

การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีน  
เสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพุลทรูชัน

**FORMING CONTINUOUS COMPOSITE MATERIALS FROM  
POLYPROPYLENE FIBERS REINFORCED BY JUTE FIBERS  
BY PULTRUSION PROCESS**

พลภัทร ทิพย์บุญศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

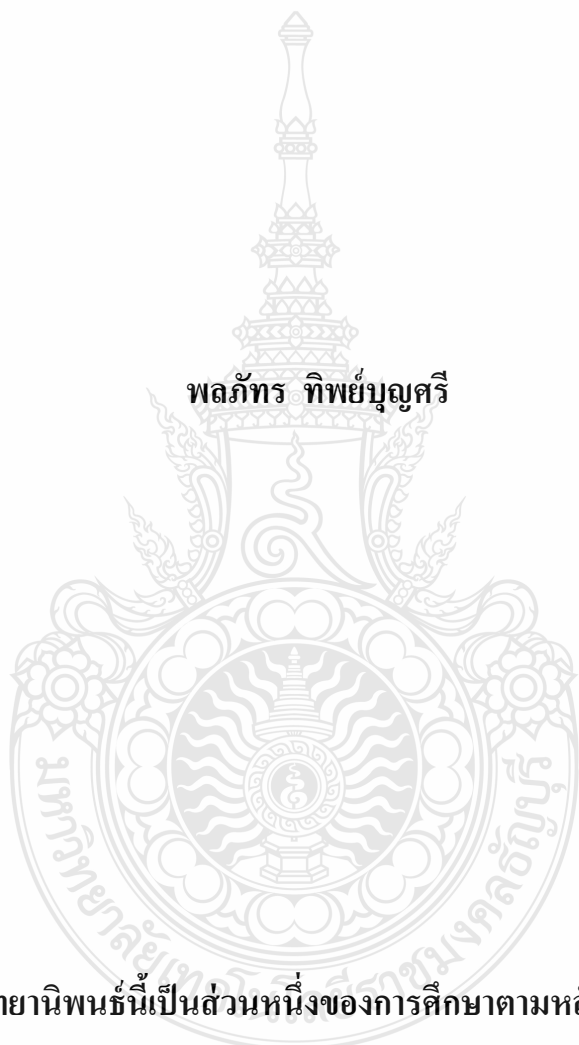
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีน  
เสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรวงขึ้น



พลภัทร ทิพย์บุญศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**FORMING CONTINUOUS COMPOSITE MATERIALS FROM  
POLYPROPYLENE FIBERS REINFORCED BY JUTE FIBERS  
BY PULTRUSION PROCESS**

**PONLAPATH TIPBOONSRI**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE  
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
PROGRAM IN MANUFACTURING ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI**

**ACADEMIC YEAR 2018**

**COPYRIGHT OF RAJAMANGALA UNIVERSITY  
OF TECHNOLOGY THANYABURI**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีน  
เสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพุลทรูชั่น

Forming Continuous Composite Materials from Polypropylene Fibers  
Reinforced by Jute Fibers by Pultrusion Process

ชื่อ - นามสกุล

นายพลภัทร ทิพย์บุญศรี

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์อนินท์ มีมนต์, Ph.D.

ปีการศึกษา

2561

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ วรรณศรี, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ค้อสกุล, D.-Ing.)

กรรมการ

(อาจารย์อนินท์ มีมนต์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 16 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2562



หัวข้อวิทยานิพนธ์	การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรวงั้น
ชื่อ-นามสกุล	นายพลภัทร ทิพย์บุญศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์อนันต์ มิมนต์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2561

### บทคัดย่อ

กระบวนการพูลทรวงั้นเป็นกระบวนการผลิตที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตที่มีลักษณะของหน้าตัดคงที่และมีความยาวอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปกระบวนการผลิตแบบนี้จะรู้จักกันในชื่อของเทอร์เซตติ้งพูลทรวงั้น ซึ่งจะใช้วัสดุเนื้อพื้นกลุ่มเทอร์โมเซตติ้ง ปัจจุบันกระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกพูลทรวงั้น ยังไม่ได้รับการศึกษาวิจัยและผลิตขึ้นส่วนวัสดุคอมโพสิตอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหรือเชิงการค้าเมื่อเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปเทอร์เซตติ้งพูลทรวงั้น กระบวนการเทอร์โมพลาสติกพูลทรวงั้นจะขึ้นรูปด้วยการดึงเส้นใยเสริมแรงและเส้นใยเทอร์โมพลาสติกผ่านคายร้อนเพื่อทำให้เกิดการหลอมเหลวและไหลตัวเข้าไปแทรกซึมในเส้นใยเสริมแรง เส้นใยจะถูกดึงผ่านหน้าตัดคายที่คงที่และร้อนเพื่อขึ้นรูปให้เป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีความยาวอย่างต่อเนื่อง

ในการศึกษาวิจัยนี้ เส้นใยพอลิพรอพิลีนใช้เป็นวัสดุเนื้อพื้น เส้นใยปอเป็นวัสดุเสริมแรง ในขณะที่เดียวกันเส้นใยแก้วจะถูกใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของวัสดุ เพื่อให้สามารถพูลทรวงั้นได้สำเร็จ อัตราส่วนการเติมเส้นใยเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับกระบวนการขึ้นรูปนี้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุทั้งหมดที่ใช้ในการพูลทรวงั้นต่อพื้นที่หน้าตัดของคายที่ใช้ในการขึ้นรูป อัตราส่วนการเติมเส้นใยนี้จะต้องถูกออกแบบให้มีค่ามากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ ในที่นี้คำนวณอัตราการเติมเส้นใย 100.52 เปอร์เซ็นต์ ประกอบด้วยเส้นใยปอ 23.06 เปอร์เซ็นต์ เส้นใยแก้ว 9.01 เปอร์เซ็นต์ และเส้นใยพอลิพรอพิลีน 68.45 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิสำหรับการขึ้นรูปกำหนดไว้ 190, 200, 210 และ 220 องศาเซลเซียส และความเร็วในการดึงขึ้นรูปจะกำหนดไว้ 40, 100 และ 140 มิลลิเมตรต่อนาที การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบจะใช้สำหรับการวัดคุณภาพการแทรกซึมของเรซินเข้าไปในเส้นใยโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์รูปภาพด้วยโปรแกรมโฟโตชอปซีเอส 6 และโปรแกรมอิมเมจเจ 1.52a การทดสอบแรงดึง (ASTM

D3039) และการทดสอบแรงค้ำ (ASTM D790) ถูกนำมาใช้สำหรับการประเมินค่าความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตที่ขึ้นรูปได้

วัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยปอเสริมแรงในพอลิพรอพิลีนประสบความสำเร็จในการขึ้นรูปแบบเทอร์โมพลาสติกพูลทรวงั้น โดยมีขนาด 25 x 3 มิลลิเมตร และยาว 1,500 มิลลิเมตร เส้นใยเสริมแรงทั้งหมดจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าอุณหภูมิและความเร็วในการดึงขึ้นรูปมีผลกับคุณภาพการแทรกซึมของพอลิพรอพิลีนเรซินและปริมาณของฟองอากาศในวัสดุคอมโพสิต อุณหภูมิที่สูงขึ้นเรซินจะแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้ดีกว่า ในขณะที่ความเร็วเพิ่มสูงขึ้นความสามารถในการแทรกซึมของเรซินจะลดลง สมบัติทางกลจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิการขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น ที่อุณหภูมิการพูลทรวงั้น 200 องศาเซลเซียส สมบัติทางกลดีที่สุด แต่เมื่อสูงเกินกว่า 200 องศาเซลเซียส พบว่าสมบัติทางกลมีค่าลดลงแม้ว่าอัตราการแทรกซึมของเรซินจะดี เนื่องจากเส้นใยปอได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิสูงในระดับที่ใกล้เคียงกับจุดสลายตัวของเส้นใยปอ นอกจากนี้เมื่อความเร็วในการพูลทรวงั้นเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้คุณภาพการแทรกซึมของเรซินลดต่ำลง และส่งผลให้สมบัติทางกลลดลงเช่นกัน จากผลการทดลองพบว่าความเร็วในการพูลทรวงั้นที่ดีที่สุดเท่ากับ 40 มิลลิเมตร/นาที่ ดังนั้นผลการศึกษาวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดกรอบของสภาวะการขึ้นรูปแบบเทอร์โมพลาสติกพูลทรวงั้นที่เหมาะสมสำหรับขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยจากธรรมชาติในเนื้อพื้นเทอร์โมพลาสติก

**คำสำคัญ:** เทอร์โมพลาสติกพูลทรวงั้น วัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน  
เส้นใยปอเสริมแรงในพอลิพรอพิลีน สภาวะการขึ้นรูปแบบเทอร์โมพลาสติกพูลทรวงั้น  
อัตราส่วนการเติมเส้นใย

<b>Thesis Title</b>	Forming Continuous Composite Materials from Polypropylene Fibers Reinforced by Jute Fibers by Pultrusion Process
<b>Name - Surname</b>	Mr. Ponlapath Tipboonsri
<b>Program</b>	Manufacturing Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Mr. Anin Memon, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2018

## ABSTRACT

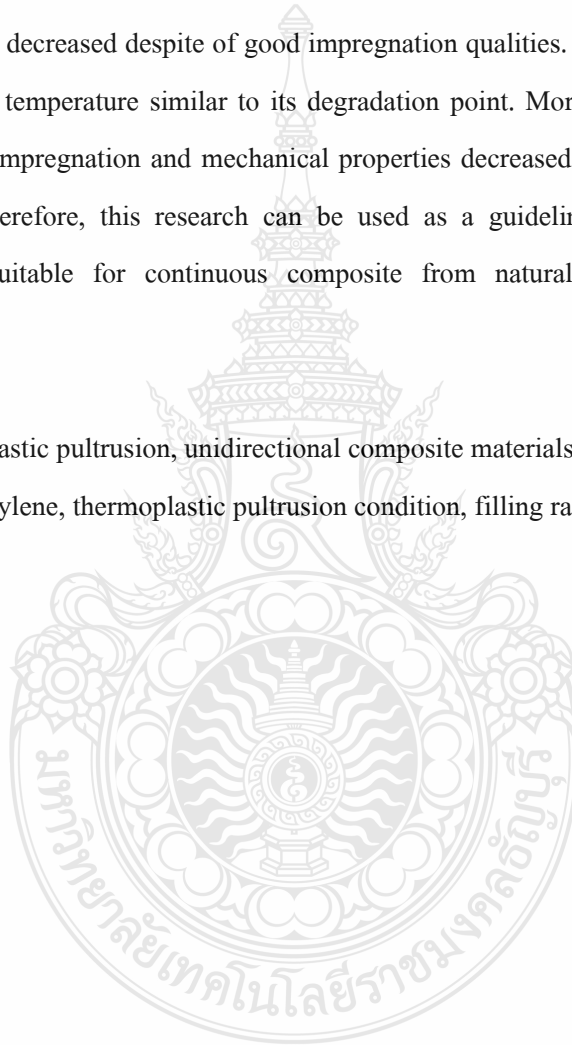
Pultrusion process is suitable for forming constant cross-section and continuous composite. Generally, this process is known as thermosetting pultrusion process using thermosetting resin as a matrix. Currently, thermoplastic pultrusion process has not been studied and this composite has not been produced widely for industrial and commercial materials comparing with thermosetting pultrusion process. Thermoplastic pultrusion is performed by pulling reinforcement fibers and thermoplastic fiber through the heated die causing melting and impregnation in the reinforcement fibers. The fibers were pulled through the constant cross-section of the heated die to form continuous composite.

In this research, polypropylene fibers were used as matrix resin and jute fibers were used as reinforcement fiber whereas glass fibers were used as additional reinforcement fiber to strengthen its structure for the successful pultrusion process. The filling ratio of fiber was an important parameter of this process calculating from the ratio of cross-section of materials to cross-section of the molding die. This ratio was designed over 100 % so the ratio of 100.52 % was employed consisting of 23.06 % jute fiber, 9.01 % glass fiber and 68.45 % polypropylene fiber. Pultrusion temperatures were set at 190, 200, 210, and 220 °C and pulling speeds were 40, 100, and 140 mm/min. The microstructure was examined to evaluate the impregnation quality of resin into fiber bundle by using Photoshop CS6 and ImageJ 1.52a. Tensile (ASTM D3039) and flexural test (ASTM D790) were conducted to evaluate these composites' strength.

The continuous composite from jute fibers reinforced polypropylene was successfully fabricated by thermoplastic pultrusion process with the size of 25 X 3 millimeter, and the length of

1,500 millimeter. All reinforced fibers were performed in unidirection. From the microstructure examination, it was found that the pultrusion temperature and speed affected the impregnation quality of polypropylene resin and void content in the composite. The resin was impregnated into the fiber bundle better at higher temperature while higher speed decreased the resin impregnation. Higher pultrusion temperature caused higher mechanical properties. Pultrusion temperature of 200 °C showed the best mechanical properties. When the temperature was over 200 °C, the mechanical properties decreased despite of good impregnation qualities. This was because jute fiber was affected by high temperature similar to its degradation point. Moreover, when the pultrusion speed increased, the impregnation and mechanical properties decreased. The best pultrusion speed was 40 mm/min. Therefore, this research can be used as a guideline to design thermoplastic pultrusion process suitable for continuous composite from natural fibers reinforced in the thermoplastic matrix.

**Keywords:** thermoplastic pultrusion, unidirectional composite materials, jute fibers reinforced in polypropylene, thermoplastic pultrusion condition, filling ratio of fibers





## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีน เสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรวงั้น สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากผู้จัดทำ ได้รับคำแนะนำจากคณาจารย์ทั้งหลาย ที่คอยชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาหาคณะที่ได้ทำการจัดทำ โครงการ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.อนินท์ มีมนต์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่คอยควบคุมการจัดทำ โครงการให้สามารถดำเนินการไปได้จนแล้วเสร็จ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และการสนับสนุนจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัย เพื่ออุตสาหกรรมสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย เลขที่สัญญา MSD60I0028 บุคลากรทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์เครื่องทดสอบสมบัติทางกลทำให้โครงการฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวทั้งหมดที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จ และคอยให้การสนับสนุนและให้กำลังใจ ตลอดจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

พลภัทร ทิพย์บุญศรี

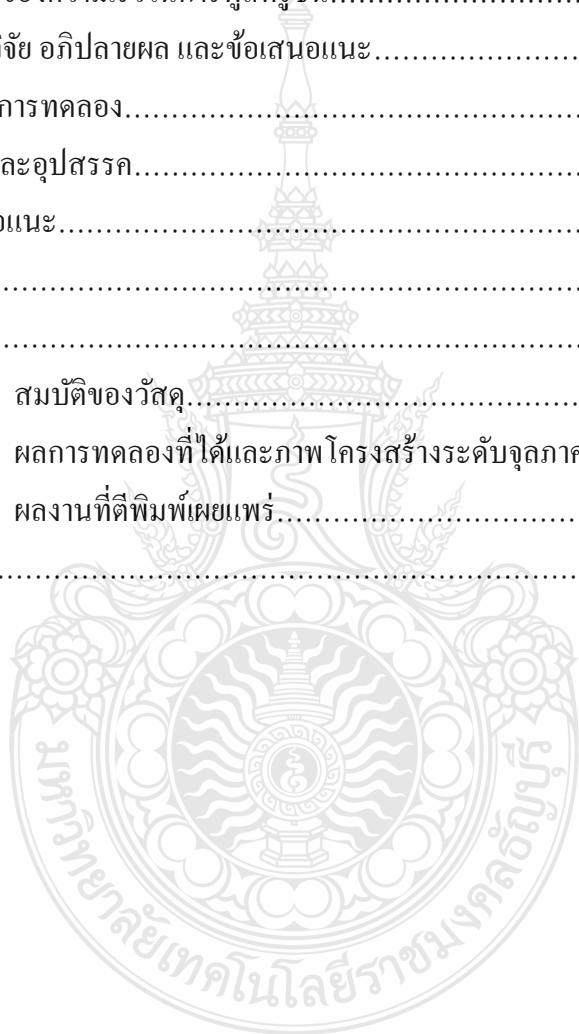


## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
สารบัญตาราง.....	(10)
สารบัญรูป.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 วัสดุคอมโพสิต.....	5
2.2 กระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิต (Producing the composite).....	12
2.3 การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรวงขึ้น.....	19
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน.....	31
3.2 วัสดุ เครื่องมือ และเครื่องจักรที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.3 การออกแบบการทดลองพูลทรวงขึ้นวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องของเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ.....	44
3.4 การทดลองพูลทรวงขึ้นวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่อง.....	50
3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และทดสอบสมบัติทางกล.....	52

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	57
4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิพุลทรวงขึ้น.....	57
4.2 อิทธิพลของความเร็วในการพุลทรวงขึ้น.....	66
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	73
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	73
5.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	74
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	75
บรรณานุกรม.....	76
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก สมบัติของวัสดุ.....	80
ภาคผนวก ข ผลการทดลองที่ได้และภาพโครงสร้างระดับจุลภาค.....	82
ภาคผนวก ค ผลงานที่ตีพิมพ์เผยแพร่.....	92
ประวัติผู้เขียน.....	107



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของวัสดุเสริมแรง.....	15
ตารางที่ 2.2 อักษรย่อที่แสดงสมบัติของเส้นใยแก้ว.....	21
ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลของเส้นใยจากธรรมชาติและสังเคราะห์.....	22
ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติของพอลิพรอพิลีน.....	24
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	35
ตารางที่ 3.2 แสดงอุณหภูมิของแม่พิมพ์ในแต่ละตำแหน่งและความเร็วในการพุดทรวงขึ้น.....	51





## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 รูปจำลองกระบวนการขึ้นรูปแบบพุลทรูชัน (Pultrusion process).....	2
รูปที่ 1.2 เส้นใยปอ.....	3
รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย ในช่วงค่าความเค้นต่ำ (ช่วง I) ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสามารถประมาณการได้จากสมการกฎการผสม ที่ระดับความเค้นสูง (ช่วง II) พื้นหลักเกิดการเปลี่ยนรูปร่างและไม่สามารถใช้สมการกฎการผสมได้.....	10
รูปที่ 2.2 การเพิ่มความยาวของเส้นใยแก้วชนิด E ในพื้นที่หลักที่พอกซี่สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต ในขณะที่วัสดุคอมโพสิตนี้มีสัดส่วนปริมาตรของเส้นใยแก้วเท่ากับ 0.5.....	11
รูปที่ 2.3 ผลของทิศทางการจัดเรียงตัวต่อค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่พอกซี่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว.....	12
รูปที่ 2.4 การจำลองการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ต่างกัน.....	14
รูปที่ 2.5 การสานเส้นใยเสริมแรงในลักษณะสามมิติของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย.....	14
รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงจำเพาะและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจำเพาะของเส้นใยแต่ละชนิดเทียบกับวัสดุโลหะและพอลิเมอร์.....	15
รูปที่ 2.7 การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตด้วยแม่พิมพ์.....	16
รูปที่ 2.8 การขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตด้วยเทคนิคการพันเส้นใยหรือเทป.....	17
รูปที่ 2.9 การขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตด้วยเทคนิคการพุลทรูชัน (Pultrusion).....	17
รูปที่ 2.10 กระบวนการผลิตแบบเทอร์โมพลาสติกพุลทรูชัน.....	18
รูปที่ 2.11 กระบวนการผลิตแบบเทอร์โมเซตติงพุลทรูชัน.....	19
รูปที่ 2.12 โครงสร้างอสังฐานและโครงสร้างระดับจุลภาคของเส้นใยปอ.....	20

## สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 แผนภาพการไหลของการจัดทำโครงการวิทยานิพนธ์เรื่องการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ...	34
รูปที่ 3.2 เส้นใยปอ.....	36
รูปที่ 3.3 เส้นใยพอลิพรอพิลีน.....	37
รูปที่ 3.4 เส้นใยแก้ว.....	37
รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง.....	38
รูปที่ 3.6 เครื่องอบไล่ความชื้น.....	38
รูปที่ 3.7 ภาพจำลองเครื่องพูลทรวงูที่ใช้ในการทดลอง.....	39
รูปที่ 3.8 ตำแหน่งพื้นที่หน้าตัดคงที่ของคาน.....	39
รูปที่ 3.9 เครื่องพูลทรวงูที่ใช้ในการทดลอง.....	40
รูปที่ 3.10 เครื่องตัดชิ้นงานละเอียด.....	41
รูปที่ 3.11 เครื่องแบ่งเส้นใยเข้าม้วน.....	41
รูปที่ 3.12 เครื่อง Universal testing machine สำหรับการทดสอบแรงดึง.....	42
รูปที่ 3.13 เครื่อง Universal testing machine สำหรับการทดสอบการดัดแบบ 3 จุด.....	43
รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope).....	43
รูปที่ 3.15 แผนภาพการไหลแสดงขั้นตอนการทดลองพูลทรวงูวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องของเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ.....	44
รูปที่ 3.16 แสดงผล Thermogravimetric analysis (TGA) ของพอลิพรอพิลีนและเส้นใยปอ.	47
รูปที่ 3.17 ชั้นวางม้วนเส้นใยพอลิพรอพิลีนสำหรับเข้าแกน.....	47
รูปที่ 3.18 การรวบเส้นใยพอลิพรอพิลีน.....	48
รูปที่ 3.19 การวางเส้นใยที่เข้าแกนแล้วบนชั้นวางสำหรับขึ้นรูป.....	48
รูปที่ 3.20 การจัดเรียงเส้นใย.....	49
รูปที่ 3.21 ตำแหน่งการจัดเรียงเส้นใยในแม่พิมพ์.....	49
รูปที่ 3.22 ลักษณะการเตรียมเส้นใยก่อนปิดแม่พิมพ์.....	50
รูปที่ 3.23 ตำแหน่งฮีทเตอร์ให้ความร้อนของแม่พิมพ์.....	50

## สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.24	ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป..... 51
รูปที่ 3.25	แสดงการเตรียมชิ้นทดสอบของวัสดุคอมโพสิต..... 52
รูปที่ 3.26	ชิ้นงานที่ถูกเตรียมก่อนทำการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์.. 52
รูปที่ 3.27	แสดงพื้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟองอากาศ..... 53
รูปที่ 3.28	การใช้โปรแกรม Image J ในการวิเคราะห์พื้นที่..... 53
รูปที่ 3.29	แสดงพื้นที่ในการวิเคราะห์ปริมาณการแทรกซึมของเรซินในเส้นใย..... 54
รูปที่ 3.30	แสดงลักษณะและขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึง..... 55
รูปที่ 3.31	เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine)..... 55
รูปที่ 3.32	แสดงลักษณะและขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดัด..... 56
รูปที่ 3.33	เครื่องทดสอบแรงดัด (Bending testing machine)..... 56
รูปที่ 4.1	ภาพโครงสร้างภาคตัดขวางที่มีอิทธิพลของอุณหภูมิพูลทुरुชั้น..... 59
รูปที่ 4.2	ภาพโครงสร้างภาคตัดขวางที่มีอิทธิพลของอุณหภูมิพูลทुरुชั้น (ต่อ)..... 60
รูปที่ 4.3	อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูปต่อปริมาณฟองอากาศ..... 61
รูปที่ 4.4	อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูปต่อปริมาณการแทรกซึมของเรซินในเส้นใย..... 62
รูปที่ 4.5	อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูปต่อค่าความแข็งแรงดึง..... 63
รูปที่ 4.6	อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูปต่อค่ามอดูลัสแรงดึง..... 63
รูปที่ 4.7	อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูปต่อค่าความแข็งแรงดัด..... 64
รูปที่ 4.8	อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูปต่อค่ามอดูลัสแรงดัด..... 65
รูปที่ 4.9	ภาพโครงสร้างภาคตัดขวางที่มีอิทธิพลของความเร็วในการพูลทुरुชั้น..... 67
รูปที่ 4.10	ภาพโครงสร้างภาคตัดขวางที่มีอิทธิพลของความเร็วในการพูลทुरुชั้น (ต่อ)..... 68
รูปที่ 4.11	อิทธิพลของความเร็วดึงขึ้นรูปต่อปริมาณฟองอากาศ..... 69
รูปที่ 4.12	อิทธิพลของความเร็วดึงขึ้นรูปต่อปริมาณการแทรกซึมของเรซินในเส้นใย..... 70
รูปที่ 4.13	อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูปต่อค่าความแข็งแรงดึง..... 71
รูปที่ 4.14	อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูปต่อค่ามอดูลัสแรงดึง..... 71
รูปที่ 4.15	อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูปต่อค่าความแข็งแรงดัด..... 72
รูปที่ 4.16	อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูปต่อค่ามอดูลัสแรงดัด..... 72





# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ ขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของวิทยานิพนธ์เรื่องการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีน เสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรูชั่น โดยมีรายละเอียดของเนื้อหาดังต่อไปนี้

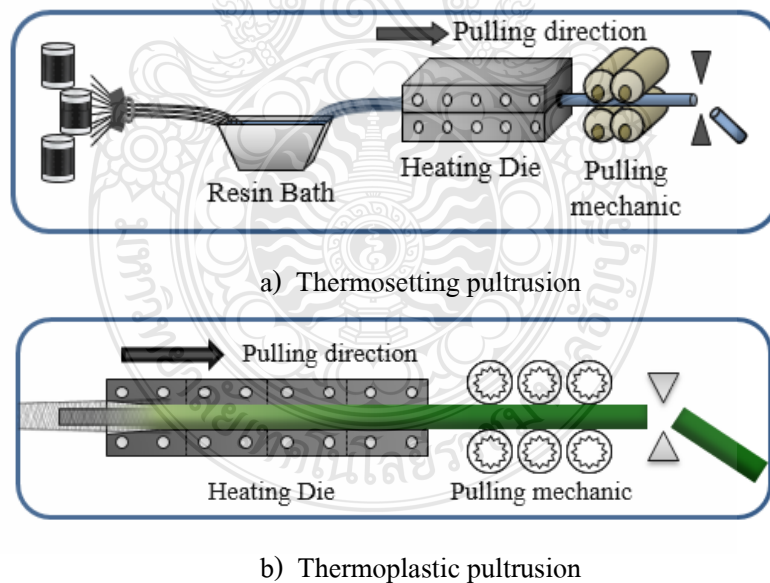
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการใช้งานของวัสดุคอมโพสิตเป็นจำนวนมากและมีแนวโน้มการใช้งานที่สูงขึ้น ในอนาคตของอุตสาหกรรมยานยนต์ อากาศยาน ชิ้นส่วนอุตสาหกรรม ซึ่งวัสดุคอมโพสิตจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนประกอบหลัก คือ ส่วนของวัสดุเสริมแรงและส่วนของวัสดุเนื้อพื้น พอลิเมอร์ถูกนำมาใช้งานเป็นวัสดุเนื้อของคอมโพสิตอย่างแพร่หลายทั้งในกลุ่มของเทอร์โมเซตติงและเทอร์โมพลาสติกสำหรับผลิตวัสดุคอมโพสิต และกระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิตมีหลากหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการฉีด การอัด การพันขึ้นรูป การทาขึ้นรูปด้วยมือ การใช้สูญญากาศช่วยในการขึ้นรูป และกระบวนการพูลทรูชั่น [1-2] สำหรับกระบวนการที่ขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตความยาวต่อเนื่องและหน้าตัดคงที่ คือ กระบวนการพูลทรูชั่น (รูปที่ 1.1)

กระบวนการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบพูลทรูชั่น โดยทั่วไปจะใช้วัสดุเนื้อพื้นกลุ่มเทอร์โมเซตติง จากการสืบค้นข้อมูลการศึกษาวิจัยของประเทศไทยพบว่ามีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการพูลทรูชั่นที่มีการใช้เส้นใยแก้วเสริมแรงในวัสดุเนื้อพื้นเทอร์โมเซตติง [3-4] ในขณะที่เทอร์โมพลาสติกพูลทรูชั่นในประเทศไทยยังมีการศึกษาวิจัยค่อนข้างน้อยหรือแทบจะไม่มีเลย ประกอบกับเทอร์โมพลาสติกมีความเหนียวสูงการแทรกซึมเข้าไปเกาะยึดในเส้นใยจึงเกิดได้ยากกว่าเทอร์โมเซตติง แต่มีข้อดี คือ ไม่เป็นพิษจากสารระเหย กระบวนการผลิตทำได้สะอาดเรียบร้อยกว่า อีกทั้งเทอร์โมพลาสติกยังสามารถรีไซเคิลได้ สามารถช่วยลดมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง โดยมากแล้วเส้นใยความยาวต่อเนื่องที่สามารถนำมาพูลทรูชั่นมักจะเป็นเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นใยอะรามิด เป็นต้น ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยจำนวนมากที่มุ่งนำเอาเส้นใยธรรมชาติเข้ามาเป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต [5-6] ซึ่งได้แก่ เส้นใยลินิน เส้นใยกล้วยง เส้นใยป่าน เส้นใยไผ่ และเส้นใยปอ นอกจากนี้บางชนิดของเส้นใยธรรมชาติสามารถปั่นให้เป็นเส้นใยยาว

ต่อเนื่องได้และมีความเหมาะสมสำหรับการนำมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการพูลทรูชั่นได้เป็นอย่างดี [7-8]

เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุที่หมุนเวียนเกิดขึ้นได้อย่างไม่จำกัด เมื่อถูกนำมาใช้งานเป็นวัสดุเสริมแรงย่อมจะเกิดผลดีกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นการใช้วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและช่วยลดปริมาณการใช้พลาสติกที่สังเคราะห์จากปิโตรเลียมลงอีกช่องทางหนึ่ง ดังนั้นจึงได้เกิดความสนใจที่จะใช้เส้นใยธรรมชาติชนิดยาวต่อเนื่องของเส้นใยปอ (รูปที่ 1.2) มาเป็นวัสดุเสริมแรงหลักสำหรับการขึ้นรูปแบบเทอร์โมพลาสติกพูลทรูชั่น และเส้นใยเรซินที่เลือกใช้ คือ เส้นใยพอลิพรอพิลีนเพราะเป็นชนิดของพลาสติกที่ใช้กันเป็นจำนวนมากในอุตสาหกรรม ราคาถูก ขึ้นรูปได้ง่าย สามารถรีไซเคิลได้ และในรูปแบบของเส้นใยมีใช้งานอยู่ในอุตสาหกรรมสิ่งทออยู่แล้ว นอกจากนี้เส้นใยแก้วยังถูกนำมาใช้เพิ่มความแข็งแรงของคอมโพสิตเพื่อให้มีความคงทนต่อแรงดึงที่ใช้การขึ้นรูปแบบพูลทรูชั่น เนื่องจากลำพังแค่เส้นใยปอไม่มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการพูลทรูชั่น โดยในการศึกษาวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษาสภาวะการขึ้นรูปและสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตความยาวต่อเนื่องแบบเส้นใยจัดเรียงตัวทิศทางเดียวกันจากเส้นใยปอเสริมแรงในพอลิพรอพิลีนที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมพลาสติกพูลทรูชั่น



รูปที่ 1.1 รูปจำลองกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรูชั่น (Pultrusion process) [8]



รูปที่ 1.2 เส้นใยปอ [9-10]

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการเทอร์โมพลาสติกพูลทูลูชั่น

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการเทอร์โมพลาสติกพูลทูลูชั่น

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ทดลองหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมเพื่อให้ได้คอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ

- 1) อัตราการเติมวัสดุ (Filling ratio) คงที่ 100.52 %
- 2) อุณหภูมิสำหรับการขึ้นรูป 190, 200, 210 และ 220 องศาเซลเซียส
- 3) ความเร็วในการดึง 40, 100 และ 140 มิลลิเมตรต่อนาที

1.3.2 ทดสอบสมบัติทางกลวัสดุคอมโพสิตเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ

- 1) ทดสอบแรงดึง ASTM D 3039
- 2) ทดสอบแรงตัด ASTM D 790

1.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุคอมโพสิตเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ

- 1) ตรวจสอบปริมาณฟองอากาศในวัสดุคอมโพสิต
- 2) ตรวจสอบปริมาณการแทรกซึมของเรซินในเส้นใยเสริมแรงของวัสดุคอมโพสิต

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้วัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องที่ใช้พอลิพรอพิลีนเป็นวัสดุเนื้อพื้นและเส้นใยปอทำหน้าที่วัสดุเสริมแรง

1.4.2 รู้สภาวะการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกพูลทรวงุ่นแบบใช้เทอร์โมพลาสติกเพื่อให้ได้วัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยปอเสริมแรงในวัสดุเนื้อพื้นพอลิพรอพิลีน

1.4.3 รู้สมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยปอเสริมแรงในวัสดุเนื้อพื้นพอลิพรอพิลีน





## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อทำการศึกษาค้นคว้าเป็นแนวทางในการดำเนินงานรวมทั้งเป็นแนวทางสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองของการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรูชั่น โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1 วัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตเป็นชนิดของวัสดุที่เกิดจากการรวมตัวกันของวัสดุหรือเฟสที่มากกว่าสองชนิดขึ้นไป เพื่อให้เกิดสมบัติที่ไม่สามารถพบได้ในวัสดุเพียงชนิดเดียว วัสดุคอมโพสิตอาจเกิดจากการเลือกวัสดุหลายชนิดมาผสมกันเพื่อให้ได้สมบัติที่โดดเด่นทางด้านความยืดหยุ่น ความแข็งแรง น้ำหนักเบา ความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ความสามารถต้านทานการกัดกร่อน ความแข็งแรง และสมบัติการนำไฟฟ้า จุดเด่นของวัสดุคอมโพสิตอยู่ที่การนำวัสดุที่มีความแตกต่างกันมาผสมกันแล้วสามารถทำให้มีสมบัติที่เป็นแบบเดียวกันได้อย่างกลมกลืน วัสดุเหล่านี้ได้รับการพัฒนาให้มีค่าความแข็งแรงจำเพาะสูงขึ้นและถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมอากาศยาน ส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนยานยนต์ และอุปกรณ์กีฬา

วัสดุคอมโพสิต โดยทั่วไปจำแนกชนิดตามรูปร่างหรือลักษณะทางธรรมชาติของเฟสที่กระจายตัว เช่น ผงอนุภาควิสเกอร์ หรือเส้นใยวิสเกอร์มีลักษณะคล้ายกับเส้นใย แต่มีความยาวน้อยกว่าการเกิดพันธะระหว่างเฟสที่กระจายตัวและเฟสพื้นหลักมีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิต ในวัสดุคอมโพสิตโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำหน้าที่เป็นสารประสานยึดติด (Coupling agents) โดยโมเลกุลเหล่านี้ทำหน้าที่สร้างพันธะระหว่างเฟสที่กระจายตัวกับเฟสพื้นหลัก วัสดุคอมโพสิตแบ่งออกเป็นสามกลุ่มใหญ่ตามรูปร่างของวัสดุ ได้แก่ ผงอนุภาค (Particulate) เส้นใย และชั้นเคลือบ (Laminar-base) คอนกรีตมีส่วนผสมของซีเมนต์และก้อนกรวดเป็นตัวอย่างของวัสดุคอมโพสิตแบบผงอนุภาค ไฟเบอร์กลาสมีเส้นใยแก้วกระจายตัวในพอลิเมอร์เป็นตัวอย่างของวัสดุคอมโพสิตแบบเสริมแรงด้วยเส้นใย ไม้อัดประกอบด้วยชั้นบาง ๆ ของแผ่นไม้เป็นวัสดุคอมโพสิตแบบเรียงชั้นหรือแบบลามิเนต (Laminar composite) เมื่อผงอนุภาคทำหน้าที่เสริมแรงมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจะทำให้วัสดุคอมโพสิตนั้นมีสมบัติแบบไอโซโทรปิก (Isotropic properties) วัสดุ

คอมโพสิตแบบเส้นใยอาจจะมีสมบัติที่เป็นทั้งแบบไอโซทรอปิกและแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic properties) วัสดุคอมโพสิตแบบลามิเนตมักจะมีสมบัติแบบแอนไอโซทรอปิกซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทาง

2.1.1 วัสดุคอมโพสิตเพิ่มความแข็งแรงด้วยเฟสกระจาย (Dispersion Strengthened Composite)

วัสดุคอมโพสิตที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยเฟสกระจายประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคระหว่าง 10-250 นาโนเมตร โดยปกติเฟสกระจายได้แก่ผงออกไซด์ของโลหะ ด้วยความที่เป็นอนุภาคขนาดเล็ก จึงสามารถกระจายตัวในพื้นที่หลักโดยไม่มีความจำเป็นต้องเกาะยึดติดกับวัสดุพื้นหลักแต่จะกระจายในลักษณะของเฟสที่อยู่ในเนื้อพื้น เมื่อกระจายได้ในพื้นที่หลักจะมีประโยชน์สำหรับขบวนการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

2.1.2 วัสดุคอมโพสิตผงอนุภาค (Particulate Composite)

วัสดุคอมโพสิตผงอนุภาคมีวัตถุประสงค์ในการผลิตเพื่อให้ได้สมบัติที่มีรูปแบบหลากหลาย มากกว่าการเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ ซึ่งโดยมากผงอนุภาคที่ผสมเข้าไปจะมีขนาดใหญ่ไม่เหมาะสมสำหรับขบวนการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน

1) กฎของการผสม (Rule of mixtures) สมบัติของวัสดุคอมโพสิตผงอนุภาคขึ้นอยู่กับปริมาณและสมบัติพื้นฐานของแต่ละส่วนผสม และสมการกฎการผสมสามารถทำนายสมบัติของวัสดุคอมโพสิตผงอนุภาคได้ เช่น ความหนาแน่นของวัสดุคอมโพสิตชนิดนี้หาได้จากสมการที่ 2.1

$$\rho_c = \sum(f_i \rho_i) = f_1 \rho_1 + f_2 \rho_2 + \dots + f_n \rho_n \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\rho_c$  คือ ความหนาแน่นของวัสดุคอมโพสิต  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  คือ ความหนาแน่นของแต่ละส่วนผสมและ  $f_1, f_2, \dots, f_n$  คือ สัดส่วนปริมาตรของแต่ละส่วนผสม อย่างไรก็ตามการเชื่อมติดกันและการกระจายตัวของเฟสที่แตกต่างกันในวัสดุคอมโพสิตชนิดนี้ยังคงมีความสำคัญต่อสมบัติเช่นกัน (เช่น เฟสที่กระจายตัวมีการจัดเรียงตัวที่สอดคล้องกับลักษณะของเฟสเนื้อพื้นอย่างไรบ้าง)

2) ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cemented carbide) หรือเซอ์เมท (Cermets) ประกอบไปด้วยอนุภาคของเซรามิกที่แข็งแรงกระจายตัวในพื้นที่หลักโลหะทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ที่ใช้สำหรับเป็นเครื่องมือตัดเฉือนเป็นชนิดที่รู้จักกันดีของวัสดุคอมโพสิตกลุ่มนี้ ทังสเตนคาร์ไบด์เป็นเซรามิกมีความแข็งแรงและทนความร้อนได้สูง การปรับปรุงสมบัติความแกร่งของทังสเตนคาร์ไบด์ทำได้โดยด้วย

การผสมผงโคบอลต์แล้วทำการอัดขึ้นรูป จากนั้นทำการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของโคบอลต์ ส่งผลให้โคบอลต์หลอมเหลวและล้อมรอบอนุภาคของทั้งสแตนคาร์ไบด์ เมื่อกระบวนการแข็งตัวสิ้นสุดลง โคบอลต์จะทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้กับผงอนุภาคของทั้งสแตนคาร์ไบด์อีกทั้งทำหน้าที่รับแรงกระแทกได้เป็นอย่างดี คาร์ไบด์ชนิดอื่นๆ เช่น TaC และ TiC จัดเป็นเซอร์เม็ทเช่นกัน

3) วัสดุขัดสี (Abrasive) ล้อหินเจียรไนหรือแผ่นตัดโดยส่วนมากผลิตจากอลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) และคิวบิก โบรอน ไนไตรด์ (CBN) อนุภาคของผงขัดเหล่านี้จะถูกประสานด้วยพื้นหลักที่เป็นแก้วหรือพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มสมบัติความแกร่งให้กับวัสดุคอมโพสิต ผงขัดเพชร โดยมากผสมในพื้นหลักที่เป็นโลหะเพื่อเพิ่มสมบัติความแกร่งให้กับวัสดุคอมโพสิต โดยลักษณะของวัสดุขัดสีทั่วไปจะเกิดคมตัดใหม่ขึ้นเมื่อผงอนุภาคนั้นเกิดการสึกหรอหรือแตกหลุดออกจากพื้นหลัก ดังนั้นเมื่อหลุดออกไปผิวหน้าคมตัดใหม่ที่ใช้สำหรับการขัดสีจะเกิดขึ้นอีกครั้ง

4) หน้าสัมผัสทางไฟฟ้า (Electric contact) วัสดุที่ใช้สำหรับผลิตเป็นหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าในสวิตช์หรือรีเลย์ต้องมีสมบัติที่ผสมกันระหว่างความต้านทานต่อการสึกหรอและนำไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี เมื่อหน้าสัมผัสนั้นเกิดการสึกกร่อนจะส่งผลให้การนำไฟฟ้าลดลงและเกิดการอาร์ค ทั้งสแตนเสริมแรงด้วยเงินจะให้สมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในรูปแบบนี้ ผงทั้งสแตนถูกอัดขึ้นรูปด้วยเทคนิคทางด้านโลหะผงเพื่อให้มีรูพรุนเกิดขึ้นในก้อนที่เนื้อเงินเหลวถูกดูดด้วยระบบสุญญากาศแทรกตัวเข้าไปเติมเต็มตามช่องว่างเหล่านั้น ส่งผลให้เงินและทั้งสแตนเป็นวัสดุที่เชื่อมติดกัน โดยเงินจะทำหน้าที่นำไฟฟ้าได้อย่างดีเยี่ยมขณะที่ทั้งสแตนจะป้องกันการสึกหรอได้อย่างดีเช่นกัน

5) วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ (Polymer composite) พอลิเมอร์วิศวกรรมที่ประกอบด้วยสารเติมแต่ง (Filler) และสารเพิ่มเนื้อ (Extender) จัดเป็นวัสดุคอมโพสิตอนุภาค เช่น การใช้ผงคาร์บอนผสมในยางวัลคาไรไนซ์ที่ประกอบด้วยอนุภาคคาร์บอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-500 นาโนเมตร ทำหน้าที่ปรับปรุงสมบัติความแข็งแรง ความแกร่ง ความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอ และทนต่อการสลายตัวเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต อีกทั้งเพิ่มความทนทานต่อความร้อนให้กับยาง เช่นเดียวกับการเติมผงอนุภาคนาโนของซิลิกาในยางรถยนต์เพื่อเพิ่มความแกร่งให้กับยางรถยนต์

### 2.1.3 วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-Reinforce Composite)

โดยทั่วไปวัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใยจะมีสมบัติด้านความแข็งแรง ด้านทนต่อความล้า ความแข็งแรงจุดคราก เพิ่มอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนัก และเพิ่มความ โดยการรวมกันของเส้นใยที่แข็งแรงแต่เปราะลงในวัสดุพื้นหลักที่อ่อนกว่าและเหนียวกว่า วัสดุพื้นหลักทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงสู่เส้นใยซึ่งทำหน้าที่รับแรงทั้งหมดที่เข้ามากระทำ และทำหน้าที่ป้องกันผิวหน้าของเส้นใยและลดการแพร่

ของสปีชีส์ เช่น อากาศ และความชื้นที่สามารถทำลายสมบัติทางกลของเส้นใย วัสดุคอมโพสิตกลุ่มนี้มีความแข็งแรงสูงทั้งในสภาวะอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ

วัสดุเสริมแรงหลากหลายชนิดที่สามารถนำมาทำเป็นเส้นใย ยกตัวอย่างเช่น ฟางข้าวถูกนำมาเพิ่มความแข็งแรงให้กับก้อนอิฐ เหล็กเส้นเสริมแรงเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอนกรีต เส้นใยแก้วกระจายตัวในพื้นที่หลักพอลิเมอร์ผลิตเป็นไฟเบอร์กลาสที่ใช้ในกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการขนส่ง รวมถึงประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอากาศยาน เส้นใยที่ผลิตจาก โบรอน คาร์บอน พอลิเมอร์ เช่น ออกลีลาไมด์ และเซรามิก สามารถใช้เสริมแรงได้ในวัสดุเนื้อพอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิก

1) กฎของการผสมในวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (The rule of mixtures in fiber-reinforced composite) สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย เหมือนกับการคำนวณที่ได้กล่าวมาก่อนหน้า โดยคำนวณได้จากสมการ 2.2

$$\rho_c = f_m \rho_m + f_f \rho_f \quad (2.2)$$

ตัวอักษรห้อย m หมายถึง พื้นที่หลัก และ f หมายถึง เส้นใย ดังนั้น  $f_m = 1 - f_f$  นอกจากนี้สมการกฎการผสมสามารถใช้คาดการณ์ค่าการนำไฟฟ้าและนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยตามทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่มีความต่อเนื่องและมีทิศทางเดียวกัน

$$K_c = f_m K_m + f_f K_f \quad (2.3)$$

$$\sigma_c = f_m \sigma_m + f_f \sigma_f \quad (2.4)$$

เมื่อ K คือ ค่าการนำความร้อน และ  $\sigma$  คือ ค่าการนำไฟฟ้า ทั้งการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุคอมโพสิตแต่จะเกิดขึ้นมากน้อยเท่าไรขึ้นอยู่กับสัดส่วนปริมาตรของวัสดุตัวนำที่นำมาเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตชนิดที่มีโลหะเป็นพื้นที่หลักเสริมแรงด้วยเซรามิก พลังงานจะถูกส่งผ่านไปทางวัสดุพื้นที่หลัก แต่กรณีของวัสดุคอมโพสิตชนิดที่มีพอลิเมอร์เป็นพื้นที่หลักและเสริมแรงด้วยเส้นใยโลหะรูปแบบของพลังงานถูกส่งผ่านไปทางเส้นใย เมื่อเส้นใยมีลักษณะไม่ต่อเนื่องหรือทิศทางไม่เป็นแบบเดียวกัน สมการกฎการผสมแบบปกติไม่สามารถนำมาใช้ได้ ตัวอย่างเช่น ในวัสดุคอมโพสิตพลาสติกที่มีเส้นใยโลหะเป็นตัวเสริมแรงจะมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นใย สัดส่วนปริมาตร รวมถึงการสัมผัสกันของแต่ละเส้นใยด้วย

2) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) สมการกฎการผสมสามารถใช้คาดการณ์ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นได้ เมื่อเส้นใยมีความต่อเนื่องและมีทิศทางเดียวกัน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$E_{c,||} = f_m E_m + f_f E_f \quad (2.5)$$

อย่างไรก็ตาม เมื่อมีความเค้นที่มีปริมาณมากกระทำ ส่งผลให้พื้นหลักเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปร่างและกราฟความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดจะไม่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เนื่องจากขณะที่พื้นหลักมีผลเพียงเล็กน้อยกับความแกร่งของวัสดุคอมโพสิต ดังนั้นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสามารถประมาณการได้จากสมการที่ 2.6

$$E_{c,||} = f_f E_f \quad (2.6)$$

เมื่อมีภาระมากกระทำแนวตั้งฉากกับเส้นใย แต่ละส่วนของวัสดุคอมโพสิตจะทำหน้าที่รับแรงแบบอิสระต่อกัน ดังนั้นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นหาได้จากสมการที่ 2.7 ทำนองเดียวกันเมื่อเส้นใยมีลักษณะไม่ต่อเนื่องและไม่มีการวางแบบเดียวกันสมการกฎการผสมไม่สามารถใช้ได้

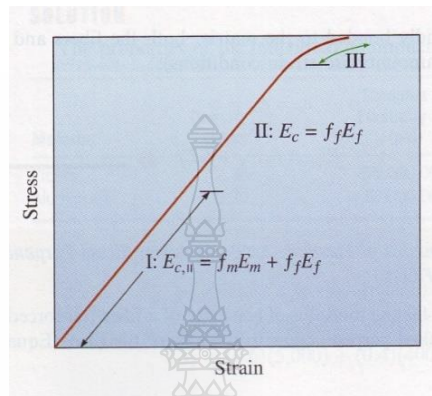
$$\frac{1}{E_{c,\perp}} = \frac{f_m}{E_m} + \frac{f_f}{E_f} \quad (2.7)$$

3) ความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิต (Strength of composite) ค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (TS) ขึ้นอยู่กับพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับพื้นหลัก อย่างไรก็ตามสมการกฎการผสมสามารถใช้คำนวณหาความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่มีลักษณะเส้นใยต่อเนื่องและจัดเรียงตัวขนานกัน ได้ดังสมการที่ 2.8

$$TS_c = f_f TS_f + f_m \sigma_m \quad (2.8)$$

เมื่อ  $TS_f$  เป็นค่าความแข็งแรงดึงของเส้นใย และ  $\sigma_m$  เป็นค่าความเค้นที่มากกระทำกับวัสดุพื้นหลักเมื่อวัสดุคอมโพสิตนั้นเกิดการยึดตัวไปจนถึงจุดที่เส้นใยเกิดการเสียหาย ดังนั้นค่า  $\sigma_m$

จะไม่ใช้ค่าความแข็งแรงดึงที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ สมบัติอื่น ๆ เช่น ความเหนียว ความทนทานต่อแรงกระแทก ความทนทานต่อความล้า การคืบ จะยากต่อการคาดการณ์ สำหรับเส้นใยที่มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นทิศทางเดียวกัน



**รูปที่ 2.1** กราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย ในช่วงค่าความเค้นต่ำ (ช่วง I) ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสามารถประมาณการได้จากสมการกฎการผสมที่ระดับความเค้นสูง (ช่วง II) พื้นที่หลักเกิดการเปลี่ยนรูปร่างและไม่สามารถใช้สมการกฎการผสมได้ [1]

4) คุณลักษณะเฉพาะของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Characteristics of Fiber-Reinforced Composite) องค์ประกอบหลายอย่างที่ต้องพิจารณาในการออกแบบวัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใย โดยทั่วไปสิ่งที่พิจารณาได้แก่ ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง การจัดเรียงตัว ปริมาณ สมบัติของเส้นใยเสริมแรง สมบัติของวัสดุพื้นหลัก และพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเสริมแรงและพื้นหลัก

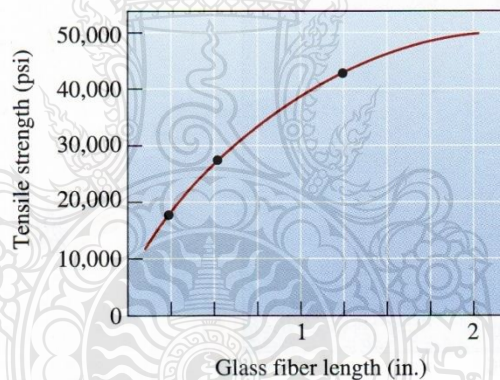
ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (Fiber length and diameter) เส้นใยมีได้ทั้งชนิดสั้น ยาว หรือมีความต่อเนื่อง ขนาดของเส้นใยนิยมนอกในลักษณะอัตราส่วน  $l/d$  โดย  $l$  คือความยาวของเส้นใย และ  $d$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย โดยทั่วไปเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง  $10 \mu\text{m}$  ( $10 \times 10^{-4} \text{ cm}$ ) ถึง  $150 \mu\text{m}$  ( $150 \times 10^{-4} \text{ cm}$ )

ความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่ามาก บ่อยครั้งที่เส้นใยเกิดการเสียหายเพราะมีความไม่สมบูรณ์ที่ผิวหน้าของเส้นใย การทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเล็กมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้จะช่วยลดพื้นที่ผิวของเส้น

ใยลึง ดังนั้นจะเกิดข้อบกพร่องขึ้นน้อยมากในขั้นตอนการผลิตหรือเมื่อวัสดุคอมโพสิตได้รับแรงกระทำ ในขณะที่ใยที่ยาวจะมีผลดีกับสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเนื่องจากบริเวณปลายของใยมีความสามารถในการรับแรงน้อยกว่าส่วนอื่น การลดจำนวนด้านปลายของใยลึงให้เหลือน้อยจะส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตมีความสามารถในการรับแรงได้ดีกว่า ดังนั้นผลของการเพิ่มความยาวส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2

ในหลายรูปแบบของการเสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่องแต่พบว่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีค่ามากกว่าค่าวิกฤติสามารถยอมรับได้ เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างการผลิตและสมบัติ ค่าความยาววิกฤติของเส้นใย ( $l_c$ ) สำหรับเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กำหนด สามารถหาได้จากสมการที่ 2.9

$$l_c = \frac{TS_f d}{2\tau_i} \quad (2.9)$$

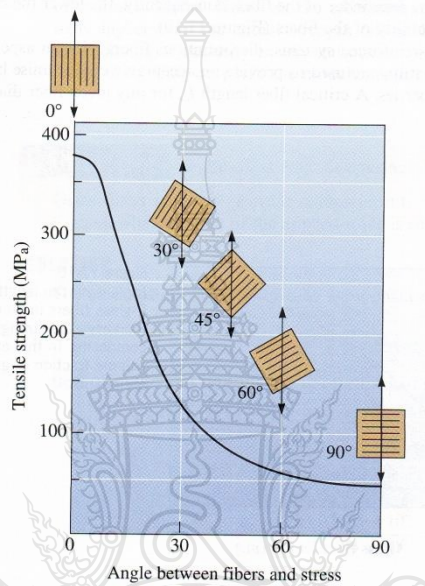


รูปที่ 2.2 การเพิ่มความยาวของเส้นใยแก้วชนิด E ในพื้นหลักอีพอกซ์ที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต ในขณะที่วัสดุคอมโพสิตนี้มีสัดส่วนปริมาตรของเส้นใยแก้วเท่ากับ 0.5 [1]

เมื่อ  $TS_f$  เป็นค่าความแข็งแรงดึงของเส้นใย และ  $\tau_i$  เป็นค่าความแข็งแรงของพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและพื้นหลัก หรือค่าความเค้นที่ทำให้พื้นหลักเกิดการเสียหาย ถ้าความยาวของเส้นใย  $l$  มีค่าน้อยกว่า  $l_c$  จะเกิดผลกระทบเล็กน้อยกับวัสดุเสริมแรง ถ้าความยาวของเส้นใย  $l$  มีค่ามากกว่าประมาณ  $15 l_c$  เส้นใยจะมีลักษณะคล้ายกับสภาพของเส้นใยที่มีความยาวต่อเนื่อง ค่าความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตสามารถประมาณการได้จากสมการที่ 2.10

$$\sigma_c = f_f T S_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + f_m \sigma_m \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\sigma_m$  คือ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่ทำให้เส้นใยเกิดการเสียหาย



**รูปที่ 2.3** ผลของทิศทางการจัดเรียงตัวต่อค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว [1]

ปริมาณของเส้นใย (Amount of fiber) สัดส่วนต่อปริมาตรของเส้นใยเสริมแรงมาก จะส่งผลให้ความแข็งแรงและความแกร่งของวัสดุคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าสัดส่วนต่อปริมาตรสูงสุดที่จะผสมเส้นใยอยู่ที่ประมาณ 80% ถ้ามีค่าเกินไปกว่านี้ เส้นใยจะไม่สามารถถูกห่อหุ้มอย่างสมบูรณ์ด้วยวัสดุพื้นหลัก

การจัดเรียงตัวของเส้นใย (Orientation of fiber) เส้นใยเสริมแรงสามารถจัดเรียงตัวในวัสดุพื้นหลักได้หลายทิศทาง เส้นใยที่ผ่านการจัดเรียงตัวเส้นใยแบบสุ่มจะให้ค่าอัตราส่วนต่ำ เส้นใยแก้วเป็นชนิดของเส้นใยเสริมแรงที่ใช้กันมากและเข้ากันได้ง่ายกับวัสดุพื้นหลัก รวมถึงส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตมีพฤติกรรมแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) เส้นใยยาวหรือมีลักษณะยาวต่อเนื่อง เมื่อเกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางที่แตกต่างกันจะส่งผลให้เกิดสมบัติแอนไอโซโทรปิกโดยเฉพาะอย่างยิ่งใน



ทิศทางขนานกับเส้นใยจะมีค่าความแข็งแรงสูง โดยทั่วไปเส้นใยมักถูกจัดวางในแนวศูนย์กลาง เพื่อให้อยู่ในแนวเดียวกับการทิศทางของความเค้น ในขณะที่ความแข็งแรงจะต่ำเมื่อเส้นใยมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตั้งฉากกับแนวแรงที่มากระทำ ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.3 ลักษณะเฉพาะอย่างหนึ่งของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย คือ สามารถปรับให้เหมาะสมกับสภาพของแรงที่มากระทำ เส้นใยที่ยาวและมีลักษณะต่อเนื่องสามารถจัดวางได้หลายทิศทางในพื้นที่หลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในทิศทางตั้งฉากกัน ( $0^\circ / 90^\circ$ ) ความแข็งแรงสูงเกิดขึ้นเมื่อทิศทางทั้งสองตั้งฉากกัน และการจัดเรียงเส้นใยในทิศทางที่ซับซ้อนขึ้น (เช่น  $0^\circ / \pm 45^\circ / 90^\circ$ ) จะทำให้เกิดการเสริมแรงในทิศทางที่หลากหลายขึ้น

เส้นใยสามารถจัดวางในรูปแบบสามมิติ เช่น ลักษณะการสานเส้นใย จะทำให้เกิดองศาการจัดเรียงตัวในมุมที่สามเกิดขึ้นเล็กน้อย การเสริมแรงในลักษณะสามมิติจะเกิดขึ้นและได้ผลดีในลักษณะของการถักหรือปักเส้นใยเหมือนกับการถักไหมพรม ดังนั้น การสานโครงสร้างสามมิติ ลักษณะซับซ้อนดังแสดงในรูปที่ 2.5 สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิตแบบเสริมแรงด้วยเส้นใย

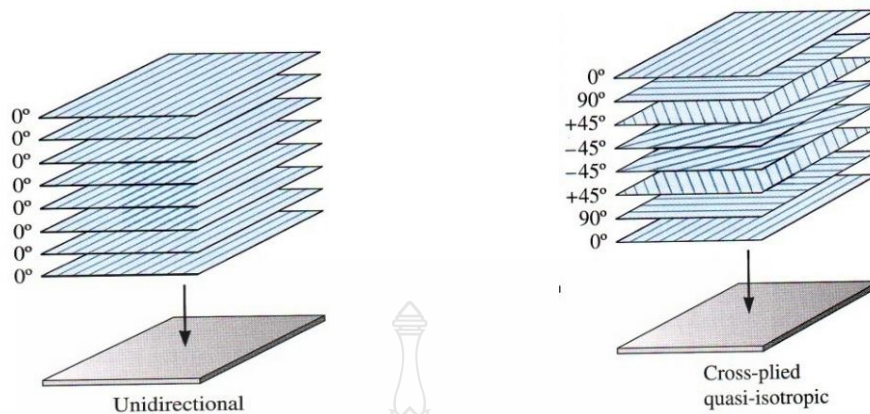
สมบัติของเส้นใย (Fiber properties) โดยทั่วไปเส้นใยจะมีความแข็งแรง แกร่ง และน้ำหนักเบา ถ้าวัสดุคอมโพสิตนั้นต้องการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงจุดหลอมเหลวของเส้นใยนั้นต้องสูงด้วย ดังนั้นค่าความแข็งแรงจำเพาะ และค่าโมดูลัสจำเพาะของเส้นใยจึงเป็นลักษณะที่สำคัญอย่างยิ่งของเส้นใย

$$\text{ค่าความแข็งแรงจำเพาะ} = \frac{TS}{\rho} \quad (2.11)$$

$$\text{ค่าโมดูลัสจำเพาะ} = \frac{E}{\rho} \quad (2.12)$$

เมื่อ TS คือ ค่าความแข็งแรงดึง และ  $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่น และ E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น สมบัติของเส้นใยบางชนิดแสดงดังตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.6

หรือ  $1 \text{ g/cm}^3 = 0.0361 \text{ lb/in}^3$  เส้นใยที่มีค่าโมดูลัสจำเพาะสูงส่วนมากพบในวัสดุที่มีเลขอะตอมต่ำ และมีพันธะโควาเลนต์ เช่น คาร์บอน และ โบรอน ซึ่งวัสดุทั้งสองชนิดนี้จะมีค่าความแข็งแรงสูงและจุดหลอมเหลวสูงด้วย



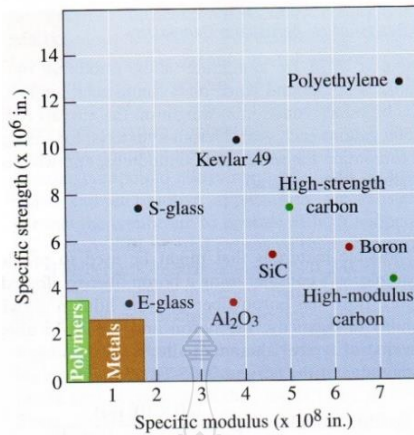
a) แสดงโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยทิศทางเดียวกันหลายชั้น ด้วยการจำลองการจัดเรียงตัวทิศทางเดียวกันบนกระดาษแล้วปิดซ้อนกันหลายชั้น

b) แสดงโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยหลายทิศทางเดียวกันส่งผลให้เกิดสมบัติไอโซทรอปิก ในกรณีทีปิดซ้อนกระดาษในทิศทาง  $0^\circ / \pm 45^\circ / 90^\circ$

รูปที่ 2.4 การจำลองการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ต่างกัน [1]



รูปที่ 2.5 การสานเส้นใยเสริมแรงในลักษณะสามมิติของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย [1]



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงจำเพาะและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจำเพาะของเส้นใยแต่ละชนิด เทียบกับวัสดุโลหะและพอลิเมอร์ [1]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของวัสดุเสริมแรง [1]

Material	Density ( $\rho$ ) (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile Strength (TS) (ksi)	Modulus of Elasticity (E) ( $\times 10^6$ psi)	Melting Temperature (°C)	Specific Modulus ( $\times 10^7$ in.)	Specific Strength ( $\times 10^6$ in.)
<b>Polymers:</b>						
Kevlar™	1.44	650	18.0	500	34.7	12.5
Nylon	1.14	120	0.4	249	1.0	2.9
Polyethylene	0.97	480	25.0	147	7.1	13.7
<b>Metals:</b>						
Be	1.83	185	44.0	1277	77.5	2.8
Boron	2.36	500	55.0	2030	64.7	4.7
W	19.40	580	59.0	3410	8.5	0.8
<b>Glass:</b>						
E-glass	2.55	500	10.5	<1725	11.4	5.6
S-glass	2.50	650	12.6	<1725	14.0	7.2
<b>Carbon:</b>						
HS (high strength)	1.75	820	40.0	3700	63.5	13.0
HM (high modulus)	1.90	270	77.0	3700	112.0	3.9
<b>Ceramics:</b>						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.95	300	55.0	2015	38.8	2.1
B <sub>4</sub> C	2.36	330	70.0	2450	82.4	3.9
SiC	3.00	570	70.0	2700	47.3	5.3
ZrO <sub>2</sub>	4.84	300	50.0	2677	28.6	1.7
<b>Whiskers:</b>						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.96	3000	62.0	1982	43.4	21.0
Cr	7.20	1290	35.0	1890	13.4	4.9
Graphite	1.66	3000	102.0	3700	170.0	50.2
SiC	3.18	3000	70.0	2700	60.8	26.2
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3.18	2000	55.0		47.8	17.5

\*1  $\frac{\text{gm}}{\text{cm}^3} = 0.0361 \frac{\text{lb}}{\text{in}^3}$

## 2.2 กระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิต (Producing the composite)

วิธีการการผลิตวัสดุคอมโพสิตมีหลากหลายขึ้นอยู่กับนำไปใช้งานและชนิดของวัสดุ โดยปกติวัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใยผลิตโดยการผสมเส้นใยกับของเหลวหรือพลาสติกเนื้อพืด จากนั้นใช้เทคนิคที่มีความสะดวก เช่น กระบวนการฉีดใช้สำหรับขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตที่มีพอลิเมอร์เป็นพื้นหลัก และกระบวนการหล่อใช้สำหรับการผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีโลหะเป็นพื้นหลัก วัสดุคอมโพสิตชนิดที่มีพลาสติกเป็นพื้นหลักสามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการพ่นเคลือบ โดยการผสมเส้นใยเข้ากับเรซินแล้วพ่นเคลือบบนแม่พิมพ์ที่แข็งไว้ให้กระบวนการบ่ม (Curing) สิ้นสุดจะได้ชิ้นงานวัสดุคอมโพสิต

เทคนิคพิเศษสำหรับการผลิตวัสดุคอมโพสิตจากเส้นใยยาว หรือลักษณะต่อเนื่อง เส้นใยที่ผ่านการสานหรือถักทอ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 a) สามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการทาเรซินด้วยมือ (Hand lay-up) โดยการวางเส้นใยที่เตรียมไว้และทาด้วยเรซินลงบนแม่พิมพ์แล้วใช้ลูกกลิ้งทาเรซินให้กระจายตัวเต็มแผ่นจนกระทั่งแน่ใจว่าได้ผิวหน้าทีราบเรียบและไม่มีโพรงอากาศ ทิ้งไว้จนกระบวนการบ่มตัวสิ้นสุด ชิ้นส่วนไฟเบอร์กลาสในรถยนต์หรือรถบรรทุกมักผลิตด้วยเทคนิคนี้ แต่จะทำให้ต้องใช้แรงงานจำนวนมากและใช้เวลาสำหรับการผลิตนาน



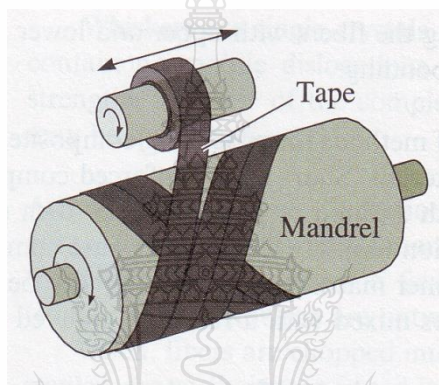
รูปที่ 2.7 การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตด้วยแม่พิมพ์ [1]

เทปและเส้นใยที่ผ่านการถักทอสามารถวางทาบลงบนแม่พิมพ์และขึ้นรูปด้วยแรงอัดจากถุงที่มีความดัน โดยใช้แรงอัดจากแก๊สหรือสุญญากาศทำให้เกิดรูปร่างตามแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 b) กระบวนการนี้จะทำให้ได้แรงยึดเหนี่ยวที่ดีในขั้นตอนของการบ่ม ชิ้นส่วนขนาดใหญ่สำหรับผลิตเป็นผนังของเครื่องบินทหารผลิตด้วยกระบวนการนี้ รูปที่ 2.7 c) แสดงวิธีการผลิตชิ้นงานวัสดุคอมโพสิต

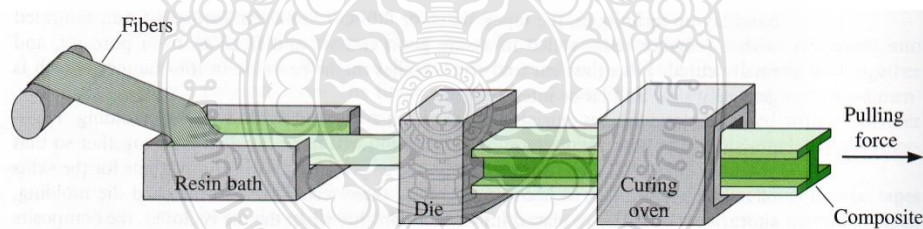
ด้วยการใช้แม่พิมพ์ตัวผู้และตัวเมียกดอัดทำให้เกิดรูปร่างตามการออกแบบของแม่พิมพ์ เหมาะสำหรับการผลิตวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นหรือผ่านการสานมาแบบหลวม

### 2.2.1 การพันเส้นใย (Filament winding)

ใช้สำหรับการผลิตถึงความดันที่มีขนาดใหญ่สำหรับบรรจุภัณฑ์หรือของเหลว และผลิตลักษณะการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2.8 เส้นใยหรือเทปถูกพันรอบแกนที่ใช้ขึ้นรูปทำให้เกิดภาชนะกลวงขนาดใหญ่ โดยเส้นใยนั้นอาจถูกทำให้เปียกตัวในเรซินก่อนทำการพัน หรือถูกทำให้เปียกตัวในระหว่างหรือหลังจากการพันเส้นใย เมื่อกระบวนการบ่มสิ้นสุดจะได้ภาชนะกลวงที่มีความแข็งแรงสูง



รูปที่ 2.8 การขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตด้วยเทคนิคการพันเส้นใยหรือเทป [1]



รูปที่ 2.9 การขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตด้วยเทคนิคการพูลทรูชั่น (Pultrusion) [1]

### 2.2.2 กระบวนการพูลทรูชั่น (Pultrusion)

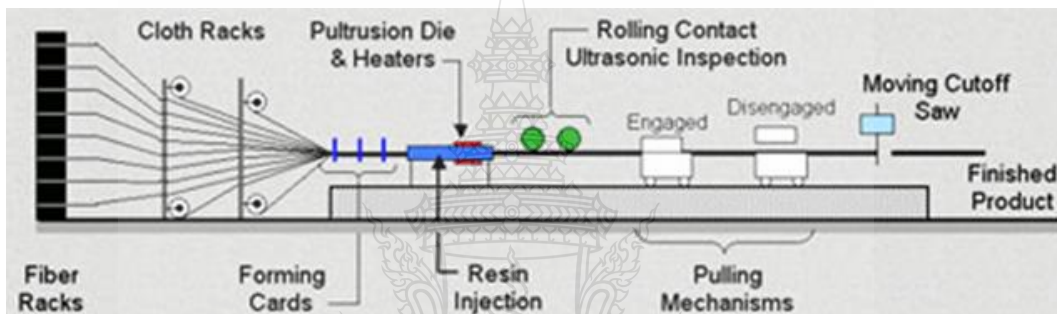
ใช้สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานแบบง่ายที่มีลักษณะหน้าตัดคงที่ เช่น ท่อกลม สีเหลี่ยม หรือแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เส้นใยถูกดึงออกจากแกนหรือม้วน กดให้จุ่มในอ่างเรซินเพื่อให้เกิดการเปียกตัว แล้วรวมเป็นกลุ่มเพื่อขึ้นรูปผ่านตายให้มีรูปร่างลักษณะตามการออกแบบก่อน จากนั้นขึ้นงานผ่านห้องอบร้อนเพื่อบ่มชิ้นงาน การบ่มเรซินสามารถทำได้โดยทันที จึงสามารถผลิตผลิตภัณฑ์



ได้อย่างต่อเนื่อง ชิ้นงานที่ได้จากการดึงขึ้นรูปสามารถนำมาผลิตเป็นชิ้นงานได้ เช่น ไม้เท้าค้ำยัน ค้ำม ไม้กอล์ฟ และไม้ค้ำยันสำหรับเล่นสกี

### 1) เทอร์โมพลาสติกพูลทรูชั่น

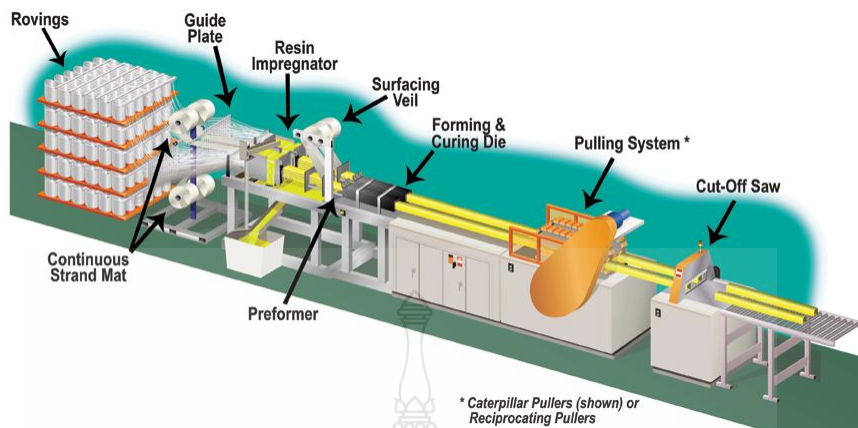
ขั้นตอนการผลิตโดยวิธีพูลทรูชั่นเริ่มจาก การดึงเส้นใยเรซินกลุ่มเทอร์โมพลาสติก และเส้นใยเสริมแรงต่อเนื่องแบบเส้น (Continuous strand rovings) ผ่านรางบังคับทิศทาง (Guide plate) เส้นใยเรซินกลุ่มเทอร์โมพลาสติกและเส้นใยเสริมแรงถูกดึงผ่านคายที่ให้ความร้อน และมีความดันทำให้เส้นใยเทอร์โมพลาสติกเกิดการหลอมละลายและถูกดันให้ไหลเข้าไปในวัสดุเส้นใยเสริมแรง แล้วทำให้เย็นตัวเมื่อผ่านปากคาย (Die) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระบวนการผลิตแบบเทอร์โมพลาสติกพูลทรูชั่น [3]

### 2) เทอร์โมเซตติ้งพูลทรูชั่น

ขั้นตอนการผลิตโดยวิธีพูลทรูชั่นเริ่มจาก การดึงเส้นใยแก้วต่อเนื่องแบบเส้นผ่าน รางบังคับทิศทาง (Guide plate) ลงสู่อ่างอบเรซิน (Resin impregnator) เพื่อให้เส้นใยแก้วเปียกตัวด้วยเรซิน (Wet-out) บางครั้งอาจมีการเสริมแผ่นเส้นใยแก้วต่อเนื่องแบบสาน (Continuous strand mat) ในขั้นตอนการผลิตไปพร้อมกับเส้นใยแก้วต่อเนื่องแบบเส้น เพื่อเพิ่มสมบัติการรับแรงในแนวขวาง (Transverse properties) ให้กับวัสดุคอมโพสิต จากนั้นใส่แผ่นวัสดุผิวอนุกรมเข้ากับเส้นใยแก้วที่เปียกตัวด้วยพลาสติกเพื่อความเรียบของผิววัสดุรวมทั้งเพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อนและเพิ่มความทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV radiation resistance) ก่อนเข้าสู่เครื่องรีด (Preformer) เพื่อรีดตัวประสานส่วนเกินออก จากนั้นระบบจะดึงวัสดุ (Pulling system) เข้าสู่แม่พิมพ์ และบ่มด้วยเครื่องบ่ม (Forming and curing die) ด้วยแรงดันและความร้อนสูง โดยอุณหภูมิของเครื่องบ่มเริ่มจากต่ำในช่วงแรก จากนั้นอุณหภูมิจะค่อย ๆ สูงขึ้น และลดต่ำลงในช่วงปลายของเครื่องบ่ม สุดท้ายวัสดุที่ได้จะถูกทำให้เย็นแล้วถูกตัดตามความยาวที่ต้องการ ดังรูป 2.11



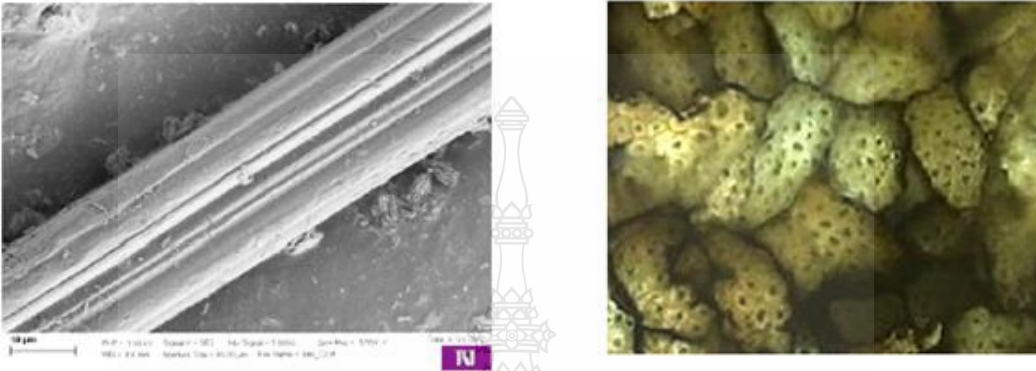
รูปที่ 2.11 กระบวนการผลิตแบบเทอร์โมเซตติ้งพูลทรูชั้น [3]

## 2.3 เส้นใยที่ใช้ในการศึกษาวิจัยการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรูชั้น

### 2.3.1 เส้นใยปอกระเจา (Jute fiber) [11]

ปอกระเจาเป็นเส้นใยจากส่วนของลำต้นที่สกัดแยกเส้นใยมาจากต้นปอกระเจาฝักกลม (White jute) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Corchorus capsularis* ปอกระเจาฝักยาว (Tossa jute) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Corchorus olitorius*) ปอกระเจาให้เส้นใยที่มีลักษณะยาว นุ่ม และเงามัน สามารถปั่นเป็นเส้นด้ายหยาบ ๆ ที่มีความแข็งแรงได้ และเป็นเส้นใยที่มีราคาถูกที่สุดชนิดหนึ่งในกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติ นอกจากนี้ เส้นใยปอยังเป็นเส้นใยเอนกประสงค์ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีความเป็นธรรมชาติ ทนทานและต้านทานไฟฟ้าสถิต การแยกสกัดเส้นใยใช้วิธีการหมัก เช่นเดียวกับแฟลกซ์ เส้นใยปอที่สกัดได้อาจมีความยาวถึง 3 เมตร ซึ่งประกอบด้วยเส้นใยสั้น ๆ จำนวนมาก ซึ่งเส้นใยเหล่านี้ (มีความยาวระหว่าง 0.5-6.0 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 26-30 ไมโครเมตร) ถูกยึดให้อยู่ด้วยกันด้วยลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) เส้นใยจะประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 61-71 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 14-20 ลิกนินร้อยละ 12-13 และเพคตินร้อยละ 0.2 ภาคตัดขวางของกลุ่มเส้นใยปอแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในเรื่อง ขนาดและจำนวนเส้นใยต่อกลุ่ม ความหนาของผนัง รูปร่างและเส้นผ่าศูนย์กลางของลูเมน เส้นใยโดยปกติจะมีความเรียบซึ่งมีบางส่วนแยกออกจากกัน เส้นใยเดี่ยว ๆ ส่วนใหญ่จะมีรูปหน้าตัดหลายเหลี่ยมมุมมน มีลูเมนรูปไข่ ไปจนถึงกลม (รูปที่ 2.12) เส้นใยปอมีความแข็งแรงปานกลาง (30-45 cN/tex) แต่ไม่แข็งแรงเท่ากับแฟลกซ์หรือกัญชง มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Extension at break) ต่ำคือประมาณ 1-2% ส่วนความสามารถในการดูดความชื้น (Moisture

regain) ประมาณ 12.6% แต่สามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้นถึง 23% ภายใต้สภาวะที่มีความชื้นสูง เส้นใยปอมีความเป็นฉนวนและมีสมบัติต้านทานต่อไฟฟ้าสถิตสูง และการนำความร้อนต่ำ ในตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางกลของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ



a) ลักษณะตามแนวยาวกำลังขยาย 5000 เท่า      b) ภาคตัดขวางกำลังขยาย 180 เท่าของเส้นใยปอ

## รูปที่ 2.12 โครงสร้างอณูพื้นฐานและโครงสร้างระดับจุลภาคของเส้นใยปอ [11]

### 2.3.2 เส้นใยแก้ว [12]

การผลิตใยแก้วใช้วัตถุดิบ คือ ทราซซิลิกา หินปูน อลูมิเนียมออกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต และบอแรกซ์ ในสัดส่วนที่พอเหมาะ นำไปหลอมที่อุณหภูมิ 3000 ฟาเรนไฮต์ จนได้แก้วเม็ดเล็ก ๆ เมื่อจะทำเส้นใยต้องนำแก้วมาหลอม แล้วอัดเป็นเส้นใย เส้นใยแก้วมีความใส แข็งแรง ยืดตัวสูงสุด 3 % หดตัวได้ 100 % มีความคงขนาดที่ดี ไม่ดูดความชื้น ไม่ลุกลไหม้ หลอมที่อุณหภูมิ 3299 ฟาเรนไฮต์ ทนทานต่อสารเคมีได้ดี ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก กรดฟอสฟอริกที่ร้อน ไ้คงงอดีแต่ไม่ทนต่อการขัดสี

ชนิดของเส้นใย และองค์ประกอบ

1) แก้วชนิด A (A glass) มีส่วนประกอบของแก้วที่มีด่างอัลคาไลน์ บางทีใช้สำหรับการผลิตเส้นใย

2) แก้วชนิด AR (AR glass) แก้วทนด่างอัลคาไลน์ใช้ในการฟอร์มตัวของเส้นใย

3) แก้วชนิด C (C glass) เป็นแก้วทนสารเคมีสำหรับการผลิตเส้นใย

4) แก้วชนิด E (E glass) เป็นสูตรที่เรียกว่าสารพัดประโยชน์ และเป็นเส้นใยมาตรฐาน ใช้สำหรับการผลิตเส้นใย ตัวอักษร E หมายถึง สำหรับไฟฟ้า เนื่องจากทนต่อกระแสไฟฟ้าสูง



5) แก้วชนิด HS (HS glass) เป็นแก้วผสมระหว่างแมกนีเซียม-อะลูมินา-ซิลิกา แต่ประกอบด้วยจำนวนเล็กน้อยของออกไซด์ชนิดอื่น ๆ ตัวอักษร HS หมายถึง ความแข็งแรงสูง

6) แก้วชนิด S (S glass) เป็นแก้วที่มีองค์ประกอบเหมือนแก้วชนิด HS ในรูปของเส้นใย มีความแข็งแรงสูง ใช้สำหรับผสมในงานเส้นใยผสม

ชนิดของเส้นใย แบ่งตาม ASTM เส้นใยแก้วแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เส้นใยที่มีราคาถูก ใช้สำหรับงานทั่วไป และเส้นใยชนิดพิเศษสูงสุด เส้นใยแก้วเกือบประมาณ 90% เป็นเส้นใยสำหรับใช้งานทั่วไป ซึ่งมักเรียกว่า เส้นใยแก้วชนิด E สำหรับการจำแนกเส้นใยแก้วตาม ASTM ใช้คำย่อแทนสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.2** อักษรย่อที่แสดงสมบัติของเส้นใยแก้ว [12]

คำอักษรย่อ	สมบัติของเส้นใยแก้ว
E = Electrical	มีการนำไฟฟ้าต่ำ
S = High strength	ความแข็งแรงสูง
C = Chemical	ทนต่อสารเคมี
M = Modulus	ความเหนียวสูง
A = Alkaline	ทนต่อด่างสูง
D = Dielectric	มีค่าไดอิเล็กตริกต่ำ

การนำไปใช้งานของเส้นใยแก้วมักจะใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในพลาสติก เช่น อากาศยาน และอวกาศ เครื่องมือเครื่องใช้ การก่อสร้าง สินค้าต่าง ๆ ผลิตภัณฑ์ที่ป้องกันการกัดกร่อน เป็นต้น อีกประเภทที่ใช้ในงานเส้นใยแก้วเสริมแรงในพลาสติก เพื่อใช้ด้านอุตสาหกรรมและรถยนต์ บางส่วนใช้ในกิจกรรมด้านกีฬา และการพักผ่อนหย่อนใจ เช่น เครื่องบินเล็ก เป็นต้น ในปัจจุบันเส้นใยแก้วถูกนำมาใช้แทนเส้นใยหิน เนื่องจากเส้นใยแก้วไม่ไหม้ไฟ ทนต่อจุลินทรีย์ มีความเสถียรภาพ และไม่มีพิษต่อร่างกาย สมบัติทางกลของเส้นใยแก้วถูกแสดงดังตารางที่ 2.3

เส้นใยแก้วชนิด S เป็นเส้นใยที่ใช้ในงานเสริมแรงเช่นกัน เนื่องจากมีสมบัติความแข็งแรงสูง และมีค่าโมดูลัสสูงกว่าแก้วชนิด E และเนื่องจากเส้นใยแก้วชนิด S ไม่นำไฟฟ้า และสะท้อนเรดาร์ต่ำ ดังนั้นจึงนำมาใช้สำหรับเฮลิคอปเตอร์ โดยที่ศัตรูตรวจจับด้วยเรดาร์ได้ยากมาก

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลของเส้นใยจากธรรมชาติและสังเคราะห์ [13]

Fiber	Diameter rang (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Elongation at Break (%)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
Jute	10-25	1.3	1.5-18	393-773	26.5
Cotton	12-38	1.5	7.0-8.0	287-597	5.5-12.6
Flax	5-38	1.5	2.7-3.2	345-1035	27.6
Hemp	10-51	1.4	1.6	690	35
Sisal	8-41	1.5	2.0-2.5	511-635	9.4-22.0
Coir		1.2	30.0	175	4-6
Bamboo		0.8	-	391-1000	48-89
Soft wood		1.5	-	1000	40
Pineapple		-	1.6	413-1627	34.5-82.5
E-glass	10	2.5	2.5	2000-3500	70
S-glass	10	2.5	2.8	4570	86
Aramid	12	1.4	3.3-3.7	3000-3150	63-67
Carbon	7-10	1.4	1.4-1.8	4000	230-240

### 2.3.3 เส้นใยพอลิพรอพิลีน [14]

พอลิพรอพิลีน คือ พลาสติกจำพวกเทอร์โมพลาสติก มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย มีสมบัติเฉพาะตัวคือ ความถ่วงจำเพาะต่ำ ความแข็งเปราะสูง อุณหภูมิบีดตัวสูง ทนทานต่อสารเคมีได้ดี มีสมบัติด้านไฟฟ้าได้ดี จึงมีการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ หลายชนิด เช่น อุปกรณ์ในครัวเรือน ภาชนะ บรรจุภัณฑ์ ของเด็กเล่น พอลิพรอพิลีนเป็นไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง และประกอบด้วยโครงสร้างที่ไม่อึดตัวน้อยมากหรือไม่มีเลย การสลับที่ของหมู่เมทิลไปตามคาร์บอนอะตอมบนสายโซ่โมเลกุลทำให้สมบัติของพอลิเมอร์แตกต่างกันได้มากมาย โดยหมู่เมทิลเป็นตัวกำหนดโครงสร้างแทกติกซิตี (Tacticity) ของพอลิเมอร์ได้ โดยแบ่งได้ 3 แบบ 1. Isotactic เมื่อมีหมู่เมทิลทั้งหมดอยู่ด้านเดียวกันของสายโซ่โมเลกุล 2. Syndiotactic เมื่อหมู่เมทิลทั้งหมดอยู่สลับกันบนสายโซ่โมเลกุล 3. Atactic เมื่อหมู่เมทิลไม่อยู่กันเป็นระเบียบบนสายโซ่โมเลกุล

## 1) กระบวนการผลิตเส้นใยพอลิพรอพิลีน

กระบวนการผลิตเส้นใยพอลิพรอพิลีนนั้นมีความแตกต่างกันไปตามผู้ผลิตแต่ละรายซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ผู้ผลิตแต่ละรายจะมีกระบวนการผลิตที่เป็นของตนเอง เพื่อให้เกิดคุณสมบัติต่าง ๆ ที่แน่นอน เช่น การดูดซับสี, ความมันวาว, การนำความร้อน และภาคตัดขวางใย

ขั้นตอนของการผลิตเส้นใยสามารถทำได้ ดังขั้นตอนดังต่อไปนี้

กระบวนการผลิตขั้นพื้นฐานนั้นคือการทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของก๊าซพรอพิลีนและโอเลฟินส์ในปริมาณที่เหมาะสมตามขั้นตอนการผลิต เช่น ตีตาเนียมคลอไรด์ที่มีอยู่ใน Diluents โพลิเมอร์จะก่อตัวขณะไหลผ่าน Diluents เกิดปฏิกิริยาให้แยกตัวเร็วขึ้น กรองให้สะอาดและช่วยลดปริมาณพอลิพรอพิลีนที่สูญเสียไป ในทางกลับกันจะทำให้สมบัติในการดูดซับแสงน้อยลง ในขณะเดียวกัน การทนความร้อนจะลดลงในอัตราส่วนที่เท่ากันด้วย หลอมเรซินให้ละลายกีดผ่านแว่นกดเส้นใยเป็นใยยาว แล้วนำไปผ่านกระบวนการทางเคมีจะทำให้ได้สมบัติตามต้องการเช่น ความแข็งแรงของเส้นใย, การทนทานต่อการเสียดสี, ความอ่อนตัว, ความยืดหยุ่นและการหดตัว ดังตัวอย่างในการปั่นด้ายจำนวนมาก ๆ นั้น จะทำให้เกิดความแข็งแรงในการต้านทานสูงขึ้น แต่จะทำให้สมบัติในการยืดหดตัวนั้นลดลงและจะใช้ความร้อนทำให้เส้นใยมีสมบัติในการทนทานต่อการหดตัวหรือการบิดงอของเส้นใยดีขึ้นด้วย

## 2) สมบัติทางกายภาพเส้นใยพอลิพรอพิลีน

เส้นใยพอลิพรอพิลีนเป็นเส้นใยที่มีความเบามากที่สุดในการบรรดาทั้งหมดอย่างไรก็ตามการไวต่อความร้อนหรือการนำความร้อนและการไม่ดูดซับสีเยี่ยม นับได้ว่าเป็นอุปสรรคอย่างหนึ่ง แม้ว่าผู้ผลิตได้ผลิตเส้นใยพอลิพรอพิลีนในรูปแบบต่างกัน เพื่อพยายามที่จะขจัดข้อจำกัดเหล่านี้ออกไปและการพัฒนามีมาอย่างต่อเนื่อง แม้จะมีการชี้แจงและกำหนดข้อปฏิบัติไว้ให้กำหนดตามเพื่อที่จะขจัดอุปสรรคนี้ แต่ในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถทำได้

อย่างไรก็ตาม หลักการทั่วไปอาจบิดเบือนไปจากข้อมูลที่ทางผู้ผลิตมีไว้ให้อันเป็นผลซึ่งเกิดจากการทดสอบขั้นพื้นฐานในห้องปฏิบัติการอย่างต่อเนื่อง จากการประเมินค่าพื้นฐานของข้อจำกัดซึ่งได้จากการกระทำและปฏิบัติอย่างต่อเนื่องของผู้บริโภคเอง

การประมาณสมบัติของเส้นด้ายนี้สามารถประมาณได้จาก

- ความแข็งแรงของด้ายพอลิพรอพิลีนช่วงความแข็งแรงของด้ายพอลิพรอพิลีนนี้ค่อนข้างกว้างเพราะ โดยทั่วไปแล้วจำถูกนำมาเปรียบเทียบกับด้ายในลอนและพอลิเอสเตอร์ซึ่งแข็งแรงและต้านทานแรงขจัดได้ดีกว่า
- ความยืดหยุ่นด้ายพอลิพรอพิลีนมีความยืดหยุ่นน้อยกว่าเส้นด้ายในลอน

- การยืดตัวด้วยพอลิพรอพิลีน มีแรงต้านทานที่ดีสมบัตินี้จึงเหมาะที่จะใช้ทำ  
ด้ายสำหรับผลิตภัณฑ์ผ้าเครื่องนุ่มห่ม อย่างไรก็ตามสมบัติทั่วไปนั้นด้ายจะต้อง  
มีความแข็งแรงเป็นหลักสำคัญและมีการยืดตัวน้อยที่สุด
- การนำความร้อนเป็นความได้เปรียบอีกข้อหนึ่งของด้ายพอลิพรอพิลีนก็คือมี  
น้ำหนักเบาซึ่งคุณลักษณะนี้เมื่อรวมตัวกันและผ่านกรรมวิธีแล้วสามารถที่จะจับ  
กลุ่มกันได้ว่าเป็นสมบัติที่ดีต่อการนำไปผลิตผ้าห่ม เสื่อกันหนาว เพราะสามารถ  
ป้องกันความร้อนมิให้กระจายออกจากกันได้
- เนื้อผ้าพอลิพรอพิลีนจะแข็งแรงทนทานและสามารถรักษารูปทรงไว้ได้และแห้ง  
เร็วกว่าผ้าชนิดอื่น

### 3) ผลกระทบจากความร้อน

ผ้าพอลิพรอพิลีนหดตัวเมื่อได้รับความร้อนสูงเกินไปนั้นเป็นเพราะผ้านี้มี  
พลาสติกอยู่เส้นใยพอลิพรอพิลีนสามารถคืนตัวได้เหมือนเดิมเมื่อได้รับความร้อนที่พอเหมาะช่วยทำ  
ให้เส้นใยมีรูปแบบเหมือนเดิม แต่ยังคงขึ้นอยู่กับชนิดของด้ายที่พอลิพรอพิลีนด้วย การหดตัวและการ  
อ่อนตัวของเส้นใยจะเกิดขึ้น ณ อุณหภูมิที่สูงเท่ากับ 280 องศาฟาเรนไฮต์ จะหลอมละลายที่อุณหภูมิ  
สูงกว่า 335 องศาฟาเรนไฮต์ ซึ่งในตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติของพอลิพรอพิลีน

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติของพอลิพรอพิลีน [14]

สมบัติ	ปริมาณ
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	0.90-0.91
อุณหภูมิการหลอมเหลว (c°)	160-180
ดัชนีหักเหของแสง n <sub>D</sub> <sup>25</sup>	1.49
การยืดตัวที่จุดขาด (%)	500-900
ความแข็ง (shore D)	70-80
การทนแรงกระแทก	34-46
โมดูลัส (MPa)	1032-1720
ความแข็งแรงดึง (MPa)	29.3-38.6

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 การพัฒนาสมการออกแบบชิ้นส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพูลทรูชั่นหน้าตัดรูปตัวซี ภายใต้แรงค้ำที่มีจุดรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่น [3]

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ ได้ศึกษาพฤติกรรมของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพูลทรูชั่น และลักษณะการวิบัติของวัสดุและเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ (Characteristics) พฤติกรรมทางโครงสร้าง (Structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (Modes of failure) ของคานพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ผลิตด้วยกระบวนการพูลทรูชั่น (Pultruded fiber reinforced plastic; PFRP) หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงค้ำ โดยมีสถานะของจุดรองรับที่แตกต่างกัน ได้แก่จุดรองรับแบบง่าย และจุดรองรับแบบยึดแน่น (Fixed-end supported) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับการค้ำดอง พบว่าพฤติกรรมของวัสดุ PFRP ที่ใช้ในการศึกษามีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล ใกล้เคียงกับวัสดุ PFRP ที่ผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion โดยหน่วยแรงดึงประลัยมีค่าใกล้เคียง กับวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion และ โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ PFRP ที่ใช้ทดสอบ มีค่าสูงกว่าวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 2.05 เท่า เนื่องจากมีปริมาณใยแก้วสูงถึง 72.2 %wt

2.4.2 พฤติกรรมและสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพูลทรูชั่นที่ผลิตในประเทศไทยภายใต้การอัด การเนียน และการค้ำ [4]

หวังแก้ว บุญสวน ได้นำเสนอผลการศึกษาพฤติกรรมทางกลและสมบัติพื้นฐานของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพูลทรูชั่น (Pultruded fiber reinforced plastic; PFRP) ที่ผลิตในประเทศไทย ภายใต้การอัด การเนียน และการค้ำ PFRP ที่ใช้ในการศึกษานี้ผลิตจากเรซินชนิดพอลิเอสเทอร์ (Polyester) และใยแก้วชนิด E-glass มีหน้าตัดรูปตัวซีและมีขนาดของหน้าตัดระบุ  $76 \times 22 \times 6$ ,  $102 \times 29 \times 6$  และ  $152 \times 43 \times 10$  มิลลิเมตร ตัดชิ้นส่วนจากท่อน PFRP ดังกล่าวตามที่มาตรฐานกำหนด และทำการทดสอบสมบัติทางกล พบว่าวัสดุ PFRP ที่ใช้ในการศึกษามีอัตราส่วนใยแก้วต่อน้ำหนักที่ค่อนข้างสูงถึง 71.7 %wt ซึ่งสูงกว่าค่าของ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. เล็กน้อย (2-16 %) และในทำนองเดียวกันมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่า PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. เล็กน้อย (2-15 %) เนื่องจากมีสัดส่วนของของเส้นใยแก้วมากกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับไม้เนื้อแข็งพบว่า มีค่ามากกว่าความถ่วงจำเพาะของไม้เนื้อแข็งค่อนข้างมาก (58 %) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติของ PFRP กับไม้เนื้อแข็ง พบว่า PFRP มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าไม้ แต่มีสมบัติทางกลภายใต้การอัด การเนียนและการค้ำดีกว่าไม้เนื้อแข็ง ซึ่งสามารถนำวัสดุ PFRP นี้ไปใช้ในโครงสร้างเพื่อทดแทนการใช้ไม้ได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะช่วยในการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและรักษาภาวะแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย

#### 2.4.3 วัสดุคอมโพสิตที่ย่อยสลายได้จากเส้นใยลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) [5]

Kestur G. และคณะ นำเสนอบทความทางวิชาการเกี่ยวกับภาพรวมของการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตที่ย่อยสลายได้ในส่วนของการตลาด กระบวนการขึ้นรูป ระบบการเสริมแรง วัสดุเนื้อพื้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติ และการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ซึ่งได้นำเสนอถึงแนวโน้มการทำวิจัยในอนาคต เกี่ยวกับการใช้วัสดุคอมโพสิตที่ย่อยสลายได้ที่ประกอบด้วยเส้นใยลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ซึ่งกำลังมีความน่าสนใจมากขึ้นเนื่องจากทรัพยากรปิโตรเลียมลดน้อยลง ต้นทุนของการเสริมแรงด้วยลิกโนเซลลูโลสค่อนข้างต่ำ มีความหลากหลายของสมบัติ ดังนั้นการใช้งานของเส้นใยย่อยสลายได้เสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตจึงเป็นอีกทางเลือกสำหรับวัสดุคอมโพสิตในอนาคต

#### 2.4.4 สมบัติทางกลของเส้นใยธรรมชาติที่มีความยาวต่อเนื่องเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต [6]

Herrera-Franco และ Valadez-Gonzalez ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) เสริมแรงด้วยเส้นใย Hennequen ซึ่งเส้นใยถูกปรับปรุงสภาพผิวด้วยด่าง เส้นใยและวัสดุเนื้อพื้นปรับปรุงการเกาะยึดด้วยการใช้สารเชื่อมประสาน (Coupling agent) จำพวกตระกูลซิลิโคน (Silane) ได้ทำการทดลองหาอัตราส่วนของสารเชื่อมประสานก่อน ซึ่งพบว่าสาร Vinyltris (2-methoxy-ethoxy) silane ที่ใช้ในการปรับปรุงการเกาะยึดที่อัตราส่วน 0.015 % w/w มีสมบัติความแข็งแรงดึง (Tensile strength) สูงที่สุด เส้นใย Hennequen ถูกปรับปรุงสภาพผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (2 % w/v) ความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่เส้นใยถูกปรับปรุงสภาพและปรับปรุงการเกาะยึด พบว่าค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นถึง 10 % ของวัสดุคอมโพสิตที่ไม่ปรับปรุงสภาพผิวและไม่ใช้สารเชื่อมประสาน

#### 2.4.5 กระบวนการพูลทรูชั่นของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ [7]

Kathleen Van de Velde และ Paul Kiekens ได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมพลาสติกพูลทรูชั่นของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งได้ทดลองใช้เส้นใยลินินเป็นเส้นใยเสริมแรงในพอลิพรอพิลีน จากการทดลองพบว่าสามารถขึ้นรูปได้และได้ทำการเปรียบเทียบความแข็งแรงกับวัสดุคอมโพสิตเส้นใยแก้วเสริมแรงในพอลิพรอพิลีน จากการทดสอบแรงคดพบว่าวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วมีความแข็งแรงคดอยู่ที่ 515 MPa และมอดูลัสอยู่ที่ 33.46 GPa ในขณะที่วัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยลินินในพอลิพรอพิลีนมีความแข็งแรงคดอยู่ที่ 145 MPa และมอดูลัสอยู่ที่ 15.19 GPa ซึ่งยังมีความแตกต่างของความแข็งแรงค่อนข้างมากและได้แสดงข้อคิดเห็นในทิศทางที่ดีของการใช้เส้นใยธรรมชาติ ถ้าสามารถพัฒนาให้มีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นจะมีส่วนช่วยลดการใช้เส้นใยสังเคราะห์ได้

2.4.6 สมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตแบบถักเปียจากเส้นใยปอผสมเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดโดยใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรวงุ่น [8]

Anin Memon และ Asami Nakai ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตแบบถักเปียจากเส้นใยปอเสริมแรงในวัสดุเนื้อพื้นพอลิแลคติกแอซิดด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรวงุ่น โดยใช้เส้นใยปอและเส้นใยแก้วเป็นวัสดุเสริมแรงในขณะที่เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดทำหน้าที่เป็นวัสดุเนื้อพื้น ในกระบวนการขึ้นรูปนี้จะให้ความสำคัญกับการพิจารณา 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ การเลือกใช้ชนิดของวัสดุในการขึ้นรูป การออกแบบโครงสร้าง และการออกแบบสภาวะการขึ้นรูป การออกแบบวัสดุสำหรับขึ้นรูปด้วยกระบวนการนี้เริ่มต้นด้วยการผสมเส้นใยปอและเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดด้วยเทคนิคการผสมเส้นใยแบบ Comingle การออกแบบโครงสร้างถักเปียใช้เส้นใยปอที่ผ่านการผสมกับเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดเป็นเส้นสำหรับถักเปีย (Braiding yarns) ให้เป็นรูปทรงทอกลวง และใช้เส้นใยแก้วเป็นเส้นยืน (Middle End Yarn) โครงสร้างถักเปียจะถูกดึงผ่านคायร้อนซึ่งเกิดการหลอมละลายของเส้นใยเรซินไหลเข้าไปแทรกซึมห่อหุ้มวัสดุเส้นใยเสริมแรงเมื่ออุณหภูมิการขึ้นรูปลดลงจะทำให้วัสดุเนื้อพื้นเกิดการแข็งตัวห่อหุ้มวัสดุเสริมแรงเป็นวัสดุคอมโพสิตรูปทรงทอ จากผลการทดลองพบว่ารูปแบบโครงสร้างของการถักเปียและอุณหภูมิของการขึ้นรูปมีผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิต คุณภาพของชิ้นงานถูกประเมินด้วยการตรวจสอบโครงสร้างภาคตัดขวางและทดสอบสมบัติทางกลด้วยการทดสอบแรงดึงแบบ 4 จุด จากการทดลองพบว่าคุณภาพการแทรกซึมของเรซินเข้าไปในเส้นใยจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิของการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นสมบัติทางกลจะลดลงเนื่องจากเส้นใยปอเกิดการสลายตัว (เกิดการไหม้)

2.4.7 การขึ้นรูปและสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันของเส้นใยปอ/พอลิแลคติกแอซิดด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด [15]

Anin Memon และ Asami Nakai ได้ศึกษาการขึ้นรูปและสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันของเส้นใยปอเสริมแรงในพอลิแลคติกแอซิดด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด ในงานวิจัยใช้สัดส่วนของเส้นใยปอ 37.39, 40.32, 43.09, 46.16, 48.00 และ 53.65 % v/v โดยทำการศึกษาตัวแปรของอุณหภูมิขึ้นรูปที่ 185, 195, 205, 215, 225 และ 235 องศาเซลเซียส และทำการตรวจสอบสมบัติทางกลเปรียบเทียบกับผลการแทรกซึมของเรซินในเส้นใยด้วยการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค (Micro structure) จากผลการทดสอบความแข็งแรงดึงพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงดึงลดลงที่อุณหภูมิ 205 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงส่งผลให้เส้นใยปอเริ่มเกิดการสลายตัวเนื่องจากเข้าใกล้อุณหภูมิการสลายตัว ซึ่งจากผล TGA (Thermal gravimetric analysis) พบว่าเส้นใยปอมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 240 องศา

เซลเซียส ส่งผลให้สมบัติทางกลลดลง ในส่วนของผลการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้เรซินสามารถเข้าไปแทรกซึมในเส้นใยได้ดีขึ้น แต่สมบัติทางกลลดลงเนื่องจากเส้นใยปอเริ่มเกิดการสลายตัว

#### 2.4.8 การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตของเส้นใยแก้ว/เส้นใยปอเสริมแรงในพอลิเอสเตอร์ [16]

Amit Bindal และคณะ ได้ทำการพัฒนาของเส้นใยแก้ว/เส้นใยปอเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตพอลิเอสเตอร์ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ โดยได้ทำการศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึง, ความแข็งแรงดัด, ความทนทานแรงกระแทกและการดูดซับน้ำ โดยจะกำหนดอัตราส่วนการเสริมแรงของเส้นใยที่ 20, 30 และ 40 % ซึ่งใน 20, 30 และ 40 % จะเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างเส้นใยแก้วและเส้นใยปอที่ 0-40 % พบว่าเส้นใยปอสามารถลดปริมาณการใช้เส้นใยแก้วได้ถึง 10 % และยังมีสมบัติทางกลเท่ากับตอนใช้เส้นใยแก้ว พบว่าอัตราส่วนการใช้เส้นใยเสริมแรงที่ 40 % โดยใช้เส้นใยแก้ว 30 % เส้นใยปอ 10 % มีสมบัติทางกลสูงที่สุด โดยมีค่าความแข็งแรงดึง  $95.85 \text{ N/mm}^2$  ความแข็งแรงดัด  $102.83 \text{ N/mm}^2$  และความทนทานแรงกระแทก  $235.46 \text{ J/m}^2$  จากการทดลองการดูดซับน้ำของเส้นใย พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่มีปริมาณของเส้นใยปอมากจะสามารถดูดซับน้ำได้มาก และยังสามารถคำนวณต้นทุนการใช้เส้นใยปอมาแทนการใช้เส้นใยแก้วสามารถลดต้นทุนได้ถึง 20 %

#### 2.4.9 ผลกระทบของการดูดซับน้ำด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพอลิเมอร์ของวัสดุคอมโพสิตไฮบริดเส้นใยปอ/เส้นใยแก้วเสริมแรงในพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิมิตัว [17]

Mohd Hafiz Zamri และคณะ ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการดูดซับน้ำด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพอลิเมอร์ของวัสดุคอมโพสิตไฮบริดเส้นใยปอ/เส้นใยแก้วเสริมแรงในพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิมิตัว โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวัสดุคอมโพสิตที่ถูกแช่ด้วยสาร 3 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น น้ำทะเลและสารละลายที่เป็นกรด โดยวัสดุคอมโพสิตจะถูกทดสอบสมบัติทางกลโดยหลังจากขึ้นรูปเสร็จและเริ่มแช่สารทั้ง 3 ชนิดเป็นเวลา 1 วัน และ 1, 2 และ 3 สัปดาห์ พบว่าในการแช่วัสดุคอมโพสิตในสารทั้ง 3 ชนิด ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติความแข็งแรงดัด (Flexural strength) ลดลง และการแช่วัสดุคอมโพสิตในน้ำทะเลนั้นมีผลกระทบทำให้สมบัติทางกลตกลงมากที่สุด ในระยะเวลาเท่ากัน สมบัติทางกลที่ลดลงเกิดขึ้นเนื่องจากการดูดซับน้ำของวัสดุ

#### 2.4.10 กระบวนการพอลิเมอร์ของเส้นใยลินินเสริมแรงในพอลิพรอพิลีน [18]

Angelov I. และคณะ ได้ทำการศึกษากระบวนการพอลิเมอร์ของเส้นใยลินินเสริมแรงในพอลิพรอพิลีน ทำการศึกษาอัตราส่วนของเส้นใยลินินที่ 30 และ 50 % v/v และการศึกษาตัวแปรในการขึ้นรูปได้แก่ อุณหภูมิของคาย อุณหภูมิพรีฮีท ความเร็วดึง และตรวจสอบสมบัติทางกลได้แก่ การทดสอบการดัดงอ (Flexural test) การทดสอบแรงกระแทก (Impact test) จากผลการทดลองพบว่า



สมบัติทางกลลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป และอิทธิพลของอุณหภูมิ พบว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลกับสมบัติแรงคดเพียงเล็กน้อยแต่จะไปในส่วนของแรงกระแทกที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และได้อธิบายถึงฟองอากาศเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้สมบัติทางกลลดลงของเส้นใยลินิน

2.4.11 ผลกระทบของเวลาในการเซตตัวต่อปริมาณฟองอากาศและสมบัติทางกลของลามิเนตคอมโพสิต [19]

Ling Liu และคณะ ได้ทำการศึกษาผลกระทบของเวลาในการเซตตัวต่อปริมาณฟองอากาศและสมบัติทางกลของลามิเนตคอมโพสิต โดยใช้วัสดุเป็นเส้นใยคาร์บอนเสริมแรงในแผ่น Epoxy prepreg ซึ่งวัสดุถูกขึ้นรูปในเตา Autoclave โดยในการขึ้นรูปในกลุ่มแรกได้ใช้อุณหภูมิกองที่และทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันในเตา Autoclave ที่ 0.0, 0.1, 0.2, 0.4 และ 0.6 MPa กลุ่มที่ 2 ได้ทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในการให้แรงดันเป็นเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที ในการขึ้นรูปใช้แผ่น Prepreg กับเส้นใยคาร์บอนนับเป็น 1 ชั้น ซึ่งในการทดลองได้ใช้ 3 ชั้น โดยวางสลับมุมกันที่ 0 และ 90 องศา พบว่าจากการที่เพิ่มแรงดันในเตา (Autoclave) ส่งผลให้ฟองอากาศลดลง และพบว่าที่เวลาอบ 90 นาที ส่งผลให้ฟองอากาศน้อยที่สุด และยังได้ทำการแสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางกลกับปริมาณฟองอากาศที่เกิดภายในชิ้นงานเพียงแค่ 3 % ส่งผลให้สมบัติทางกลลดลงถึง 20 %

2.4.12 การปรับปรุงรูปแบบกระบวนการพูลทรวงขึ้นวัสดุคอมโพสิตด้วยเทคนิคการถักเปียให้เป็นท่อของเส้นใยแบบยาวต่อเนื่องเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติก [20]

Yoshitaka Tanaka และคณะ ได้ปรับปรุงรูปแบบกระบวนการพูลทรวงขึ้นวัสดุคอมโพสิตด้วยเทคนิคการถักเปียให้เป็นท่อของเส้นใยแบบยาวต่อเนื่องเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติก โดยใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมแรงในพอลิเอไมด์ที่สัดส่วน 50 % v/v เส้นใยทั้งคู่ถูกทำให้เข้ากันด้วยเทคนิค Commingle และเส้นใยที่ผสมแล้วจะถูกถักเปียเป็นท่อกลมที่เส้นใยเอียงทำมุม 50 องศา สำหรับนำไปขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตรูปทรงตัว L พื้นที่หน้าตัด 30 x 30 มิลลิเมตรหนา 3 มิลลิเมตร กำหนดอุณหภูมิในการขึ้นรูป 290 องศาเซลเซียส และทำการศึกษาคิวแปรในการขึ้นรูปได้แก่ความเร็วในการพูลทรวงขึ้นที่ 46, 94 และ 103 มิลลิเมตรต่อนาที และวัสดุถูกตรวจสอบด้วยการทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) พบว่าวัสดุที่ทดลองด้วยความเร็วของการพูลทรวงขึ้นที่ 94 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงคดสูงสุด 349 MPa และ 28 GPa ตามลำดับ เนื่องจากมีการแทรกซึมของเรซินดีที่สุด และได้สรุปว่าเมื่อความเร็วในการพูลทรวงขึ้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการแทรกซึมของเรซินต่ำลง

จากข้อมูลการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด จะได้ข้อมูลสำหรับเป็นแนวทางในการออกแบบการทดลองในโครงการวิทยานิพนธ์เรื่องการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรวงั้น ในขั้นตอนการเตรียมเส้นใยธรรมชาติเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติกของหลายผลงานวิจัยจะใช้การเตรียมเส้นใยด้วยเทคนิคการผสมเส้นใยแบบ Comingle จะมีการแทรกซึมของเรซินในเส้นใยค่อนข้างดีกว่า และออกแบบโครงสร้างให้เป็นรูปแบบ Micro - Braiding [7-8,16,18,20] ซึ่งการเตรียมทั้งสองรูปแบบจะมีความยุ่งยากในการเตรียมเส้นใยและไม่มีเครื่องมือสำหรับการจัดเตรียม ดังนั้นการทดลองนี้จะใช้การเตรียมเส้นใยเสริมแรงและเส้นใยเรซินด้วยวิธีการดึงควบเส้นใยคู่ขนานแบบธรรมดา

ในส่วนของอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปพอลิพรอพิลีนจากงานวิจัยของ Angelov I. [18] จะอยู่ที่ 200-240 องศาเซลเซียส ซึ่งในส่วนของโครงการวิทยานิพนธ์นี้จะใช้อยู่ที่ 190 – 220 องศาเซลเซียส เนื่องจากในงานวิจัยใช้เส้นใยลินิน (Flax) ซึ่งมีอุณหภูมิการเสื่อมสลายที่สูงกว่าเส้นใยปอ อุณหภูมิการเสื่อมสลายของเส้นใยปอจากงานวิจัยของ Mohanty, A. K. [13] จะอยู่ที่ 240 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงได้ออกแบบอุณหภูมิขึ้นรูปไม่เกินอุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยปอ

สำหรับความเร็วในการขึ้นรูปจากงานวิจัยของ Angelov I [18] ได้กำหนดความเร็วได้ใช้ความเร็วขึ้นรูปอยู่ที่ 80, 120, 220, 240, 360 และ 380 มิลลิเมตรต่อนาที และของ Yoshitaka Tanaka [20] 46, 94 และ 103 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วที่ต่ำที่สุด มีสมบัติทางกลสูงที่สุด ดังนั้นแนวทางสำหรับการกำหนดความเร็วของการพูลทรวงั้นของวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยปอเสริมแรงในพอลิพรอพิลีนจะเลือกใช้ความเร็วในช่วง 40-140 มิลลิเมตรต่อนาที

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทูล์ซันได้มีการกำหนดขั้นตอน และวางแผนการดำเนินงานวิจัย จัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องจักร และเครื่องทดสอบ กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ออกแบบการทดลอง ดำเนินการทดลองขึ้นรูป และทดสอบสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์เรื่องนี้ได้ออกแบบขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยและได้มีการวางแผนการดำเนินงานวิจัยอย่างเป็นขั้นตอน โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 3.1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

###### 1) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในขั้นตอนนี้จะดำเนินการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของวัสดุคอมโพสิต ชนิดของวัสดุเสริมแรง และวัสดุเนื้อพื้น กระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิต และศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตด้วยกระบวนการพูลทูล์ซัน โดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่ทำการศึกษาแล้ว เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ออกแบบการทดลองเพื่อกำหนด อุณหภูมิ ความเร็วดึงในกระบวนการพูลทูล์ซัน

###### 2) กำหนดวิธีการ ขั้นตอนการดำเนินงาน และเตรียมวัสดุอุปกรณ์

- ออกแบบขั้นตอนและวางแผนการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย
- เตรียมวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องจักร และเครื่องทดสอบ สำหรับดำเนินงาน
- วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer; TGA) ของเส้นใยปอ และเส้นใยพอลิพรอพิลีน
- เตรียมเส้นใยปอ เส้นใยพอลิพรอพิลีน และเส้นใยแก้ว ให้อยู่ในรูปแบบม้วนแกนขนาดเล็ก สำหรับขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทูล์ซัน

### 3) ออกแบบการทดลอง

การศึกษานี้จะออกแบบการทดลองพูลทรูชั้นวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่อง โดยจะต้องคำนึงถึงตัวแปรหลักที่สำคัญ ประกอบด้วย โครงสร้างของวัสดุที่จะใช้ในการขึ้นรูป อัตราการเติมเส้นใย อุณหภูมิ และความเร็วในการขึ้นรูป ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดทั้งหมดในหัวข้อที่ 3.3.1

### 4) ทดลองพูลทรูชั้นวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่อง

จัดเตรียมเครื่องพูลทรูชั้นให้พร้อมสำหรับการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต โดยจะใช้โครงสร้างของวัสดุที่จะใช้ในการขึ้นรูปตามจำนวนของเส้นใยแต่ละชนิดที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ ซึ่งเส้นใยทั้งหมดจะถูกเตรียมในม้วนแกนขนาดเล็ก และติดตั้งให้ครบตามอัตราการเติมเส้นใยได้จำนวนไว้ เช่นเดียวกับอุณหภูมิ และความเร็วในการขึ้นรูปจะดำเนินการทดลองขึ้นรูปตามที่ได้ออกแบบไว้ ดायสำหรับการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตมีขนาดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า 25 x 3 มิลลิเมตร รายละเอียดของขั้นตอนนี้จะแสดงในหัวข้อที่ 3.4

### 5) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และทดสอบสมบัติทางกล

ชิ้นทดสอบพูลทรูชั้นวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องที่ขึ้นรูปได้ จะถูกนำมาเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค และทดสอบสมบัติทางกล รายละเอียดการทดสอบจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.5

- ชิ้นทดสอบ โครงสร้างจุลภาคจะถูกตัดให้มีขนาด 15 มิลลิเมตร และนำไปหล่อเรซินสำหรับขัดด้วยกระดาษทราย เพื่อให้ได้ภาพโครงสร้างจุลภาคสำหรับวิเคราะห์คุณภาพการแทรกซึมของเรซินในเส้นใย และปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นในชิ้นทดสอบ โดยใช้ชิ้นทดสอบเพียงหนึ่งชิ้นของแต่ละสภาวะการทดลอง โดยจะเลือกตัดชิ้นทดสอบตำแหน่งตรงกลางของความยาวรวมทั้งหมด
- ชิ้นทดสอบแรงดึงจะเตรียมชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3039 โดยจะถูกตัดให้มีความยาว 250 มิลลิเมตร โดยจะใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 8 ชิ้น
- ชิ้นทดสอบแรงคดจะเตรียมชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยจะถูกตัดให้มีความยาว 100 มิลลิเมตร โดยจะใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 8 ชิ้น

### 6) วิเคราะห์ผลการทดสอบและอภิปรายผล

ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค และทดสอบสมบัติทางกล ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่ได้ผ่านศึกษาค้นคว้ามา เพื่อหาข้อมูลที่ถูกต้องสำหรับนำไปสรุปผลการดำเนินงานวิจัย ประกอบด้วย

- ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบพูลทรวงูชั้นวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องที่ได้ทำการทดลองตามการออกแบบในหัวข้อที่ 3)
- อิทธิพลของอุณหภูมิการขึ้นรูปที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบพูลทรวงูชั้นวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่อง
- อิทธิพลของความเร็วในการขึ้นรูปที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบพูลทรวงูชั้นวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่อง

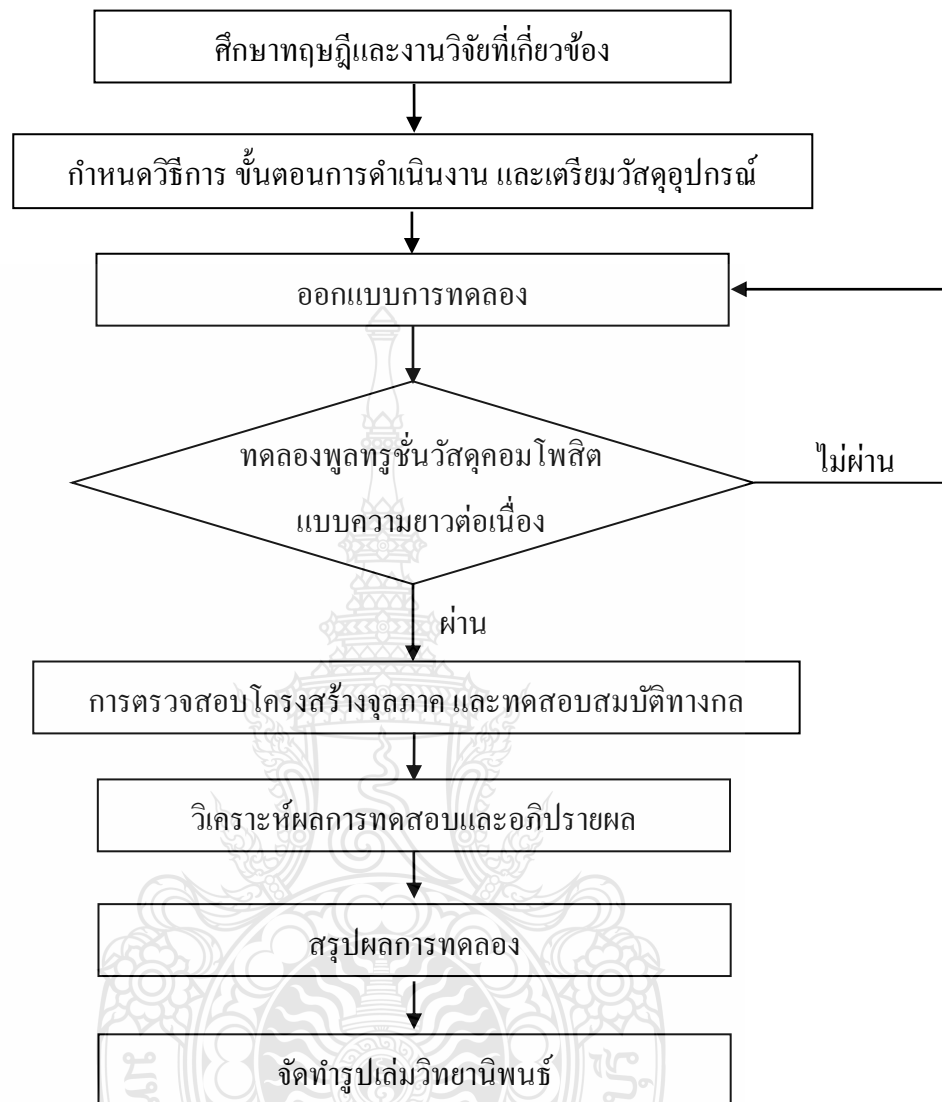
#### 7) สรุปผลการทดลอง และเผยแพร่ผลงาน

ผลการทดสอบที่ได้ทั้งหมดที่ผ่านการวิเคราะห์และอภิปรายผลเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะถูกนำไปจัดเตรียมเป็นบทความวิจัยเพื่อเผยแพร่ในงานประชุมทางวิชาการ เพื่อให้ได้รับข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์จากผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ รวมทั้งข้อคิดเห็นจากผู้เข้าร่วมประชุมวิชาการ อีกทั้งเป็นการถ่ายทอดผลงานวิจัยที่จะสามารถใช้ประโยชน์ได้ในทางวิชาการ และทางการผลิตจริงในอุตสาหกรรม

#### 8) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ผลงานทั้งหมดที่ผ่านการดำเนินงานวิจัยตามรูปแบบของการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล เพื่อขออนุมัติสำเร็จการศึกษา และเป็นข้อมูลสาธารณะสำหรับผู้สนใจจะศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม

รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพการไหลของการจัดทำโครงการวิทยานิพนธ์เรื่องการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรวงูชั้น



รูปที่ 3.1 แผนภาพการไหลของการจัดทำโครงการวิทยานิพนธ์เรื่องการขึ้นรูปวัสดุคอมพิวเตอร์แบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ

### 3.1.2 แผนการดำเนินงานวิจัย

จากขั้นตอนการดำเนินงานที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 3.1.1 ได้มีการวางแผนการดำเนินงานเพื่อให้มีการดำเนินงานเป็นไปอย่างมีขั้นตอน และเสร็จตามกำหนดเวลาที่กำหนด ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม	ช่วงเวลา														
	2561												2562		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←→	←→													
2. กำหนดวิธีการ ขั้นตอนการดำเนินงาน และเตรียมวัสดุอุปกรณ์		←---→	←---→	←---→	←---→										
3. ออกแบบการทดลอง				←---→	←---→	←---→									
4. ทดลองพอลิเมอร์ชั้นวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่อง						←---→	←---→	←---→							
5. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และทดสอบสมบัติทางกล							←---→	←---→	←---→						
6. วิเคราะห์ผลกาทดสอบและอภิปรายผล							←---→	←---→	←---→						
7. สรุปผลการทดลองและเผยแพร่ผลงาน								←---→	←---→	←---→					
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์										←---→	←---→	←---→	←---→	←---→	←---→

----- แสดงแผนการดำเนินงาน  
 \_\_\_\_\_ แสดงแผนการดำเนินงานจริง

## 3.2 วัสดุ เครื่องมือ และเครื่องจักรที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2.1 เส้นใยที่ใช้ในการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองนี้ใช้เส้นใย 3 ชนิด ประกอบด้วย

#### 1) เส้นใยปอ

ในการทดลองนี้จะเลือกใช้เส้นใยปอขนาด 844 เท็กซ์ มีความยาวต่อเนื่อง สำหรับใช้เป็นวัสดุเสริมแรงหลักที่ใช้ในการทดลองขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตที่มีความยาวต่อเนื่อง โดยเส้นใยปอที่เลือกใช้จะเป็นเส้นใยเดี่ยวที่ถูกบิดเป็นเกลียวใน 1 ม้วน จะหนักประมาณ 2.5 กิโลกรัม แสดงดังรูปที่ 3.2 ในการทดลองจะต้องแบ่งเส้นใยจากม้วนใหญ่มาใส่ม้วนเล็กตามจำนวนที่ทำการออกแบบโครงสร้างวัสดุ



รูปที่ 3.2 เส้นใยปอ

#### 2) เส้นใยพอลิพรอพิลีน

ในการทดลองเส้นใยพอลิพรอพิลีนถูกใช้สำหรับเป็นวัสดุเนื้อพื้นมีขนาด 133 เท็กซ์ มีความยาวต่อเนื่อง เป็นเส้นใยตรงไม่ถูกตีเกลียว ถูกผลิตโดย บริษัท ประดิษฐ์กรรม จำกัด โดยเส้นใยพอลิพรอพิลีน 1 ม้วน จะหนักประมาณ 1 กิโลกรัม แสดงดังรูปที่ 3.3. ในการทดลองจะต้องนำม้วนพอลิพรอพิลีน 8 ม้วน มาควบเข้าเป็นม้วนเล็กม้วนเดียวเพื่อให้ได้อัตราส่วนเท่ากับที่ทำการออกแบบวัสดุ





รูปที่ 3.3 เส้นใยพอลิพรอพิลีน

3) เส้นใยแก้ว

ในการทดลองเส้นใยแก้วถูกใช้เป็นวัสดุเสริมแรงเพื่อช่วยในการขึ้นรูป เนื่องจากเส้นใยปอเพียงอย่างเดียวมีความแข็งแรงไม่พอที่จะพูลทรวงขึ้นได้ เส้นใยมีขนาด 1200 เท็กซ์ มีความยาวต่อเนื่อง เป็นเส้นใยตรงไม่ถูกตีเกลียว สามารถซื้อได้จาก บริษัท เจ.เอ็น.ทรานสอส (ประเทศไทย) จำกัด โดยเส้นใยแก้ว 1 ม้วน จะหนักประมาณ 22 กิโลกรัม แสดงดังรูปที่ 3.4 ในการทดลองจะต้องแบ่งเส้นใยจากม้วนใหญ่มาใช้ม้วนเล็กตามจำนวนที่ทำการออกแบบโครงสร้างวัสดุ

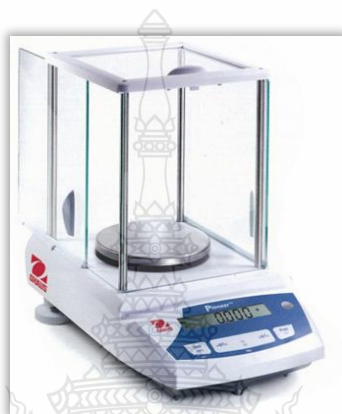


รูปที่ 3.4 เส้นใยแก้ว

### 3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

#### 1) เครื่องชั่งน้ำหนัก

ในการทดลองเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Pioneer ถูกแสดงดังรูปที่ 3.5 ถูกใช้ในการตรวจสอบน้ำหนักของเส้นใยแต่ละชนิด เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของขนาดเส้นใยอีกครั้ง



รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง

#### 2) เครื่องอบไล่ความชื้น

ในการทดลองใช้เครื่องอบไล่ความชื้น ยี่ห้อ Binder ถูกแสดงดังรูปที่ 3.6 สำหรับการไล่ความชื้นของเส้นใย ก่อนทำการตรวจสอบขนาดของเส้นใย

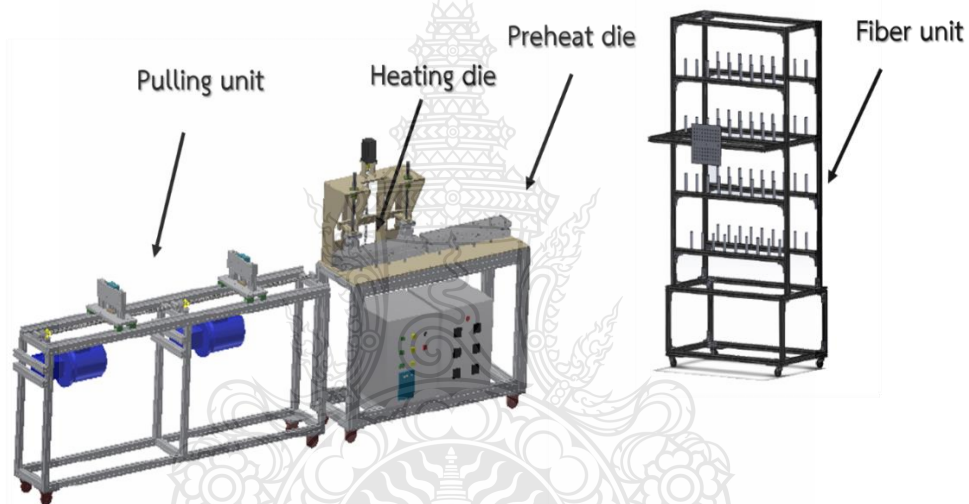


รูปที่ 3.6 เครื่องอบไล่ความชื้น

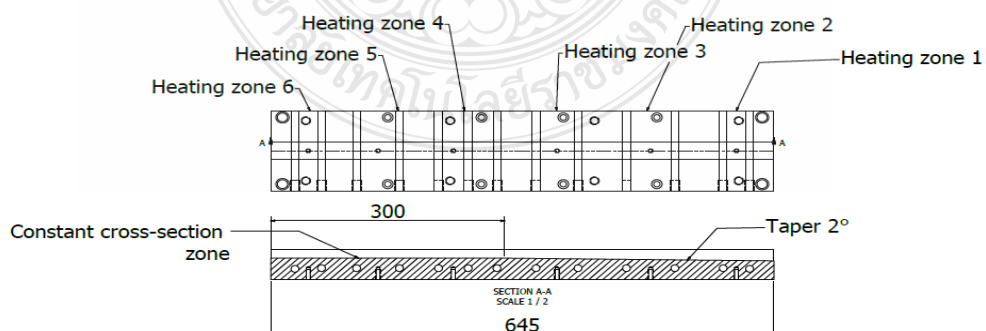
### 3.2.3 เครื่องจักรที่ใช้ในการทดลอง

#### 1) เครื่องพูลทรวงุ่น

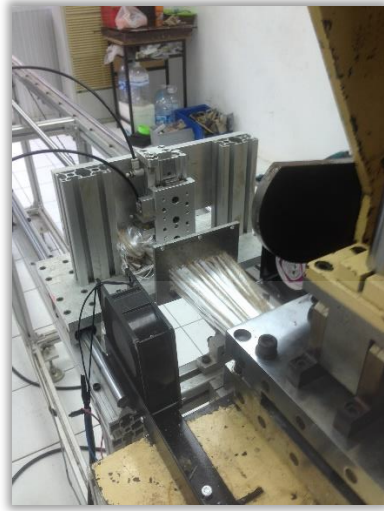
สำหรับเครื่องขึ้นรูปพูลทรวงุ่นที่ใช้ในการทดลอง และส่วนประกอบต่าง ๆ ถูกแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.9 ซึ่งมีขนาดของพื้นที่หน้าตัดของคาย 25 x 3 มิลลิเมตร มีความยาว 645 มิลลิเมตร ชุดคายสำหรับอุ่นมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 50 x 10 มิลลิเมตร มีความยาว 645 มิลลิเมตร คายจะมีพื้นหน้าคงที่ยาว 300 มิลลิเมตร และทำมุมเอียง 1 องศา มีความยาว 345 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.8 เครื่องสามารถปรับตั้งอุณหภูมิของคายได้ 6 ตำแหน่ง และคายสำหรับอุ่น 3 ตำแหน่ง ดังตารางที่ 3.2 และเครื่องสามารถพูลทรวงุ่นได้ชิ้นงานยาวสูงสุด 2 เมตร



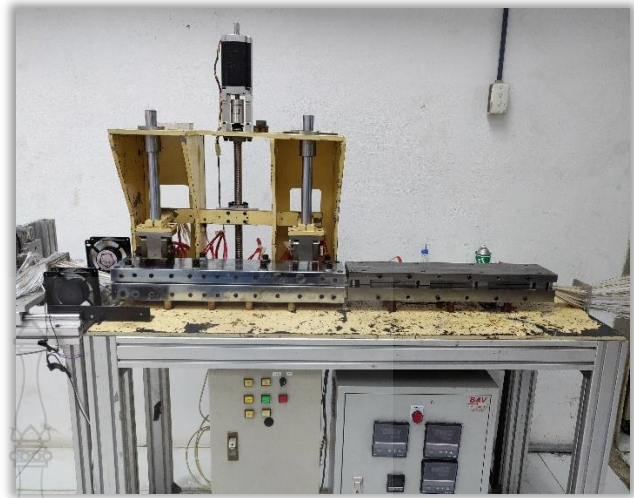
รูปที่ 3.7 ภาพจำลองเครื่องพูลทรวงุ่นที่ใช้ในการทดลอง



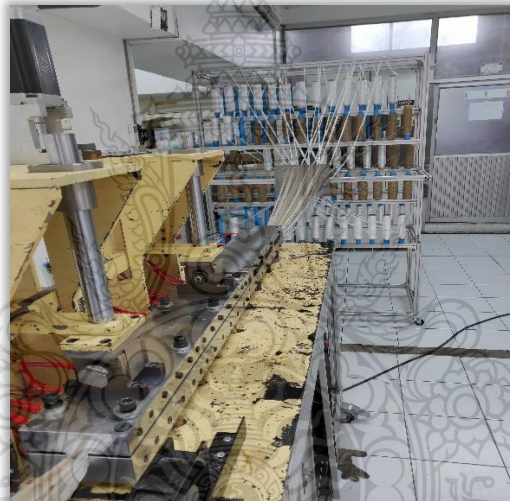
รูปที่ 3.8 ตำแหน่งพื้นที่หน้าตัดคงที่ของคาย



a) Pulling unit



b) Heating die และ Preheat die



c) Fiber unit และภาพรวมของเครื่อง

### รูปที่ 3.9 เครื่องพูลทรวงุ่นที่ใช้ในการทดลอง

#### 2) เครื่องตัดชิ้นงานละเอียด

ในการทดลองเครื่องตัดชิ้นงานละเอียด แสดงดังรูปที่ 3.10 ถูกใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ เนื่องจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ในกระบวนการพูลทรวงุ่นจะมีลักษณะยาว จึงต้องทำการตัดให้ได้ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน และต้องมีความแม่นยำในชิ้นงานน้อยที่สุด



รูปที่ 3.10 เครื่องตัดชิ้นงานละเอียด

3) เครื่องแบ่งเส้นใยเข้าม้วน

ในการทดลองจะใช้เครื่องมือม้วนเส้นใยเข้าแกน ในส่วนของการแบ่งเส้นใยจากม้วนใหญ่มาขังม้วนเล็ก และยังสามารถควบเส้นใยหลายเส้นเข้าในม้วนเดียวกันได้ ถูกแสดงในรูปที่ 3.11



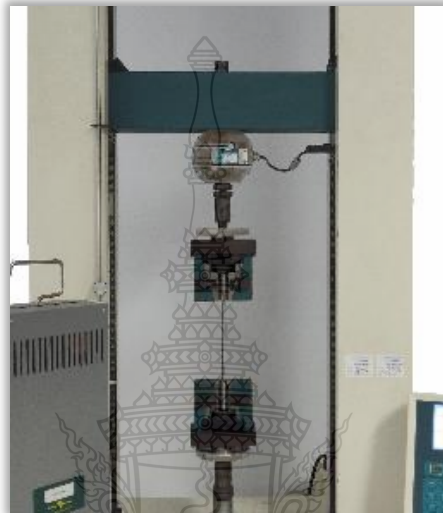
รูปที่ 3.11 เครื่องแบ่งเส้นใยเข้าม้วน



### 3.2.4 เครื่องทดสอบที่ใช้ในการทดลอง

#### 1) การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Test)

ในการตรวจสอบความแข็งแรงดึง จะใช้เครื่อง Universal testing machine ยี่ห้อ Hounsfield โหลด 25 kN และใช้หัวจับสำหรับการทดสอบแรงดึง ถูกแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่อง Universal testing machine สำหรับการทดสอบแรงดึง

#### 2) การทดสอบความแข็งแรงดัด (Flexural test)

ในการตรวจสอบความแข็งแรงดัด จะใช้เครื่อง Universal testing machine ยี่ห้อ Hounsfield โหลด 25 kN เครื่องเดียวกับการทดสอบแรงดึง แต่จะเปลี่ยนจากหัวจับเป็นหัวกด และเปลี่ยนเป็นฐานสำหรับการทดสอบการดัดแบบ 3 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่อง Universal testing machine สำหรับทดสอบการดัดแบบ 3 จุด

3) กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

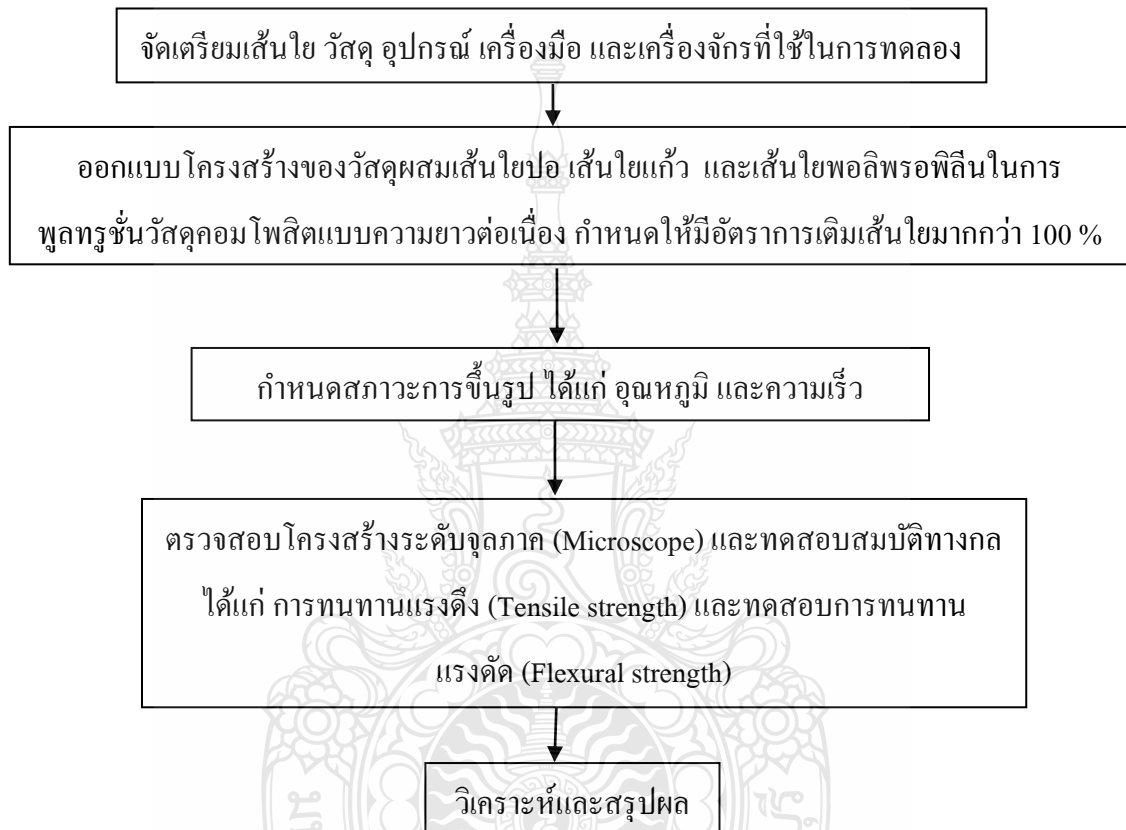
ในการตรวจสอบ โครงสร้างระดับจุลภาค กล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Olympus ที่กำลังขยาย 10 เท่า ถูกแสดงดังรูปที่ 3.14 ถูกใช้เพื่อตรวจสอบการแทรกซึมของเรซินในเส้นใยและปริมาณฟองอากาศ



รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

### 3.3 การออกแบบการทดลองพูลทรวงชั้นวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องของเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ

การทดลองพูลทรวงชั้นวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ ได้ออกแบบขั้นตอนการทดลองดังแสดงในแผนภาพการไหล รูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แผนภาพการไหลแสดงขั้นตอนการทดลองพูลทรวงชั้นวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องของเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ



### 3.3.1 การออกแบบอัตราส่วนการเติมเส้นใย (Filling ratio)

อัตราส่วนการเติมเส้นใยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{อัตราส่วนการเติม (Filling ratio)} = \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของคาย}} \quad (3.1)$$

การคำนวณหาอัตราส่วนการเติมเส้นใยนั้นจะต้องรู้ขนาดของพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยแต่ละชนิดก่อน ซึ่งพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยสามารถคำนวณได้จากขนาดของเส้นใย (Tex หรือ Denier) หรือในกรณีที่ไม่มีทราบถึงขนาดของเส้นใยสามารถทำการตรวจสอบขนาดของเส้นใยได้ โดยการนำเส้นใยมาตัดให้ได้ความยาว 1 เมตรและนำไปชั่งน้ำหนัก ซึ่งในส่วนนี้สามารถนำค่าที่ชั่งได้มาแปลงได้ 2 แบบ

- เท็กซ์ เป็นหน่วยวัดขนาดเส้นใย มีหน่วยเป็น กรัมต่อ 1,000 เมตร
- ดีเนียร์ เป็นหน่วยวัดขนาดเส้นใย มีหน่วยเป็น กรัมต่อ 9,000 เมตร

ตัวอย่างการคำนวณขนาดของเส้นใยที่ได้จากการวัดเป็นเท็กซ์

จากการชั่งขนาดของเส้นใยปอความยาว 1 เมตรจำนวน 100 ตัวอย่างซึ่งงานพบว่า มีน้ำหนักเฉลี่ยคือ 0.0844 กรัมต่อ 1 เมตร จะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{เส้นใยปอที่ชั่งน้ำหนักได้} = 0.0844 \quad \text{กรัม/เมตร}$$

$$\text{ดังนั้นเส้นใยปอยาว 1000 เมตร} = 844 \quad \text{เท็กซ์}$$

เส้นใยปอที่วัดผลได้จะมีขนาด 844 เท็กซ์หลังจากนั้นถูกนำไปคำนวณพื้นที่หน้าตัดที่มีหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตรเพื่อใช้สำหรับคำนวณสัดส่วนของเส้นใยดังนี้

$$\text{เส้นใยปอมีขนาด} = 844 \quad \text{กรัม/1000 เมตร}$$

$$\text{ซึ่งแปลงเป็นหน่วยมิลลิเมตร} = 84.40 \times 10^{-5} \quad \text{กรัม/มิลลิเมตร}$$

$$\text{ซึ่งเส้นใยปอจะมีความหนาแน่น} = 1.44 \times 10^{-3} \quad \text{กรัม/ลูกบาศก์มิลลิเมตร}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยปอ} = 5861.11 \times 10^{-4} \quad \text{ตารางมิลลิเมตร}$$

เมื่อรู้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยแล้วจะสามารถนำพื้นที่ที่ได้ไปใช้สำหรับคำนวณอัตราส่วนการเติมเส้นใย (Filling ratio) จากค่าที่ได้จากการคำนวณเส้นใยปอมีพื้นที่หน้าตัด =  $5861.11 \times 10^{-4}$  ตารางมิลลิเมตร เส้นใยแก้วมีขนาดพื้นที่หน้า =  $4580.15 \times 10^{-4}$  ตารางมิลลิเมตร และเส้นใยพอลิพรอพิลีน =  $1409.44 \times 10^{-4}$  ตารางมิลลิเมตร ซึ่งในการคำนวณสัดส่วนของอัตราส่วนการเติมเส้นใยนั้นจะต้องคำนวณพื้นที่หน้าตัดรวมทั้งหมดของทั้ง 3 เส้นใยให้ = 100 % หรือมากกว่า เพื่อให้วัสดุเต็มหน้าคายที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

ในการทดลองนั้นคายของแม่พิมพ์มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 80.91 ตารางมิลลิเมตรได้ทำการกำหนดจำนวนของเส้นใยที่จะใช้สำหรับขึ้นรูปโดยได้ทำการทดลองขึ้นรูปในการใช้เส้นใยแก้วที่น้อยที่สุดและสามารถขึ้นรูปได้คือจำนวน 16 เส้น เป็นจำนวนของเส้นใยปอ 32 เส้นและจำนวนของเส้นใยพอลิโพรพิลีน 392 เส้น ดังนั้นจะสามารถคำนวณสัดส่วนของอัตราส่วนการเติมเส้นใยได้ดังนี้

เส้นใยปอมีจำนวน 32 เส้นมีพื้นที่  $32 \times 5861.11 \times 10^{-4} = 18.75$  ตารางมิลลิเมตร

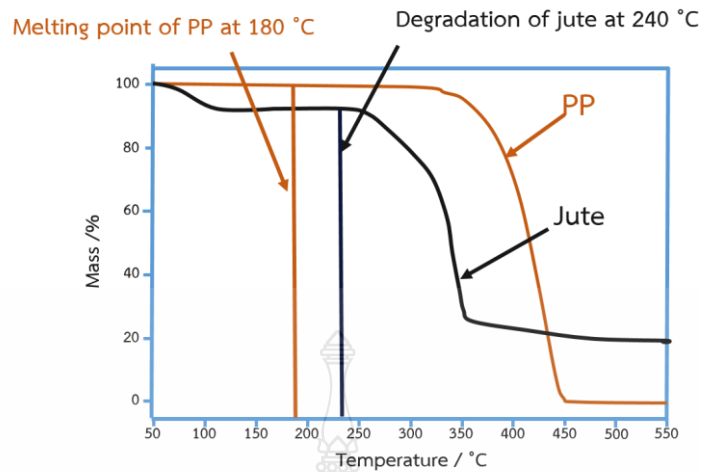
เส้นใยแก้วมีจำนวน 16 เส้นมีพื้นที่  $16 \times 4580.15 \times 10^{-4} = 7.33$  ตารางมิลลิเมตร

เส้นใยพอลิพรอพิลีนทั้งหมด  $392 \times 1409.44 \times 10^{-4} = 55.25$  ตารางมิลลิเมตร

อัตราส่วนการเติมเส้นใย  $(81.33)/80.91 \times 100 = 100.52 \%$

ซึ่งสำหรับวิทยานิพนธ์เรื่องนี้จะศึกษาเพียงแค่สถานะในการขึ้นรูปเท่านั้น ซึ่งสัดส่วนของเส้นใยต่าง ๆ จะกำหนดเป็นค่าคงที่สำหรับการทดลอง

สำหรับการพูลทรวงขึ้นของเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอจะอธิบายดังนี้วัสดุเส้นใยปอและเส้นใยพอลิพรอพิลีนถูกคำนวณด้วยอัตราส่วนการเติมเส้นใย (Filling ratio) ที่ต้องมากกว่า 100 % ซึ่งในการทดลองนั้นได้ใช้อัตราส่วนการเติมเส้นใยที่ 100.52 % นั่นคือผ่านเงื่อนไขเมื่อผ่านเงื่อนไขแล้วยังต้องทำการทดลองว่าอัตราส่วนการเติมเส้นใยที่ใช้สามารถพูลทรวงขึ้นออกมาจากแม่พิมพ์ได้หรือไม่ ซึ่งจากการทดลองพบว่าการใช้เส้นใยปอเพียงอย่างเดียวไม่สามารถพูลทรวงขึ้นออกมาได้ เนื่องจากเส้นใยปอมีความแข็งแรงไม่พอ ดังนั้นจึงต้องทำการใส่เส้นใยแก้วเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้สามารถพูลทรวงขึ้นออกมาได้ ดังนั้นจะได้สัดส่วนของ เส้นใยปอเท่ากับ 23.06 % เส้นใยแก้วเท่ากับ 9.01 % พอลิพรอพิลีนเท่ากับ 68.45 % เมื่อสามารถพูลทรวงขึ้นได้แล้ว ทำการขึ้นรูปพูลทรวงขึ้นที่อุณหภูมิที่ออกแบบไว้คือ 190, 200, 210 และ 220 องศาเซลเซียส ซึ่งออกแบบโดยใช้ผล Thermogravimetric analysis (TGA) ของเส้นใยพอลิพรอพิลีนและเส้นใยปอถูกแสดงในรูปที่ 3.16 และทำการทดสอบสมบัติแรงดึง (Tensile test) แรงคด (Flexural test) และตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure) ได้อุณหภูมิพูลทรวงขึ้นที่มีสมบัติทางกลสูงที่สุดคือผ่านเงื่อนไข เมื่อรู้อุณหภูมิพูลทรวงขึ้นแล้วหลังจากนั้นทำการพูลทรวงขึ้นที่ความเร็ว 40, 100 และ 140 มิลลิเมตรต่อนาที ตามที่ออกแบบไว้ และทำการทดสอบสมบัติแรงดึง (Tensile test) แรงคด (Flexural test) และตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure) เมื่อผ่านเงื่อนไขจะทราบถึงสถานะขึ้นรูปที่เหมาะสมของการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ



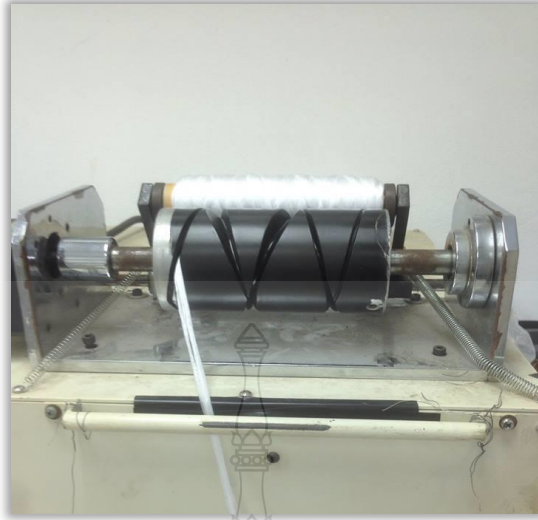
รูปที่ 3.16 แสดงผล Thermogravimetric analysis (TGA) ของพอลิพรอพิลีนและเส้นใยปอ

### 3.3.2 การเตรียมเส้นใย

ในการเตรียมเส้นใยนั้นเส้นใยพอลิพรอพิลีนจะถูกรวบให้เข้าในแกนเดียวกันเป็นจำนวน 8 เส้น ตามที่ได้คำนวณในหัวข้อที่ 3.3.1 ในหนึ่งแกน ดังรูปที่ 3.17 และ 3.18 ในส่วนของเส้นแก้วและเส้นปอต้องถูกนำมาเข้าแกนเหมือนกับเส้นใยพอลิพรอพิลีนแต่จะเข้าแกนทีละ 1 เส้น เท่านั้น



รูปที่ 3.17 ชั้นวางม้วนเส้นใยพอลิพรอพิลีนสำหรับเข้าแกน



รูปที่ 3.18 การรวบเส้นใยพอลิพรอพิลีน

เมื่อทำการนำเส้นใยรวบเข้าแกนเรียบแล้ว เส้นใยที่ถูกเข้าแกนแล้วถูกนำไปเรียงบนชั้นวางสำหรับขึ้นรูปดังรูปที่ 3.19



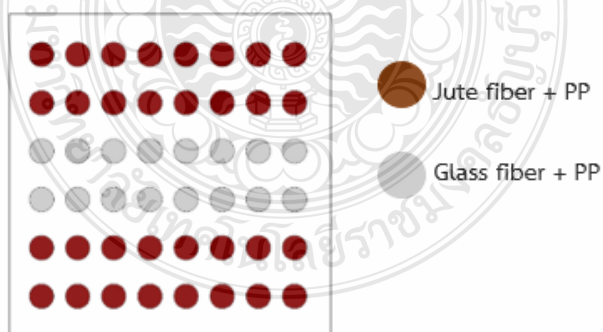
รูปที่ 3.19 การวางเส้นใยที่เข้าแกนแล้วบนชั้นวางสำหรับขึ้นรูป

ในการเตรียมเส้นใยเพื่อที่จะขึ้นรูปในแม่พิมพ์นั้นได้ทำการจัดเรียงเส้นใยเข้าแม่พิมพ์ตามแผ่นโลหะที่เจาะรูไว้เพื่อกำหนดตำแหน่งเส้นใยให้มีลักษณะเหมือนเดิมทุกครั้งดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 การจัดเรียงเส้นใย

ในรูปที่ 3.21 จะแสดงถึงการจัดเรียงเส้นใยในแม่พิมพ์ ซึ่งทุกครั้งที่ทำการขึ้นรูปจะมีการจัดเรียงเส้นใยที่เหมือนกันทุกครั้ง เส้นใยเสริมแรง 1 เส้น จะถูกดึงพร้อมกับเส้นใยพอลิพรอพิลีน 8 เส้น



รูปที่ 3.21 ตำแหน่งการจัดเรียงเส้นใยในแม่พิมพ์

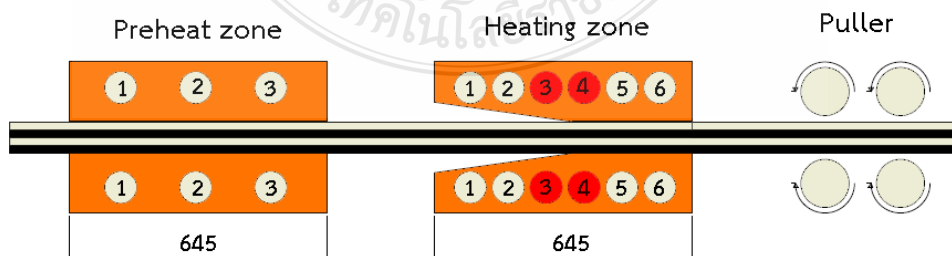
### 3.4 การทดลองพูลทรวงขึ้นวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่อง

ในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรวงขึ้นนั้น จะต้องดึงเส้นใยทั้งหมดไปยังจุดดึงก่อนที่จะทำการปิดแม่พิมพ์ โดยแม่พิมพ์จะต้องยังไม่ทำการเปิดฮีตเตอร์ซึ่งในรูปที่ 3.22 แสดงลักษณะการเตรียมเส้นใยก่อนปิดแม่พิมพ์



รูปที่ 3.22 ลักษณะการเตรียมเส้นใยก่อนปิดแม่พิมพ์

หลังจากนั้นทำการปิดแม่พิมพ์แล้วเปิดฮีตเตอร์โดยที่ยังไม่ต้องขันน็อตให้แน่น ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปจะแสดงดังรูปที่ 3.23 และตารางที่ 3.2 ซึ่งทำการศึกษาอุณหภูมิขึ้นรูปที่ 190, 200, 210 และ 220 องศาเซลเซียส และเมื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมได้แล้วจึงทำการศึกษาความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ 40, 100 และ 140 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่ออุณหภูมิของแม่พิมพ์อยู่ที่ 80 เอร์เซนต์ ของอุณหภูมิที่ตั้งไว้แล้วจึงเริ่มทำการดึงขึ้นรูปและค่อย ๆ ทำการขันน็อตล็อกแม่พิมพ์



รูปที่ 3.23 ตำแหน่งฮีตเตอร์ให้ความร้อนของแม่พิมพ์



ตารางที่ 3.2 แสดงอุณหภูมิของแม่พิมพ์ในแต่ละตำแหน่งและความเร็วในการพูลทรวงขึ้น

Condition	Preheat zone (°C)			Heating zone (°C)						Pulling speed (mm/min)
	1	2	3	1	2	3	4	5	6	
1	100	100	100	160	170	190	190	170	160	40
2	100	100	100	160	170	200	200	170	160	40
3	100	100	100	160	170	210	210	170	160	40
4	100	100	100	160	170	220	220	170	160	40
5	100	100	100	160	170	200	200	170	160	100
6	100	100	100	160	170	200	200	170	160	140

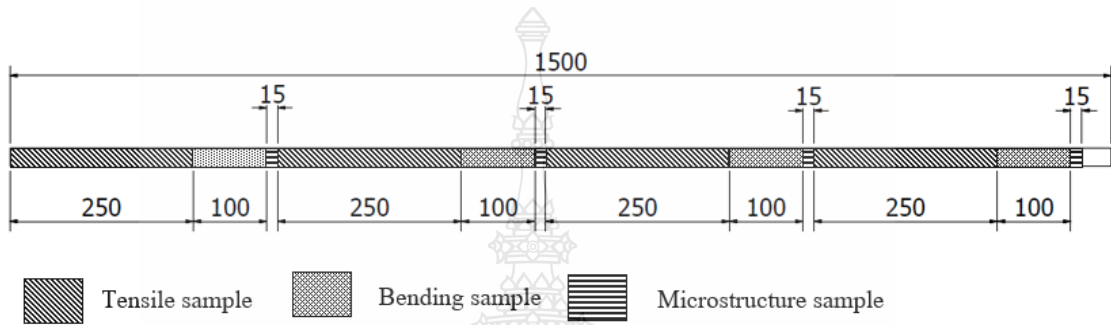
ชิ้นงานที่ได้จะถูกเลือกบริเวณที่ปิดแม่พิมพ์สนิทแล้วมาใช้ในการทดสอบซึ่งลักษณะชิ้นงานที่ได้ถูกแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป

### 3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และทดสอบสมบัติทางกล

ชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่ได้จะมีความยาว 1,500 มิลลิเมตร จะถูกตัดสำหรับเตรียมชิ้นทดสอบทั้งหมดได้จำนวน 4 ชุด ประกอบด้วย ชิ้นทดสอบแรงดึง ชิ้นทดสอบแรงคด และชิ้นทดสอบสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 3.25



หมายเหตุ : ความยาวที่เหลือ 40 มิลลิเมตร เพื่อไว้สำหรับการตัด

รูปที่ 3.25 แสดงการเตรียมชิ้นทดสอบของวัสดุคอมโพสิต

#### 3.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การเตรียมชิ้นงานก่อนตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานจะถูกตัดออกมาและทำการหล่อด้วยเรซินดังรูปที่ 3.26 และถูกนำเข้าไปเรียงใส่เบอร์ดายทราซจนถึงเบอร์สั๊กหลาด ในการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคใช้กล้องจุลทรรศน์ ยี่ห้อ Olympus โดยจะใช้กำลังขยาย 10 เท่า



รูปที่ 3.26 ชิ้นงานที่ถูกเตรียมก่อนทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์



### 1) การตรวจสอบปริมาณฟองอากาศ (Void content)

ในการวิเคราะห์ปริมาณฟองอากาศจะใช้ผลการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคในการคำนวณหาปริมาณฟองอากาศซึ่งจะใช้โปรแกรม Image J ในการวิเคราะห์ปริมาณฟองอากาศ ซึ่งในส่วนของคุณภาพฟองอากาศจะวิเคราะห์โดยคำนวณจากปริมาณฟองอากาศบนพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดดังรูปที่ 3.27 a) และ 3.27 b) ซึ่งสำหรับการวงพื้นที่ที่เป็นฟองอากาศจะใช้โปรแกรม Photoshop cs6 ในการวงพื้นที่ฟองอากาศและการไม่แทรกซึมของเรซิน

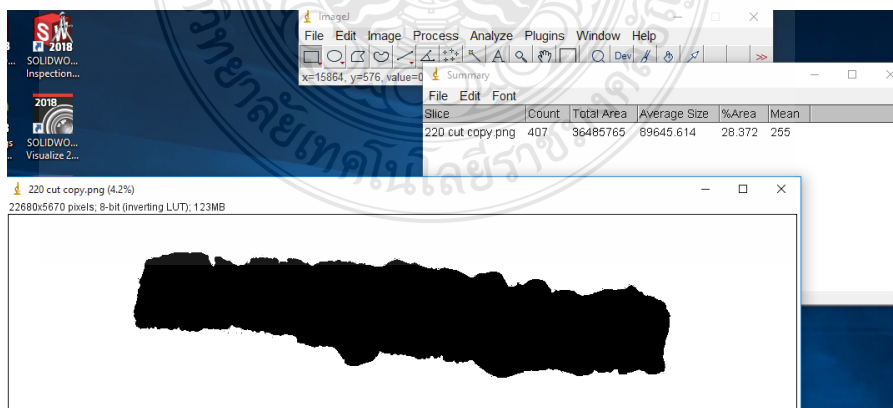


a) พื้นที่ชิ้นหน้าตัดทั้งหมด



b) พื้นที่ฟองอากาศ

รูปที่ 3.27 แสดงพื้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟองอากาศ



รูปที่ 3.28 การใช้โปรแกรม Image J ในการวิเคราะห์พื้นที่

## 2) การตรวจสอบการแทรกซึมของเรซินในเส้นใย (Un-impregnation)

ในวิเคราะห์ปริมาณการแทรกซึมของเรซินในเส้นใยใช้ผลการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคในการคำนวณในทำนองเดียวกันกับการวิเคราะห์ปริมาณฟองอากาศ แต่ส่วนของปริมาณการแทรกซึมของเรซินในเส้นใยจะคำนวณจากปริมาณช่องว่างในเส้นใยต่อพื้นที่ของเส้นใยในการคำนวณในรูปที่ 3.29 แสดงพื้นที่การวิเคราะห์การแทรกซึมของเรซินในเส้นใย



a) พื้นที่ที่เรซินไม่แทรกซึม (Un-impregnation)



b) พื้นที่ของเส้นใย 1 เส้น

รูปที่ 3.29 แสดงพื้นที่ในการวิเคราะห์ปริมาณการแทรกซึมของเรซินในเส้นใย

### 3.5.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile strength)

ในการทดสอบสมบัติแรงดึงใช้เครื่องทดสอบ Hounsfield universal testing machine ที่มีขนาดของโหลดเซลล์ 25 kN และความเร็วในการดึง 1 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้มาตรฐาน ASTM D3039 [21] โดยตัวอย่างชิ้นงานจะมีขนาดแสดงดังรูปที่ 3.30 คือ 25 x 250 x 3 มิลลิเมตร ตัวอย่างชิ้นงานทุกชิ้นถูกทากาวอีพอกซ์ติดกับแผ่นอลูมิเนียมบาง 1 มิลลิเมตร บริเวณจุดที่ใช้สำหรับให้ตัวจับเครื่องทดสอบจับทุกชิ้น ซึ่งรูปที่ 3.31 แสดงการทดสอบแรงดึง



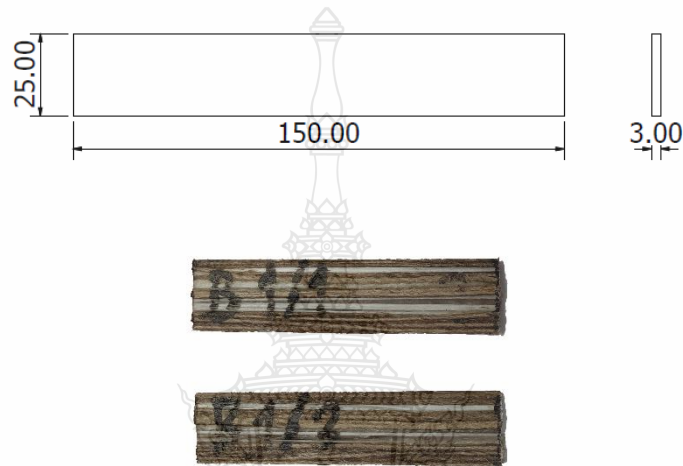
รูปที่ 3.30 แสดงลักษณะและขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.31 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine)

### 3.5.3 การทดสอบแรงค้ด (Flexural strength)

ในการทดสอบสมบัติแรงค้ดใช้เครื่องทดสอบ Hounsfield universal testing machine ที่มีขนาดของโหลดเซลล์ 25 kN และความเร็วของหัวค้ด 2.16 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งความเร็วของหัวค้ดสามารถคำนวณได้จากมาตรฐาน ASTM D790 [22] ขนาดของตัวอย่างชิ้นงานและลักษณะของชิ้นงานถูกแสดงในรูปที่ 3.32 คือ 25 x 150 x 3 มิลลิเมตร และรูปที่ 3.33 แสดงการทดสอบแรงค้ด



รูปที่ 3.32 แสดงลักษณะและขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงค้ด



รูปที่ 3.33 เครื่องทดสอบแรงค้ด (Bending testing machine)

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การดำเนินงานโครงการวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ทำศึกษาวิจัยเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทูลูชั่น และสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้เป็นผลสำเร็จ ได้ขนาดของชิ้นทดสอบที่มีพื้นที่หน้าตัด 25 x 3 มิลลิเมตร และยาว 1,500 มิลลิเมตร ซึ่งได้กำหนดให้อัตราการเติมเส้นใย 100.52 % ซึ่งประกอบไปด้วยเส้นใยปอ 23.06 % เส้นใยแก้ว 9.01 % และเส้นใยพอลิพรอพิลีน 68.45 % และได้ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิในการขึ้นรูปโดยกำหนดให้มีอุณหภูมิ 190, 200, 210 และ 220 องศาเซลเซียส และความเร็วในการพูลทูลูชั่น กำหนดให้มีความเร็ว 40, 100 และ 140 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดลองและการอภิปรายผลมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิพูลทูลูชั่น

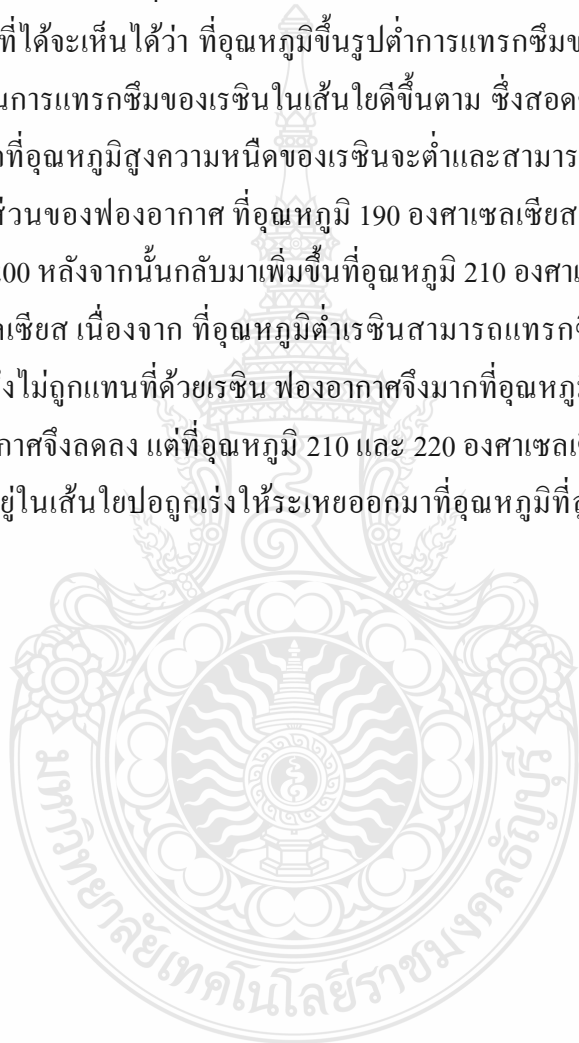
ผลการทดลองในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทูลูชั่นที่ได้กำหนดอุณหภูมิในการขึ้นรูป 190, 200, 210 และ 220 องศาเซลเซียส และความเร็วในการพูลทูลูชั่นกำหนดให้มีความเร็ว 40 มิลลิเมตรต่อนาที มีผลการทดลองเริ่มต้นจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และทดสอบสมบัติทางกลประกอบด้วยทดสอบแรงดึง และทดสอบแรงดัด ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทดสอบดังนี้

##### 4.1.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure)

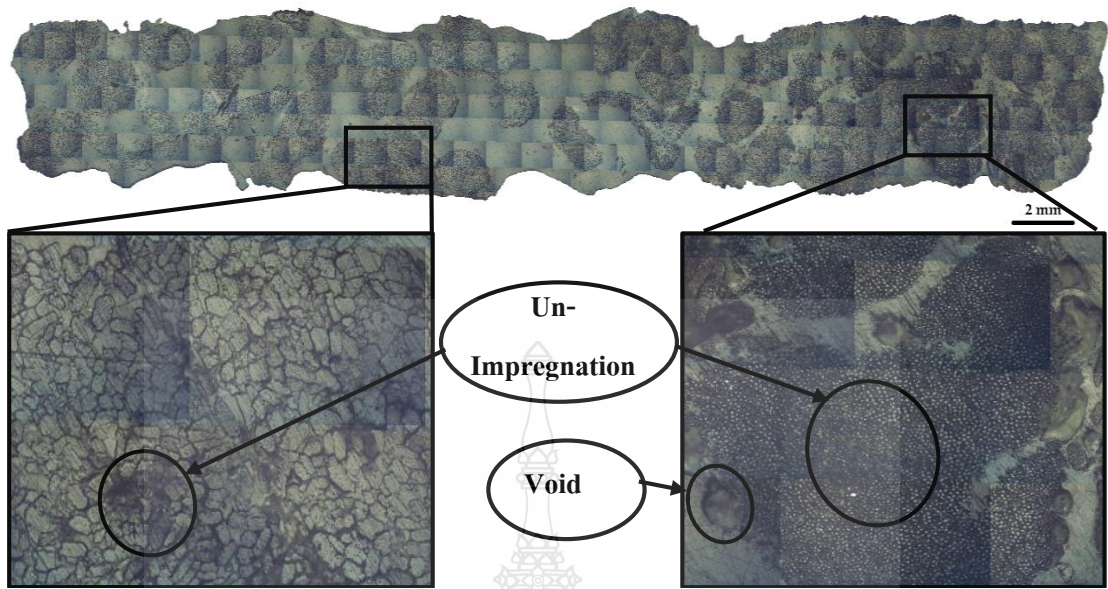
ผลการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุที่อุณหภูมิ 190-220 องศาเซลเซียส ถูกแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 จากรูปเมื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างภาคตัดขวางของวัสดุคอมโพสิต จะพบว่าพื้นผิวโดยรวมของวัสดุที่จะประกอบไปด้วยเส้นใยแก้วที่มีลักษณะเป็นเส้นกลมเล็ก ๆ และเส้นใยปอมีลักษณะเป็นเส้นที่ใหญ่กว่าเส้นใยแก้ว ทั้ง 2 เส้นใย แทรกตัวอยู่บนวัสดุเนื้อพื้นพอลิพรอพิลีน พื้นที่สีดำที่อยู่ในเส้นใย คือลักษณะของการไม่แทรกซึมของเรซินในเส้นใย พื้นที่สีดำที่อยู่ในวัสดุเนื้อพื้น คือพื้นที่ฟองอากาศ ในรูป 4.1 a) ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส พบว่ามีพื้นที่สีดำในเส้นใยค่อนข้างมาก ทั้งในเส้นใยแก้วและเส้นใยปอนั้นจึงหมายความว่า การแทรกซึมของเรซินไม่ดี และนอกจากนี้ยังพบพื้นที่สีดำบนวัสดุพอลิพรอพิลีนซึ่งคือฟองอากาศ จากรูปที่ 4.1 b) ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่าบนพื้นผิวภาคตัดมีพื้นที่สีดำในเส้นใยแก้วและเส้นใยปอ

ค่อนข้างต่ำ ซึ่งหมายถึงการแทรกซึมของเรซินในเส้นใยที่ดี และมีพื้นที่สีดำบนวัสดุพอลิพรอพิลีนขนาดเล็ก และมีจำนวนน้อย จากรูปที่ 4.2 a) ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส พบว่าบนพื้นผิวภาคตัดมีพื้นที่สีดำในเส้นใยแก้วและเส้นใยปอค่อนข้างต่ำ มีลักษณะเดียวกับที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แต่จะมีพื้นที่สีดำบนวัสดุพอลิพรอพิลีนเพิ่มขึ้นมาเพียงเล็กน้อย จากรูปที่ 4.2 b) ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส พบว่าบนพื้นผิวภาคตัดมีพื้นที่สีดำในเส้นใยแก้วและเส้นใยปอค่อนข้างต่ำ แต่จะมีพื้นที่สีดำบนวัสดุพอลิพรอพิลีนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน

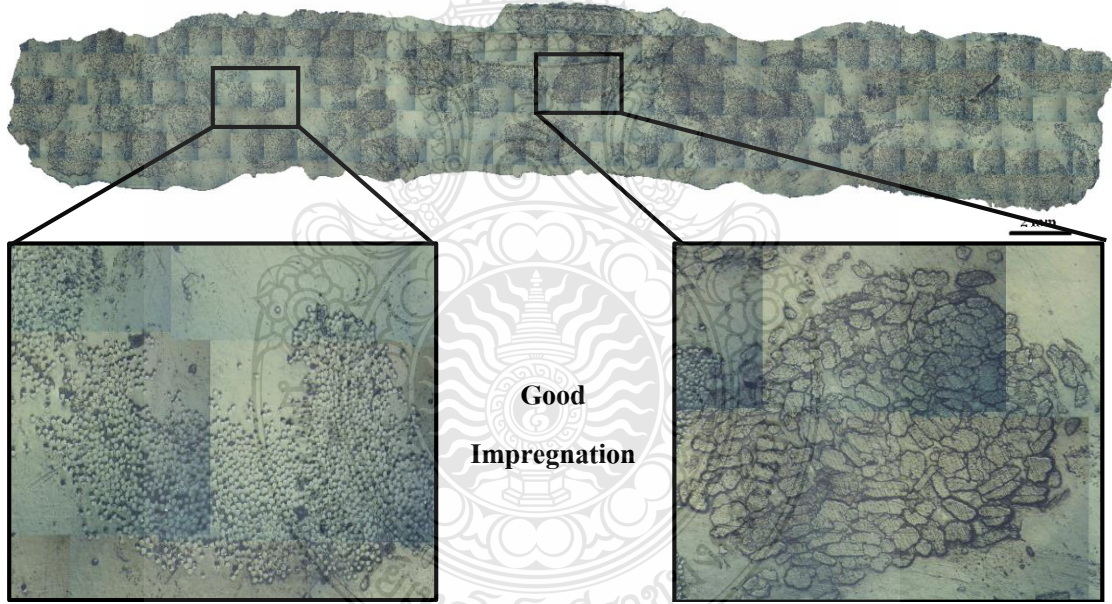
จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิขึ้นรูปต่ำการแทรกซึมของเรซินในเส้นใยค่อนข้างต่ำ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการแทรกซึมของเรซินในเส้นใยดีขึ้นตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Anin Memon [15] เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงความหนืดของเรซินจะต่ำและสามารถเข้าแทรกซึมในเส้นใยได้ดีกว่าอุณหภูมิต่ำ ในส่วนของฟองอากาศ ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ค่อนข้างมีฟองอากาศมากและลดลงที่อุณหภูมิ 200 หลังจากนั้นกลับมาเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส และเพิ่มอย่างเห็นได้ชัดที่ 220 องศาเซลเซียส เนื่องจาก ที่อุณหภูมิต่ำเรซินสามารถแทรกซึมในเส้นใยได้ยาก ดังนั้นอากาศที่อยู่ในเส้นใยจึงไม่ถูกแทนที่ด้วยเรซิน ฟองอากาศจึงมากที่อุณหภูมิต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการแทรกซึมดีขึ้นฟองอากาศจึงลดลง แต่ที่อุณหภูมิ 210 และ 220 องศาเซลเซียส ฟองอากาศเพิ่มขึ้นสูงเนื่องจากความชื้นที่อยู่ในเส้นใยปอถูกเร่งให้ระเหยออกมาที่อุณหภูมิที่สูง จึงเกิดเป็นฟองอากาศที่ระบายออกไม่ทัน





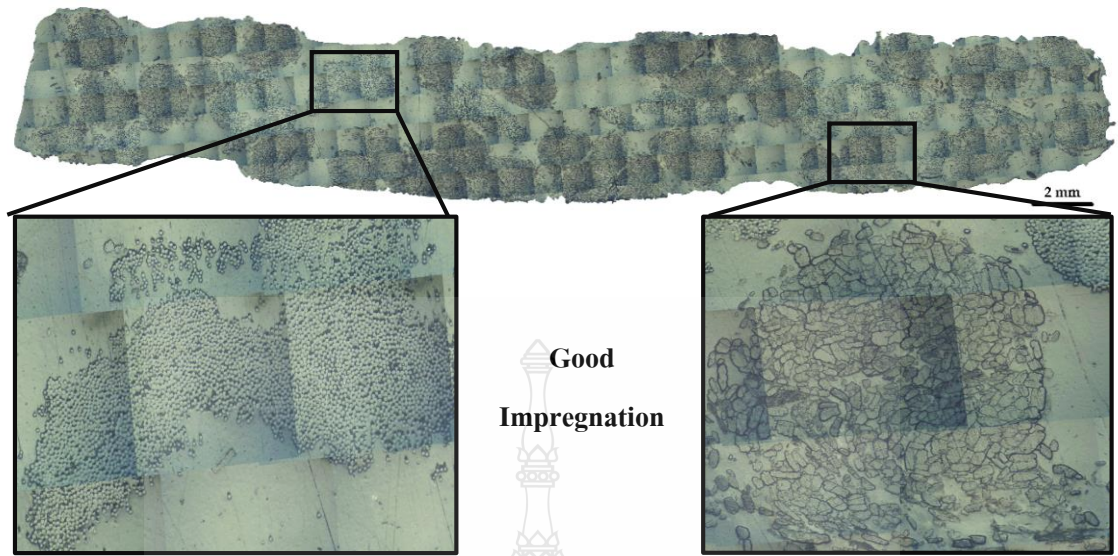


a) อุนหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

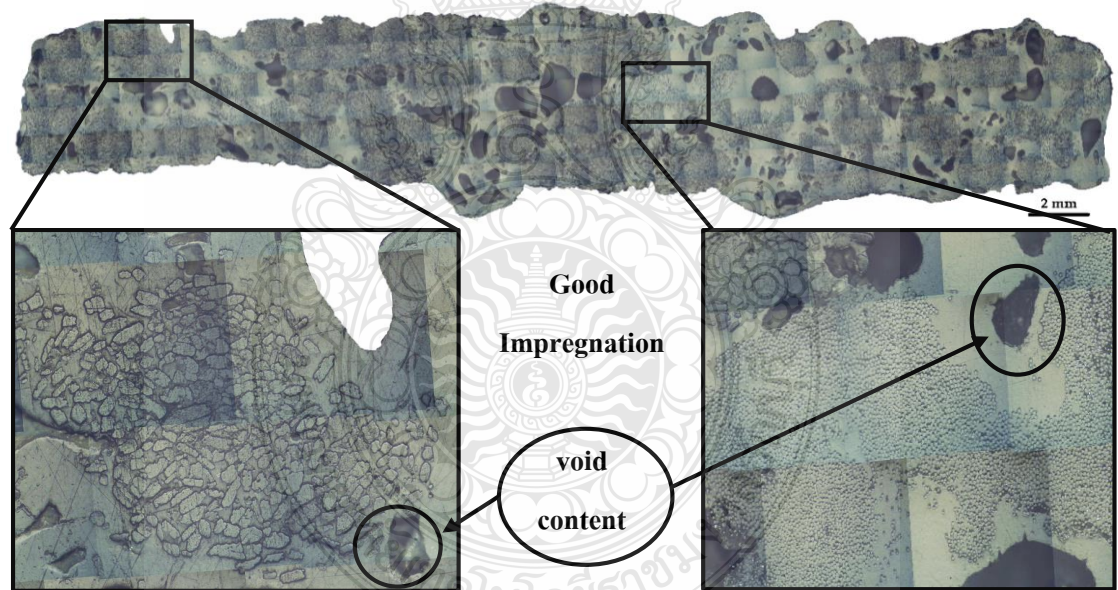


b) อุนหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.1 ภาพโครงสร้างภาคตัดขวางที่มีอิทธิพลของอุณหภูมิพูลทรวงขึ้น



a) อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส



b) อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส

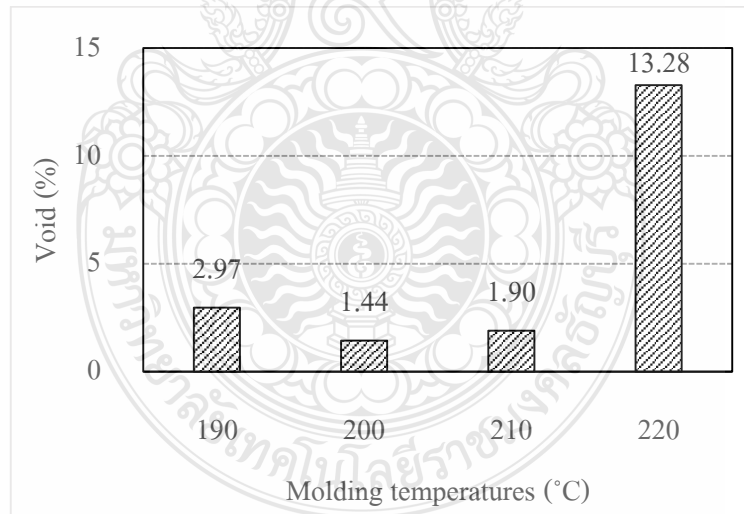
รูปที่ 4.2 ภาพโครงสร้างภาคตัดขวางที่มีอิทธิพลของอุณหภูมิพลาทรูชั่น (ต่อ)



#### 4.1.2 ผลการตรวจสอบปริมาณฟองอากาศ (Void content)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคที่ได้ ถูกนำมาวิเคราะห์ปริมาณฟองอากาศ ซึ่งถูกแสดงดังรูปที่ 4.3 จากการตรวจสอบโครงสร้างภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบ พบว่าฟองอากาศมีมากที่อุณหภูมิพอลิเมอร์ 190 องศาเซลเซียส และลดลงที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำสุด 1.44 % หลังจากนั้นฟองอากาศเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส และเห็นได้ชัดเจนที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส มีฟองอากาศสูงถึง 13.28 % ดังรูปที่ 4.2 b)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณฟองอากาศที่อุณหภูมิต่ำมีฟองอากาศมาก เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำเรซินสามารถแทรกซึมในเส้นใยได้ยาก ดังนั้นอากาศที่อยู่ในเส้นใยจึงไม่ถูกแทนที่ด้วยเรซิน ฟองอากาศจึงมากที่อุณหภูมิต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการแทรกซึมดีขึ้นฟองอากาศจึงลดลง แต่ที่อุณหภูมิ 210 และ 220 องศาเซลเซียส ฟองอากาศเพิ่มขึ้นสูงเนื่องจากความชื้นที่อยู่ในเส้นใยปอกร่งให้ระเหยออกมาที่อุณหภูมิที่สูง จึงเกิดเป็นฟองอากาศที่ระบายออกไม่ทัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเส้นใยธรรมชาติจะมีสมบัติในการดูดความชื้น [8,16,20] ดังนั้นการควบคุมความชื้นมีความสำคัญมากสำหรับการเกิดฟองอากาศในชิ้นงาน ซึ่ง Mohd Hafiz Zamri [17] และ Ling Liu [19] ได้กล่าวว่า ฟองอากาศมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ ปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มส่งผลให้ความแข็งแรงต่ำลง

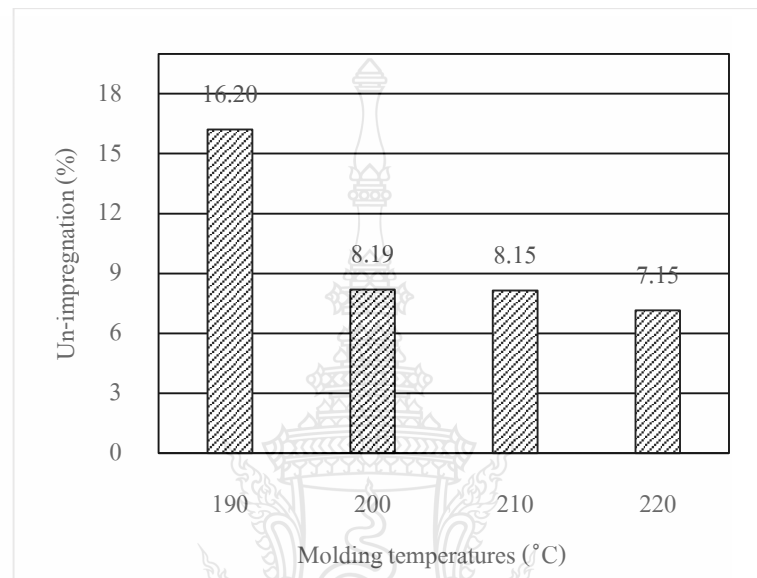


รูปที่ 4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูปต่อปริมาณฟองอากาศ

#### 4.1.3 การตรวจสอบการแทรกซึมของเรซินในเส้นใย (Impregnation)

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค ถูกนำมาวิเคราะห์ปริมาณการแทรกซึมของเรซินในเส้นใยอีกครั้ง ถูกแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าปริมาณการแทรกซึมของเรซินในเส้นใยดีขึ้น

ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิพูลทुरुชั้น 220 องศาเซลเซียส มีการแทรกซึมของเรซินดีที่สุด ซึ่งมีค่าการไม่แทรกซึมของเรซินเพียง 7.15 % เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นเรซินจะมีความหนืดลดลงและสามารถเข้าไปแทรกซึมในเส้นใยได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Anin Memon [8] และ Hung-Yu Lan [23] ได้กล่าวถึงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อความหนืด



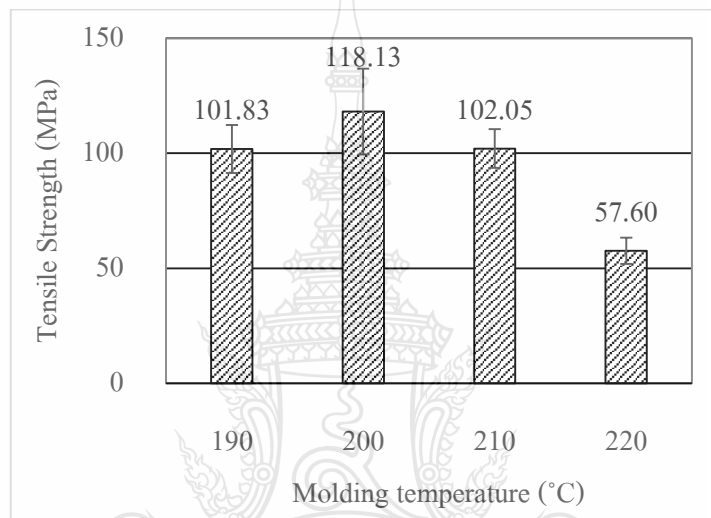
#### รูปที่ 4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูปต่อปริมาณการแทรกซึมของเรซินในเส้นใย

##### 4.1.4 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile strength)

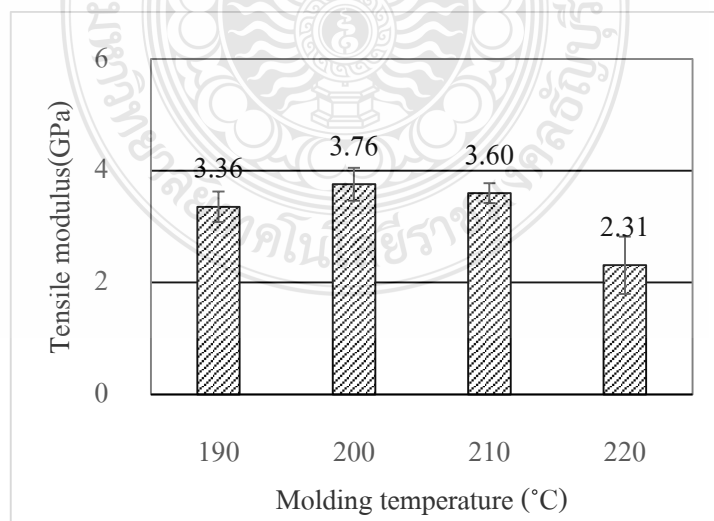
ผลจากการทดสอบแรงดึงจะประกอบไปด้วยค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงดึง ซึ่งค่าความแข็งแรงดึงจะถูกแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าค่าความแข็งแรงดึงจะเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิพูลทुरुชั้น 200 องศาเซลเซียสและเริ่มลดลงตามตั้งแต่อุณหภูมิพูลทुरुชั้น 210 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป ที่อุณหภูมิพูลทुरुชั้น 200 องศาเซลเซียสมีค่าความแข็งแรงดึง สูงสุดคือ 118. 13 MPa และในส่วนของค่ามอดูลัสแรงดึงถูกแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งมีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกับค่าความแข็งแรงดึง คือที่อุณหภูมิพูลทुरुชั้น 200 องศาเซลเซียส มีค่าสูงที่สุดคือ 3.76 GPa จากค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงสูงสุดที่อุณหภูมิพูลทुरुชั้น 200 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิพูลทुरुชั้น 200 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงสูงสุด เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ความหนืดของเรซินลดลงและสามารถเข้าไปแทรกซึมในเส้นใยได้ง่ายขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Anin Memon [8,15] แต่ในขณะเดียวกันที่

อุณหภูมิพอลิเมอร์ชั้น 210 และ 220 องศาเซลเซียส แม้เรซินจะสามารถแทรกซึมในเส้นใยได้ดีขึ้นแต่สมบัติความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงตกลง เนื่องจากอุณหภูมิที่พอลิเมอร์ชั้น 210 และ 220 องศาเซลเซียส เข้าใกล้อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยปอซึ่งเส้นใยปอที่มีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 240 องศาเซลเซียส [13] จากผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มของค่าสมบัติความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงมีลักษณะเดียวกันกับงานวิจัยของ Angelov I. [18] อีกด้วย และนอกจากนี้ความแข็งแรงที่ลดลงยังเกิดขึ้นเนื่องปริมาณของฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย



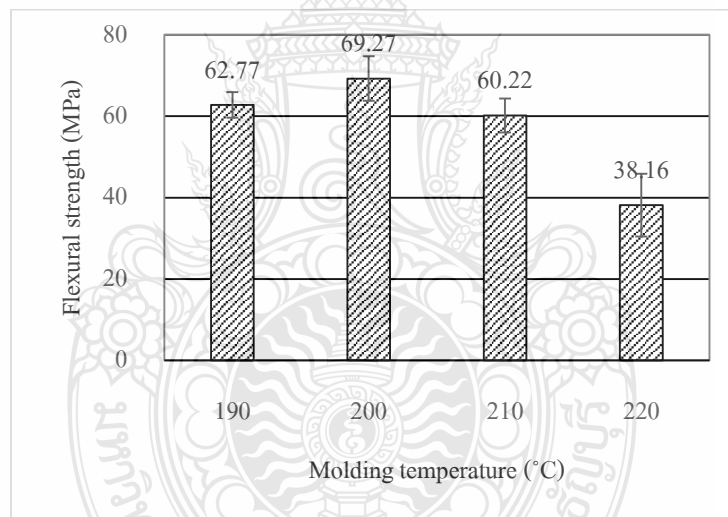
รูปที่ 4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูปต่อค่าความแข็งแรงดึง



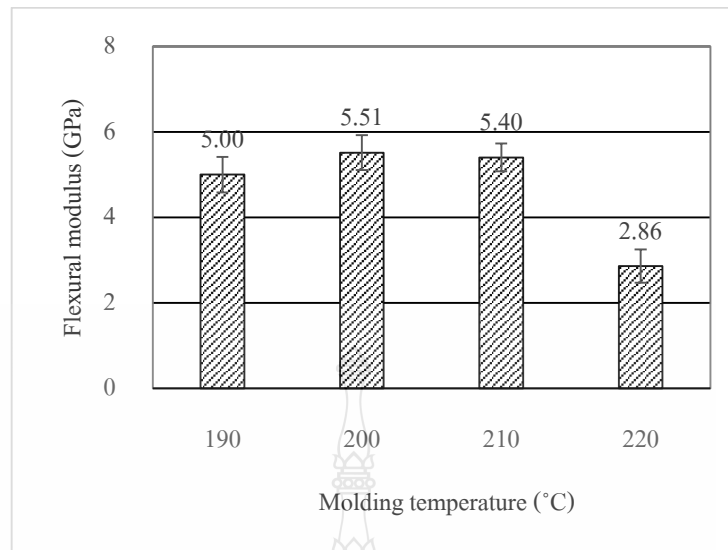
รูปที่ 4.6 อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูปต่อค่ามอดูลัสแรงดึง

#### 4.1.5 ผลการทดสอบแรงดัด (Flexural strength)

ผลการทดสอบแรงดัดจะประกอบไปด้วยค่าความแข็งแรงดัดและมอดูลัสแรงดัด ในรูปที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งแรงดัด พบว่าค่าความแข็งแรงดัดมีทิศทางไปในทำนองเดียวกันกับค่า ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงดึง คือค่าความแข็งแรงดัดจะเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิพูลทรวงขึ้น 200 องศาเซลเซียส และลดลงที่อุณหภูมิพูลทรวงขึ้น 210 องศาเซลเซียส เป็นต้น ไป ค่าความแข็งแรงดัดมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิพูลทรวงขึ้น 200 องศาเซลเซียส ประมาณ 69.27 MPa และในรูปที่ 4.8 แสดงค่ามอดูลัสแรงดัด พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่า ความแข็งแรงดัด ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสแรงดึง คือมีค่ามอดูลัสแรงดึงสูงสุดที่อุณหภูมิพูลทรวงขึ้น 200 องศาเซลเซียสคือ 5.51 GPa และเริ่มลดลงที่อุณหภูมิพูลทรวงขึ้น 210 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ผลที่เกิดขึ้นมีลักษณะเดียวกับค่าความแข็งแรงดึง โดยที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรซินสามารถเข้าไปแทรกซึมในเส้นใยได้ดี แต่ก็ส่งผลถึงการสลายตัวของเส้นใยไป สอดคล้องกับงานวิจัยของ Angelov I. [18]



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูปต่อค่าความแข็งแรงดัด



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของอุณหภูมิขึ้นรูปต่อค่ามอดูลัสแรงดัด

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Velde, K.V.D. [7] ได้ใช้เส้นใยลินินเสริมแรงในพอลิพรอพิลีน ด้วยกระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกพูลทูลูชั่น พบว่ามีสมบัติความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงดึง คือ 145 MPa และ 15.19 GPa ตามลำดับ เมื่อเทียบกับผลการทดลองที่ดีที่สุดของความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงคือ 118.13 MPa และ 3.76 GPa ตามลำดับ มีผลการทดลองที่แตกต่างกันถึง 19 % ของความแข็งแรงดึงและ 75% ของมอดูลัสแรงดึง เนื่องจากในงานวิจัยได้ใช้เส้นใยลินินที่มีความแข็งแรงสูงกว่าเส้นใยปอที่ใช้ในการทดลอง และในงานวิจัยได้ใช้เส้นใยลินิน 38 % ในการทดลองใช้เส้นใยปอเพียง 23.06 % จึงส่งผลให้ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแตกต่างกันมากนอกจากนี้ในงานวิจัยยังใช้การเตรียมเส้นใยแบบผสม (Comingle) ทำให้การแทรกซึมดีกว่าการทดลองทำให้สมบัติทางกลสูงกว่า

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Angelov, I. [18] ได้ใช้เส้นใยลินินเสริมแรงใน พอลิพรอพิลีนด้วยกระบวนการเทอร์โมพลาสติกพูลทูลูชั่นสัดส่วนของเส้นใยลินินคือ 30 % ซึ่งมีสมบัติความแข็งแรงดัดและมอดูลัสแรงดัดคือ 94.60 MPa และ 7.68 GPa ซึ่งผลความแข็งแรงดัดและมอดูลัสแรงดัดจากการทดลองคือ 69.27 MPa และ 5.51 GPa จากผลการทดลองนั้นต่ำกว่างานวิจัย 27 % ของความแข็งแรงดัดและ 28 % ของมอดูลัสแรงดัด เนื่องจากเส้นใยลินินมีความแข็งแรงสูงกว่าเส้นใยปอและสัดส่วนของงานวิจัยใช้ที่ 30 % ซึ่งมากกว่าดังนั้นความแข็งแรงดัดและมอดูลัสแรงดัดของการทดลองจึงต่ำกว่าและในงานวิจัยยังใช้ชุดอบในส่วนของการอุ่นเส้นใยที่แตกต่างอีกด้วย

เมื่อทำการเทียบกับงานวิจัยของ [16] ได้ใช้เส้นใยปอและเส้นใยแก้วในการเสริมแรงในพอลิเอสเทอร์ซึ่งมีสัดส่วนของเส้นใยแก้วตั้งแต่ 0 - 40 % และเส้นใยปอ 0 - 40 % แต่จะเลือกสัดส่วน

จากงานวิจัยที่ใช้เส้นใยปอ 20 % กับเส้นใยแก้ว 10 % เท่านั้นมาเปรียบเทียบเนื่องจากมีสัดส่วนใกล้เคียงกับการทดลองซึ่งใช้เส้นใยปอ 23.06 % และเส้นใยแก้ว 9.01 % จากผลในงานวิจัยความแข็งแรงดึงคือ 43.8 MPa เมื่อเทียบกับผลความแข็งแรงดึงจากการทดลองคือ 118.13 MPa ผลจากการทดลองมีความแข็งแรงสูงกว่า 63 % เนื่องจากวัสดุในงานวิจัยใช้เป็นพอลิเอสเตอร์ซึ่งมีความแข็งแรงไม่เท่ากัน และยังใช้ความเร็วดึงในการทดสอบที่แตกต่าง นอกจากนี้วัสดุที่ใช้เสริมแรงเส้นใยปอและเส้นใยแก้วยังมีขนาดไม่เท่ากับที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นจึงส่งผลถึงความแตกต่างของสมบัติความแข็งแรงดึง

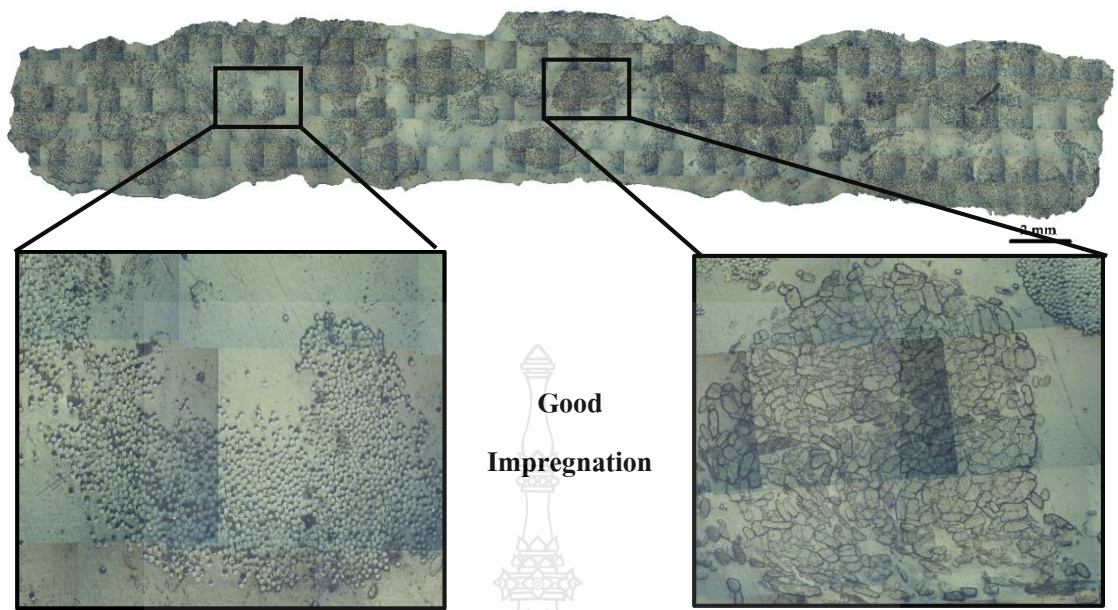
## 4.2 อิทธิพลของความเร็วในการพูลทรวงขึ้น

ผลการทดลองในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ ที่ได้กำหนดอุณหภูมิในการขึ้นรูป 190, 200, 210 และ 220 องศาเซลเซียสพบว่าที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 200 องศาเซลเซียส แสดงสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงได้เลือกสภาวะการขึ้นรูปที่ระดับอุณหภูมินี้ มาทำการทดลองหาอิทธิพลของความเร็วในการพูลทรวงขึ้น โดยจะกำหนดให้มีความเร็ว 40, 100 และ 140 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทดสอบดังนี้

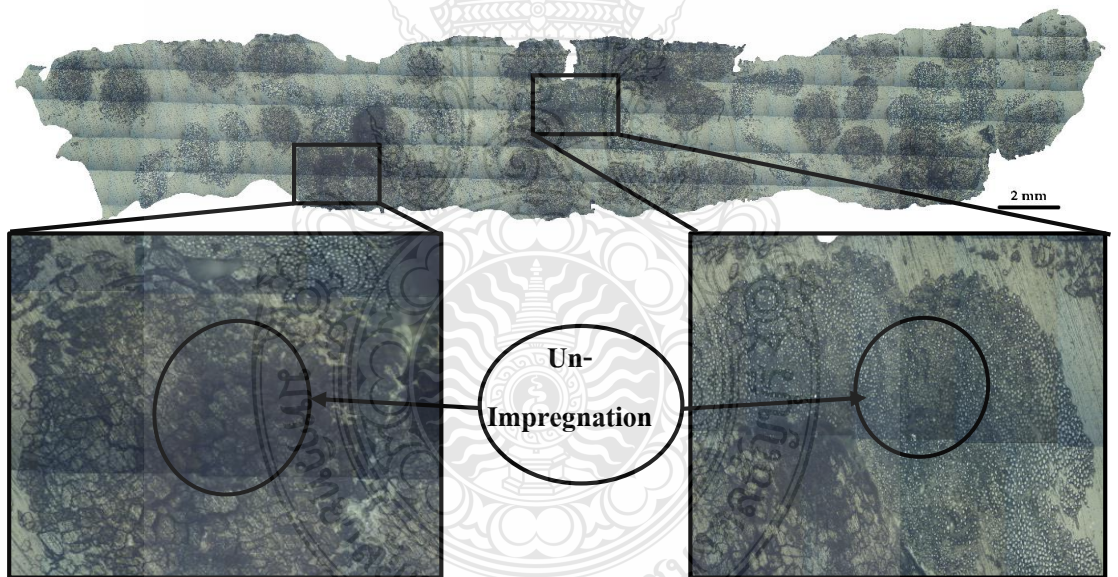
### 4.2.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure)

ผลการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุขึ้นรูปด้วยความเร็วของการพูลทรวงขึ้น 40-140 มิลลิเมตรต่อนาที ถูกแสดงในรูปที่ 4.9 จากรูปเมื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างภาคตัดขวางของวัสดุคอมโพสิต จะพบว่าพื้นผิวโดยรวมของวัสดุที่ จะประกอบไปด้วยเส้นใยแก้วที่มีลักษณะเป็นเส้นกลมเล็ก ๆ และเส้นใยปอมีลักษณะเป็นเส้นที่ใหญ่กว่าเส้นใยแก้ว ทั้ง 2 เส้นใย แทรกตัวอยู่บนวัสดุเนื้อพื้นพอลิพรอพิลีน จากรูปที่ 4.9 a) พบว่าที่ความเร็วในการพูลทรวงขึ้น 40 มิลลิเมตรต่อนาที มีการแทรกซึมของเรซินที่ดี จากรูปที่ 4.9 b) พบว่าความเร็วในการพูลทรวงขึ้น 100 มิลลิเมตรต่อนาที เริ่มมีพื้นที่ส่วนสีดำในเส้นใยมากขึ้น นั้นหมายความว่า การแทรกซึมของเรซินในเส้นใยต่ำลง จากรูปที่ 4.10 a) จะเห็นได้ชัดเจนว่าพื้นที่สีดำในเส้นใยเพิ่มขึ้นเยอะมาก และยังมีส่วนของฟองอากาศที่เพิ่มเข้ามาอีก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความเร็วที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการแทรกซึมของเรซินที่ต่ำลง เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีเวลาอยู่ในคายน้อยลง การแทรกซึมของเรซินจึงต่ำ



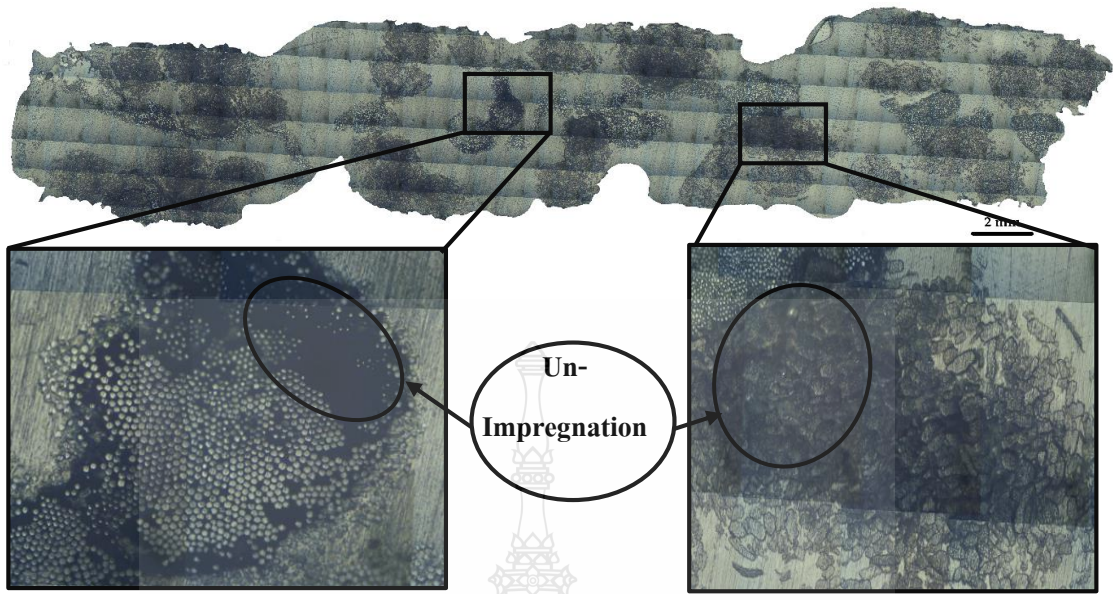


a) ขึ้นรูปที่ความเร็วพูลทรวงขึ้น 40 มิลลิเมตรต่อนาที



b) ขึ้นรูปที่ความเร็วพูลทรวงขึ้น 100 มิลลิเมตรต่อนาที

รูปที่ 4.9 ภาพโครงสร้างภาคตัดขวางที่มีอิทธิพลของความเร็วในการพูลทรวงขึ้น



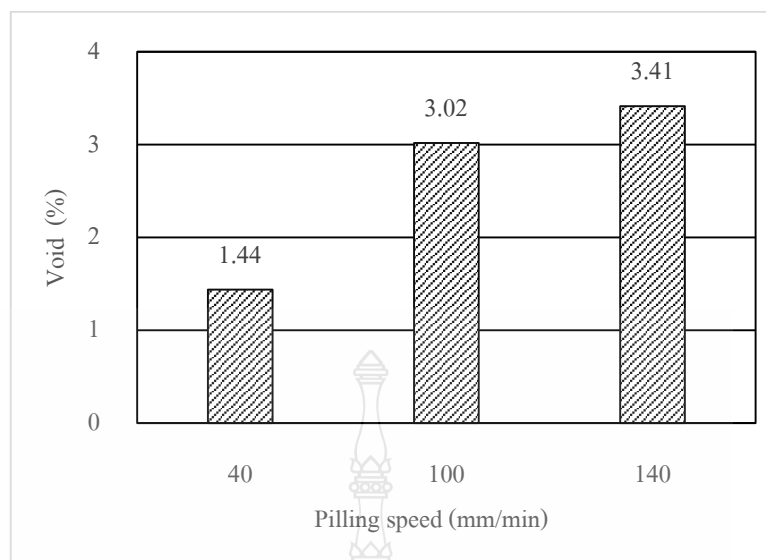
a) ชิ้นรูปที่ความเร็วพุลทรวงขึ้น 140 มิลลิเมตรต่อนาที

รูปที่ 4.10 ภาพโครงสร้างภาคตัดขวางที่มีอิทธิพลของความเร็วในการพุลทรวงขึ้น (ต่อ)

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟองอากาศ (Void content)

จากการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุที่ใช้ความเร็วของการพุลทรวงขึ้นที่แตกต่างกัน เมื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณฟองอากาศดังรูปที่ 4.11 พบว่าปริมาณฟองอากาศเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่งที่ความเร็วที่ใช้ที่มีฟองอากาศต่ำที่สุดคือ 40 มิลลิเมตรต่อนาที คือ 1.44 % ฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นเกิดขึ้น เนื่องจาก มีเวลาให้เรซินเข้าไปแทรกซึมในเส้นใยน้อยลง ฟองอากาศที่อยู่ในเส้นใยจึงไม่ถูกแทนที่ด้วยเรซิน ดังนั้นฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความแข็งแรงลดลง ซึ่งจากผลการทดลองของ Ling Liu [19] ฟองอากาศภายในชิ้นงานเพียงแค่ 3 % ส่งผลให้สมบัติทางกลลดลงถึง 20 %

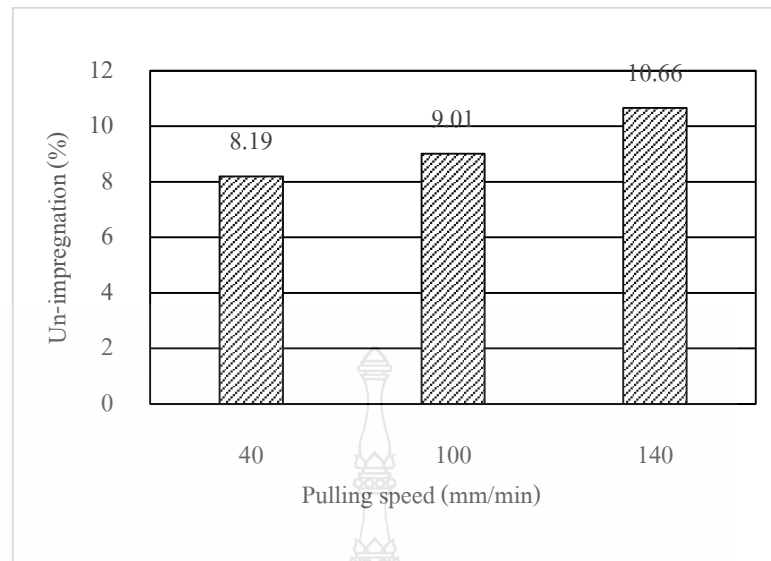




รูปที่ 4.11 อิทธิพลของความเร็วดึงขึ้นรูปต่อปริมาณฟองอากาศ

#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการแทรกซึมของเรซินในเส้นใย (Impregnation)

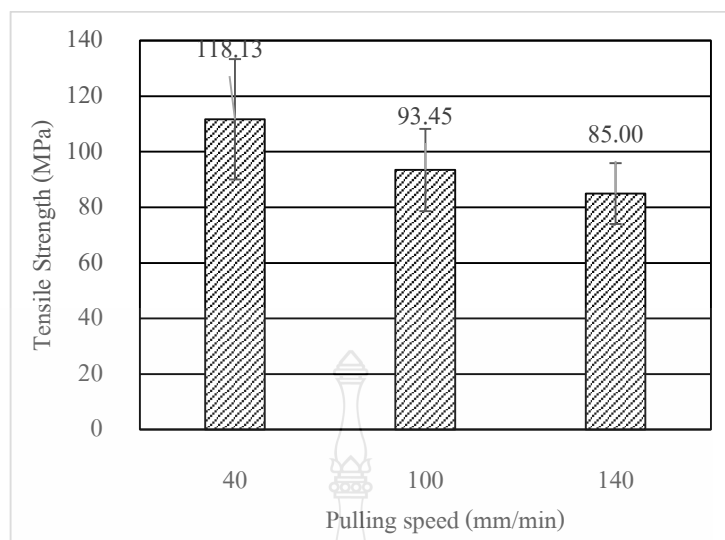
จากการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุที่ใช้ความเร็วของการพูลทรวงู้นที่แตกต่างกัน เมื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณการแทรกซึมของเรซินในเส้นใยดังรูปที่ 4.12 พบว่าปริมาณการแทรกซึมของเรซินในเส้นใยและเส้นใยปอมีแนวโน้มแย่งลงตามการเพิ่มของความเร็วของการพูลทรวงู้น ที่ความเร็วของการพูลทรวงู้น 40 มิลลิเมตรต่ออนาที มีการไม่แทรกซึมของเรซินต่ำที่สุดคือ 8.19 % เนื่องความเร็วที่สูงทำให้เส้นใยอยู่ในแม่พิมพ์สั้นลง จึงทำให้เรซินเข้าไปแทรกซึมในเส้นใยได้น้อยลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoshitaka Tanaka [20]



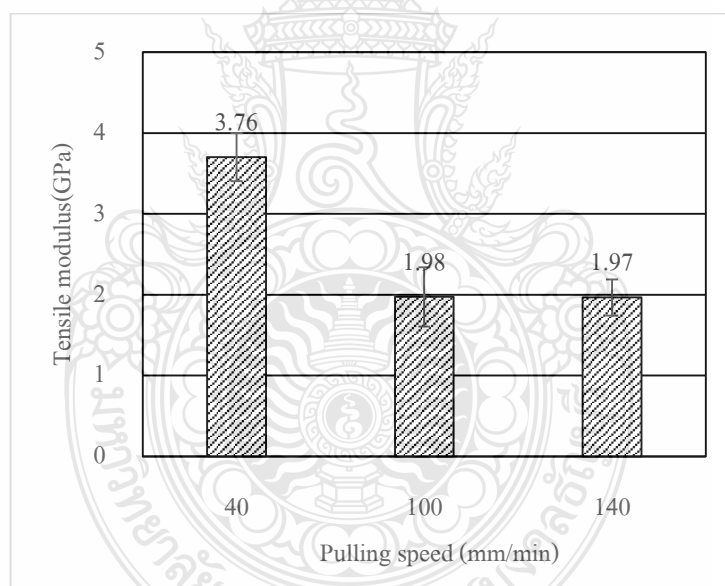
รูปที่ 4.12 อิทธิพลของความเร็วดึงขึ้นรูปต่อปริมาณการแทรกซึมของเรซินในเส้นใย

#### 4.2.4 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile strength)

ผลการทดลองของการทดสอบแรงดึงที่ใช้ความเร็วของการพูลทुरुชั้นที่แตกต่างกันถูกแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าความแข็งแรงดึงลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเร็ว ที่การทดลองที่ความเร็วต่ำที่สุดหรือ 40 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 118.13 MPa และในรูปที่ 4.14 แสดงถึงมอดูลัสแรงดึงของความเร็วของการพูลทुरुชั้นที่แตกต่างกัน พบว่ามอดูลัสแรงดึงที่สูงสุดด้วยการใช้ความเร็วต่ำที่สุดหรือ 40 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าเท่ากับ 3.76 GPa ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงที่ลดลง เนื่องจากเวลาที่เรซินเข้าไปแทรกซึมในเส้นใยน้อยลง จึงส่งผลให้การแทรกซึมของเส้นใยไม่ดี และทำให้สมบัติความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงต่ำลง ซึ่งจากผลการทดลองสอดคล้องกับผลการแทรกซึมของเรซินในเส้นใยและนอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoshitaka Tanaka [20] และ Angelov I. [18]



รูปที่ 4.13 อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูปต่อค่าความแข็งแรงดึง

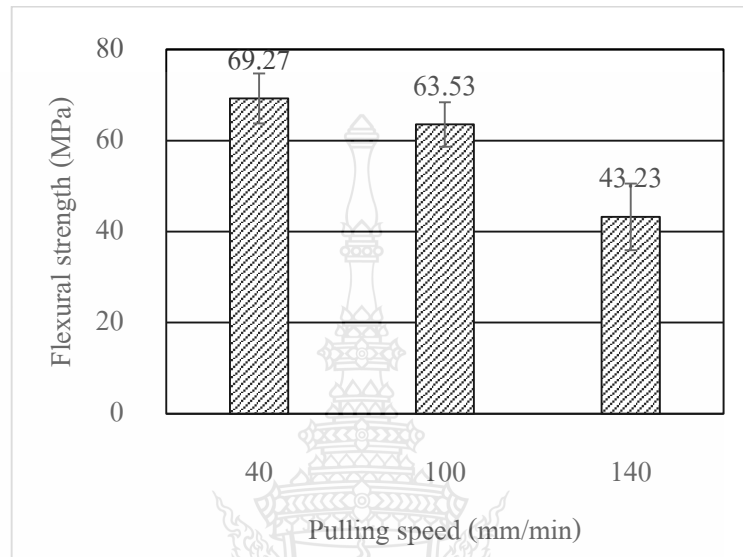


รูปที่ 4.14 อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูปต่อค่ามอดูลัสแรงดึง

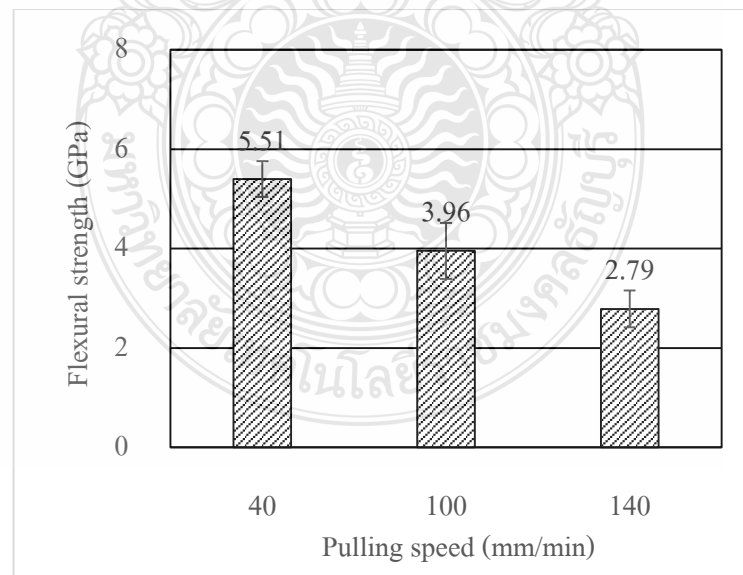
#### 4.2.5 ผลการทดสอบแรงคด (Flexural strength)

ผลการทดสอบแรงคดถูกแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ของค่าความแข็งแรงคดและมอดูลัสแรงคดตามลำดับ พบว่าค่าความแข็งแรงคดและมอดูลัสแรงคดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วดึงที่เพิ่มขึ้นมีลักษณะการลดลงเหมือนค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงดึง ซึ่งความเร็วต่ำ

ที่สุดคือ 40 มิลลิเมตรต่อนาที นั้นมีค่าความแข็งแรงดัดและมอดูลัสแรงดัดสูงที่สุดคือ 69.27 MPa และ 5.40 GPa ตามลำดับ ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีเวลาให้เรซินไปแทรกซึมในเส้นใยได้น้อยลงในลักษณะเดียวกันกับความแข็งแรงดัดและมอดูลัสแรงดัด [8]



รูปที่ 4.15 อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูปต่อค่าความแข็งแรงดัด



รูปที่ 4.16 อิทธิพลของความเร็วในการดึงขึ้นรูปต่อค่ามอดูลัสแรงดัด

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การดำเนินงานของวิทยานิพนธ์เรื่อง การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรวงั้น การดำเนินงานครั้งนี้ได้เกิดปัญหาหลายประการและมีรายละเอียดสรุปผลการดำเนินงาน ปัญหาอุปสรรคจากการดำเนินงาน โครงการวิทยานิพนธ์นี้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรวงั้น ทุกสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปสามารถขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตได้เป็นผลสำเร็จ และได้วัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 25 x 3 มิลลิเมตร และมีความยาวต่อเนื่อง 1.5 เมตร ในการศึกษาของตัวแปรในการขึ้นรูปจะประกอบไปด้วยอุณหภูมิที่พูลทรวงั้น และความเร็วในการพูลทรวงั้น ซึ่งทั้ง 2 ตัวแปรนี้มีผลทำให้สมบัติทางกลของวัสดุเปลี่ยนไป

5.1.1 สภาวะการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบพูลทรวงั้น

##### 1) อิทธิพลของอุณหภูมิ

จากผลการทดลองอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป ส่งผลถึงการแทรกซึมของเรซินในเส้นใย และปริมาณฟองอากาศในชิ้นงาน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การแทรกซึมของเรซินในเส้นใยดีขึ้น เนื่องจากความหนืดของเรซินลดลงที่อุณหภูมิสูง และปริมาณฟองอากาศเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากความชื้นในเส้นใยปอถูกแรงให้ระเหยออกมาจากเส้นใย ดังนั้นอุณหภูมิพูลทรวงั้นที่ 200 องศาเซลเซียส การไม่แทรกซึมของเรซินในเส้นใย คือ 8.19 % และปริมาณฟองอากาศ คือ 1.44 % ซึ่งที่เหมาะสมที่สุดหรือต่ำที่สุด

##### 2) อิทธิพลของความเร็วดึง

จากผลการทดลองอิทธิพลของความเร็วดึงที่ใช้ในการขึ้นรูป ส่งผลถึงการแทรกซึมของเรซินในเส้นใย และปริมาณฟองอากาศในชิ้นงาน ความเร็วพูลทรวงั้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การแทรกซึมของเรซินในเส้นใยลดลง เนื่องจากเวลาที่เรซินจะเข้าไปแทรกซึมในเส้นใยน้อยลง และปริมาณ

ฟองอากาศจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วดึงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีเวลาให้เรซินเข้าไปแทนที่ฟองอากาศในเส้นใยน้อยลง ความเร็วดึงที่ดีที่สุดคือ 40 มิลลิเมตร/นาที่ หรือความเร็วต่ำที่สุด

### 5.1.2 สมบัติทางกล

#### 1) อิทธิพลของอุณหภูมิ

จากผลการทดลองอิทธิพลของอุณหภูมิที่ 190 – 220 องศาเซลเซียส นั้นส่งผลทำให้สมบัติทางกลได้แก่ ความแข็งแรงดึง, โมดูลัสแรงดึง, ความแข็งแรงดัดและโมดูลัสแรงดัดเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 200 และเริ่มลดลงที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป ซึ่งปัจจัยที่ทำให้สมบัติทางกลเพิ่มขึ้นและลดลงได้แก่ การแทรกซึมของเรซินในเส้นใย ฟองอากาศ การสลายตัวของเส้นใย ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของเรซินต่ำและเข้าไปแทรกซึมในเส้นใยได้ง่ายขึ้นสมบัติทางกลจึงเพิ่มขึ้น ฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติทางกลต่ำลง และอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้เส้นใยปอเริ่มสลายตัวเนื่องจากความร้อน ดังนั้นที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จึงเป็นอุณหภูมิที่มีสมบัติทางกลที่ดีที่สุดคือความแข็งแรงดึง 118.13 MPa, โมดูลัสแรงดึง 3.76 GPa, ความแข็งแรงดัด 69.27 MPa และโมดูลัสแรงดัด 5.51 GPa

#### 2) อิทธิพลของความเร็วดึง

ดังนั้นอุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียส จึงถูกนำมาศึกษาในส่วนของตัวแปรความเร็วดึงขึ้นรูปที่ 40 – 140 มิลลิเมตร/นาที่ ซึ่งปัจจัยที่ทำให้สมบัติทางกลเพิ่มขึ้นและลดลงได้แก่ การแทรกซึมของเรซินในเส้นใย และฟองอากาศ ซึ่งเมื่อความเร็วในการดึงขึ้นรูปเพิ่มขึ้นสมบัติทางกลจะลดลงตามเนื่องจากวัสดุคอมโพสิตถูกดึงขึ้นรูปเร็วขึ้น จึงส่งผลให้วัสดุอยู่ในแม่พิมพ์ได้น้อยลงจึงมีเวลาให้เรซินเข้าไปแทรกซึมในเส้นใยได้น้อยลงสมบัติทางกลจึงต่ำลง ในทำนองเดียวกันฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติทางกลต่ำลง ดังนั้นความเร็วในการดึงขึ้นรูปที่ 40 มิลลิเมตร/นาที่ ส่งผลให้สมบัติทางกลสูงที่สุด

ผลการทดลองศึกษาการวิจัยนี้ จะทราบถึงกรอบสภาวะขึ้นรูปของวัสดุคอมโพสิตแบบความยาวต่อเนื่องจากเส้นใยพอลิพรอพิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ และสามารถนำตัวแปรที่มีผลต่อสภาวะการขึ้นรูปไปใช้เพื่อเป็นแนวทางกำหนดสภาวะการขึ้นรูปในกระบวนการเทอร์โมพลาสติกพูลทูลทูล

## 5.2 ปัญหาและอุปสรรค

5.2.1 การเตรียมเส้นใยจากม้วนใหญ่ที่ซื้อมาจากบริษัทให้เข้ามาอยู่ในแกนเส้นใยสำหรับการขึ้นรูปต้องใช้เวลาในการเตรียม

5.2.2 การจัดเรียงเส้นใยในชั้นวางเส้นใยค่อนข้างใช้เวลานานและไม่สามารถควบคุมความ  
ชื้นได้เนื่องจากเป็นระบบเปิด

5.2.3 ชุดดิ่งมีความยาวค่อนข้างจำกัดซึ่งสามารถขึ้นรูปวัสดุได้ในความยาว 1.5 – 2 เมตร  
เท่านั้น

5.4.3 ยังไม่มีชุดสำหรับทำการหล่อเย็นเพื่อให้วัสดุแข็งตัวหลังจากออกจากแม่พิมพ์ร้อน

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เพิ่มชุดหล่อเย็นเพื่อให้วัสดุที่ออกจากแม่พิมพ์มีการตัดงอเล็กน้อยลงซึ่งจากการการเกิด  
ผลึกของพอลิเมอร์

5.3.2 เปลี่ยนชุดดิ่งให้สามารถดิ่งขึ้นรูปด้วยความยาวที่ต่อเนื่อง

5.3.3 ควรศึกษาสัดส่วนของเส้นใยในอัตราที่แตกต่างกัน



## บรรณานุกรม

- [1] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, ศิริชัย ต่อสกุล, นรพร กลั่นประจำ และอนินท์ มีมนต์. (2553). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ:บริษัท พงษ์วรินทร์การพิมพ์ จำกัด.
- [2] Adrian, P.P., & Gheorghe, B.M. (2010). **Manufacturing Process and Applications of Composite Materials, Fascicle of Management and Technological Engineering.** Volume IX (XIX).
- [3] สิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2555). การพัฒนาสมการออกแบบชิ้นส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชั้นหน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัดที่มีจุดรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่น. รายงานการวิจัยมหาวิทยาลัยสุรนารี.
- [4] หวังแก้ว บุญสวน, สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และสงวน วงษ์ชวลิตกุล. (2552). พฤติกรรม และคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดชั้นที่ผลิตในประเทศไทย ภายใต้การอัด การเชื่อม และการตัด. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีนครราชสีมา เล่มที่ 4. (น. 1625-1632).
- [5] Satyanarayana, K. G., Arizaga, G. C., & Wypych, F. (2009). **Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers - An overview.** Progress in Polymer Science 34. (pp 982–1021).
- [6] Herrera-Franco, P. J., & Valadez-Gonzalez, A. (2004). **Mechanical properties of continuous natural fibre-reinforced polymer composite.** Composites : Part A 35. (pp 339-345).
- [7] Velde, K.V.D., & Kiekens, P. (2001). **Thermoplastic pultrusion of natural fibre reinforced composites.** Composite Structures 54. (pp.355-360).
- [8] Memon, A., & Nakai, A. (2013). **Mechanical Properties of Jute Spun Yarn/PLA Tubular Braided Composite by Pultrusion Molding.** Energy Procedia (Special issue; 10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium).
- [9] **Jute fiber.** สืบค้นจาก <http://www.ptj.com.pk/Web-2014/12-2014/General-Article-AVM-Article.html> (10 สิงหาคม 2560).
- [10] **Jute fiber information.** สืบค้นจาก <http://www.mnogolok.info/ewrajphoto-jute-fiber.htm> (10 สิงหาคม 2560)

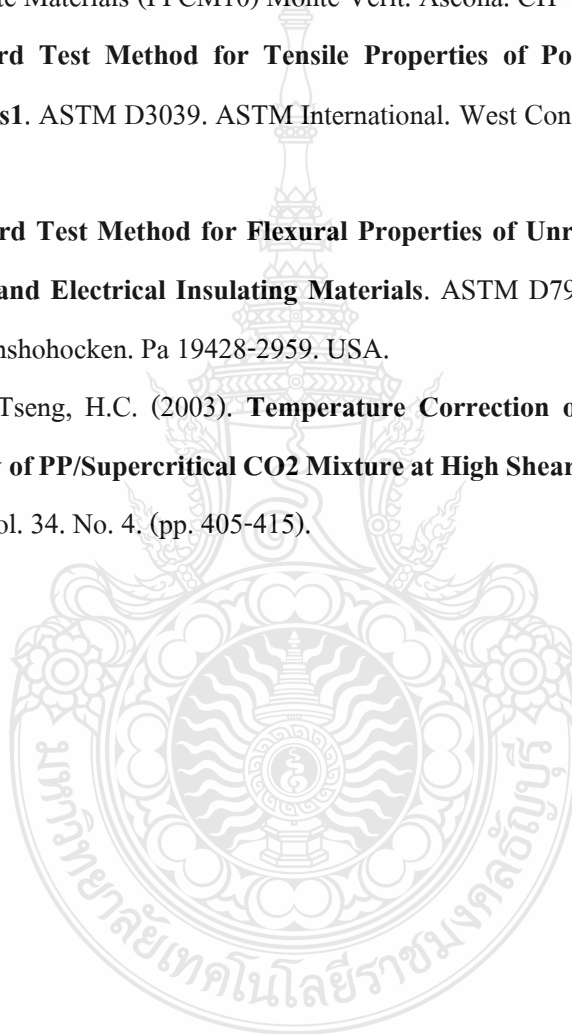


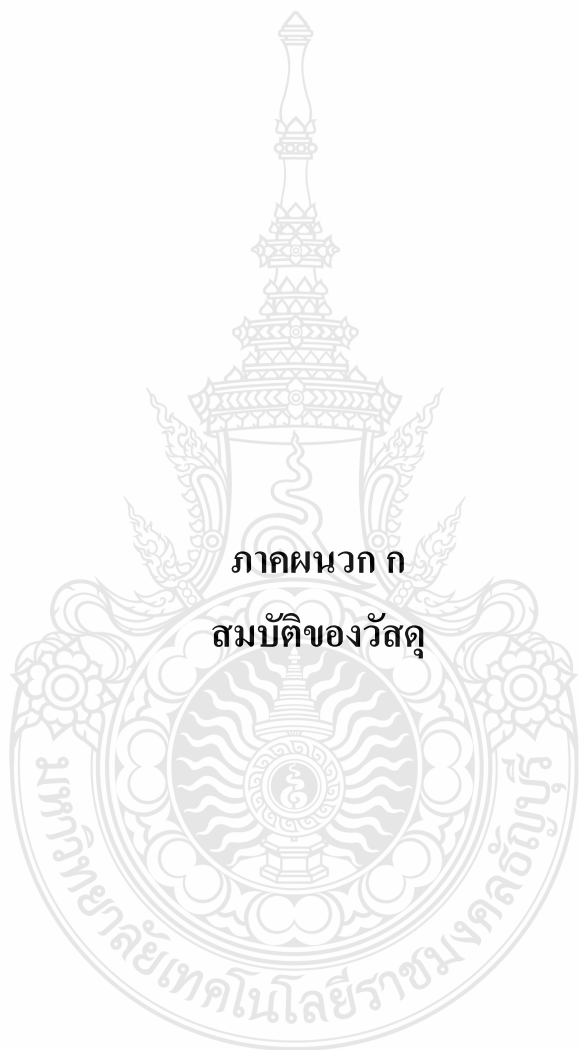
## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] เส้นใยปอกระเจา. สืบค้นจาก <http://www.thaitextile.org/index.php/blog/2016/08/59plant5> (10 สิงหาคม 2560)
- [12] อภิชาติ สนธิสมบัติ. เส้นใยสมรรถนะสูง. (2550). เอกสารประกอบการสอนวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [13] Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2005). **Natural fibers, Biopolymers, And Biocomposites**. Taylor & Francis Group. LLC
- [14] ชุพาพร รักสกุลพิวัฒน์ และวิมลลักษณ์ สุตะพันธ์. (2553). **พอลิพรพิลีนคอมโพสิตจากเส้นใย ป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อน**. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2553.
- [15] Memon, A., & Nakai, A. (2013). **Fabrication and Mechanical Properties of Jute Spun Yarn/PLA Unidirection Composite by Compression Molding**. Energy Procedia 34. (pp. 830 - 838).
- [16] Bindal, A., Singh, S., Batra, N.K., & Khanna, R. (2013). **Development of Glass/Jute Fibers Reinforced Polyester Composite**. Hindawi Publishing Corporation Indian Journal of Materials Science Volume 2013, Article ID 675264, (pp. 6).
- [17] Zamri, M.H., Akil, H.M., Bakar, A.A., Arifin, Z., Ishak, M., & Cheng, L.W. (2011). **Effect of water absorption on pultruded jute/glass fiber-reinforced unsaturated polyester hybrid composites**. Journal of Composite Materials.
- [18] Angelov, I., Wiedmer, S., Evstatiev, M., Friedrich, K., & Mennig, G. (2007). **Pultrusion of a flax/polypropylene yarn**. Composites: Part A 38 (pp. 1431–1438).
- [19] Liu, L., Zhang, B.M., Wang, D.F., & Wu, Z.J. (2006) **Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates**. Composite Structures 73. (pp. 303–309).

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] Tanaka, Y., Torun, A.R., Lebel, L.L., Ohtani, A., & Nakai, A. (2010). **Development of pultrusion system for continuous fiber reinforced thermoplastic composite tube with braiding technique.** The 10th International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM10) Monte Verit. Ascona. CH – July 11-15, 2010.
- [21] ASTM. **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials1.** ASTM D3039. ASTM International. West Conshohocken. Pa 19428-2959. USA.
- [22] ASTM. **Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.** ASTM D790-10. ASTM International. West Conshohocken. Pa 19428-2959. USA.
- [23] Lan, H.Y., & Tseng, H.C. (2003). **Temperature Correction on Shear Heating for the Viscosity of PP/Supercritical CO<sub>2</sub> Mixture at High Shear Rates.** J. Chin. Inst. Chem. Engrs. Vol. 34. No. 4. (pp. 405-415).





ภาคผนวก ก

สมบัติของวัสดุ



**Praditkorn Co., Ltd.**

**บริษัท ประดิษฐ์กรรม จำกัด**

276-8 Suapa Road, Pomprab, Bangkok 10100  
Tel:+66(0)-2225-1122-6, Fax:+66(0)-2225-6655



### Product Specification Sheet

Date	Customer	Our Ref:
17 Oct 17	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์	171016-01

Yarn Type Name	Denier	Strength	Tenacity	Elongation	Number Of Filament
1200 D PPMF	1140 - 1260	≥ 8.40 kg.	≥ 7.00 gpd.	10 - 25	148

Approved By

Paitoon Kommueang  
Quality Control Department

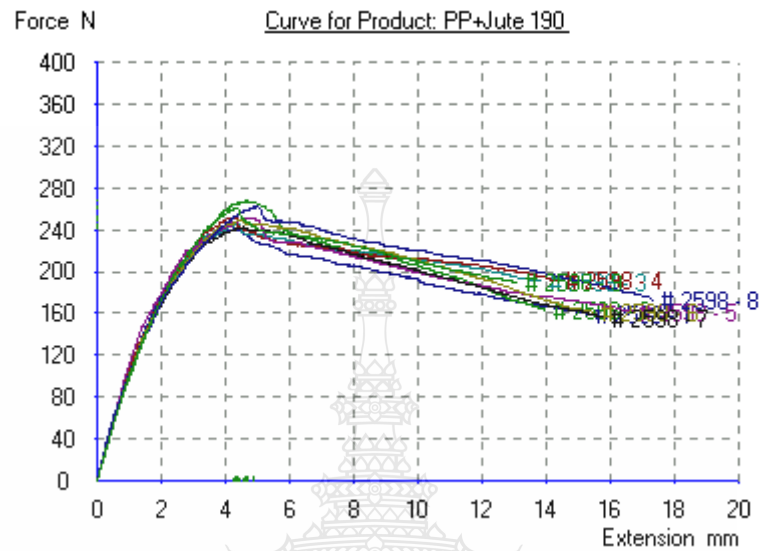


ภาคผนวก ข

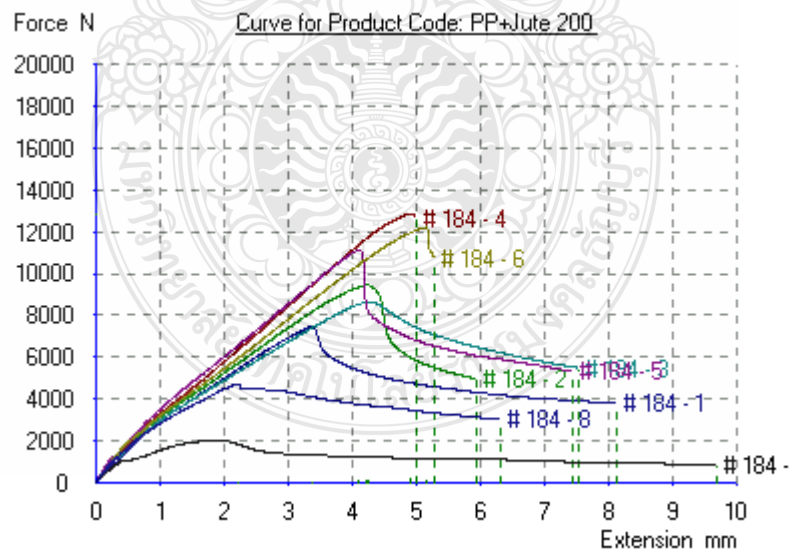
ผลการทดลองที่ได้จากเครื่องทดสอบและภาพโครงสร้างระดับจุลภาคที่ใช้  
ในการวิเคราะห์



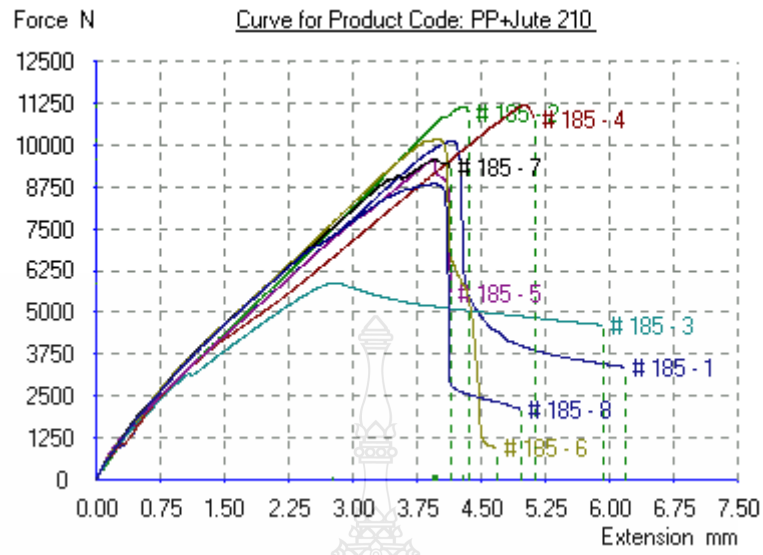
## ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงตัดจากเครื่องทดสอบ



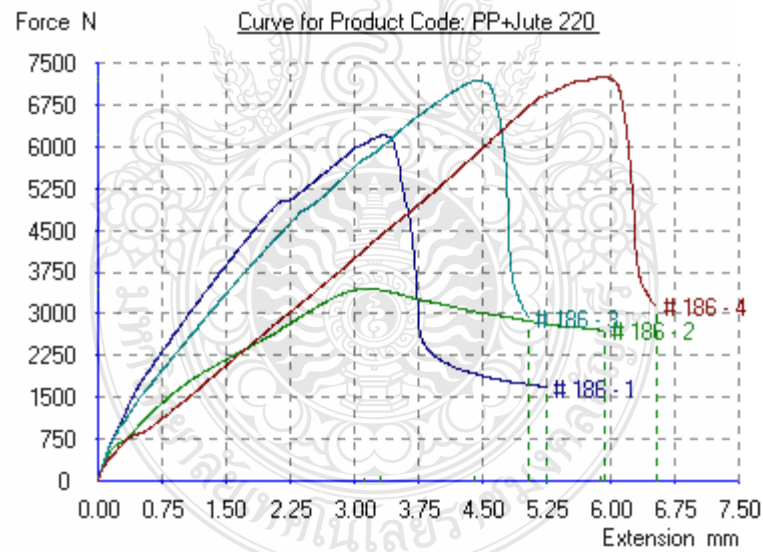
รูปที่ ข-1 กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิขึ้นรูป 190 °C



รูปที่ ข-2 กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิขึ้นรูป 200 °C

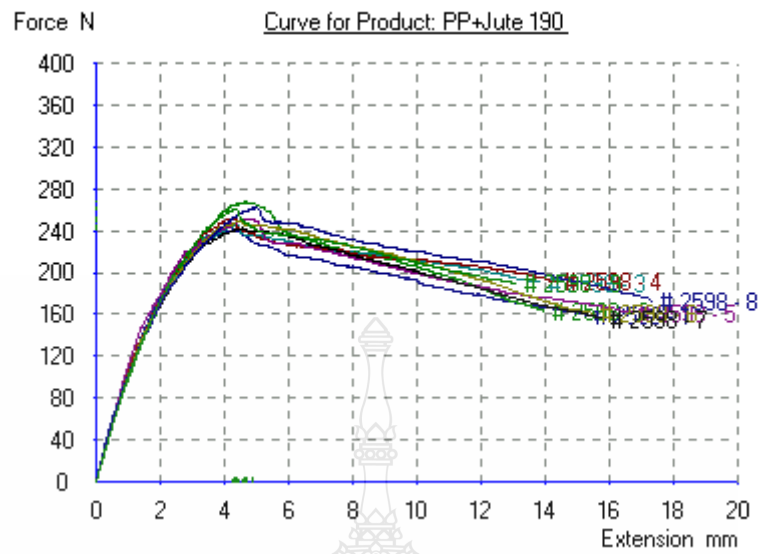


รูปที่ ข-3 กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิขึ้นรูป 210 °C

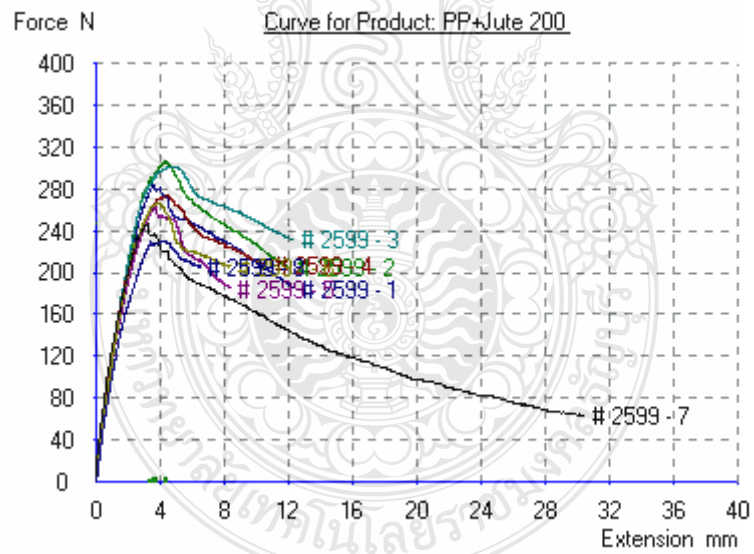


รูปที่ ข-4 กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิขึ้นรูป 220 °C

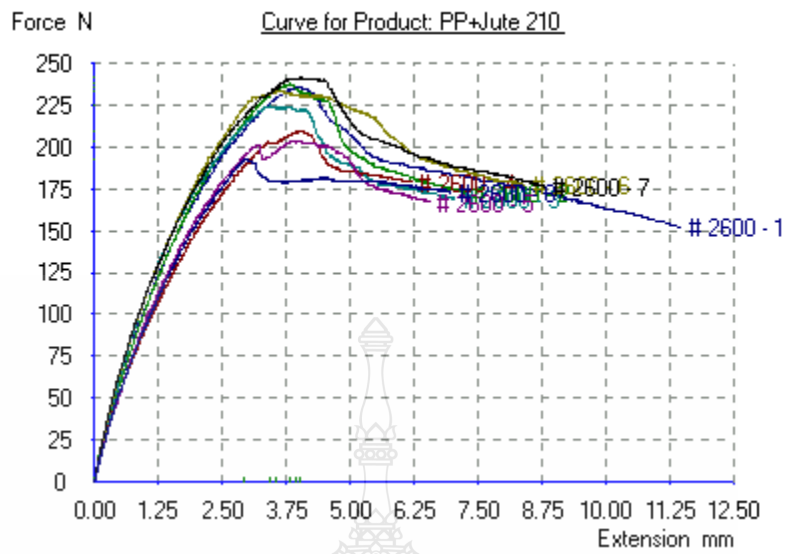




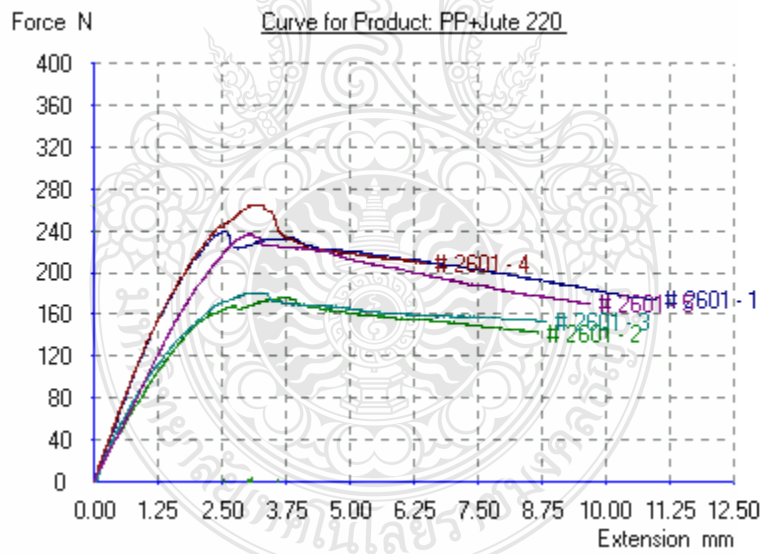
รูปที่ ข-5 กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดัดที่อุณหภูมิขึ้นรูป 190 °C



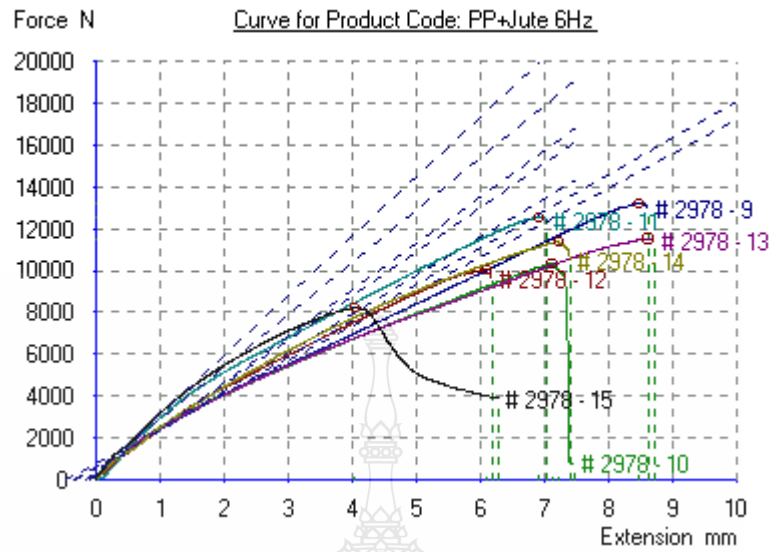
รูปที่ ข-6 กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดัดที่อุณหภูมิขึ้นรูป 200 °C



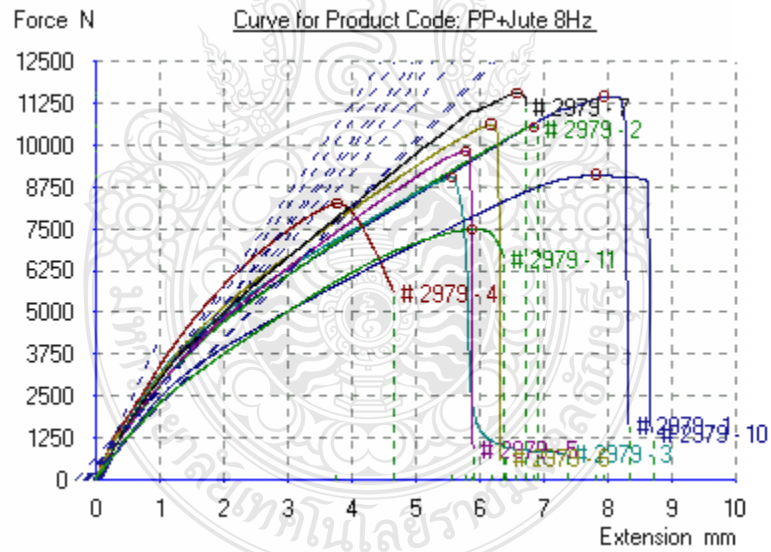
รูปที่ ข-7 กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดัดที่อุณหภูมิขึ้นรูป 210 °C



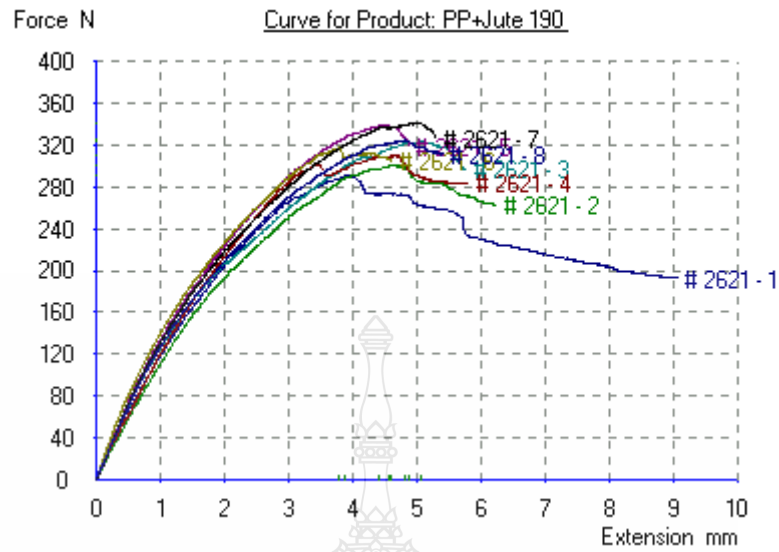
รูปที่ ข-8 กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดัดที่อุณหภูมิขึ้นรูป 220 °C



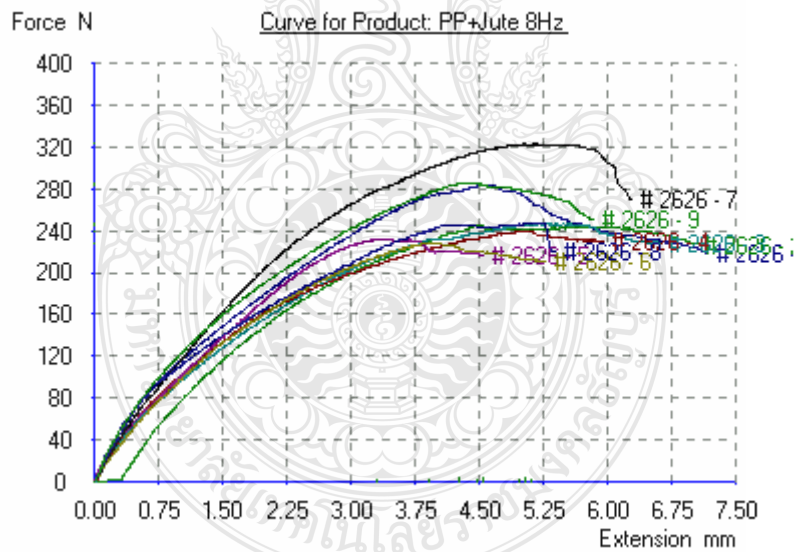
รูปที่ ข-9 กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงที่ความเร็วดึง 100 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ ข-10 กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงที่ความเร็วดึง 140 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ ข-11 กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดัดที่ความเร็วดึง 100 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ ข-12 กราฟที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดัดที่ความเร็วดึง 140 มิลลิเมตร/นาที

ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณฟองอากาศ



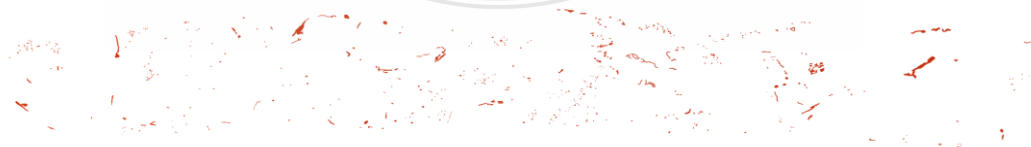
รูปที่ ข-13 ภาพ โครงสร้างภาคตัดขวางที่อุณหภูมิพูลทรวงขึ้น 190 องศาเซลเซียส



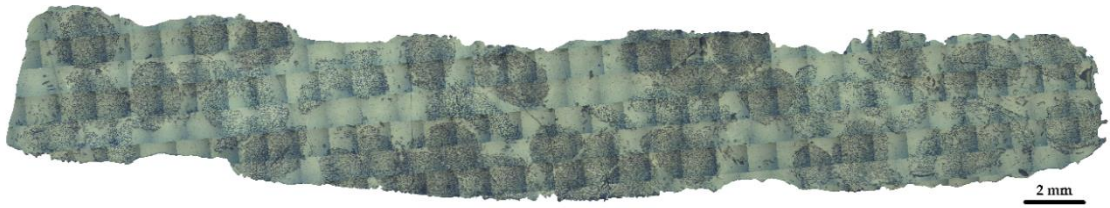
รูปที่ ข-14 ภาพพื้นที่ฟองอากาศของวัสดุอุณหภูมิพูลทรวงขึ้น 190 องศาเซลเซียส



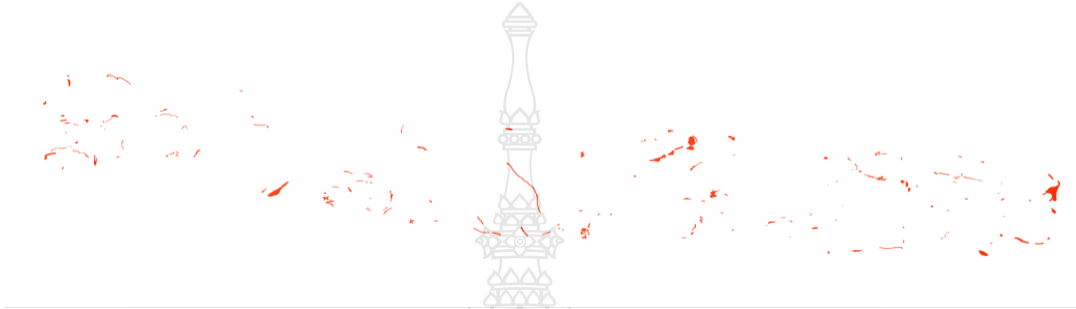
รูปที่ ข-15 ภาพ โครงสร้างภาคตัดขวางที่อุณหภูมิพูลทรวงขึ้น 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข-16 ภาพพื้นที่ฟองอากาศของวัสดุอุณหภูมิพูลทรวงขึ้น 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข-17 ภาพ โครงสร้างภาคตัดขวางที่อุณภูมิพลทรูชั้น 210 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข-18 ภาพพื้นที่ฟองอากาศของวัสดุอุณภูมิพลทรูชั้น 210 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข-19 ภาพ โครงสร้างภาคตัดขวางที่อุณภูมิพลทรูชั้น 220 องศาเซลเซียส

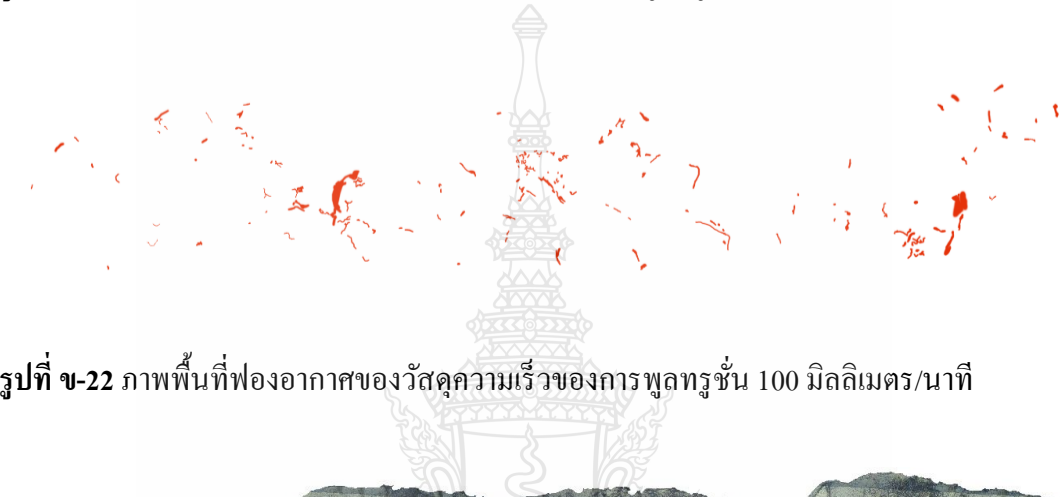


รูปที่ ข-20 ภาพพื้นที่ฟองอากาศของวัสดุอุณภูมิพลทรูชั้น 220 องศาเซลเซียส





รูปที่ ข-21 ภาพ โครงสร้างภาคตัดขวางที่ความเร็วของการพุดทรวงั้น 100 มิลลิเมตร/นาที่



รูปที่ ข-22 ภาพพื้นที่ฟองอากาศของวัสดุความเร็วของการพุดทรวงั้น 100 มิลลิเมตร/นาที่

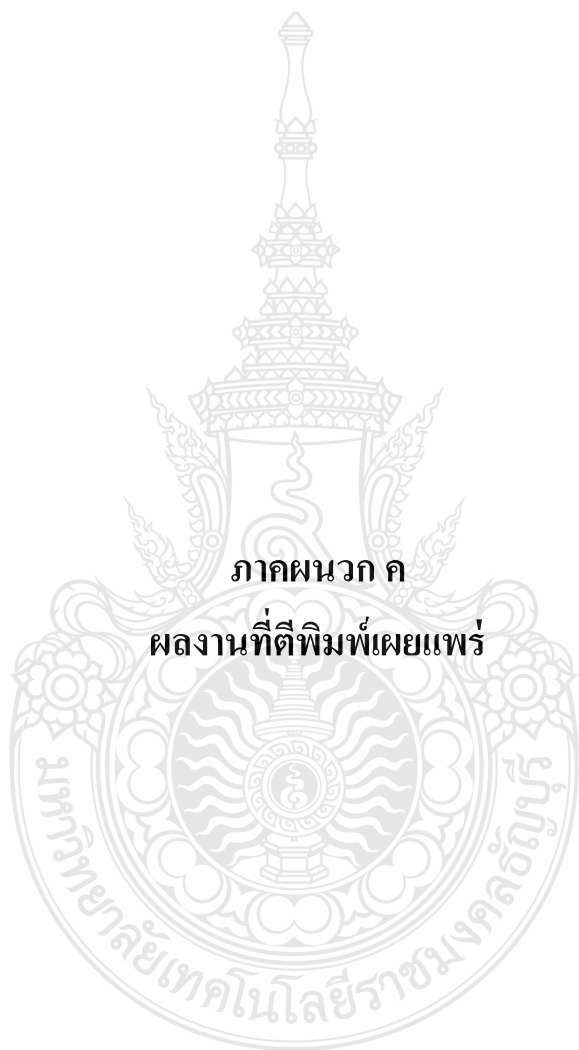


รูปที่ ข-23 ภาพ โครงสร้างภาคตัดขวางที่ความเร็วของการพุดทรวงั้น 140 มิลลิเมตร/นาที่



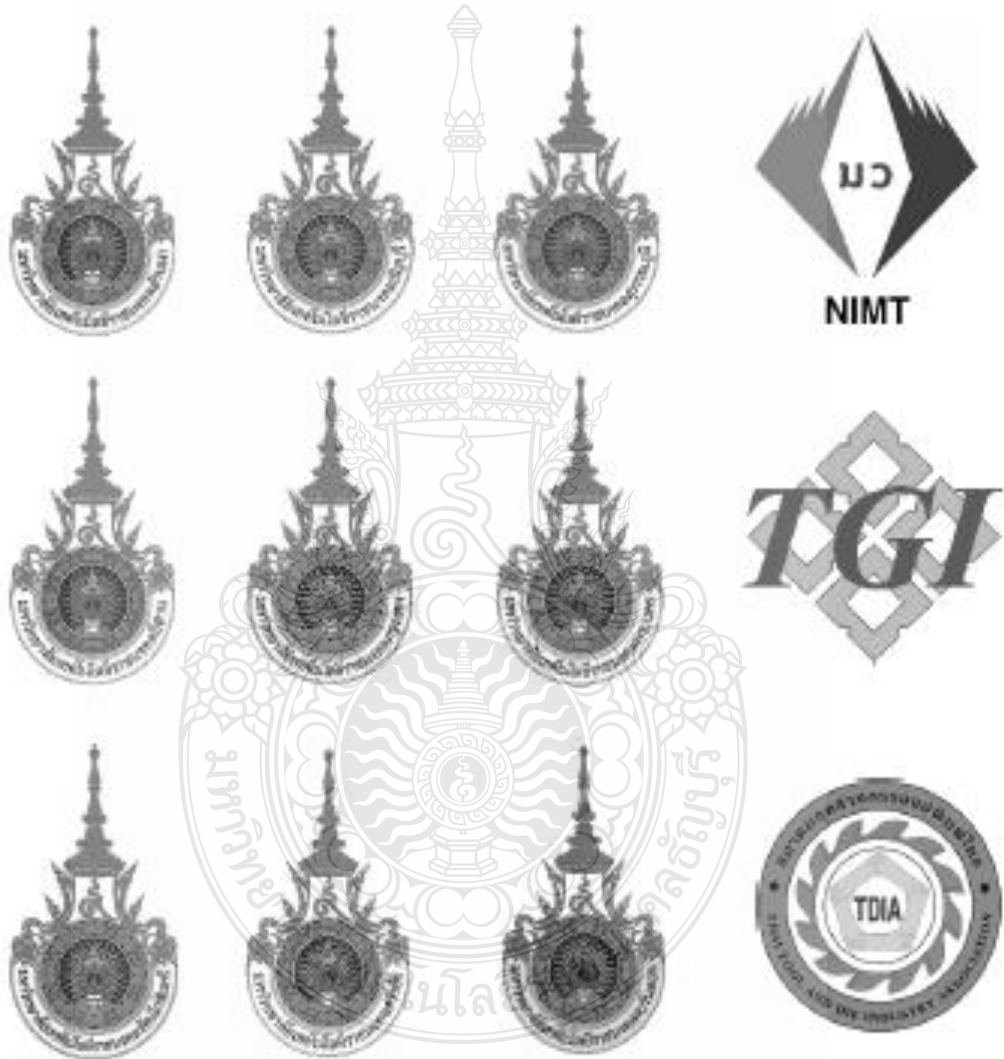
รูปที่ ข-24 ภาพพื้นที่ฟองอากาศของวัสดุความเร็วของการพุดทรวงั้น 140 มิลลิเมตร/นาที่







Abstract Book of  
Rajamangala Manufacturing & Management  
Technology Conference 2019  
(RMTC 2019)



30 - 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2562

ณ โรงแรมดิเอ็มเพรสเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่

**ผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาบทความ**

ศาสตราจารย์ ดร.กอบนวุฒิ รุจิจนากุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย ฉัตรพินวัฒน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิศ เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสันติ โชคธวาว	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย วิโรจนบุณย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตี คำเมืองลี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.บพิณ บุปผโชติ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพาพร คำแดง	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.น้ำพร ปิฎกใหญ่	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
อาจารย์ ดร.สุวิศักดิ์ กุญมาลี	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
อาจารย์ ดร.สุภาพร ศาวทอง	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สันติรัฐ นันตะธาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี เปรมภนภ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ เอกชัย วิมลภาดา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ อธิระศักดิ์ ทมาภณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร. จรินทร์พร ทรรพมนตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิเศษ ภาณุณรงค์ชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประเสริฐ ศรีบุญจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ ดร.ปิยะ ภรชัชจินตนาการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ ดร.ภูตินันท์ เสือวงศ์สุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ ดร.สุทธิธาดา ไชยะนัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สันใจธรรม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.สมเจตน์ พิชัยพันธ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ จันทรีสา นาคศรีขจรภูษ	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภิจ สุทธิเรืองวงศ์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ อารารดี	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กฤษฏ์ธอส บุญแข็ง	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ค่องสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยธะ ปราณีศพลกรัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสงี่ยม ภาวสุปรีดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ศรีวัฒนพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วรเชษฐ หวานเมือง  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มนวิภา ธาวิพันธุ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิธีวัฒน์ ชัยจักษ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พงศกร สุรินทร์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศุภชัย อัครนรากุล  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิรพัฒน์ บางพาน  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิจิรากร ชัยวัฒน์พิพัฒน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี





ตารางการนำเสนอผลงาน

ประชุมวิชาการรวมผลสัมฤทธิ์เทคโนโลยีการผลิตและการจัดการประจำปี 2562

วันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2562

ประชุมวิชาการรวมผลสัมฤทธิ์เทคโนโลยีการผลิตและการจัดการประจำปี 2562 ช่วงที่ 1					
Room		ROOM 1	ROOM 2	ROOM 3	ROOM 4
Session Chair		ผศ. จตุพร โพธิ์รงค์	ดร. บุญส่ง อุตศิลป์	รศ. สุรชัย ธรรมรงค์	อ. จิรวินัย ณ พัทลุง
Session Co-Chair		ผศ.ดร. นนท สุคันทร	อ. ศำพร ณ ก้าวไกล	ผศ.สุภาวดี อัครบรรจง	ผศ. เทพย์ อุตศิลป์
11.00 น.	11.20 น.	MNE001	MNE024	MNE037	MSA001
11.20 น.	11.40 น.	MNE010	MNE025	MNE038	MSA003
11.40 น.	12.00 น.	MNE004	MNE028	MNE040	MSA004

ประชุมวิชาการรวมผลสัมฤทธิ์เทคโนโลยีการผลิตและการจัดการประจำปี 2562 ช่วงที่ 2					
Room		ROOM 1	ROOM 2	ROOM 3	ROOM 4
Session Chair		รศ. ดร. ณัฐพร	ดร. เทพย์โพธิ์ วัฒนศิริ สำเร็จ	ดร. อดิศักดิ์ ทรัพย์ดี	ดร. วรดี อินธิบุญ
Session Co-Chair		ดร.ดร. นนท สุคันทร	ดร.ดร. วรดี ทรัพย์ดี	ดร. เทพย์ อัครบรรจง	ดร.ดร. เทพย์ อัครบรรจง
13.00 น.	13.20 น.	MNE005	MNE023	MNE043	MSA030
13.20 น.	13.40 น.	MNE006	MNE026	MNE044	MSA031
13.40 น.	14.00 น.	MNE007	MNE027	MNE045	MSA032
14.00 น.	14.20 น.	MNE008	MNE029	MNE048	MSA026
14.20 น.	14.40 น.	MNE009	MNE030	MNE056	MSA007
14.40 น.	15.00 น.	MNE012	MNE031	MNE015	MSA008
15.00 น.	15.20 น.	MNE013	MNE032	MSA002	MSA011
15.20 น.	15.40 น.	MNE014	MNE033	MSA006	MSA017
15.40 น.	16.00 น.	MNE016	MNE035	MSA009	MSA018
16.00 น.	16.20 น.	MNE017	MNE036	MSA010	MSA019
16.20 น.	16.40 น.	MNE019	MNE039	MSA012	MSA020
16.40 น.	17.00 น.	MNE020	MNE041	MSA016	MSA021

**WARNING:** Manufacturing Engineering (MNE), Material Science and Application (MSA), Supply chain & logistics (SCL), Production and Operations Management (POM), Industrial Education (IE) and Other Related fields (OIE)

**หมายเหตุ:** กำหนดการนี้เป็นกรณีฉุกเฉินและสามารถเปลี่ยนแปลง





30-31 พฤษภาคม 2562

ณ โรงแรมดิเอ็มเพรสเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่

ขอเชิญท่านเข้าร่วมงานประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

เรียน นายพลภัทร ทิพย์บุญศรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ได้จัดประชุมวิชาการระดับชาติ “การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ 2562 หรือ “Rajamangala Manufacturing and Management Technology Conference 2019 (RMTC 2019)” ซึ่งจัดเป็นครั้งที่ 4 โดยจัดประชุมวันที่ 30 - 31 พฤษภาคม 2562 ณ โรงแรมดิเอ็มเพรสเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ เพื่อเป็นเวทีแลกเปลี่ยนประสบการณ์ และความรู้จาก อาจารย์ นักวิจัย นักศึกษาและผู้สนใจในสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิศวกรรมการผลิต เทคโนโลยีการผลิต-การจัดการ วัสดุวิศวกรรม และสาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรม อันจะนำไปสู่การยกระดับงานวิจัยของประเทศต่อไป

คณะกรรมการประชุมวิชาการฯ มีความยินดีที่จะยอมรับต้นฉบับงานวิจัยของคุณ เรื่อง

“วัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยจัดเรียงตัวทิศทางเดียวกันจากเส้นใยปอเสริมแรงใน  
พอลิพรอพิลีนขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมพลาสติกพลุทูลูชั่น”

และจะได้รับการตีพิมพ์ในวารสารการประชุมสัมมนาที่จะจัดขึ้นในที่ประชุมวันที่ 30 - 31 พฤษภาคม 2562 ณ โรงแรมดิเอ็มเพรสเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมโภชน์ กุลศิริศรีตระกูล)  
รักษาราชการแทน คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์ สิทธิเจริญ)  
ประธานจัดงานประชุมวิชาการฯ  
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
โทร: 097-921-3875  
E-mail: wsittcharoen@hotmail.com



การประชุมวิชาการราชวมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ  
30-31 พฤษภาคม 2562 โรงแรมดิเอ็มเพรส อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่

## วัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยจัดเรียงตัวทิศทางเดียวกันจากเส้นใยพอลิโพรพิลีนใน พอลิพรอพิลีนขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมพลาสติกพุลทรูชัน

### Unidirectional Composite Materials of Jute Fibers Reinforced Polypropylene by Thermoplastic Pultrusion Process

พลภัทร ทิพย์บุญศรี \* ศุภเอก ประมุลมาก และ อนินท์ มีมินต์  
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
E-mail: ponlapath\_t@mail.rmutt.ac.th \*

Ponlapath Tipboonsri \* Supaaek Pramoonmak and Anin Memon  
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,  
Rajamangala University of Technology Thunyaburi  
E-mail: ponlapath\_t@mail.rmutt.ac.th \*

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันของเส้นใยพอลิโพรพิลีนในวัสดุเนื้อพอลิพรอพิลีนและขึ้นรูปด้วยกระบวนการพุลทรูชัน (Pultrusion process) กระบวนการผลิตแบบนี้เหมาะสำหรับการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตที่มี ลักษณะของหน้าตัดคงที่ และมีความยาวอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปกระบวนการผลิตแบบนี้จะรู้จักกันในชื่อของเทอร์โมเซตติ้งพุลทรูชัน (Thermosetting pultrusion) ซึ่งจะใช้วัสดุเนื้อพอลิโพรพิลีนเทอร์โมเซตติ้ง ปัจจุบันกระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกพุลทรูชัน (Thermoplastic pultrusion) ยังไม่ได้รับการศึกษาวิจัยและผลิตขึ้นส่วนวัสดุคอมโพสิตอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหรือเชิงการค้าเมื่อเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมเซตติ้งพุลทรูชัน กระบวนการเทอร์โมพลาสติกพุลทรูชันจะขึ้นรูปด้วยการดึงเส้นใยเสริมแรงและเส้นใยเทอร์โมพลาสติกผ่านดายร้อนเพื่อทำให้เกิดการหลอมเหลวและไหลตัวเข้าไปแทรกซึมในเส้นใยเสริมแรง ในการศึกษาวิจัยนี้เลือกใช้เส้นใยพอลิพรอพิลีน (Polypropylene ; PP) เป็นวัสดุเนื้อพอลิโพรพิลีน เส้นใยพอลิโพรพิลีน (Jute fibers) เป็นวัสดุเสริมแรงและเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุด้วยเส้นใยแก้วเพื่อให้ทนทานต่อแรงดึงสำหรับกระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกพุลทรูชัน อัตราส่วนการเติมเส้นใย (Filling ratio of fibers) จะถูกคำนวณสัดส่วนให้มีค่ามากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิสำหรับการขึ้นรูปกำหนดไว้ 190, 200, 210 และ 220 องศาเซลเซียส และความเร็วในการดึงขึ้นรูปจะกำหนดให้คงที่ 40 มิลลิเมตรต่อนาที การทดสอบแรงดึงและการทดสอบแรงดัดถูกนำมาใช้สำหรับการประเมินค่าความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตที่ขึ้นรูปได้ จากผลการทดสอบพบว่าสมบัติทางกลมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 200 องศาเซลเซียส และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิสูงมีค่าใกล้เคียงกับจุดสลายตัวของเส้นใยพอลิโพรพิลีน

**คำหลัก** เทอร์โมพลาสติกพุลทรูชัน, วัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน, เส้นใยพอลิโพรพิลีนในพอลิพรอพิลีน, สภาวะการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกพุลทรูชัน, อัตราส่วนการเติมเส้นใย

#### Abstract

This research was studied the forming process of unidirectional composite materials of jute fibers reinforced in polypropylene matrix by thermoplastic pultrusion process. This process is suitable for



forming continuously composite with constant cross-section. Generally, this process is well-known as thermosetting pultrusion process which uses thermosetting resin as a matrix. Currently, thermoplastic pultrusion process has not been investigated and produced the composite materials for industry and commercialize when compare with thermosetting pultrusion process. Thermoplastic pultrusion is performed by pulling reinforcement fibers and thermoplastic fiber through the heated die for melting the resin fiber and impregnate to the reinforcement fibers. Polypropylene fibers were used as matrix resin and jute fibers were used as reinforcement fiber. Meanwhile, glass fibers were used as additional reinforcement fiber for enhancing the structure while pultrusion process. The filling ration of fiber was designed over 100 % to make sure the composite materials were performed completely structure. Pultrusion temperatures were set to 190, 200, 210 and 220 °C, pulling speed was set constantly at 40 mm/min. Tensile test and flexural test were conducted to these composite for evaluate some mechanical properties. The best mechanical properties were found with the pultrusion temperature 200 °C and decreasing with increased temperature because of jute fiber easily degradation at the higher temperature.

**Keywords** Thermoplastic Pultrusion, Unidirectional composite materials, Jute fibers reinforced in polypropylene, Thermoplastic Pultrusion condition, Filling ratio of fibers

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้งานของวัสดุคอมโพสิตเป็นจำนวนมากและมีแนวโน้มการใช้งานที่สูงขึ้นในอนาคตของอุตสาหกรรมยานยนต์ อากาศยาน ชิ้นส่วนอุตสาหกรรม ซึ่งวัสดุคอมโพสิตจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนประกอบหลัก คือ ส่วนของวัสดุเสริมแรงและส่วนของวัสดุเนื้อพื้น พอลิเมอร์ถูกนำมาใช้งานเป็นวัสดุเนื้อของคอมโพสิตอย่างแพร่หลายทั้งในกลุ่มของเทอร์โมเซตติงและเทอร์โมพลาสติกสำหรับผลิตวัสดุคอมโพสิต กระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิตมีหลากหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการฉีด การอัด การพันขึ้นรูป การทำขึ้นรูปด้วยมือ การใช้สูญญากาศช่วยในการขึ้นรูป และกระบวนการพลาซม [1-2] สำหรับกระบวนการที่ขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตที่มีความยาวต่อเนื่องและหน้าตัดคงที่ คือ กระบวนการพลาซม

กระบวนการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบพลาซม โดยทั่วไปจะใช้วัสดุเนื้อพื้นกลุ่มเทอร์โมเซตติง จากการสืบค้นข้อมูลการศึกษาวิจัยของประเทศไทยพบว่ามีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการเทอร์โมเซตติงที่มีการใช้เส้นใยแก้วเสริมแรงในวัสดุเนื้อพื้นเทอร์โมเซตติง [3-5] ในขณะที่เทอร์โมพลาสติกพลาซมในประเทศไทยยังมีการศึกษาวิจัย

ค่อนข้างน้อยหรือแทบจะไม่มีเลย ประกอบกับเทอร์โมพลาสติกมีความหนืดสูงการแทรกซึมเข้าไปเกาะยึดในเส้นใยจึงเกิดได้ยากกว่าเทอร์โมเซตติง แต่มีข้อดี คือ ไม่เป็นพิษจากสารระเหย กระบวนการผลิตที่ได้สะอาดเรียบร้อยกว่า อีกทั้งเทอร์โมพลาสติกยังสามารถรีไซเคิลได้ สามารถช่วยลดมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง

โดยมากแล้วเส้นใยความยาวต่อเนื่องที่สามารถนำมาพลาซมขึ้นมักจะเป็นเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นใยอะรามิด เป็นต้น ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยจำนวนมากที่มุ่งนำเอาเส้นใยธรรมชาติเข้ามามีบทบาทเป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต [6-8] ซึ่งได้แก่ เส้นใยลินิน เส้นใยกัญชง เส้นใยป่าน เส้นใยไผ่ และเส้นใยปอ นอกจากนี้บางชนิดของเส้นใยธรรมชาติสามารถปั่นให้เป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องได้และมีความเหมาะสมสำหรับการนำมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการพลาซมได้เป็นอย่างดี [9-10]

เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุที่หมุนเวียนเกิดขึ้นได้อย่างไม่จำกัดเมื่อถูกนำมาใช้งานเป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตย่อมจะเกิดผลดีกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งใช้วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและช่วยลดปริมาณการใช้พลาสติกที่สังเคราะห์จากปิโตรเลียมลงอีกช่องทางหนึ่ง ดังนั้นจึงได้เกิดความ





สนใจที่จะใช้เส้นใยธรรมชาติชนิดยาวต่อเนื่องของเส้นใยปอ มาเป็นวัสดุเสริมแรงหลักสำหรับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ พลุทुरुชั้นเทอร์โมพลาสติก และเส้นใยเรซินที่เลือกใช้ คือ เส้น ใยพอลิพรอพิลีนเพราะเป็นชนิดของพลาสติกที่ใช้กันเป็น จำนวนมากในอุตสาหกรรม ราคาถูก ขึ้นรูปได้ง่าย สามารถรีไซเคิลได้ และในรูปแบบของเส้นใยมีใช้งานอยู่ใน อุตสาหกรรมสิ่งทออยู่แล้ว นอกจากนี้เส้นใยแก้วยังถูก นำมาใช้เพิ่มความแข็งแรงของคอมโพสิตเพื่อให้ความคงทน ต่อแรงดึงที่ใช้การขึ้นรูป เนื่องจากลำพังแค่เส้นใยปอไม่มี ความแข็งแรงเพียงพอต่อการพลุทुरुชั้น โดยในการศึกษาวิจัย นี้จะมุ่งเน้นศึกษาสภาวะการออกแบบกระบวนการขึ้นรูปและ สมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยจัดเรียงตัวทิศทาง เดียวกันจากเส้นใยปอเสริมแรงในพอลิพรอพิลีนที่ขึ้นรูปด้วย กระบวนการเทอร์โมพลาสติกพลุทुरुชั้น

## 2. เครื่องพลุทुरुชั้น และวัสดุในการขึ้นรูป

การศึกษานี้จะใช้เครื่องพลุทुरुชั้นที่ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม ดังแสดงลักษณะของเครื่องในรูป 1 ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

- 1) ส่วนของ Molding die unit ที่จะทำหน้าที่ขึ้นรูป วัสดุคอมโพสิตตามลักษณะการออกแบบรูปร่างซึ่ง จะมีการติดตั้งฮีตเตอร์สำหรับให้ความร้อนและจะ มีส่วนประกอบของ Pre-Heater ที่จะ ปรับ อุณหภูมิของเส้นใยทั้งหมดก่อนที่จะถูกขึ้นรูปจริง
- 2) ส่วนของ Pulling unit จะทำหน้าที่พลุทुरुชั้นขึ้น รูปวัสดุคอมโพสิตประกอบไปด้วยมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าสำหรับการดึงขึ้นงานเพื่อฟอร์มรูปร่างตาม ดायน์ที่ออกแบบ
- 3) ส่วนของ Control unit ซึ่งจะเป็นส่วนที่ควบคุม การทำงานของเครื่องทั้งหมดให้ทำงานสัมพันธ์กัน โดย จะสามารถปรับตั้งอุณหภูมิในการขึ้นรูปแต่ละโซน ของไดนาไมซ์ขึ้นรูป และสามารถปรับความเร็วในการ พลุทुरुชั้นได้เช่นกัน

ในการทดลองได้ทำการเตรียมวัสดุคอมโพสิตซึ่ง ประกอบไปด้วยเส้นใยปอ ขนาด 844 tex ความหนาแน่น 1.44 g/cm<sup>3</sup> ซึ่งเป็นเส้นใยหลักในการขึ้นรูป นอกจากนี้ยัง

ต้องใช้เส้นใยแก้วขนาด 1,200 tex มีความหนาแน่น 2.62 g/cm<sup>3</sup> สำหรับช่วยให้เพิ่มความแข็งแรงของส่วนผสมทั้งหมด ให้สามารถพลุทुरुชั้นขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่องโดยที่เส้นใยปอไม่ขาด และวัสดุเนื้อพื้นได้ใช้เส้นใยพอลิพรอพิลีนขนาด 133.34 tex หรือ 1,200 denier มีความหนาแน่น 0.946 g/cm<sup>3</sup> ลักษณะของเส้นใยทั้งหมดถูกแสดงดังรูปที่ 2

## 3. วิธีการทดลอง

### 3.1 การเตรียมวัสดุสำหรับขึ้นรูปในกระบวนการเทอร์โม พลาสติกพลุทुरुชั้น

การคำนวณหาอัตราส่วนการเติมเส้นใยสามารถ คำนวณหาได้จากสมการที่ (1) พื้นที่หน้าตัดของเส้นใย ทั้งหมดหาได้จากขนาดกำหนดของเส้นใยแต่ละชนิดที่ เลือกใช้

$$\text{อัตราส่วน} \frac{\text{การเติมเส้นใย}}{\text{การเติมเส้นใย}} = \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยทั้งหมด}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของไดนาไมซ์}} \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) และขนาดของเส้นใยปอ 844 tex เส้นใยแก้ว 1,200 tex และเส้นใยพอลิพรอพิลีน 1,200 denier และค่าความหนาแน่นต่าง ๆ ของทุกเส้นใยจะทำให้ สามารถคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยแต่ละชนิดได้ และ พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยทั้งหมดที่จะต้องใช้ในการขึ้นรูป ในขณะที่พื้นที่หน้าตัดของไดนาไมซ์มีขนาด 25 x 3 มิลลิเมตร Anin Memon and Asami Nakai [3] ได้ทดลองขึ้นรูปวัสดุ คอมโพสิตโดยกระบวนการพลุทुरुชั้น และได้นำเสนอเกี่ยวกับการ ออกแบบอัตราส่วนการเติมเส้นใยจะต้องมีอัตราขั้นต่ำอยู่ที่ 100 เปอร์เซ็นต์

ในการทดลองนี้ได้กำหนดสัดส่วนการเติมของเส้นใยปอ 23 เปอร์เซ็นต์ เส้นใยแก้ว 9 เปอร์เซ็นต์ เส้นใยพอลิพรอพิลีน 69 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะได้สัดส่วนการเติมเส้นใยของการทดลอง นี้อยู่ที่ 101 เปอร์เซ็นต์

### 3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมพลาสติก พลุทुरुชั้น

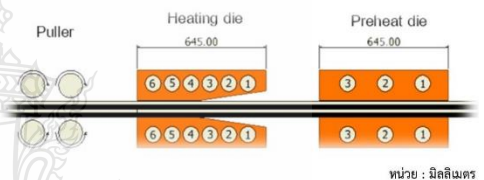
ในขั้นตอนการพลุทुरुชั้นสำหรับขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต เส้นใยทุกชนิดที่ถูกอัตราส่วนการเติมเส้นใยจะถูกติดตั้งบน ชั้นวางเส้นใย และดึงผ่านชุดบังคับเส้นใย ลากผ่านชุด Pre-



Heater และติดตั้งในคายน์ ลักษณะการเตรียมเส้นใย ส่วนผสมทั้งหมดบนเครื่องพลาทูลูชั่นแสดงดังรูปที่ 3 จากนั้นทำการปิดแม่พิมพ์และปรับตั้งอุณหภูมิของแม่พิมพ์ตามตำแหน่งต่าง ๆ ดังระบุในรูปที่ 4 และค่าระดับอุณหภูมิในแต่ละโซน แสดงดังตารางที่ 1 อุณหภูมิ Pre-Heat จะกำหนด 100 องศาเซลเซียส ในการทดลองนี้จะกำหนดตัวแปร คือ อุณหภูมิขึ้นรูปที่แตกต่างกันได้แก่ 190, 200, 210 และ 220 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในโซนที่ 1-2 จะปรับตั้งให้มีค่าต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิพรอพิลีน สำหรับโซน 3-4 จะเป็นการปรับตั้งอุณหภูมิสำหรับการพลาทูลูชั่น โดยในโซน 3 จะเป็นช่วงที่เส้นใยพอลิพรอพิลีน การหลอมละลายและถูกอัดดันให้แทรกซึมเข้าไปในเส้นใยเสริมแรงด้วยมุมเอียงของคายน์ และปรับรูปร่างให้มีหน้าตัดคงที่ในโซนที่ 4 จากนั้นอุณหภูมิโซน 5-6 จะปรับตั้งให้มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิพลาทูลูชั่นสำหรับให้วัสดุคอมโพสิตมีรูปร่างหน้าตัดคงที่และเกิดการพอร์มรูปร่างที่สมบูรณ์ตามการออกแบบ เมื่ออุณหภูมิการขึ้นรูปถึงจุดระดับที่ต้องการจะเริ่มพลาทูลูชั่นขึ้นงานผ่านคายน์ร้อนโดยจะกำหนดความเร็วในการดึงคงที่ 40 มิลลิเมตร/นาที และจะได้ชิ้นงานที่เป็นลักษณะพื้นทีหน้าตัดคงที่ที่มีความยาวต่อเนื่องดังรูปที่ 5



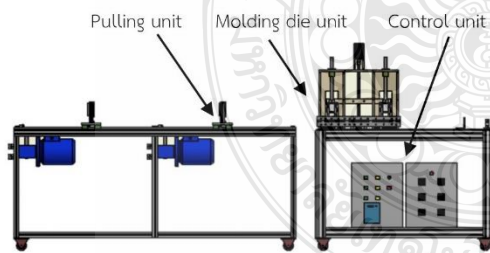
รูปที่ 3 การเตรียมเส้นใยเตรียมพร้อมสำหรับพลาทูลูชั่น



รูปที่ 4 ตำแหน่งการปรับตั้งอุณหภูมิของเครื่องพลาทูลูชั่น

ตารางที่ 1 แสดงอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูปแต่ละตำแหน่งในแม่พิมพ์

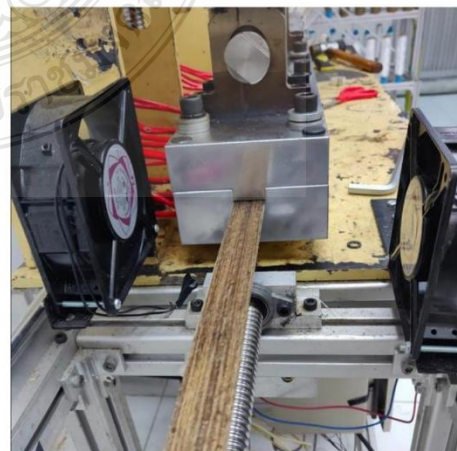
Heating zone (°C)						Preheat zone (°C)		
6	5	4	3	2	1	3	2	1
160	170	190	190	170	160	100		
		200	200					
		210	210					
		220	220					



รูปที่ 1 ลักษณะของเครื่องพลาทูลูชั่นที่ใช้ในการขึ้นรูป



รูปที่ 2 ลักษณะของเส้นใยที่ใช้ในการพลาทูลูชั่น



รูปที่ 5 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป





### 3.3 การทดสอบสมบัติทางกล

วัสดุคอมโพสิตที่ขึ้นรูปได้จะถูกนำมาเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile test) ในการทดสอบแรงดึงจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3039 [4] ซึ่งมีขนาดชิ้นทดสอบ 250 x 25 x 3 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วในการดึงทดสอบ 1 มิลลิเมตร/นาที และการทดสอบแรงดัด (Flexural test) ใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D790 [5] ชิ้นทดสอบมีขนาด 150 x 25 x 3 มิลลิเมตร ใช้การทดสอบแรงดัดแบบ 3 จุด ความเร็วดัด 2.16 มิลลิเมตร/นาที ซึ่งเป็นค่าความเร็วในการดัดที่คำนวณได้ตามมาตรฐานการทดสอบดังกล่าว

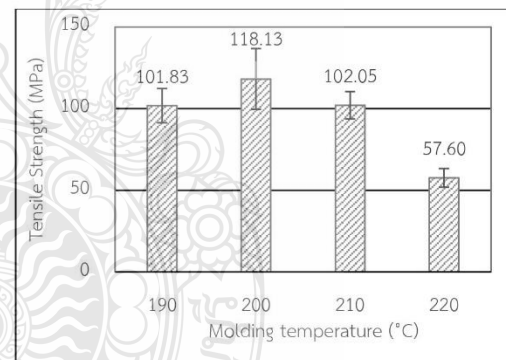
### 4. อภิปรายผลการทดลอง

การพลาสมารูปขึ้นวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันของเส้นใยปอเสริมแรงในวัสดุเนื้อพื้นพอลิพรอพิลีนประสบความสำเร็จในการพลาสมารูปขึ้นงานขนาดพื้นที่หน้าตัด 25 x 3 มิลลิเมตร โดยไม่เกิดการเสียหายหรือเส้นใยเสริมแรงเกิดการขาดในระหว่างการขึ้นรูป และในการทดลองนี้ใช้อัตราส่วนการเติมเส้นใย 101 เปอร์เซ็นต์สอดคล้องกับการออกแบบอัตราการผลิตเส้นใยที่เป็นผลงานวิจัยของ Anin Memon and Asami Nakai [13] ซึ่งประสบความสำเร็จในการขึ้นรูปท่อวัสดุคอมโพสิตที่ออกแบบให้มีโครงสร้างแบบถักเปีย (Tubular braiding composite) ของเส้นใยปอและเส้นใยแก้วเสริมแรงในวัสดุเนื้อพื้นพอลิแลคติกแอซิด

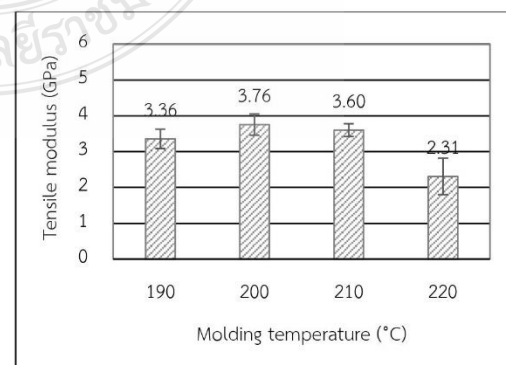
วัสดุคอมโพสิตที่ขึ้นรูปได้ถูกนำไปทดสอบสมบัติทางกลบางประการ ได้แก่ การทดสอบความแข็งแรงดึง และการทดสอบความแข็งแรงดัด จากผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตพบความแข็งแรงดึงสูงสุด 118.13 MPa ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 200 องศาเซลเซียส ดังแสดงผลการทดสอบในรูปที่ 5 และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความแข็งแรงดึงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เป็นเพราะลักษณะความหนืดของพอลิพรอพิลีนจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้นและในขณะที่อุณหภูมิการขึ้นรูปเพิ่มสูงเส้นใยจะถูกพลาสมารูปขึ้นผ่านความร้อนเป็นระยะเวลานาน จะทำให้มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสลายตัวของเส้นใยปอ ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ประมาณ 250 องศาเซลเซียส ดังจะเห็นได้จากผล

การทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิในการขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความแข็งแรงดึงมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน และมีค่าสูงสุด 3.76 GPa ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 6

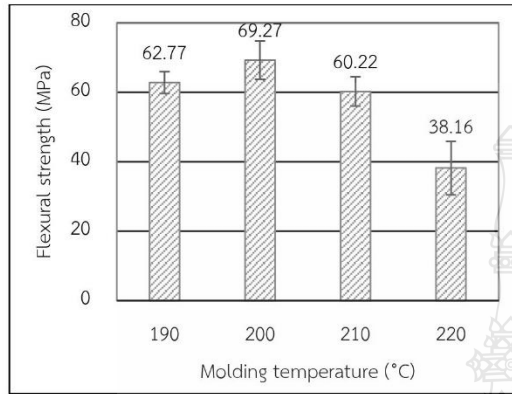
รูปที่ 7 แสดงค่าความแข็งแรงต่อแรงดัด จากผลการทดสอบพบว่าค่าที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดสอบแรงดึง พบค่าความทนทานแรงดัดสูงสุด 69.27 MPa ที่อุณหภูมิขึ้นรูป 200 องศาเซลเซียส และแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงการลดลงของค่าความทนทานต่อแรงดัดเมื่ออุณหภูมิการขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น ในรูปที่ 8 แสดงค่าโมดูลัสแรงดัดค่าสูงสุดคือ 5.51 GPa ที่อุณหภูมิขึ้นรูป 200 องศาเซลเซียส เช่นกัน



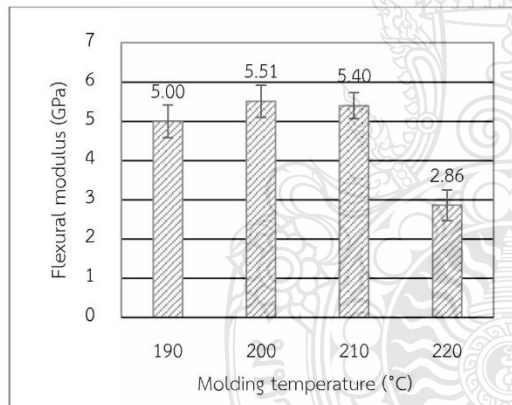
รูปที่ 6 ผลกระทบของอุณหภูมิการขึ้นรูปที่แตกต่างกันต่อความแข็งแรงดึง



รูปที่ 7 ผลกระทบของอุณหภูมิการขึ้นรูปที่แตกต่างกันต่อโมดูลัสแรงดึง



รูปที่ 8 ผลกระทบของอุณหภูมิการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงดัด



รูปที่ 9 ผลกระทบของอุณหภูมิการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ต่อค่าโมดูลัสแรงดัด

จากผลการทดสอบสมบัติทางกลบางประการสามารถระบุได้ว่าอุณหภูมิการขึ้นรูป 200 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิการขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการพลาสม่าขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันของเส้นใยปอเสริมแรงในวัสดุเนื้อพื้นพอลิพรอพิลีน เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่เทอร์โมพลาสติกเรซินไหลตัวได้ดี สามารถแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้ดีขึ้น ส่งผลให้สมบัติทางกลมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Anin Memon and Asami Nakai [13] ที่ได้ศึกษาการพลาสม่าขึ้นรูปท่อโครงสร้างถักเปียของเส้นใยปอและเส้นใยแก้วที่มีพอลิแลคติกแอซิดเป็นวัสดุเนื้อพื้น ทำนองเดียวกันเมื่ออุณหภูมิการขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้นสมบัติ

ทางกลของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงในวัสดุเนื้อพื้นเทอร์โมพลาสติกจะมีค่าลง ในกรณีของการใช้เส้นใยปอเป็นวัสดุเสริมแรงจะมีแนวโน้มการลดลงของสมบัติทางกล Anin Memon and Asami Nakai [10] ได้รายงานค่าการเสื่อมสลายตัวของเส้นใยปอจะเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 240 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ทำการศึกษาศักยภาพของวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันของเส้นใยปอเสริมแรงในวัสดุเนื้อพื้นพอลิแลคติกแอซิดและพบว่าสมบัติทางกลมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการขึ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิการขึ้นรูปต่ำ วัสดุคอมโพสิตจะมีสมบัติทางกลที่ด้อยกว่าเช่นกันเนื่องจากระดับอุณหภูมิต่ำจะมีการแทรกซึมของวัสดุเนื้อพื้นได้ไม่ดีแม้ว่าที่ระดับอุณหภูมิต่ำเส้นใยปอไม่เกิดการเสื่อมสลาย

### 5. สรุป

วัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันของเส้นใยปอเสริมแรงในวัสดุเนื้อพื้นพอลิพรอพิลีนสามารถพลาสม่าขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมโพสิตที่สมบูรณ์ได้ ด้วยการใช้อัตราส่วนการเติมเส้นใย 101 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถใช้เส้นใยปอได้มากถึง 23 เปอร์เซ็นต์ ประกอบไปด้วยเนื้อพื้นพอลิพรอพิลีน 69 เปอร์เซ็นต์ และมีเส้นใยแก้วไม่น้อยกว่า 9 เปอร์เซ็นต์ เพื่อสร้างความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิตในระหว่างการพลาสม่าขึ้นรูป ซึ่งถ้าใช้เส้นใยแก้วต่ำกว่า 9 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ส่วนผสมทั้งหมดมีความแข็งแรงต่ำเมื่อพลาสม่าขึ้นรูปจะเกิดการขาดและเสียหายในดายนระหว่างการผลิต และจากการทดลองขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 190-220 องศาเซลเซียส และความเร็วในการพลาสม่าขึ้นรูป 40 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 220 องศาเซลเซียส ได้วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติทางกลดีที่สุด การศึกษาวิจัยนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบเลือกใช้ชนิดของวัสดุเส้นใยเสริมแรง และเลือกกำหนดสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับพลาสม่าขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตแบบเส้นใยจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันของเส้นใยจากธรรมชาติเสริมแรงในวัสดุเนื้อพื้นเทอร์โมพลาสติก





## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย เลขที่สัญญา MSD60I0028

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Nijssen, R.P.L. Composite Materilas an introduction, Inholland University of Applied Sciences, 2015.
- [2] Adrian, P.P.; Gheorghe, B.M. Manufacturing Process and Applications of Composite Materials, Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume IX (XIX), 2010, NR2.
- [3] สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2555. การพัฒนาสมการออกแบบชิ้นส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดขึ้นหน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัดที่มีจุดรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่น. รายงานการวิจัยมหาวิทยาลัยสุรนารี.
- [4] หวังแก้ว บุญสวน, สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และสงวน วงษ์ขวลิตกุล, 2552. พฤติกรรม และคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดขึ้นที่ผลิตในประเทศไทย ภายใต้การอัด การเคียน และการดัด. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีนครราชสีมา เล่มที่ 4 วันที่ 13-15 พฤษภาคม 2552, หน้า 1625-1632.
- [5] สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542. คุณสมบัติและพฤติกรรมทางกลของวัสดุพลาสติกเสริมใยแก้ว. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, ชลบุรี, 24-26 มีนาคม 2542.
- [6] P. Wambua, J. Ivens and I. Verpoest, "Natural fiber: Can they replace glass in fibre reinforce plastic?", Composites Science and Technology, Volume 63, Issue 9, pp 1259-1264, 2003.
- [7] K. G. Satyanarayana, G.C. Arizaga and F. Wypych, "Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers - An overview", Progress in Polymer Science 34, pp 982-1021, 2009.
- [8] P.J. Herrera-Franco and A. Valadez-Gonzalez, "Mechanical properties of continuous natural fibre-reinforced polymer composite", Composites : Part A 35, pp 339-345, 2004.
- [9] K. Van de Velde and P. Kiekens, "Thermoplastic pultrusion of natural fibre reinforced composite", Composite Structure 54, pp 355-360, 2001.
- [10] Anin Memon and Asami Nakai, Mechanical Properties of Jute Spun Yarn/PLA Tubular Braided Composite by Pultrusion Molding, Energy Procedia 34 ( 2013 ) 818 – 829.
- [11] ASTM, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials1, ASTM D3039, ASTM International, West Conshohocken, Pa 19428-2959, USA,
- [12] ASTM, Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM D790-10, ASTM International, West Conshohocken, Pa 19428-2959, USA,
- [13] Anin Memon and Asami Nakai, Fabrication and Mechanical Properties of Jute Spun Yarn/PLA Unidirection Composite by Compression Molding, Energy Procedia 34 ( 2013 ) 830 – 838.

## ประวัติผู้จัดทำปฏิญานิพนธ์

ชื่อ – ชื่อสกุล	นาย พลภัทร ทิพย์บุญศรี
วัน เดือน ปี เกิด	16 สิงหาคม 2536
ที่อยู่ปัจจุบัน	31/138 หมู่ 1 ตำบล รังสิต อำเภอ ัญบุรี จังหวัด ปทุมธานี 12110
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม พลาสติก จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมื่อ พ.ศ.2558
ประวัติการทำงาน (ถ้ามี)	-
เบอร์โทรศัพท์	087-694-4580
อีเมลล์	ponlapath.t@gmail.com

