเมื่อผสม PE-g-MA ที่อัตราส่วนต่างๆที่กำหนด จากรูปแสดงค่าโมดูลัส และค่าความแข็งแรงดึง ของพอลิเมอร์ผสม เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ PE-g-MA ในพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น น่าจะเป็นผลมาจาก PE-g-MA เป็นสารช่วยผสมช่วยเพิ่มการยึดเกาะ PLA และ ผงถ่านไม้ไฟ ทำให้สมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนของชิ้นทดสอบ

simple	ratio
1	PLA 6100 D
2	PLA99:mbBC1:(PE-g-MA)0
3	PLA98.5:mbBC1:(PE-g-MA)0.5
4	PLA98:mbBC1:(PE-g-MA)1
5	PLA97.5:mbBC1:(PE-g-MA)1.5
6	PLA97:mbBC3:(PE-g-MA)0
7	PLA96.5:mbBC3:(PE-g-MA)0.5
8	PLA96:mbBC3:(PE-g-MA)1
9	PLA95.5:mbBC3:(PE-g-MA)1.5
10	PLA95:mbBC5:(PE-g-MA)0
11	PLA94.5:mbBC5:(PE-g-MA)0.5
12	PLA94:mbB5:(PE-g-MA)1
13	PLA93.5:mbBC5:(PE-g-MA)1.5



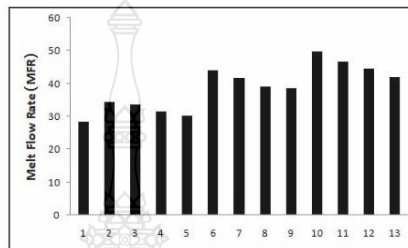
รูปที่ 1 สมบัติเชิงกลของ PLA, Bamboo Charcoal Powder, PE-g-MA ของพอลิเมอร์ผสม (a) ความแข็งแรงดึง (tensile strength) (b) ค่าโมดูลัส (Young's modulus)

การทดสอบดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ melt flow index (MFI)

ผลการทดสอบสมบัติดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิด (PLA) มาสเตอร์แบดซ์ผงถ่านไม้ไฟ (mbBC) และพอลิกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) ที่อัตราส่วนต่างๆโดยนำค่าเฉลี่ย

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 3-4 ธันวาคม 2562

ของแต่ละตัวอย่างมาเปรียบเทียบ พบว่าเมื่อผสมผงถ่านไม้ไฟ และพอลิกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เข้าไปมากขึ้น จะทำให้พอลิเมอร์มีการไหลตัวที่สูงขึ้น โดยสมบัติการไหลของ PLA ปกติจะอยู่ที่ 28.56 g/10min ซึ่งค่าที่ได้ทำให้ต้องพิจารณาหากนำไปใช้งานด้านการอัดรีดที่ต้องใช้ความหนืดสูง มี MFI ต่ำหากนำไปใช้งานในการอัดรีดเพื่อขึ้นรูปเส้นใยก็สามารถใช้งานได้และจากการทดสอบ ค่า MFI ตัวอย่างที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยคือตัวอย่างที่ 5 เนื่องจากมีความหนืดที่สามารถขึ้นรูปเส้นใยได้และสามารถนำไปใช้งานได้

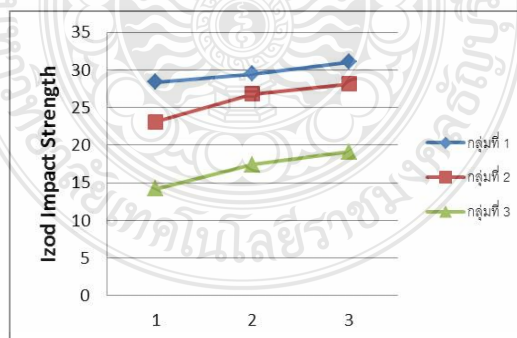


รูปที่ 2 การทดสอบดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ Melt Flow Rate (MFR)

#### การทดสอบการทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม (Izod Impact Strength)

ผลการทดสอบการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม พบว่าสมบัติของพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงคือเมื่อเติมผงถ่านไม้ไฟจะทำความคงทนต่อแรงกระแทกลดลงตามปริมาณของผงถ่านไม้ไฟที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเติมสารช่วยผสม PE-g-MA เข้าไปในส่วนผสมของพอลิเมอร์ทำให้ทำให้พอลิเมอร์มีการเชื่อมประสานดีขึ้นจึงทำให้ความคงทนต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มที่สูงขึ้นมากกว่าไม้ได้เติม PE-g-MA ดังนั้น PE-g-MA มีผลทำให้ค่าความคงทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

โดยทำการแบ่งกลุ่มเพื่อให้ดูง่ายในการเปรียบเทียบ ดังนี้ กลุ่มที่ 1 bamboo charcoal 1% กลุ่มที่ 2 bamboo charcoal 3% และกลุ่มที่ 3 bamboo charcoal 5%ตามลำดับ จากกราฟแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงในอัตราส่วนผสมในแต่ละอัตราส่วนที่กำหนดไว้และแสดงอยู่ในรูปภาพด้านล่าง



รูปที่ 3 การทดสอบการทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม (izod impact strength)

#### ลักษณะเส้นใยของพอลิเมอร์ผสม PLA/Bamboo Charcoal Powder

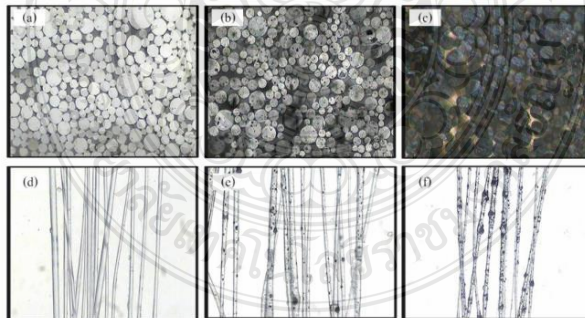
รูปที่ 4 แสดงเส้นใยของพอลิเมอร์ผสมบางส่วนที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวเดี่ยวที่ต่อกับหัวดายแบบ Multifilament 24 ฐาน จากการขึ้นรูปสามารถเก็บเส้นใยได้ไม่ครบตามจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 13 ตัวอย่างเนื่องจากอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มี PE-g-MA ผสมอยู่ด้วยนั้นไม่สามารถทำการเก็บเส้นใยได้ และผงถ่านไม้ไม่ดูดซับที่หัวดายเนื่องจากผงถ่านไม้ไม่มีขนาดไม่เท่ากันทำให้ไม่สามารถเก็บเส้นใยได้เช่นเดียวกัน ผลจากการขึ้นรูปเส้นใยในการเก็บเส้นใยทำให้เห็นว่าขนาดของผงถ่านไม้ และ PE-g-MA มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใย



รูปที่ 4 เส้นใยของพอลิเมอร์ผสม PLA/Bamboo Charcoal Powder

#### การทดสอบโดยการดูลักษณะของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์

รูปที่ 5 จะแสดงการทดสอบเราจะดูเส้นใยตามขวาง (a, b, c) จากการดูลักษณะของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ขนาดกล้องจุลทรรศน์ 10x พบว่า เส้นใยมีลักษณะกลม และมีผงถ่านไม้ผสมอยู่ จะเห็นได้ว่า (a) คือ PLA ไม่ได้ผสมผงถ่านไม้ (b), (c) สีขาวคือ PLA และที่เป็นจุดสีดำ คือ ผงถ่านไม้ซึ่งกระจายอยู่ทั่วไปในเส้นใย ยังมีอัตราส่วนของผงถ่านไม้ไม่มาก จะทำให้เส้นใยมีสีดำ ขนาดตามขวางเส้นใยอยู่ที่ประมาณ 24.64  $\mu\text{m}$  เส้นใยตามยาว (d, e, f) (d) คือ PLA ไม่ได้ผสมผงถ่านไม้ (e), (f) คือมีส่วนผสมของผงถ่านไม้ จะสังเกตเห็นว่ามีจุดสีดำ และทำให้ผิวไม่เรียบ (f) สัดส่วนผงถ่านไม้ไม่อยู่ที่ 5% ขนาดตามแนวขวางอยู่ที่ประมาณ 8.77  $\mu\text{m}$



รูปที่ 5 การทดสอบโดยการดูลักษณะของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์ OM (a) PLA (b) BC 1% (c) BC 5% (d) BC1 (e) BC 3% (f) BC 5% (ขนาดสเกล 100  $\mu\text{m}$ )

### สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของวัสดุผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด (PLA), ผงถ่านไม้(bamboo charcoal powder) ทำการขึ้นรูปวัสดุผสมเป็นเส้นใย โดยการผสมของถ่านไม้ไม่เพื่อเพิ่มสมบัติกับเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิด โดยใช้สารช่วยผสม คือ พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราไซด์ (PE-g-MA) จากการศึกษาเมื่อผสมผงถ่านไม้ไม่พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราไซด์ ผสมในวัสดุผสม พบว่า สมบัติเชิงกลวัสดุผสมดีขึ้น เมื่อมีการใช้พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราไซด์ปริมาณพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราไซด์ที่เหมาะสมให้ความแข็งแรง (tensile strength) สูงสุดคือ 1.5% โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรง ที่ 33.06 MPa ความแข็งแรงต่อการกระแทก (impact strength) ที่ 31.06 (J/m) มีค่าลดลง เมื่อมีปริมาณผงถ่านไม้ไม่เพิ่มขึ้น ปริมาณผงถ่านไม้ไม่ที่เหมาะสมอยู่ที่ 1% โดยน้ำหนัก เมื่อทำการขึ้นรูปเส้นใย สมบัติด้านความแข็งแรง มีค่าลดลงเมื่อมีอัตราส่วนของผงถ่านไม้ไม่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราไซด์ สมบัติด้านความแข็งแรงมีแนวโน้มสูงขึ้น อัตราส่วนที่เหมาะสมและสามารถขึ้นรูปเส้นใยได้ คือ อัตราส่วน PLA97.5:mbBC1:(PE-g-MA)1.5 และจากการศึกษาพบว่า พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดราไซด์ในการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไม่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลดีขึ้น

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

### เอกสารอ้างอิง

- Mei-Po, Kin-Tak Lau"Enhancement of impact resistance of biodegradable polymer using bamboo charcoal particles", Material Letters, Vol.136, 2014, pp.122-125.
- Mei-Po Ho, Kin-Tak Lau, Hao Wang, David Hui, "Improvement on the properties of polylactic acid (PLA) using bamboo charcoal particles", Composite Part B, Vol.81, 2015, pp.14-25.
- Zhipei, Dagang Li"Highly filled bamboo charcoal powder reinforced ultra-high molecular weight polyethylene", Material Letters, Vol.122, 2014, pp.121-124.
- D. Bikiaris, J.Prinos, K. Koutsopoulos, N. Vouroutzis, E. Pavlidou, N.Frangis, C. Panayioyou"LDPE/plasticized starch blends containing PE-g-MA copolymer as compatibilizer", Polymer Degradation and Stability, Vol.59, 1998, pp.287-291.
- R. Srisuk et al., "Mechanical Properties of Bamboo Charcoal (BC)/Poly(Lactic) Acid (PLA) Composites", Key Engineering Materials, Vol. 801, pp. 121-126, 2019
- G. F. Yao, "Development of Bamboo Charcoal Fiber Blended Anti-Ultraviolet Fabric", Advanced Materials Research, Vols. 750-752, pp. 2323-2326, 2013
- ชัยฤกษ์ อภาภเวท, เจษฎา วงษ์อ่อน, นที ศรีสวัสดิ์, เจริญพร กานบัวทอง"การศึกษาการปรับปรุงสมบัติความเหนียว ของ PLA ด้วยการผสมกับ PBS", การประชุมวิชาการชายางานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2554, 20-21 ตุลาคม 2554 ชลบุรี

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 3-4 ธันวาคม 2562

อิทธิพล แจ่มชัด, อธิพัฒน์ อุดมโชค, พจนีย์ ศรธรรมลี, วรธรรม อุ่นจิตติชัย "การศึกษาไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิต จากเส้นใยผักตบชวาและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ใช้พอลิเอทิลีน-กราฟท์-มาลีอิกแอนไฮไดรยด์ เป็นสารช่วยผสม", การประชุมการป่าไม้ ประจำปี พ.ศ. 2545, 18-20 กันยายน 2545  
กรุงเทพมหานคร







# สมบัติของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่

## PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE FROM BAMBOO CHARCOAL POWDER AND POLYLACTIC ACID



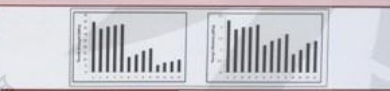
นาย อุบล พุฒอิน  
อาจารย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมกับผงถ่านไม้ไผ่ (Bamboo charcoal powder) ซึ่งทำจากวัสดุธรรมชาติที่มีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างจากพลาสติก PLA ธรรมดา การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ (PLA/Bamboo charcoal powder) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์เชิงสถิตินำเสนอ ผลการวิจัยพบว่า การเติมผงถ่านไม้ไผ่ลงใน PLA จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเหนียวของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการเติมผงถ่านไม้ไผ่ โดยเฉพาะที่อัตราส่วน 70:30 และ 80:20 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผงถ่านไม้ไผ่สามารถเสริมความแข็งแรงและเพิ่มความเหนียวให้กับ PLA ได้ นอกจากนี้ การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนยังแสดงให้เห็นว่า การเติมผงถ่านไม้ไผ่ลงใน PLA จะส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการหลอมของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการเติมผงถ่านไม้ไผ่ โดยเฉพาะที่อัตราส่วน 70:30 และ 80:20 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผงถ่านไม้ไผ่สามารถเพิ่มอุณหภูมิการหลอมของ PLA ได้

### กัณฑ์

ใบพิมพ์จากกรมการศึกษานานาชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (International Journal of Education Research) ปีที่ ๖ ฉบับที่ ๖ (๒๐๑๘) หน้า ๖๖-๗๓  
ใบพิมพ์จากวารสารวิจัยทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (Journal of Science and Technology Research) ปีที่ ๖ ฉบับที่ ๖ (๒๐๑๘) หน้า ๖๖-๗๓  
ใบพิมพ์จากวารสารวิจัยทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (Journal of Science and Technology Research) ปีที่ ๖ ฉบับที่ ๖ (๒๐๑๘) หน้า ๖๖-๗๓



ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ (PLA/Bamboo charcoal powder) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100

### อุปกรณ์และวิธีการ

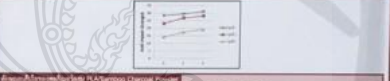
- Polylactide (PLA) grade 4100 (NatureWorks, LLC, USA)
- PE-gMAH acrylic 500 (Sprayable, Saint Louis, USA)
- ผงถ่านไม้ไผ่ Bamboo Charcoal Powder ขนาด 300 ไมครอน บริษัท อีทีอี อีทีอี อีทีอี (E.T.E. THAILAND)
- เครื่องอัดฉีดพลาสติกแบบฉีดแบบฉีด (Injection Molding Machine) ขนาด 300 กรัม บริษัท อีทีอี อีทีอี อีทีอี (E.T.E. THAILAND)



ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ (PLA/Bamboo charcoal powder) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100

การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ (PLA/Bamboo charcoal powder) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์เชิงสถิตินำเสนอ

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ (PLA/Bamboo charcoal powder) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนนำเสนอ



ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ (PLA/Bamboo charcoal powder) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ (PLA/Bamboo charcoal powder) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนนำเสนอ

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ (PLA/Bamboo charcoal powder) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนนำเสนอ



รูปที่ ๑ เครื่องอัดฉีดพลาสติกแบบฉีดแบบฉีด (Injection Molding Machine) ขนาด 300 กรัม บริษัท อีทีอี อีทีอี อีทีอี (E.T.E. THAILAND)

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ (PLA/Bamboo charcoal powder) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนนำเสนอ

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ (PLA/Bamboo charcoal powder) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนนำเสนอ



รูปที่ ๒ ภาพตัดขวางของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ (PLA/Bamboo charcoal powder) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ (PLA/Bamboo charcoal powder) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนนำเสนอ

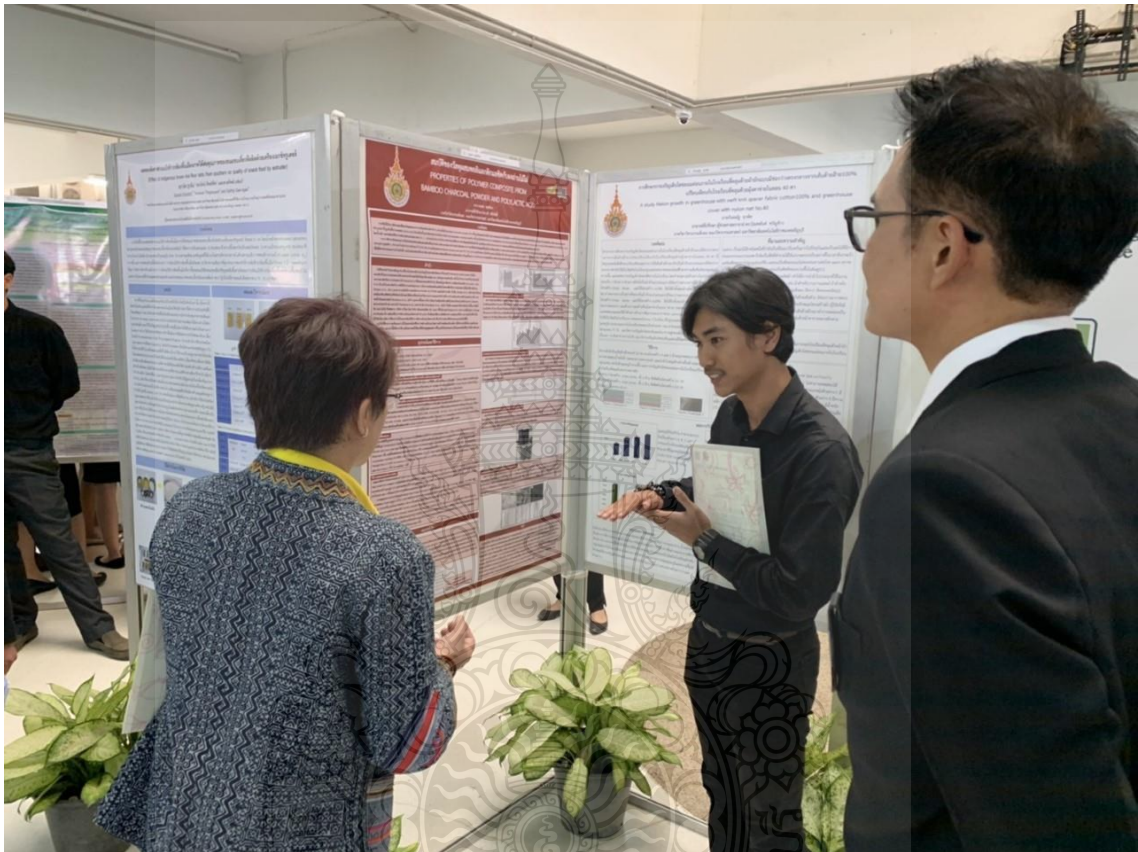
การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ (PLA/Bamboo charcoal powder) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนนำเสนอ

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ (PLA/Bamboo charcoal powder) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนนำเสนอ

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงถ่านไม้ไผ่ (PLA/Bamboo charcoal powder) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนนำเสนอ

อัตราส่วน	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ความเหนียว (MJ/m <sup>2</sup> )	อุณหภูมิการหลอม (°C)
100:0	~60	~1.5	~150
90:10	~65	~1.8	~160
80:20	~70	~2.1	~165
70:30	~75	~2.4	~170
60:40	~80	~2.7	~175
50:50	~85	~3.0	~180
40:60	~90	~3.3	~185
30:70	~95	~3.6	~190
20:80	~100	~3.9	~195
10:90	~105	~4.2	~200
0:100	~110	~4.5	~205





## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอนุพล พุฒซ้อน
วัน เดือน ปีเกิด	15 ธันวาคม 2535
ที่อยู่	68/2 หมู่ 2 ต.บึงสนั่น อ.ธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2558	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ- เคมีสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	086-3190833
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2560-2562	วิศวกรโรงงาน บริษัท งามดีต่อตอล จำกัด
พ.ศ. 2563-ปัจจุบัน	Project Design Engineer บริษัท คอลเนคซอล จำกัด
อีเมล	Aottz@hotmail.com

