

วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรง  
เหล็กกล้าไร้สนิม



นางสาวสรินทร์ ดือขุนทด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2563

**STAINLESS STEEL FIBER-REINFORCED  
POLYETHYLENE TEREPHTHALATE  
COMPOSITES**



**Rossarin Duekunthod**

**Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Materials Engineering**

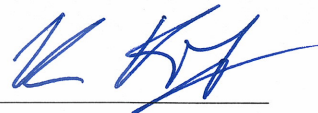
**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2020**

วัตถุประสงค์เพื่อผลิตพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วย  
ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม

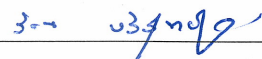
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. อุษณีย์ กิตกำธร)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร. รัตน์ บริสุทธิ์กุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. จุฑาปניย์ พิชรวิชญ์)

กรรมการ



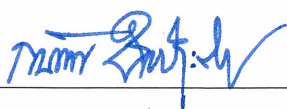
(ผศ. ดร. ภูษิต มิตรสมหวัง)

กรรมการ



(ผศ. ดร. วารุณี อริยวิริยะนันท์)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รสรินทร์ คือขุนทด : วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรง  
ด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม (STAINLESS STEEL FIBER-REINFORCED  
POLYETHYLENE TEREPHTHALATE COMPOSITES) อาจารย์ที่ปรึกษา :  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตน บิริสุทธิกุล, 89 หน้า.

วัสดุคอมพอสิตเป็นวัสดุที่ผลิตจากการนำวัสดุที่มีสมบัติเด่นตั้งแต่สองชนิดมาผสมกัน  
ปัญหาหลักการผลิตวัสดุคอมพอสิต คือ การประสานกันระหว่างวัสดุที่นำมาประกอบกันเป็นวัสดุ  
คอมพอสิต จากงานวิจัยของ **Katayama** และคณะ แสดงให้เห็นว่าพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตสามารถ  
เชื่อมติดกับเหล็กกล้าไร้สนิมได้ ทำให้มีโอกาที่จะผลิตวัสดุคอมพอสิตจากวัสดุทั้งสองที่มีเนื้อ  
ประสานกันอย่างดี และเพื่อยืนยันแนวคิดดังกล่าวนี้งานวิจัยนี้ จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาความ  
เป็นไปได้ในการผลิตวัสดุคอมพอสิตเนื้อพื้นทำจากพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรง  
เหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปร้อน และเพื่อทำความเข้าใจถึงอิทธิพลของ ขนาด จำนวนชั้น  
และ แนวการวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิต ในการทดลองผู้วิจัยได้  
ผลิตวัสดุคอมพอสิตที่มีเส้นใยเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม แบบ 1 ชั้น และ 2 ชั้น ด้วยการอัด  
ขึ้นรูปร้อน โดยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้มีทั้งตะแกรงเบอร์ 60 100 และ 200 หลังจากการผลิต  
วัสดุคอมพอสิตแล้วเสร็จ วัสดุคอมพอสิตจะถูกตรวจสอบลักษณะของชิ้นงานหลังขึ้นรูป  
โครงสร้างภาคตัดขวางระดับมหภาค ความหนาแน่น และความสามารถในการรับแรงดึง จากการ  
ทดลองพบว่า ขนาด และจำนวนชั้น ของตะแกรงมีผลต่อความหนาแน่น และ ความแข็งแรงของ  
วัสดุคอมพอสิต โดยขนาดตะแกรงที่ใหญ่ และจำนวนชั้นของตะแกรงที่เพิ่มขึ้นความหนาแน่น และ  
ความแข็งแรงของวัสดุคอมพอสิตใหม่จะสูงขึ้น ขณะที่แนวการวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม มีผล  
ต่อความเหนียวของวัสดุคอมพอสิตค่อนข้างมาก จากการทดสอบแรงดึง แม้ว่าตะแกรงเหล็กกล้าไร้  
สนิมจะติดประสานได้ไม่ดีกับพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต แต่ความแข็งแรงที่ได้ของวัสดุคอมพอสิตที่  
สูงเทียบเท่ากับการนำเนื้อพื้นมาประกอบกัน ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าเราสามารถผลิตวัสดุคอมพอสิต  
เนื้อพื้นทำจากพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป  
ได้ และขนาด จำนวนชั้น และแนวการวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเสริมแรงมีผลต่อสมบัติของ  
วัสดุคอมพอสิตอย่างมาก

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา รสรินทร์ คือขุนทด.

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร. รัตน บิริสุทธิกุล.

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา (ร่วม) ดร. รัตน บิริสุทธิกุล.



ROSSARIN DUEKUNTHOD : STAINLESS STEEL FIBER-REINFORCED  
POLYETHYLENE TEREPHTHALATE COMPOSITES. THESIS ADVISOR :  
ASST. PROF. RATTANA BORRISUTTHEKUL. Ph.D., 89 PP.

STAINLESS STEEL/FIBER-REINFORCED/POLYETHYLENE  
TEREPHTHALATE COMPOSITES

Composite materials are materials that are made from a combination of two unique materials. The main problem in composite production is the de bonding between the materials that make up the composite material. Research from the study of Katayama et al. showed that polyethylene terephthalate can be welded to stainless steel. It has been seen that combining these two materials into a product has the potential to produce composite materials from two well-bonded materials. To confirm this concept, this research was developed to study the feasibility of produced a composite matrix made of polyethylene terephthalate reinforced with stainless steel grating by hot compress method. And understanding the influence of class size, number and orientation of stainless-steel grating on the properties of composite materials. Experiments were able to produce fiber-reinforced composite material, 1 layer and 2-layer stainless steel grating by hot compress method. The stainless-steel grating used, there are numbers 60 100 and 200. After the production of composite materials. The composite materials will be investigates characteristics, macro-sectional structure, density and tensile strength. The composite material investigates found that the size and number of layers of mesh reinforcement. The size of the mesh, stainless steel, and a large number of grid reinforcement layers increase the density and strength of composite materials. As to the orientation of the stainless steel, the grating has a relatively high effect on the toughness of the new composite

material. Tensile testing for composite materials showed that stainless steel debonding with polyethylene terephthalate. However, composite materials have high strength comparable to combine base material. Therefore, it can be concluded that we can produce a composite matrix made of polyethylene terephthalate reinforced with stainless steel grating by extrusion method, and the size, number of layers and direction of Stainless-steel grating reinforced composite material greatly affects the properties of new composite materials.



School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature สิทธิพงศ์ อธิวงศา

Advisor's Signature ดร. อธิวงศา

Co - Advisor's Signature KK

## กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องจากการได้รับความช่วยเหลือและคำปรึกษาจากที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตน บิริสุทธิกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษณีย์ กิตติมาตร หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ชี้แนะแนวทางในการทำงานวิจัยอีกทั้งให้ความรู้ อธิบาย และ ช่วยเหลือสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในการช่วยเหลือครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ หน่วยวิจัยการประยุกต์ใช้โลหะวิทยาเพื่อการขึ้นรูปโลหะ (Integrated Metallurgy to Industrial Applications Research Unit, IMIARU) สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือและสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

ท้ายนี้ ขอขอบคุณ ครอบครัว ที่ส่งเสริมด้านการศึกษา เป็นกำลังใจ รวมไปถึงเพื่อนทุก ๆ คนที่คอยให้การช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา จนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้

รสรินทร์ คือขุนทด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ง
สารบัญ .....	จ
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูป .....	ญ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	9
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย .....	9
<b>2 ปรีทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>11</b>
2.1 วัสดุคอมพอสิต.....	11
2.1.1 วัสดุคอมพอสิตแบ่งตามประเภทของวัสดุเนื้อพื้น.....	11
2.1.1.1 วัสดุคอมพอสิตเนื้อพื้น โลหะ .....	11
2.1.1.2 วัสดุคอมพอสิตเนื้อพื้นเซรามิกส์.....	12
2.1.1.3 วัสดุคอมพอสิตเนื้อพื้นพอลิเมอร์ .....	12
2.1.2 วัสดุคอมพอสิตแบ่งประเภทตามลักษณะรูปร่างเสริมแรง.....	12
2.1.2.1 วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค.....	13
2.1.2.2 วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงแบบโครงสร้าง.....	13
2.1.2.3 วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย .....	14
2.2 วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย .....	14
2.2.1 วัสดุเนื้อพื้นพอลิเมอร์.....	15

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.1.1	วัสดุพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์.....	15
2.2.1.2	วัสดุพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก.....	15
2.2.2	เส้นใยเสริมแรง.....	16
2.2.3	การจัดเรียงตัวของเส้นใย.....	18
2.3	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate: PET).....	20
2.4	ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม.....	21
2.4.1	สานขัดกัน (Plain weave).....	22
2.4.2	สานทแยง (Twilled weave).....	22
2.4.3	สานขัดกันแบบดัตช์ Plain Dutch Weave.....	22
2.4.4	สานทแยงย้อนกลับ (Reverse Twilled Weave).....	22
2.5	การขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย.....	24
2.5.1	การขึ้นรูปจัดวาง (Lay-up process).....	24
2.5.2	กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์ม Thermoforming.....	25
2.5.3	การอัดขึ้นรูป (Compression molding press, hot press).....	26
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
3	<b>วัสดุ อุปกรณ์ และ ระเบียบวิธีการดำเนินการ.....</b>	<b>34</b>
3.1	วัสดุ.....	34
3.1.1	แผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET).....	34
3.1.2	ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304.....	35
3.2	อุปกรณ์.....	37
3.2.1	เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding).....	37
3.2.2	เครื่องตัดแผ่นวงจรพิมพ์ SHR-150.....	38
3.2.3	เครื่องขัด.....	38
3.2.4	เครื่องทดสอบเนกประสงค์.....	39
3.2.5	ชุดเครื่องมือสำหรับการประเมินความหนาแน่น.....	39
3.2.6	กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ.....	40

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.7 ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) .....	41
3.2.8 เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Caliper).....	41
3.2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	41
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	43
<b>4 ศึกษาการผลิตวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 1 ชั้น .....</b>	<b>46</b>
4.1 บทนำ.....	46
4.2 ระเบียบวิธีการ .....	47
4.2.1 การจัดวางชิ้นงานก่อนขึ้นรูป.....	48
4.2.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน.....	49
4.3 ผลงานวิจัยและการอภิปรายผล.....	51
4.3.1 ลักษณะชิ้นงานหลังจากขึ้นรูป.....	51
4.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างภาคตัดขวางระดับมหภาค.....	52
4.3.3 ความหนาแน่น.....	53
4.3.4 ความสามารถในการรับแรงดึง.....	55
4.4 สรุปผลงานวิจัย.....	59
<b>5 การผลิตวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 2 ชั้น .....</b>	<b>61</b>
5.1 บทนำ.....	61
5.2 ระเบียบวิธีการ .....	61
5.2.1 การขึ้นรูปชิ้นงาน.....	63
5.3 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย.....	64
5.3.1 ลักษณะของคอมพอสิต.....	64
5.3.2 โครงสร้างภาคตัดขวางระดับมหภาคของชิ้นงานคอมพอสิต.....	66
5.3.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงาน.....	67
5.3.4 ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงดึง .....	68



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4 สรุปผลการวิจัย	72
<b>6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>74</b>
6.1 ข้อเสนอแนะ .....	74
รายการอ้างอิง .....	75
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	77
ประวัติผู้เขียน .....	89



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์แต่ละชนิด .....	6
1.2	สมบัติของเส้นใยเสริมแรง .....	6
2.1	สมบัติของพอลิเมอร์แต่ละชนิด .....	16
2.2	สมบัติของเส้นใยชนิดต่าง ๆ .....	23
2.3	สมบัติของการสานเส้นใยคาร์บอน .....	23
2.4	สมบัติของวัสดุในงานวิจัย .....	27
2.5	สัดส่วนของเส้นใยเสริมแรง .....	32
3.1	สมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต .....	35
3.2	ส่วนผสมทางเคมีของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 .....	36
3.3	ขนาดและสมบัติของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 .....	37

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	การแนวโน้มการเปลี่ยนมาใช้วัสดุน้ำหนักเบาในยานพาหนะ..... 1
1.2	เปรียบเทียบความแข็งแรงจำเพาะ (Specific stiffness) และความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) ของโลหะและวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซต เสริมแรงด้วยเส้นใยต่าง ๆ..... 2
1.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดวัสดุพอลิเมอร์ชนิดไนลอน (PA 6) และพอลิเมอร์ชนิดอีพ็อกซี (Epoxy) ..... 4
1.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์เสริมแรง ด้วยเส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีเนื้อพื้นพอลิเมอร์ชนิดไนลอน (PA 6) และอีพ็อกซี (Epoxy) ..... 5
1.5	ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของชิ้นงานคอมโพสิต ..... 5
1.6	ผลของทิศทางวางเส้นใยเสริมในวัสดุคอมโพสิตต่อความสามารถในการ รับแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว..... 7
1.7	ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการเชื่อม (A) แผ่น SUS 304 บนแผ่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (B) ชิ้นงานหลังทดสอบแรงดึง ..... 8
2.1	การแบ่งประเภทของวัสดุคอมโพสิตตามลักษณะการเสริมแรง..... 12
2.2	วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle -Reinforced Composites) ..... 13
2.4	วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย) ..... 14
2.5	รูปแบบการจัดเรียงตัวของเส้นใยใน แบบต่าง ๆ..... 18
2.6	ผลของการทิศทางการเสริมแรงของเส้นใยที่มีผลต่อความสามารถใน การรับแรงดึง ..... 19
2.7	โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิต..... 19
2.8	ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในการผลิตเรซินของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 20
2.9	จำลองพฤติกรรมเกิดผลึกของพอลิเมอร์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต..... 21
2.10	แสดงหลักการสานตะแกรงกล้าไร้สนิม ..... 21

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.11	ลักษณะการสานตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมแบบต่าง ๆ.....	23
2.12	กระบวนการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย .....	24
2.13	การขึ้นรูปด้วย (Lay-up process) .....	25
2.14	กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์ม .....	25
2.15	จำลองส่วนประกอบของเครื่องอัดขึ้นรูป .....	26
2.16	กระบวนการดึงขึ้นรูปอย่างต่อเนื่อง (Pultrusion Process).....	27
2.17	ชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตหลังผ่านการขึ้นรูป .....	28
2.18	ผลทดสอบแรงกดอัดชิ้นงานเสริมแรงเส้นใย 3 ชั้นในแนวตั้ง .....	28
2.19	ผลทดสอบแรงกดอัดชิ้นงานเสริมแรงเส้นใย 3 ชั้นในแนวนอน.....	28
2.20	ผลทดสอบแรงกดอัดชิ้นงานเสริมแรงเส้นใย 6 ชั้นในแนวนอน.....	29
2.21	ผลทดสอบแรงกดอัดชิ้นงานเสริมแรงเส้นใย 6 ชั้นในแนวนอน.....	29
2.22	ลักษณะเส้นใยเหล็กที่ถูกสานเป็นพื้น.....	30
2.23	วิธีการขึ้นรูปด้วยเทคนิค (Vacuum infusion).....	30
2.24	การทดสอบแรงดึง (Tensile test) .....	31
2.25	ภาพถ่ายภาคตัดขวางชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยแผ่นเส้นใย 2 ชั้น .....	32
2.26	วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ชนิดอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและ เส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 L ที่ปริมาณต่าง ๆ .....	33
3.1	แผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) .....	34
3.2	ขนาดชิ้นงานพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)ก่อนขึ้นรูปเป็นชิ้นงานคอมพอสิต .....	35
3.3	ลักษณะจำลองการสานของลวดตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม .....	35
3.4	การสานของตะแกรงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม .....	36
3.5	ขนาดชิ้นงานตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนนำไปขึ้นรูป.....	36
3.6	เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) รุ่น MODEL PR2D-W300L350 PM-WCL.....	37
3.7	เครื่องตัดแผ่นวงจรพิมพ์ SHR-150 .....	38
3.8	เครื่องขัดชิ้นงานแบบจานหมุน .....	38

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.9	เครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 5 กิโลนิวตัน (kN).....	39
3.10	ชุดอุปกรณ์สำหรับหาทดสอบความหนาแน่น.....	40
3.11	กล้องถ่ายภาพสตอริโอ.....	40
3.12	ไมโครมิเตอร์.....	41
3.13	เวอร์เนียคาลิเปอร์.....	41
3.14	เครื่องเคลือบทอง.....	42
3.15	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	42
3.16	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	43
3.17	แสดงตำแหน่งในการตัดเตรียมตัวอย่างในการทดสอบต่าง ๆ ของชิ้นงานหลังขึ้นรูป.....	45
3.18	ขนาดของชิ้นงานทดสอบความสามารถในการรับแรงดึง.....	45
4.1	ชิ้นงานคอมพอสิต PET เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 ชั้น.....	48
4.2	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนขึ้นรูป.....	49
4.3	ลักษณะการวางเรียงประกบของชิ้นงานก่อนขึ้นรูป.....	49
4.4	สภาวะการขึ้นรูปชิ้นงาน.....	50
4.5	ขั้นตอนการนำชิ้นงานจุ่มในน้ำ ก. การนำชิ้นงานเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป ข. การทำให้ชิ้นงานเย็นตัวในน้ำ.....	50
4.6	ชิ้นงานคอมพอสิตเสริมแรงตะแกรงกล้าไร้สนิมจำนวน 1 ชั้น.....	52
4.7	โครงสร้างภาคตัดขวางของชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 ชั้น.....	53
4.8	ความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเสริมแรง ด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 1 ชั้น.....	54
4.9	ความสามารถในการรับแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานคอมพอสิตเสริมแรงด้วย ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 1 ชั้น.....	56
4.10	ระยะยืดของชิ้นงานคอมพอสิตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม เสริมแรง จำนวน 1 ชั้น.....	57

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11	ผิวแตกหักของชิ้นงานคอมพอสิตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 1 ชั้น วางแนว 0 องศา ..... 58
5.1	ประเภทของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรง เหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 2 ชั้น ..... 62
5.2	ขั้นตอนการเรียงชิ้นงานก่อนขึ้นรูปของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลต เสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 2 ชั้น ก่อนขึ้นรูป ..... 63
5.3	การเรียงชิ้นงานก่อนขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมพอสิตวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีน เทอร์ฟทาเลตเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 2 ชั้น ..... 63
5.4	สภาวะการขึ้นรูปชิ้นงาน ของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตเสริม ด้วยแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 2 ชั้น ..... 64
5.5	ลักษณะของชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตเสริมแรงด้วย ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 2 ชั้น ..... 65
5.6	โครงสร้างภาคตัดขวางระดับมหภาคชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทีลีน เทอร์ฟทาเลตเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 2 ชั้น ..... 66
5.7	ความหนาแน่นคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตเสริมแรงด้วย ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 2 ชั้น ..... 68
5.8	ความสามารถในการรับแรงดึงของชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลต เสริมแรงด้วยตะแกรงเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 2 ชั้น ..... 69
5.9	ความสามารถในการยึดของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตเสริมแรง ด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 2 ชั้น ..... 69
5.10	การแตกหักของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตเสริมแรงด้วย ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 60 จำนวน 2 ชั้น ..... 71
5.11	การแตกหักของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตเสริมแรงด้วย ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 100 จำนวน 2 ชั้น ..... 71



## สารบัญรูป (ต่อ)

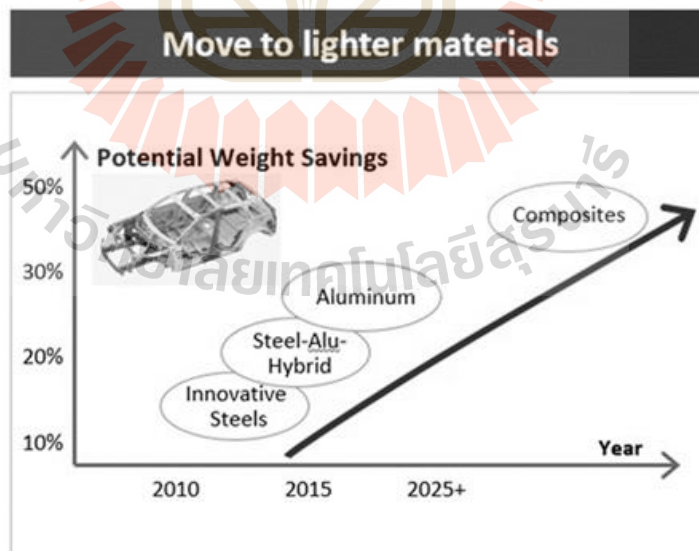
รูปที่	หน้า
5.12	
การแตกหักของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วย ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 200 จำนวน 2 ชั้น .....	72



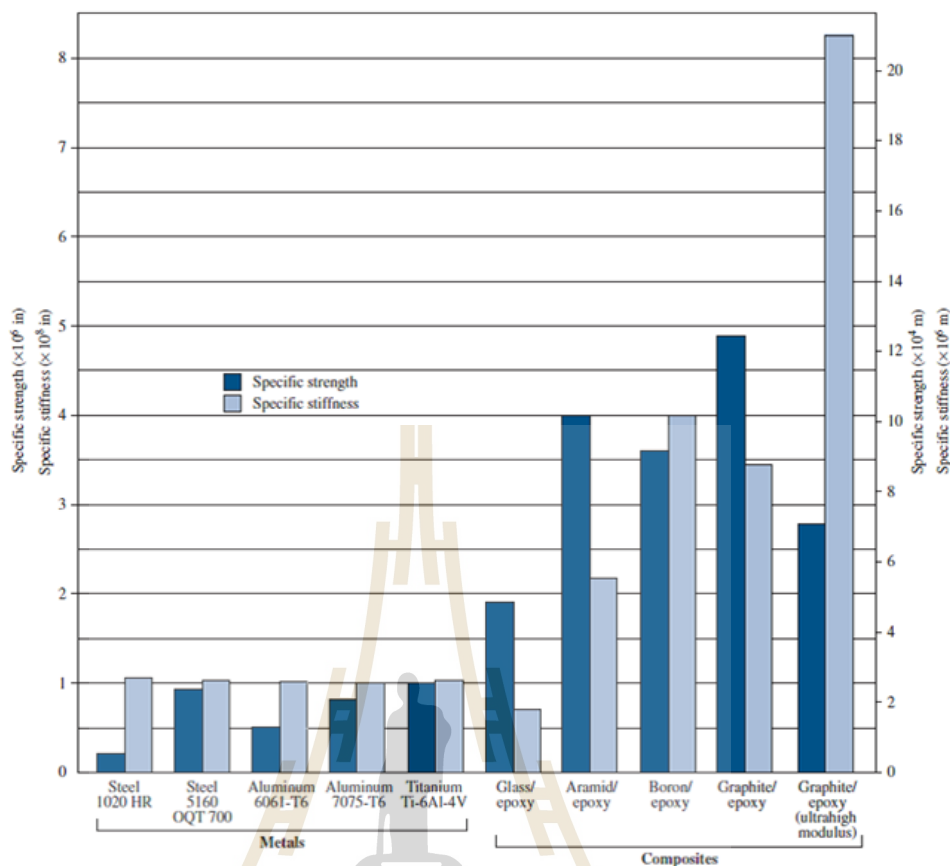
# บทที่ 1

## 1.1 บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมก่อสร้าง และยานยนต์หันมาใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา เช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียม ฯลฯ มากขึ้น เพื่อทดแทนเหล็กกล้า ด้วยเป้าหมายที่แตกต่างกัน เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้างต้องการวัสดุน้ำหนักเบาเพื่อลดต้นทุน โครงสร้างของสิ่งก่อสร้าง ขณะที่อุตสาหกรรมยานยนต์การเลือกใช้วัสดุเบาด้วยเป้าหมายในการประหยัดเชื้อเพลิงสำหรับการขับขี่ รูปที่ 1.1 แสดงแนวโน้มการประยุกต์ใช้วัสดุสำหรับผลิตตัวถังรถยนต์ ตั้งแต่ปีคริสต์ศักราช 2010 ถึงปีคริสต์ศักราช 2025 จากรูปที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าวัสดุที่นำมาผลิตเป็นตัวถังรถยนต์จากอดีตถึงอนาคตจะถูกเปลี่ยนไปเรื่อย ๆ จากเหล็กกล้าเป็นเหล็กกล้าผสมอลูมิเนียมต่อลูมิเนียม และวัสดุคอมโพสิตตามลำดับ เพื่อลดน้ำหนักรถยนต์ จากประเภทของวัสดุดังรูปที่ 1.1 ใช้ผลิตตัวถังรถยนต์จะเห็นว่าแนวโน้มเปลี่ยนมาใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา ทำให้วัสดุคอมโพสิตที่มีความแข็งแรงสูง และเบากว่าวัสดุอื่น ๆ ดังแสดงรูปที่ 1.2 ได้รับความสนใจมากโดยเฉพาะวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย



รูปที่ 1.1 การแนวโน้มการใช้วัสดุน้ำหนักเบาในยานพาหนะ (Syed Mahai, 2018)



รูปที่ 1.2 เปรียบเทียบความแข็งแรงจำเพาะ (Specific stiffness) และความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) ของโลหะและวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ชนิดเทอร์มอเซต เสริมแรงด้วยเส้นใยต่าง ๆ (Robert L Mott, 2003)

วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยถูกนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น คอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยเคฟล่าถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของตัวถังรถยนต์ช่วยเพิ่มความแข็งแรง และลดน้ำหนักของรถยนต์ คอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนก็ถูกนำมาใช้เป็นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องบิน เช่น ปีก หาง ประตู ลำตัวเครื่องบิน เป็นต้น และคอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วผสมเส้นใยคาร์บอนถูกนำมาใช้เสริมโครงสร้างตึกให้แข็งแรงและป้องกันการถล่ม (Plasticity, 2018) อย่างไรก็ตามคอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยส่วนใหญ่ผลิตจากเนื้อพอลิเมอร์อีพ็อกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยเซรามิกส์ โดยเส้นใยเซรามิกส์ที่ถูกใช้มากมีอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยแก้ว (Glass fiber) และเส้นใยเคฟล่า (Aramid fiber) ซึ่งวัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย ดังกล่าวถึงแม้ว่ามีความแข็งแรงจำเพาะสูง น้ำหนักเบา และความต้านทานการกัดกร่อนดี แต่มีความสามารถยืดตัวน้อย อันเกิดจากวัสดุ

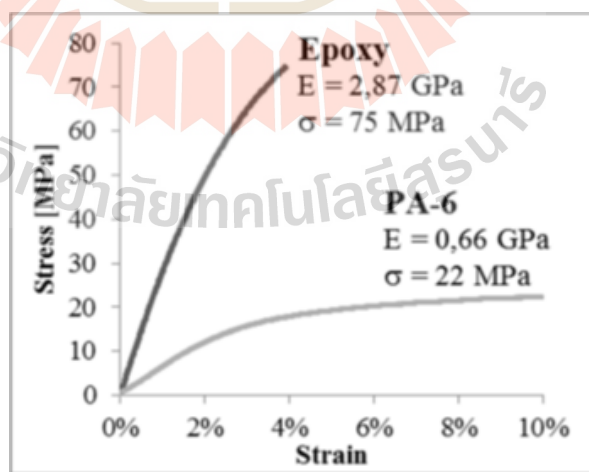
คอมพอลิตผลิตจากเนื้อพื้นอีพ็อกซีเป็นเทอร์โมเซตติงที่ผ่านการบ่มจะมีลักษณะคล้ายแก้ว และเส้นใยเซรามิกส์ที่มีสมบัติความแข็งแรง และเปราะ ดังนั้น นักวิจัยด้านวัสดุศาสตร์จึงพยายามพัฒนาวัสดุคอมพอลิตใหม่ที่สามารถรับแรงและยึดตัวได้ดี

เป็นที่ทราบกันดีว่าวัสดุคอมพอลิตเกิดจากนำวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดมาประกอบกัน สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอลิตจึงขึ้นกับปัจจัยหลัก ๆ 3 ปัจจัย ได้แก่ 1) สมบัติของวัสดุที่ใช้ผลิต 2) การจัดเรียงตัวของส่วนรับแรงหลักของวัสดุ (เส้นใยเสริมแรง) 3) ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและวัสดุเนื้อพื้น (Matrix) ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

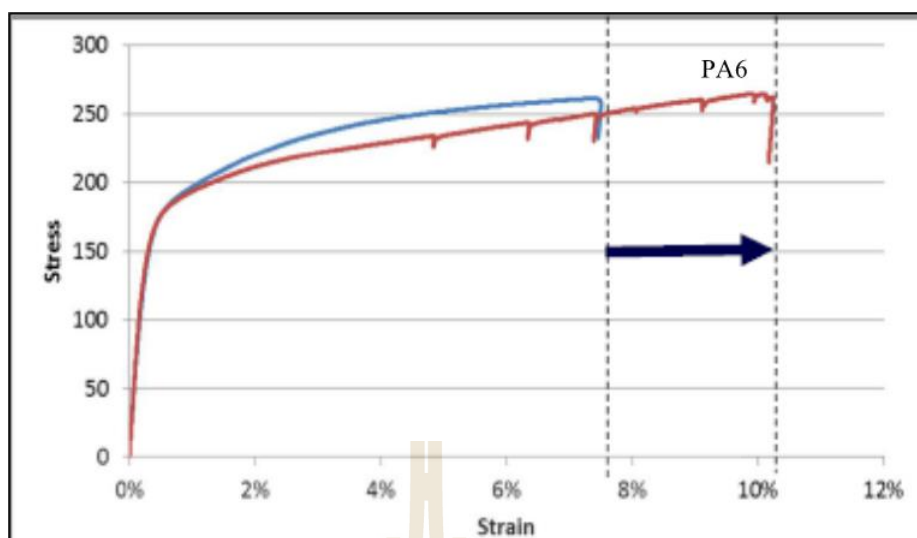
ปัจจัยที่ 1 วัสดุที่ใช้ผลิตเป็นวัสดุคอมพอลิตชนิดพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยจะประกอบด้วยวัสดุ 2 ส่วน คือ วัสดุเนื้อพื้น และ เส้นใยเสริมแรง ดังนั้นสมบัติของวัสดุคอมพอลิตจึงขึ้นกับสองส่วนนี้

ส่วนที่ 1 เนื้อพื้น (Matrix) ที่ทำจากพอลิเมอร์นั้นสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ เทอร์โมเซตติง (Thermosetting matrix) และเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) โดยพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติงมีโครงสร้างโมเลกุลแบบเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลอย่างหนาแน่น ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลขยับตัวยากแม้จะได้รับความร้อนที่สูงพอลิเมอร์ประเภทนี้ เช่น พอลิเอสเตอร์ (Polyester) ซิลิโคน (Silicone) อีพ็อกซี (Epoxy) เป็นต้น โดยพอลิเมอร์ประเภทนี้ที่นิยมนำมาทำเป็นเนื้อพื้นของวัสดุคอมพอลิตในท้องตลาด คือ อีพ็อกซีโดยนำมาใช้ผลิต โครงสร้างเรือขนาดเล็ก หลังการถยนต์ เฟอร์นิเจอร์ขนาดเล็ก (R. Brooks, 2540) ส่วนเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิโพรพิลีน พอลิเอไมด์ และพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต เป็นต้น มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายตรงหรือกึ่งไม่มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลขยับตัวง่ายเมื่อได้รับความร้อน สามารถหลอม และไหลเมื่อมีอุณหภูมิสูง พอลิเมอร์ประเภทนี้ถูกนำมาผลิตเป็นวัสดุคอมพอลิตหลายชนิด อาทิเช่น พอลิโพรพิลีนถูกเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนผลิตเป็นกันชนรถยนต์ และโครงสร้างร่วมในห้องโดยสาร เป็นต้น จากสมบัติที่แตกต่างกันของพอลิเมอร์ทั้งสองการขึ้นรูปคอมพอลิตพอลิเมอร์แต่ละประเภทข้างต้นจึงมีความต่างกัน กล่าวคือ วัสดุพอลิเมอร์ประเภทวัสดุเทอร์โมเซตติงปกติขึ้นรูปด้วยการหล่อเรซินและเติมสารเสริมแรง (เส้นใย) ในแม่พิมพ์โดยปฏิกิริยาของพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการแข็งตัวเป็นรูปร่างขึ้นงานตามต้องการซึ่งหลังการขึ้นรูปจะคงรูปไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ ในขณะที่พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกนั้นสามารถขึ้นรูปด้วยความร้อนร่วมกับแรงอีกทั้งหลังจากคงรูปแล้วหากได้รับความร้อนอีกครั้งส่วนที่เป็นเนื้อพื้นก็จะสามารถหลอมเหลวได้สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ใหม่ตามต้องการ ในกระบวนการผลิตเป็นชิ้นส่วนคอมพอลิตในอุตสาหกรรม กระบวนการผลิตชิ้นส่วนส่วนใหญ่วัสดุที่ใช้ในการผลิตจะอยู่ในรูปของชิ้นงานกึ่งสำเร็จ หรือพรีเพรก (Prepreg) ที่สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนใน

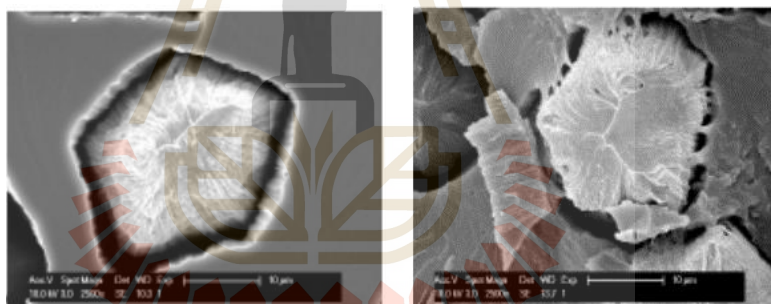
กระบวนการต่อไป ดังนั้น คอมพอลิเมอร์ที่มีเนื้อพื้นเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกเหมาะแก่การนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนในทางอุตสาหกรรมมากกว่าประเภทเทอร์โมเซต สมบัติของคอมพอลิเมอร์กับวัสดุเนื้อพื้นที่ใช้ผลิตเป็นวัสดุตัวอย่าง เช่น มิงงานวิจัยของ Vallens .L และคณะ ได้ทดลองเปรียบเทียบผลของวัสดุเนื้อพื้นของวัสดุคอมพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิมที่ส่งต่อพฤติกรรมความสามารถในการรับแรงดึง การทดลองเปรียบเทียบวัสดุเนื้อพื้นระหว่างพอลิเมอร์เป็นเทอร์โมเซตชนิดอีพ็อกซี (Epoxy) และ ไนลอน (Polyamide /Nylon ,PA6) เสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L จากรูปที่ 1.3 ผลการทดสอบแรงดึงวัสดุเนื้อพื้นทั้งสอง จะเห็นว่า ไนลอนมีความเหนียวแต่ต้านทานแรงดึงต่ำกว่าอีพ็อกซีที่ต้านทานแรงดึงสูงแต่เปราะ เมื่อนำไนลอน และอีพ็อกซีมาผลิตเป็นเนื้อพื้นในวัสดุคอมพอลิเมอร์ผลทดสอบแรงดึงแสดงดังรูปที่ 1.4 จากรูปที่ 1.4 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุคอมพอลิเมอร์เนื้อพื้นเป็น ไนลอนกับอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิมเหมือนกัน พบว่าวัสดุคอมพอลิเมอร์ดังกล่าวมีความสามารถในการรับแรงดึงใกล้เคียงกัน แต่การยืดก่อนเกิดความเสียหายของวัสดุคอมพอลิเมอร์เนื้อพื้นไนลอนสูงกว่าเนื้อพื้นอีพ็อกซี และจากรูปที่ 1.5 แสดงรูปภาพตัดขวางรอยแตกหลังคอมพอลิเมอร์หลังทดสอบแรงดึง พบว่า วัสดุคอมพอลิเมอร์เนื้อพื้นอีพ็อกซีแยกตัวกับเส้นใยเสริมแรง และพื้นผิวการแตกหักเป็นแบบเรียบซึ่งบ่งถึงวัสดุคอมพอลิเมอร์มีการยึดตัวได้น้อยกว่าแตกหักแบบเปราะ ในขณะที่คอมพอลิเมอร์เนื้อพื้นไนลอนมีการยึดเกาะของพอลิเมอร์และเส้นใยก่อนเกิดการแตกหัก ผิวของรอยแตกขรุขระบ่งถึงความสามารถในการยึดตัวก่อนแตกแบบเหนียว



รูปที่ 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดวัสดุพอลิเมอร์ชนิดไนลอน (PA 6) และพอลิเมอร์ชนิดอีพ็อกซี (Epoxy)



รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของวัสดุพอลิเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีเนื้อพื้นพอลิเมอร์ชนิดไนลอน (PA 6) และอีพ็อกซี (Epoxy)



รูปที่ 1.5 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของชิ้นงานคอมพอสิต ณ พื้นผิวรอยแตกหักของวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์เนื้อพื้นต่าง ๆ เสริมเส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิมหลังรับแรงดึง (ก) เนื้อพื้นพอลิเมอร์ชนิดอีพ็อกซี (ข) เนื้อพื้นพอลิเมอร์ชนิดไนลอน (PA 6)

จากแนวคิดดังกล่าวที่สมบัติของพอลิเมอร์เป็นเนื้อพื้นมีความต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต โดยพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกมีสมบัติเชิงกลค่อนข้างดี โดยเฉพาะความสามารถในการยึดตัว ดังแสดงในตารางที่ 1.1 จากตารางที่ 1.1 จะเห็นว่า การเลือกใช้พอลิเมอร์ไคจึงควรตรวจสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์สมบัติพอลิเมอร์ต่าง ๆ ซึ่งพอลิเอทิลีนเทอร์ฟทาเลตมีการยึดตัว และความสามารถในการรับแรงดึงสูงกว่าพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกชนิดอื่น ๆ ทำให้ผู้วิจัยเลือกใช้พอลิเอทิลีนเทอร์ฟทาเลต เพราะน่าจะได้อคอมพอสิตที่มี



ตารางที่ 1.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

PROPERTIES	PET	HDPE	LDPE	PP	PS	PVC	Epoxy
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1370	940-965	910 - 928	902 -906	1050	1380	1116
Young's modulus (MPa)	2800 –3100	600 -1400	200 -400	1100 -1500	400-500	2900-3300	500
Tensile strength (MPa)	55–75	20-32	8-12	30-38	25-69	50-80	73
%Elongation	175	-	570	450	-	21	4.5
Melting point (°C)	260	120	115	165	135	80	50
Impact strength (J/cm <sup>-1</sup> )	9	0.27-10.9	>854	0.27-1	1.09-5.44	0.32	1.1

(Characteristics, Applications and Properties of Polymer, 2016)

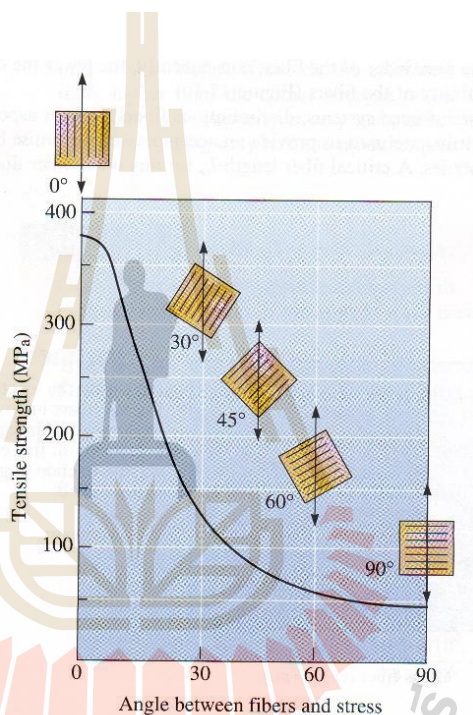
ส่วนที่ 2 เส้นใยเสริมแรง เส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตเนื้อพื้นพอลิเมอร์สามารถใช้ได้ทั้ง เซรามิกส์ พอลิเมอร์ และโลหะ โดยปกติวัสดุเสริมแรงจะเป็นวัสดุหลักที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมพอสิต ดังนั้น การเลือกใช้วัสดุเสริมแรง จึงมีความสำคัญมาก ๆ ตารางที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและ ราคาของวัสดุเส้นใยเสริมแรงชนิดต่าง ๆ จากตารางที่ 1.2 จะเห็นว่าเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) และ เส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิมมีความแข็งแรงสูงแต่เหล็กกล้าไร้สนิมให้ความเหนียวสูงกว่า

ตารางที่ 1.2 สมบัติของเส้นใยเสริมแรง

Material	Modulus of Elastic (GPa)	Ultimate Strength (MPa)	% Elongation	Specific gravity	Cost, \$/kg
Carbon fiber	230	2067	1-3	1.8	220-660
Aramid fiber	124	1379	4	1.43	330-440
Glass fiber	85	1550	4.8	2.58	22-33
Steel fiber AISI1020	206	648	13	7.8	20-25
Stainless Steel (316L) (Ø = 0.50 - 1.0)	193	1700	19.0	8.0	193
Stainless Steel (304) (Ø = 0.50 - 1.0)	240	1850 - 2100	33	8.06	38-48

\*Specific gravity, (ความถ่วงจำเพาะ) คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของสารหนึ่ง ๆ ต่อความหนาแน่นของน้ำ (Autos K. KAW, 2006) และ [www.n-seisen.co.jp](http://www.n-seisen.co.jp)

ปัจจัยที่ 2 การจัดเรียงตัวของส่วนรับกำลังหลัก (เส้นใยเสริมแรง) การเรียงตัวของวัสดุเสริมแรงที่เป็นเส้นใยนั้น มีผลต่อสมบัติทางกลในทิศทางต่าง ๆ มาก หากเราต้องการวัสดุคอมพอสิตที่สามารถรับแรงได้ในหลาย ๆ ทิศทางเราสามารถทำได้จากการออกแบบ การเรียงแนวของเส้นใยเสริมแรง ดังรูปที่ 1.6 ผลของทิศทางการจัดเรียงตัวต่อค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมพอสิต อีพ็อกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว ที่วางในทิศทางต่างกัน

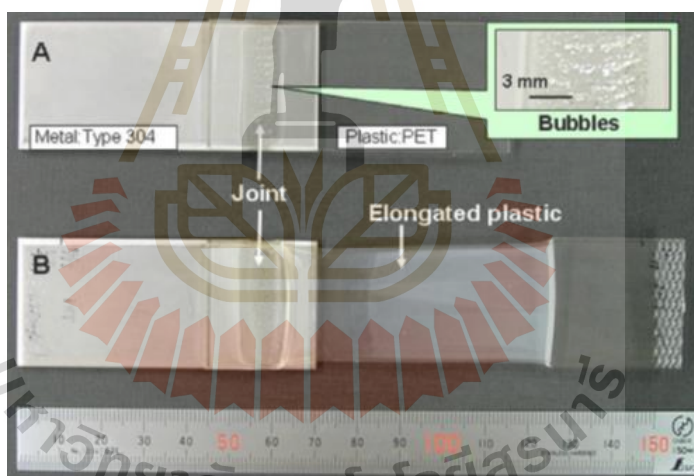


รูปที่ 1.6 ผลของทิศทางการวางเส้นใยเสริมในวัสดุคอมพอสิตต่อความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุคอมพอสิตอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว (แมน อมรสิทธิ์, 2545)

นอกจากนี้ จำนวนชั้นของวัสดุเสริมแรงมีผลต่อสมบัติคอมพอสิต ดังตัวอย่างจากศึกษา งานวิจัยของ Seyyedvahid Mortazavian และ Ali Fatemi (2015) ได้ศึกษาผลของทิศทางการเสริมแรงของเส้นใยในวัสดุคอมพอสิต พบว่า การทิศทางการเสริมแรงมีผลปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงดึงของ โดยในเสริมแรงเส้นใยในทิศทาง 0 องศา วัสดุคอมพอสิตสามารถรับแรงดึงได้สูงสุด และต่ำสุดที่ทิศทาง 90 องศา และอีกงานวิจัยของ Julian Tri Utomo และคณะ (2010) ได้ศึกษาผลของจำนวนชั้นเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยใย

พบว่า จำนวนชั้นเสริมแรงที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงดึงที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ปัจจัยทิศทางและการเสริมแรงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย

ปัจจัยที่ 3 ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเส้นใย และเนื้อพื้นเป็นส่วนที่สำคัญต่อวัสดุคอมพอสิตที่จะผลิตอย่างมากเพราะความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุทั้ง 2 ชนิด จะส่งผลต่อความสามารถในการส่งถ่ายแรงระหว่างเนื้อพื้นกับเส้นใยเสริมแรง การจะบ่งความสามารถในการยึดเกาะของพอลิเมอร์นั้นเราสามารถศึกษาได้จากข้อมูลความสามารถในการเชื่อมติดกันระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุเสริมแรงและเมื่อไม่นานมานี้ในปีคริสต์ศักราช 2018 Katayama และคณะ ศึกษาการเชื่อมโลหะกับพอลิเมอร์ด้วยแสงเลเซอร์ โดยการฉายลำแสงเลเซอร์ลงบนแผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่วางซ้อนทับบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วนำมาทดสอบแรงดึง พบว่า รอยเชื่อมขึ้นงานหลังการเชื่อมมีความแข็งแรงมาก ทำให้เมื่อทดสอบแรงดึงเกิดยึดของพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุพื้นดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการเชื่อม (A) แผ่น SUS 304 บนแผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (B) ชิ้นงานหลังทดสอบแรงดึง

จาก 3 ปัจจัยที่ผู้วิจัยคิดว่า การเลือกใช้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นวัสดุเนื้อพื้น และเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเส้นใยเสริมแรง น่าจะให้วัสดุคอมพอสิตที่แข็งแรง และเหนียวเพราะเนื้อพื้นและเส้นใยเสริมแรงมีความแข็งแรงสูง นอกจากนี้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และเหล็กกล้าไร้สนิมยังสามารถเชื่อมกันได้ การผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิตควรจะได้วัสดุคอมพอสิตคุณภาพสูง เพื่อยืนยันแนวคิดและความเข้าใจผลของทิศทางการจัดวางชั้นเสริมแรง และจำนวนชั้นเสริมแรง

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปร้อน

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลผลของ ขนาด จำนวนชั้น และทิศทางการวาง ของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความสามารถในการรับแรง และความหนาแน่นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม

## 1.3 ขอบเขตการทำวิจัย

เพื่อทำให้งานวิจัยไม่กว้างขวางเกินไป และสามารถจำกัดขอบเขตของการใช้งานผลการศึกษาภายใต้ความมุ่งหมายของงานวิจัยนี้ที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปร้อน และศึกษาอิทธิพลของ ขนาด จำนวนชั้น และทิศทางการวางของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความสามารถในการรับแรง และความหนาแน่นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม งานวิจัยนี้จึงกำหนดขอบเขตในการวิจัยดังนี้

1.3.1 วัสดุเนื้อพื้นที่ใช้ในการศึกษารั้งนี้จะเลือกใช้เฉพาะพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต หนา 0.5 มิลลิเมตรเท่านั้น

1.3.2 วัสดุเสริมแรงใช้เป็นตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 (SUS 304) ขนาดเมช 60 100 และ 200 เท่านั้น

1.3.3 การศึกษาผลของจำนวนชั้นตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมต่อความแข็งแรง และความหนาแน่นของวัสดุคอมพอสิตจะศึกษาเฉพาะการใช้ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 1 และ 2 ชั้นในทิศทางการวาง 0 องศา และ 45 องศาเท่านั้น

1.3.4 การประเมินคุณภาพของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเพียง 1) ภาพถ่ายภาคตัดขวางชิ้นงานคอมพอสิตระดับมหภาค 2) ความหนาแน่น 3) ทดสอบความสามารถในการรับแรงดึง และ 4) ตรวจสอบรอยแตกหักของชิ้นงานคอมพอสิตหลังทดสอบแรงดึง

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้วัสดุคอมพอสิตชนิดใหม่ที่ทำจากพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตกับตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม

1.4.2 ทราบอิทธิพลของขนาด จำนวนชั้น และทิศทางการวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม ต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิตใหม่



## บทที่ 2

### ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ด้วยงานวิจัยนี้เกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งเป็นวัสดุคอมโพสิตใหม่ ดังนั้น เพื่อให้เกิด ความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิตและวิธีการขึ้นรูป ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้น และ ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอันจะทำให้การดำเนินงานวิจัยมีความผิดพลาดน้อยลง โดยมีรายละเอียดการทบทวนการเขียนและวิจัยดังนี้

#### 2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite)

วัสดุคอมโพสิต หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปโดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จะมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้น การทำนายหรือคาดคะเนสมบัติของวัสดุคอมโพสิตจึงสามารถทำนายได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบโดยองค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิตจะมีวัสดุเนื้อพื้น (Matrix) คือ วัสดุที่มีปริมาณมากในวัสดุคอมโพสิตมีหน้าที่ห่อหุ้มวัสดุเสริมแรงและเป็นตัวจับยึดวัสดุให้คงรูป และ วัสดุเสริมแรง (Reinforcement) คือ วัสดุที่มีสมบัติต่างจากวัสดุเนื้อหลักและมีสมบัติเสริมแรง หรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อพื้น

ปัจจุบันวัสดุคอมโพสิตสามารถแยกประเภทขึ้นกับวัสดุเนื้อพื้นที่น่ามาผลิตเป็นวัสดุคอมโพสิตหรือ แยกประเภทตามลักษณะของการเสริมแรง โดยมีรายละเอียดของการแบ่งประเภทของวัสดุคอมโพสิตดังนี้

2.1.1 วัสดุคอมโพสิตแบ่งตามประเภทของวัสดุเนื้อพื้นสามารถแยกออกเป็น 3 ประเภทได้ดังนี้

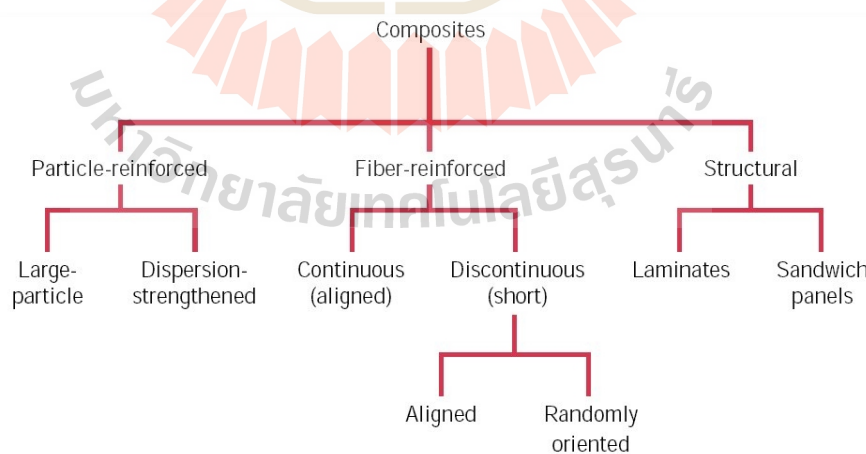
2.1.1.1 วัสดุคอมโพสิตเนื้อพื้นโลหะ (Metal matrix composites-MMCs) เป็นวัสดุคอมโพสิตที่เนื้อพื้นทำจากโลหะ สมบัติเด่น คือ ทนทานต่ออุณหภูมิสูง ไม่ติดไฟ แต่มีราคาสูง มักถูกนำไปส่วนผลิตภัณฑ์เชิงวิศวกรรมที่ต้องการสมบัติพิเศษ อาทิ ส่วนประกอบของยานอวกาศ เป็นต้น (กาญจนวรรณิชย์, 2014)



2.1.1.2. วัสดุคอมพอสิตเนื้อพื้นเซรามิกส์ (Ceramic Matrix Composites-CMCs) วัสดุเนื้อพื้นทำจากเซรามิกส์ เช่น ซีเมนต์ ฯลฯ มีข้อดีที่สามารถทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ดี แต่มีความแข็งแรงน้อยกว่าวัสดุคอมพอสิตเนื้อพื้นโลหะ ตัวอย่างคอมพอสิตกลุ่มนี้ที่พบเห็นในชีวิตประจำวัน ได้แก่ คอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปูน กรวด ทราช เหล็กเส้น) เป็นต้น ขณะที่วัสดุคอมพอสิตเซรามิกส์ได้รับการพัฒนาให้ลู่หน้าไปมาก โดยมีการใช้วัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใย ใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เช่น กังหันใบพัดของเครื่องยนต์ไอพ่น เป็นต้น

2.1.1.3. วัสดุคอมพอสิตเนื้อพื้นพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composites-PMCs) สามารถใช้เนื้อพื้นที่ทำจากทั้งในเทอร์โมพลาสติกหรือเทอร์โมเซตพลาสติก วัสดุคอมพอสิตกลุ่มนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาต่ำกว่าวัสดุคอมพอสิตชนิดอื่น ๆ อีกทั้ง วัสดุคอมพอสิตชนิดนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบเนื่องจากขึ้นรูปง่ายตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่พบเห็นได้ง่ายของคอมพอสิตกลุ่มนี้ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากไฟเบอร์กลาสต่าง ๆ

2.1.2 วัสดุคอมพอสิตแบ่งประเภทตามลักษณะรูปร่างของวัสดุเสริมแรงที่กระจายตัวอยู่ภายใน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ประกอบไปด้วย วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle Reinforce Composites) วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยโครงสร้าง (Structure Composites) วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber Reinforce Composites) โดยประเภทของคอมพอสิตในกลุ่มนี้ แสดง ในรูปที่ 2.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุคอมพอสิตตามลักษณะการเสริมแรง

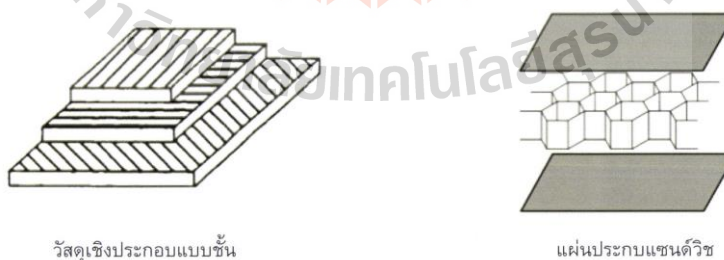
(William D. Callister Jr. 2003)

2.1.2.1 วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle -Reinforced Composites) คือ วัสดุคอมพอสิตที่มีอนุภาคของวัสดุเสริมแรงกระจายอยู่ในเนื้อพื้น ทำหน้าที่เสริมแรง โดยรูปร่างของอนุภาคนั้นมีทั้งที่เป็น อนุภาคกลม แผ่นบาง หรือ เม็ดขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2.2



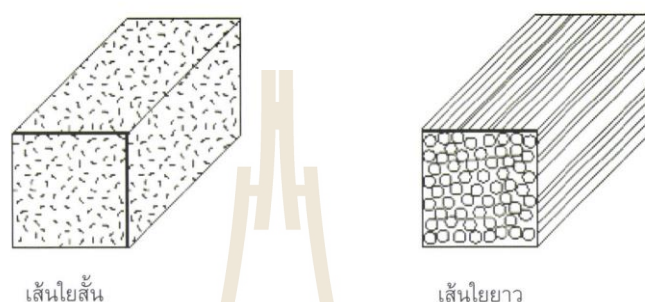
รูปที่ 2.2 วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle -Reinforced Composites)  
(German, R. M. ,2016)

2.1.2.2 วัสดุคอมพอสิตเสริมแบบโครงสร้าง (Structure Composites) คือคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ วัสดุคอมพอสิตแบบชั้น (Laminar Composites) มีลักษณะเป็นการซ้อนทับในทิศทางที่แตกต่างกันของแผ่นซีทที่มาเสริมแรงหลาย ๆ ชั้น และวัสดุคอมพอสิตแบบแซนด์วิช (Sandwich Panel) มีลักษณะเป็นการประกบแกนกลางด้วยวัสดุชนิด โครงสร้างรังผึ้ง โดยมีแผ่นกาวเป็นตัวเชื่อม ส่วนมากใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงและน้ำหนักที่เบา อาทิ ปีกเครื่องบิน



รูปที่ 2.3 วัสดุคอมพอสิตชนิด โครงสร้าง (Structure Composites))  
(German, R. M., 2016)

2.1.2.3 วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-Reinforced Composites) คือ วัสดุคอมพอสิตที่มีเส้นใยเป็นวัสดุเสริมแรง ทั้งนี้ ความสามารถในการเสริมแรงจะขึ้นอยู่กับ การจัดเรียงตัวของเส้นใย ซึ่งอาจจะเป็นการจัดเรียงแบบสุ่มหรือเรียงตัวในทิศทางเดียวกันก็ได้ โดยวัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของเส้นใย ได้แก่ เส้นใยสั้น และเส้นใยยาว ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (German, R. M. ,2016)

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าคอมพอสิตมีขอบข่ายกว้างครอบคลุมหลากหลายประเภท ข้างต้นแต่ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะ วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย เพราะงานวิจัย มุ่งเน้นไปที่วัสดุคอมพอสิตนี้

## 2.2 วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย

คอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง เมื่อเทียบกับน้ำหนัก ลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของค่าความแข็งแรงจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุดกับความถ่วงจำเพาะ โดยส่วนประกอบของคอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย คือ วัสดุเนื้อพื้นพอลิเมอร์และเส้นใยโดยการเพิ่มความแข็งแรงของ วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย อาศัยสมบัติของเส้นใยเสริมแรงที่นำมาประกอบผลิต เป็นวัสดุคอมพอสิต เส้นใยเหล่านี้ต้องมีการยึดเกาะตัวกันกับเนื้อพื้นนั้น ได้ดีมีความคงตัว (Stable) ไม่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างขึ้นรูป อาจเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง หรือเส้นใยสั้นก็ได้ ดังรูปที่ 2.4 โดยปกติ สมบัติของวัสดุคอมพอสิตจะขึ้นกับปัจจัย 3 ประการ คือ 1) สมบัติของพอลิเมอร์ (เนื้อพื้น) 2) สมบัติของเส้นใยเสริมแรง และ 3) การจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง โดยมีรายละเอียดดังนี้

## 2.2.1 วัสดุเนื้อพื้นพอลิเมอร์

พอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดโมเลกุลใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว สำหรับเนื้อพื้นพอลิเมอร์สามารถแบ่งย่อยออกเป็นเนื้อพื้นเทอร์โมเซตติง (Thermosetting Matrix) และ เนื้อพื้นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Matrix) ที่มีความแตกต่างกันในพฤติกรรมเชิงความร้อนของพลาสติกมีรายละเอียด ดังนี้

2.2.1.1 วัสดุพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ (Thermosetting Matrix) โครงสร้างเป็นร่างแหหรือเกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างโมเลกุล ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาเคมี หรือ โครงสร้างร่างแห (cross links) จำกัดการเคลื่อนไหวของโมเลกุลพอลิเมอร์ และเมื่อได้รับความร้อนจะเสื่อมสภาพ โดยไม่สามารถอ่อนตัว หรือหลอมได้ใหม่ สมบัตินี้ทำให้การนำเทอร์โมเซตกลับมาใช้ใหม่เป็นไปได้ยาก แม้ว่าปัจจุบันจะมีการวิจัยและพัฒนาด้านรีไซเคิลเทอร์โมเซตมากขึ้นก็ตาม พอลิเมอร์เทอร์โมเซตได้แก่ ฟีนอลิกรีซิน อีพอกซี และ โพลียูรีเทน เป็นต้น พลาสติกหรือเรซินเหล่านี้จะใช้งานหรือผ่านขั้นตอนขึ้นรูป ในรูปของเหลวที่มีความหนืดต่ำสามารถไหลไปตามแบบหรือแม่พิมพ์ได้ จากนั้น เรซินจะถูกบ่มโดยความร้อนหรือสารเร่งปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดการแข็งตัว

2.2.1.2 วัสดุพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และเมื่อเย็นลงจะแข็งตัว สามารถเปลี่ยนรูปได้ พลาสติกประเภทนี้โครงสร้างโมเลกุลเป็นโซ่ตรงยาวพลาสติกที่แข็งตัวแล้วสามารถนำมาหลอมซ้ำได้ ด้วยความร้อนเทอร์โมพลาสติกจึงเป็นวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ด้วยเทคนิคพื้นฐาน เช่น การฉีด การอัดรีด หรือการปั่นเป็นเส้นใย ซึ่งเป็นพลาสติกที่ใช้งานทั่วไป ได้แก่ พอลิเอทิลีน (Polyethylene : PE), พอลิพรอพิลีน (Polypropylene : PP), พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl Methacrylate : PMMA), ไนลอน (Nylon), และ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate: PET) เป็นต้น

อย่างไรก็ตามการที่จะเลือกใช้วัสดุเนื้อพื้นชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติในการประยุกต์ใช้งานเป็นสำคัญ จากตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์ แต่ละชนิด พบว่า เทอร์โมพลาสติกที่มีความเหนียว เปราะเช่นต์การยึดตัวสูง และรับแรงกระแทกได้ดีกว่า พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต ซึ่งหากพิจารณาพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจัดอยู่ในประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีความเหนียว ความสามารถรับแรงดึง เปราะเช่นต์การยึดตัว รับแรงกระแทกได้ดี หากเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก ซึ่งอาจจะช่วยให้คอมพอลิตที่มีเนื้อพื้นเป็นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีสมบัติด้านความเหนียวและรับแรงกระแทกได้ดีตามไปด้วยก็ได้

ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

Type	Polymer*	Tensile Modulus	Tensile Strength	Elongation	Impact Strength	
		GPa (ksi)	MPa (ksi)	%	J/m (ft-lb/in) (notched)	
Thermoplastic	Cellulose Acetate	1.59 (230)	37.6 (5.45)	38	150	(2.8)
	Nylon 66	2.07 (300)	72.4 (10.5)	180	80	(1.5)
	Polycarbonate	2.41 (350)	60.7 (8.8)	115	790	(14.8)
	Polyethylene (LD)	0.39 (57)	20.1 (3.0)	570	260	(5.0)
	Poly(ethylene terephthalate)	3.55 (500)	65.5 (9.5)	175	24	(0.45)
	Poly(methylmethacrylate)	3.10 (450)	62.1 (9.0)	6.0	320	(0.4)
	Polypropylene	1.38 (200)	33.8 (4.9)	450	70	(1.3)
	Polysulfone	2.48 (360)	70.3 (10.2)	75	64	(1.2 <sup>a</sup> )
Thermosetting	Polyimide	3.10 (450)	72.4 (10.5)	6.0	59	(1.1)
	Poly(vinylchloride) (rigid)	3.31 (480)	48.2 (7.0)	21	545	(10.2)
	Polyurethane (rigid)	3.55 (500) <sup>b</sup>	72.4 (10.5)	4.5	320	(0.4)
	Epoxy (cast)	2.41 (350)	58.6 (8.5)	4.5	32	(0.6)

ที่มา Polymer Engineering Science and Viscoelasticity: An Introduction (1996), pp. 69

### 2.2.2 เส้นใยเสริมแรง

เส้นใย หมายถึงวัสดุหรือสารใด ๆ ทั้งที่เกิดจากธรรมชาติและที่เกิดจากมนุษย์สังเคราะห์ขึ้น โดยตัวอย่างเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยเสริมแรงที่มีในปัจจุบัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 จากตารางที่ 2.2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบสมบัติ พบว่า เส้นใยธรรมชาติ มีสามารถรับแรงดึงต่ำกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เส้นใยธรรมชาติยังมีข้อจำกัดในส่วนของอายุการใช้งานที่สั้นและความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิต่ำ ทำให้ไม่ถูกนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนทางวิศวกรรม

ตารางที่ 2.2 สมบัติของเส้นใยชนิดต่าง ๆ

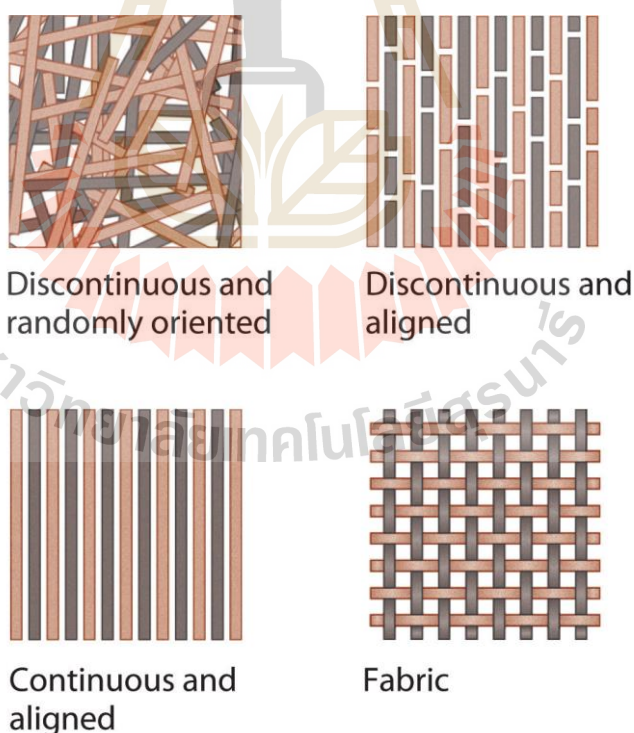
Fiber	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Elongation (%)	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)
Aramid	1.4	3.3-3.7	3000-3150	63-67
E-glass	2.5	2.5-3	2000-3500	70
S-glass	2.5	2.8	4570	86
Jute	1.3-1.6	1.5-1.8	393-800	10-30
Sisal	1.33-1.5	2-14	400-700	9-38
Bamboo	1.2-1.5	1.9-2.3	500-575	27-40
Oil palm	0.7-1.6	4-8	50-400	0.6-9
Steel fiber AISI1020	7.8	13	648	206
Stainless Steel (316L)	8.0	19.0	1700	193
Stainless Steel (304)	8.06	33	1850 - 2100	240

ที่มา (Balakrishnan, P และคณะ 2016; pp. 365–383.) (Verma, D และ คณะ 2007) Kumar, R และ คณะ 2019) (Menezes, P.L และคณะ 2012; pp. 329–345.)

ในขณะที่การเลือกใช้เส้นใยสังเคราะห์ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนมักนิยมเลือกใช้เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว และ เส้นใยอะรามิก เป็นเส้นใยหลักสามประเภทที่ใช้ในการผลิตเป็นคอมโพสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยและ มักถูกตั้งชื่อตามเส้นใยเสริมแรง เช่น CFRP สำหรับคอมโพสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน สมบัติที่สำคัญที่สุดที่แตกต่างกันระหว่างประเภทของเส้นใย คือความแข็งแรงและความเค้นดึง แต่เมื่อเทียบเส้นใยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength) จะพบว่า เส้นใยเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมีความเหนียวและความสามารถยึดตัวได้สูงกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยคาร์บอน ซึ่งนั่นอาจจะหมายถึง เส้นใยเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เมื่อนำมาเสริมแรงพอลิเมอร์จะได้คอมโพสิตที่มีสมบัติเหนียวและความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ดีกว่าการใช้เส้นใยเสริมแรง เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว และ เส้นใยอะรามิก



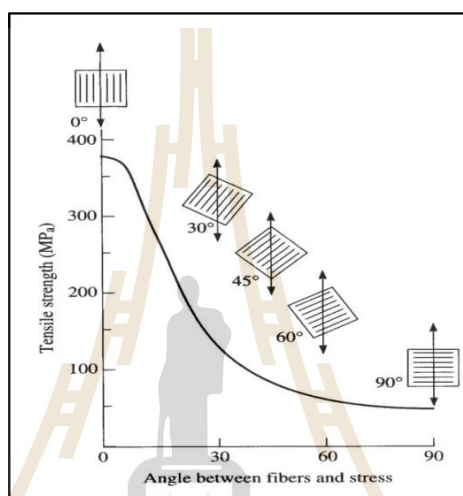
2.2.3 การจัดเรียงตัวของเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติวัสดุคอมพอสิตเส้นใยเสริมแรงการจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงสามารถเรียงในวัสดุพื้นหลักได้หลายรูปแบบแต่สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ดังนี้ เส้นใยยาวไม่ต่อเนื่องเรียงแบบสุ่ม (Discontinued and random) เส้นใยยาวไม่ต่อเนื่องเรียงแนวเดียวกัน (Discontinued and aligned) เส้นใยยาวต่อเนื่องเรียงแนวเดียวกัน (Continued and aligned) และ การเรียงเส้นใยยาวต่อเนื่องสานเป็นผืน (Fabric) โดยแต่ละแบบมีสมบัติที่ต่างกัน กล่าวคือ เส้นใยเสริมแรงที่เรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่องเรียงสุ่ม (Discontinued and random) สมบัติด้านทานแรงดึงใกล้เคียงกันทุกทิศทาง (ไอโซโทรปิก) แต่ประสิทธิภาพการเสริมแรงเป็น 1 ใน 5 ของชนิดที่เส้นใยเรียงแนวเดียว ส่วนเส้นใยยาวไม่ต่อเนื่องเรียงแนวเดียวกัน (Discontinued and aligned) มักนิยมใช้กับเส้นใยแก้ว สมบัติการต้านทานแรงดึงในทิศทางขนาดเส้นใยจะสูงกว่าทิศทางตั้งฉากมาก แต่สมบัติจะด้อยกว่าเส้นใยยาวต่อเนื่องเรียงแนวเดียวกัน (Continued and aligned) ซึ่งสมบัติการต้านทานแรงดึงในทิศทางขนานเส้นใยจะสูงกว่าทิศทางตั้งฉากมาก และ การเรียงเส้นใยยาวต่อเนื่องสานเป็นผืน (Fabric) จะมีสมบัติด้านทานแรงดึงในทิศทางตั้งฉากและขนานกับแรงดึกว่าแบบอื่น ๆ



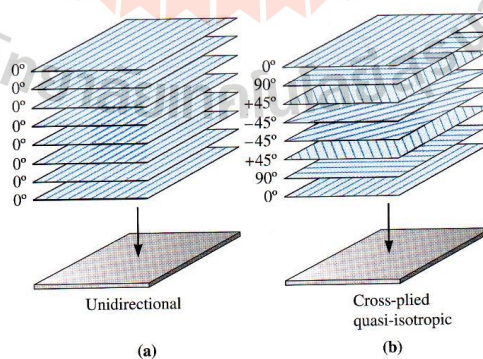
รูปที่ 2.5 รูปแบบการจัดเรียงตัวของเส้นใยใน แบบต่าง ๆ ([www. saylordotorg.github.io](http://www.saylordotorg.github.io))



โดยทั่วไปเส้นใยมักถูกจัดวางในแนวศูนย์กลางเพื่อให้อยู่ในแนวเดียวกับทิศทางของความเค้น ในขณะที่ความแข็งแรงจะต่ำเมื่อเส้นใยมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตั้งฉากกับแนวความเค้นที่มากระทำ ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.6 จากดังกล่าวทำให้วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยมีลักษณะเด่นอีกอย่างหนึ่ง คือ สามารถปรับแนวรับแรงให้เหมาะสมกับสภาพของแรงที่มากระทำ ยิ่งกว่านั้นเรายังสามารถจัดวางวัสดุเสริมแรงได้หลายชั้นในหลายทิศทางในพื้นที่หลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ทำให้การรับแรงที่ดีเกิดขึ้นได้หลายแนวบนชิ้นงานคอมพอสิต



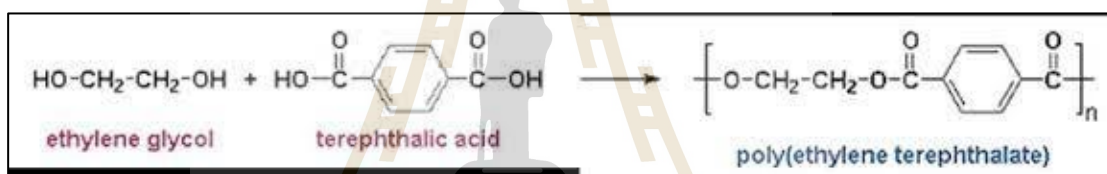
รูปที่ 2.6 ผลของการทิศทางเสริมแรงของเส้นใยที่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงดึง (กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และคณะ, 2553)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของวัสดุคอมพอสิตที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยทิศทางต่าง ๆ หลายชั้น (a) การจัดเรียงตัวของเส้นใยทิศทางเดียวกันซ้อนกันหลายชั้น (b) การจัดเรียงตัวของเส้นใยหลายชั้นและหลายทิศทาง (กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และคณะ, 2553)

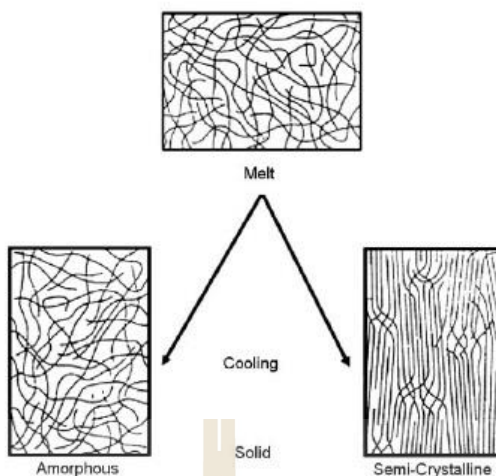
## 2.3 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate: PET)

พอลิเมอร์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการอ่อนตัว โครงสร้างภายในเนื้อพอลิเมอร์จะไม่เกิดการเสื่อมสภาพเมื่อหยุดการให้ความร้อนกับพอลิเมอร์และ เมื่อพอลิเมอร์เย็นลงจะกลับมาสภาพเดิมก่อน ถ้าความร้อนที่ให้ไม่สูงเกินไป โดยมีสมบัติเด่นคือ มีความเหนียวและยืดหยุ่น ทนต่อแรงกระแทก จึงไม่แตกเมื่อถูกแรงกดดัน และมีความใส โดยทั่วไป PET มีจุดหลอมเหลวประมาณ 260 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นประมาณ 1.38 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ที่ 20 องศาเซลเซียส) และ ดัชนีหักเหของแสงอยู่ในช่วง 1.57-1.58 ซึ่งการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization) ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างเอทิลีนไกลคอลกับไดเมทิลเทเรฟทาเลต หรือระหว่างเอทิลีนไกลคอลกับกรดเทเรฟทาลิก โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในการผลิตเรซินของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Speight, J. G.; Lange, Norbert Adolph (2005). pp. 2807–2758.

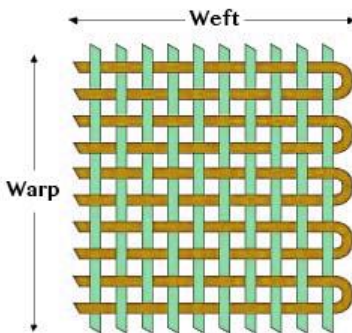
พลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตนี้ มีทั้งโครงสร้างแบบอสัณฐาน (A-PET) ส่วนที่โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบกึ่งผลึก (Semi-Crystalline) เป็นส่วนที่โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเป็นระเบียบผสมกัน (C-PET) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งสมบัติของโครงสร้างทั้งสองแบบมีความต่างค่อนข้างมาก C-PET มีความแข็งแรงสูง แต่ความสามารถในการรับแรงกระแทกต่ำ ส่วน A-PET จะมีสมบัติในทางกลับกัน



รูปที่ 2.9 จำลองพฤติกรรมเกิดผลึกของพอลิเมอร์พอลิโอทีลีนเทรฟทาเลต \n (<https://commons.wikimedia.org/>)

### 2.4 ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม

ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นการนำเส้นลวดหลายเส้น (จำนวนเส้นขึ้นอยู่กับช่องหรือตะแกรงที่ต้องการ) มาเรียงกันอย่างมีระเบียบตามแนวอนขนานไปกับเครื่อง การสานตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม มีหลักการพื้นฐานเหมือนกันในทุกรูปแบบการผลิต โดยเลียนแบบมาจากการ ทอผ้า ซึ่งจะมีเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิมในแนวยาว คือ เส้นยืน (Warp) และเส้นลวดในแนวขวาง คือ เส้นพุ่ง (Weft) เส้นลวดยืนจะถูกจัดเรียงตัวขนานกันบนแกนที่มีความกว้างใกล้เคียงกับตะแกรง เรียกว่า แกนเส้นยืน (Warp beam) และ ถูกวางไว้ด้านหลัง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งลักษณะการสานนี้มี 4 รูปแบบ ดังรูปที่ 2.11 ดังนี้



รูปที่ 2.10 แสดงหลักการสานตะแกรงกล้าไร้สนิม (von mirjam hintz , 2020 )

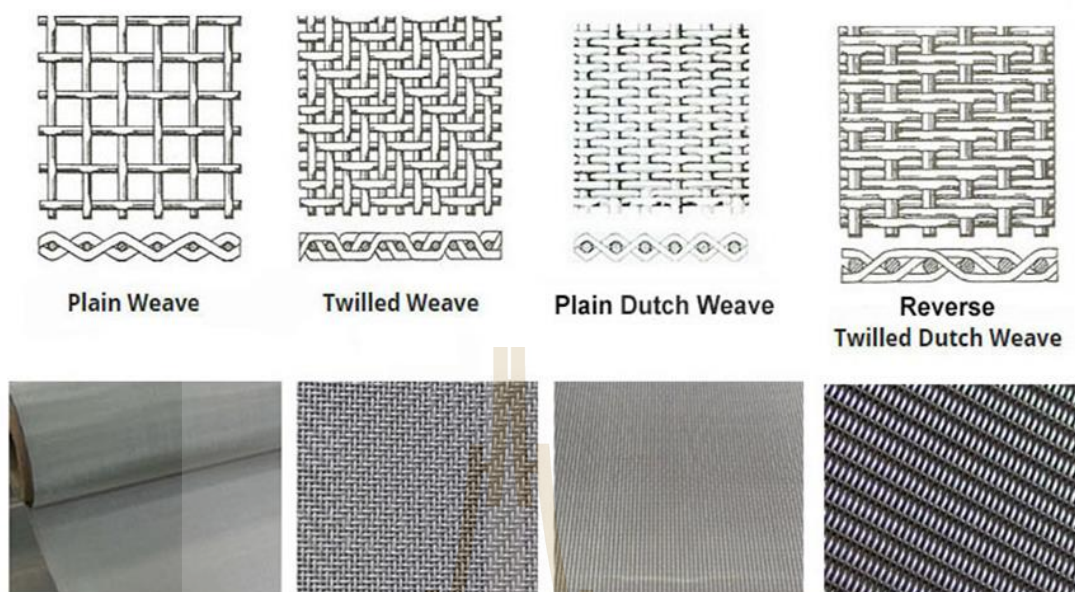
2.4.1 สานขัดกัน (Plain weave) ลักษณะการสานจะคล้ายกับการสานแบบทั่วไป ในชั้นแรกนำเส้นลวดเส้นแรกวางตลอดข้างใต้ จากนั้นวางข้ามเส้นต่อไปเรื่อย ๆ โดยโครงสร้างจะเป็นแบบการสาน ขึ้น 1 ลง 1 ทั้งในลวดแนวตั้ง และแนวนอน ลักษณะช่องจะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

2.4.2 สานทแยง (Twilled weave) สานแบบลายทแยง เรียกว่า ลายสอง เป็นตะแกรงที่ใช้ได้ทนที่สุด มีลักษณะเด่นคือ ลวดพุ่งจะสอดขัดกับลวดยืน ทำให้เกิดสันนูนเป็นแนวเส้นทแยงบนตะแกรง ซึ่งอาจมีลายทแยงแบบทแยงขวาที่เรียกว่า Z-twill และทแยงซ้ายที่เรียกว่า S-twill หรืออาจเป็นแบบผสมที่มีลักษณะทแยงซ้ายขวามาพบกันตรงกลางที่เรียกว่าลายสองพ้อยน์ (Point-twill) ก็ได้

2.4.3 สานขัดกันแบบดัตช์ (Plain Dutch Weave) ลักษณะการทอจะคล้ายกับ Plain weave แต่มีการสานเพิ่มขึ้นอีก 1 ชั้น เป็นการสานแบบ 2 ชั้น โดยโครงสร้างจะเป็นแบบลักษณะขึ้น 1 ลง 1 การทอจะใช้เส้นลวดด้านหนึ่งที่มีขนาดใหญ่และระยะห่างมากกว่าเส้นลวดที่ขัดกันในแนวขวาง ส่วนอีกด้านหนึ่งการทอ จะใช้เส้นลวดที่มีขนาดเล็ก(ละเอียด) และระยะห่างน้อยจะเรียงขัดกัน เส้น ต่อเส้น จึงทำให้เกิดช่องขัดกัน มีความหนาแน่น ความแข็งแรงและทนทาน มีประสิทธิภาพดีมากกว่าการทอแบบ Plain weave การทอแบบนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ ตะแกรงลายเสือ “

2.4.4 สานทแยงย้อนกลับ (Reverse Twilled Weave) การทอลักษณะย้อนกลับของการจัดเรียงลวดแบบลายขัดกันแบบดัตช์ Plain Dutch Weave โดยที่ลวดพุ่งที่ละเอียดกว่าจะถูกจัดวางเข้าด้วยกันอย่างแน่นหนาและ มีการทอลวดที่หนาขึ้นตามลวดยืนตามที่กำหนด ลายนี้มีความแข็งแรงเชิงกลไก โดยมีปริมาณของลวดสูงและทำงานได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการ ใช้งานตะแกรงแนวตั้งและแนวนอน

### Weave styles:



รูปที่ 2.11 ลักษณะการสานตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมแบบต่าง ๆ (<https://www.fratellimariani.com/>)

ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลเปรียบเทียบสมบัติของการสานแต่ละแบบของเส้นใยคาร์บอน ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของการสานเส้นใยคาร์บอน (<https://www.plastics.gl/>)

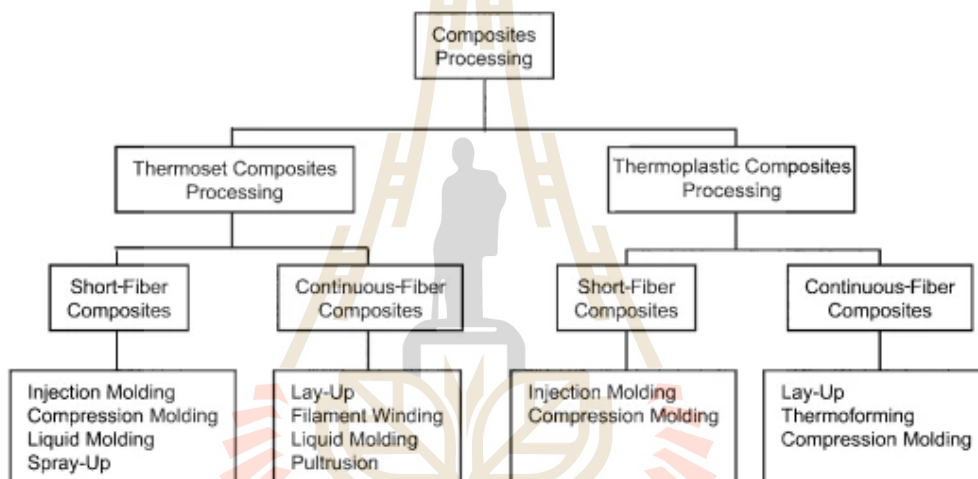
Properties	Plain weave	Twilled Weave
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1850	1850
Area (kg/m <sup>2</sup> )	1960	1980
Warp/inch & Weft/inch	12	16
Tensile strength (MPa)	0.3	0.147
Elongation %	1.25	1.85

จะเห็นได้ว่าสมบัติของเส้นใยที่ถูกสานต่างกันระหว่างแบบแบบขัดกัน (Plain weave) และสานแนวทแยง (Twilled Weave) มีความหนาแน่นเท่ากัน ซึ่งการสานแบบขัดกัน(Plain weave) มีปริมาณของเส้นใยต่ำกว่าแต่ความสามารถรับแรงดึงได้สูงกว่า (Plain weave) การสานแบบทแยง (Twilled Weave) ซึ่งงานนี้จึงเลือกใช้ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมที่สานแบบขัดกัน



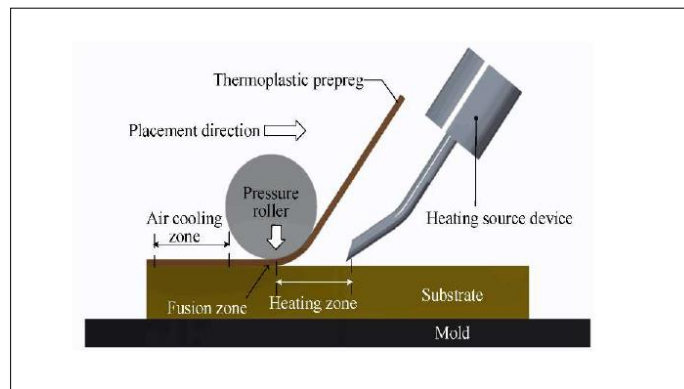
## 2.5 การขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย

วิธีการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตผลิตจะแบ่งประเภทตามสมบัติ ของวัสดุพื้นและรูปร่างเส้นใย ซึ่งกล่าวโดยสรุปได้ ดังรูปที่ 2.12 การขึ้นรูปวัสดุพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยขึ้นอยู่กับพฤติกรรมเชิงความร้อนของพอลิเมอร์เป็นสำคัญ (กิตตพงษ์ กิมะพงศ์, 2533) เพราะหลักการสำคัญคือการผสมวัสดุพอลิเมอร์เข้ากับเส้นใย ซึ่งเกิดขึ้นได้ดีในขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวโดยการให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลวและขึ้นรูปก่อนที่จะทำให้เย็นตัวลงเพื่อเกิดการคงรูป โดยในอุตสาหกรรมวัสดุคอมพอสิต กระบวนการผลิตคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous-Fiber Composites) มีการขึ้นรูปได้หลัก 3 วิธีดังนี้



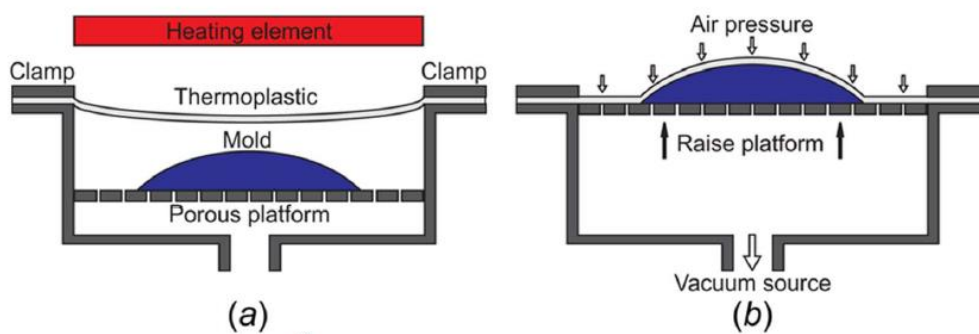
รูปที่ 2.12 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Girendra Pal Singh, 2020)

2.5.1 การขึ้นรูปจัดวาง (Lay-up process) ดังรูปที่ 2.13 แสดงการจำลองการขึ้นรูปด้วยการจัดวางพอลิเมอร์กับเส้นใย โดยเริ่มจากการให้ความร้อนพร้อมกับการใช้ลูกรีดกดให้เรียบแผ่นพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติก จากนั้น ปูด้วยเส้นใยเสริมแรงลงไปโดยเรียงเป็นชั้น ๆ ตามการออกแบบวิธีการนี้เหมาะกับพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นมาแล้ว



รูปที่ 2.13 การขึ้นรูปด้วย (Lay-up process) (Zhong liang Cao, M., 2020)

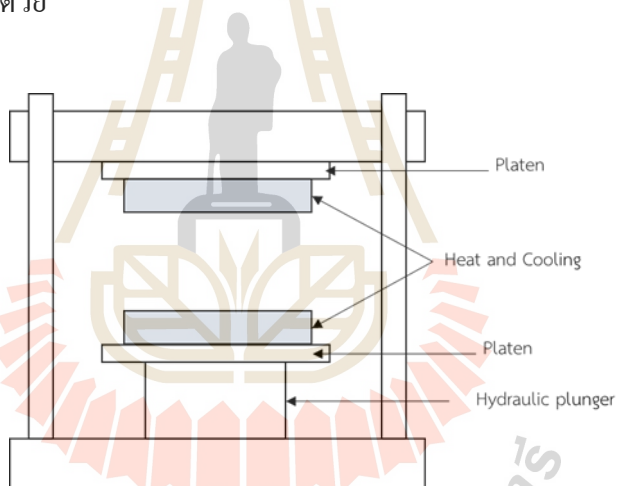
2.5.2 กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง Thermoforming กรรมวิธีการผลิตประเภทอัดขึ้นรูปพลาสติกแผ่น (Thermoforming) เป็นกรรมวิธีซึ่งนำมาใช้ใน อุตสาหกรรม เมื่อปี ค.ศ.1950 เครื่องมือและ เครื่องจักรที่ใช้มีหลายชนิดแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดการใช้งาน แต่มีหลักการเหมือนกัน คือ นำแผ่นเทอร์โมพลาสติกกับเส้นใยเสริมแรงมาซ้อนกันหลังจากที่ไปให้ความร้อนพลาสติกจนอ่อนตัวแล้วนำไปอัดขึ้นรูปทิ้งให้เย็น แผ่นคอมพอสิตจะคงรูปตามต้องการ กรรมวิธีการผลิตประเภทนี้ใช้กับการผลิตชิ้นงานจำนวนไม่มาก บางครั้งจะใช้กับงานออกแบบผลิตภัณฑ์ทดสอบ (Prototype) ซึ่งสามารถทำแม่แบบได้รวดเร็วและใช้ผลิตงานที่มีขนาดใหญ่ได้ แต่จะผลิตได้เร็วกว่าวิธีการขึ้นรูปด้วยมือ (Lay-up process) แต่ต้องลงทุนด้านแม่พิมพ์ จากรูปที่ 2.14 a และ b แสดงตัวอย่างการผลิตด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง Thermoforming จากรูปที่ 2.14 a คือ การให้ความร้อนจนคอมพอสิตเริ่มอ่อนตัว และรูปที่ 2.14 b เมื่อคอมพอสิตเริ่มอ่อนตัวก็จะสูญญากาศภายในออกจนพอลิเมอร์ถูกแม่พิมพ์อัดจนออกมาเป็นรูปร่างตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 2.14 กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง Thermoforming (Keith Q, 2018)



2.5.3 การอัดขึ้นรูป (Compression molding press, hot press) ดังแสดงรูปที่ 2.15 เป็นวิธีการขึ้นรูปคอมพอสิตที่มีกระบวนการไม่ซับซ้อน เครื่องมือมีราคาไม่สูง ไม่มีเศษเหลือจากกระบวนการผลิตมากเหมือนกระบวนการอื่นๆ พลาสติก สามารถใช้กับเส้นใยยาวที่เป็นส่วนเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต และสามารถผลิตในปริมาณต่อครั้งที่สูงกว่า การขึ้นรูปด้วยมือ (Hand lay-up, Hand lay-up process) และ กระบวนการขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์ม Thermoforming หลักการจะให้ความร้อนจนพลาสติกอ่อนตัวลงหรือหลอมเหลว จากนั้น ทำการกดอัดด้วยแรงดันเพื่อทำให้พลาสติกไหล เกิดเป็นรูปแบบตามแม่พิมพ์ที่กำหนด จากนั้นเมื่อชิ้นงานแข็งตัวแล้วก็ทำปลดออกจากแม่พิมพ์ และ จากการจำลองส่วนประกอบของเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน ซึ่งการทำงานของเครื่องที่ใช้ในกระบวนการกดอัดขึ้นรูปคอมพอสิต มีส่วนประกอบหลักของเครื่องคือ แผ่นเหล็กอัดจำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ ขึ้นลงได้อีกแผ่นหนึ่งจะถูกยึดติดกับที่ไว้ ทำให้สามารถเปิดและปิดแม่พิมพ์ได้ อุปกรณ์ให้ความร้อน ระบบขับเคลื่อน (Hydraulic) และอาจมีอุปกรณ์หล่อเย็นร่วมอยู่ด้วย



รูปที่ 2.15 จำลองส่วนประกอบของเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding press, hot press)

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

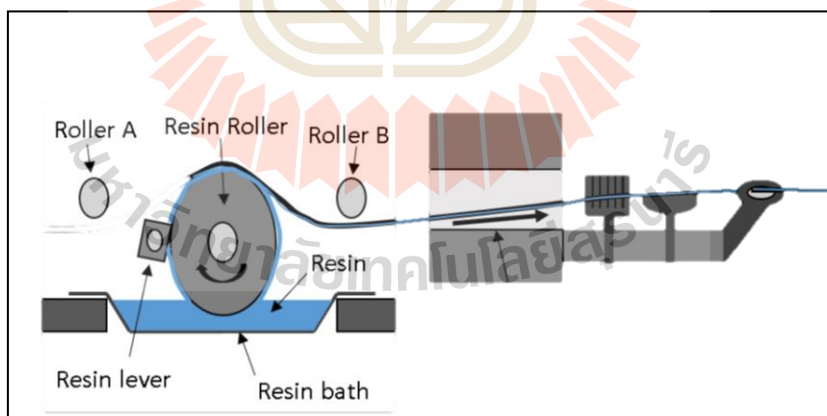
ด้วยงานวิจัยที่ดำเนินการผลิตคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมยังไม่มี ผู้วิจัยจึงได้เลือกงานวิจัยที่ใช้วัสดุคล้ายกัน มาทบทวนการศึกษา โดยมีรายละเอียด ดังนี้

Daniel Tran, 2016 ทดลองเปรียบเทียบวัสดุคอมพอสิตเนื้อพื้นพอลิเมอร์อีพอกซีเสริมแรงต่างกันระหว่างเส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 L มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร กับเส้นใยคาร์บอน สมบัติวัสดุในงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 2.4 ตัวแปรที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ตัวแปร คือ

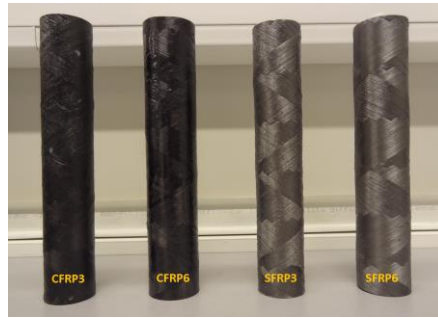
1) ชนิดของเส้นใยเสริมแรง และ 2) จำนวนชั้นตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 3 และ 6 ชั้น ขึ้นรูปคอมพอสิตด้วยกระบวนการดึงขึ้นรูปอย่างต่อเนื่อง (Pultrusion Process) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 หลังขึ้นรูปลักษณะของชิ้นงานมีรูปร่างเป็นท่อยาว ดังรูปที่ 2.17 และ นำชิ้นงานทดสอบแรงกดอัด พบว่าวัสดุคอมพอสิตีฟ็อกซีเสริมใยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 L จำนวน 3 ชั้น รับแรงกดได้ต่ำกว่าวัสดุคอมพอสิตีฟ็อกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน แต่เมื่อคอมพอสิตีฟ็อกซีเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 L จำนวน 6 ชั้น มีความสามารถในการรับแรงกดอัดและยึดตัวได้สูงกว่า คอมพอสิตีฟ็อกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ดังรูปที่ 2.18 รูปที่ 2.19 รูปที่ 2.20 และรูปที่ 2.21

ตารางที่ 2.4 สมบัติของวัสดุในงานวิจัย

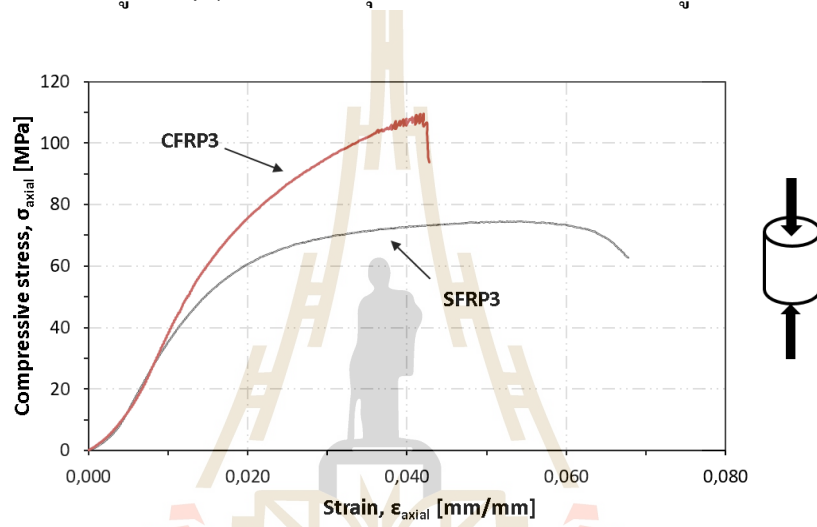
วัสดุ	E (GPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	Elongation (%)	Density ( $\text{g/cm}^3$ )
316L stainless steel fiber (d=8 $\mu\text{m}$ )	193	1700	19.0	8.0
T700SC Carbon fiber (d=7 $\mu\text{m}$ )	230	4900	1.2	1.8
EPIKOTE MGS RIM 135 epoxy Resins	3.2	65	12	1.2



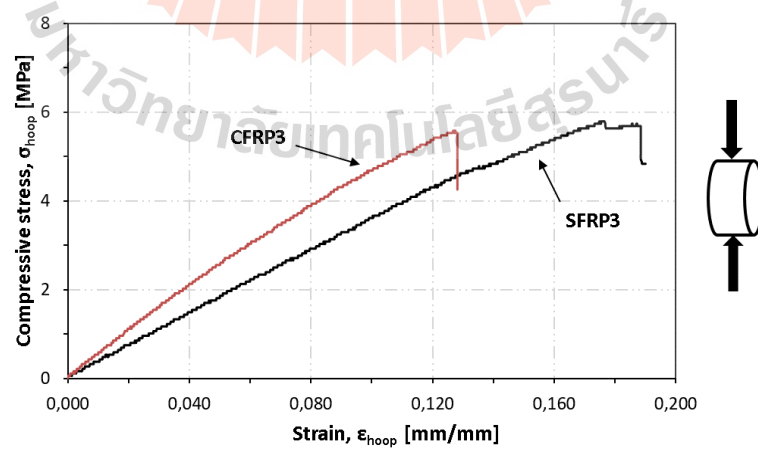
รูปที่ 2.16 กระบวนการดึงขึ้นรูปอย่างต่อเนื่อง (Pultrusion Process)



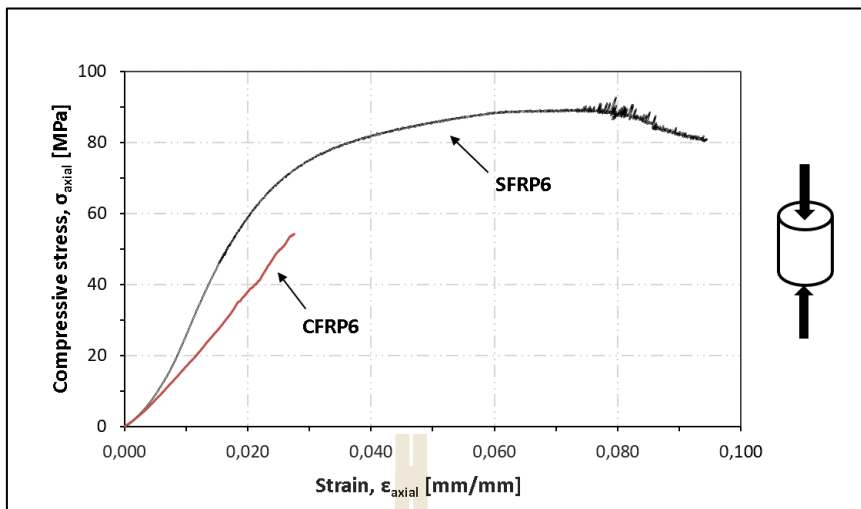
รูปที่ 2.17 ชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตหลังผ่านการขึ้นรูป



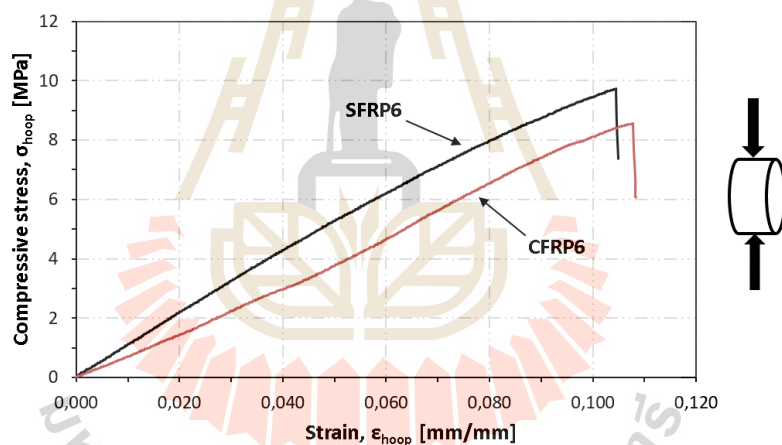
รูปที่ 2.18 ผลทดสอบแรงกดอัดชิ้นงานเสริมแรงเส้นใย 3 ชั้นในแนวตั้ง



รูปที่ 2.19 ผลทดสอบแรงกดอัดชิ้นงานเสริมแรงเส้นใย 3 ชั้นในแนวนอน

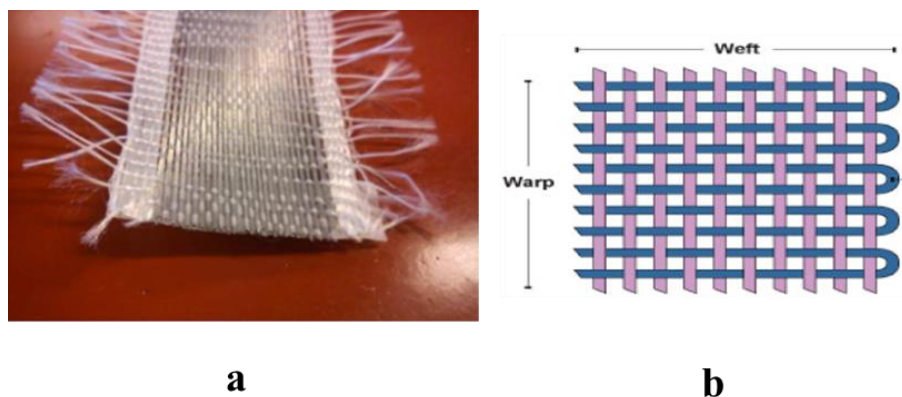


รูปที่ 2.20 ผลทดสอบแรงกดอัดชิ้นงานเสริมแรงเส้นใย 6 ชั้นในแนวนอน



รูปที่ 2.21 ผลทดสอบแรงกดอัดชิ้นงานเสริมแรงเส้นใย 6 ชั้นในแนวนอน

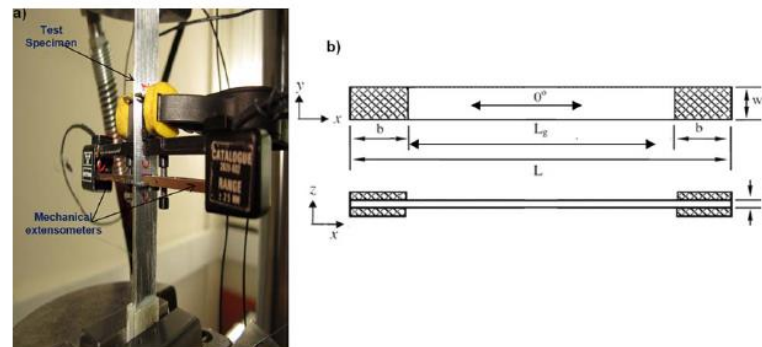
R.T. Durai Prabhakaran และคณะ ได้ทดลองผลิตวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ชนิดอีพอกซีเสริมแรงเส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.21 มิลลิเมตร โดยสานเป็นฝืนกับเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ดังรูปที่ 2.22 ตัวแปรการทดลอง คือ จำนวนชั้นเสริมแรง 1 และ 2 ชั้น ด้วยวิธีการเทคนิคฉีดสุญญากาศ (Vacuum infusion technique) ดังรูปที่ 2.23 และทดสอบแรงดึงในทิศทางเดียว (Unidirectional) ดังรูปที่ 2.24 และตรวจสอบโครงสร้างภาคตัดขวางระดับจุลภาคของคอมโพสิต



รูปที่ 2.22 ลักษณะเส้นใยเหล็กที่ถูกสานเป็นผืน (Steel fabric) และ เส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นเส้นยืน (Weft yarns) เส้นผ่าศูนย์กลางกึ่งกลาง 0.30 มิลลิเมตร (a) ผืนเส้นใย (b) จำลองการสาน

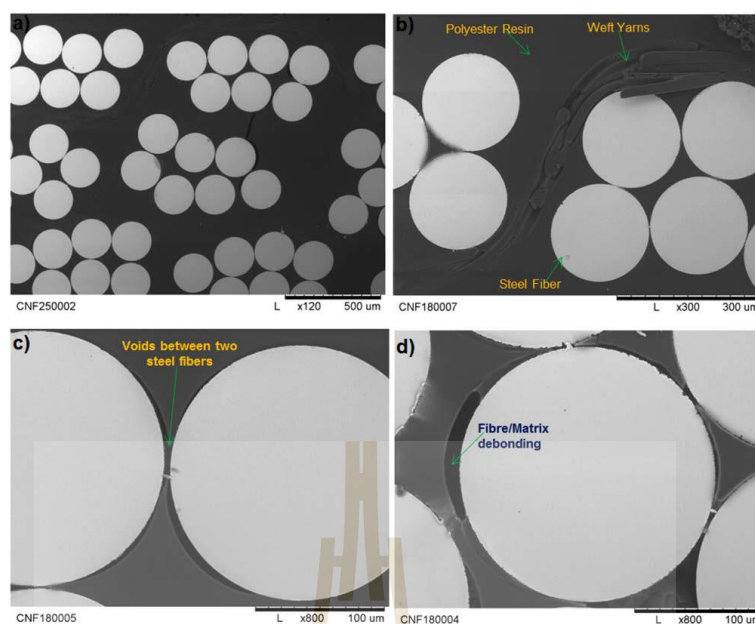


รูปที่ 2.23 วิธีการขึ้นรูปด้วยเทคนิค (Vacuum infusion) ขึ้นงานวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L สานกับเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต



รูปที่ 2.24 การทดสอบแรงดึง (Tensile test) และจำลองลักษณะชิ้นงานคอมพอสิตที่ใช้ทดสอบแรงดึง

จากการศึกษาของงานวิจัยดังกล่าว พบว่า วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์อีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L สานกับเส้นใยพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตจำนวนชั้นเสริมแรง 2 ชั้น มีความแข็งแรงกว่าเสริมแรงจำนวน 1 ชั้น และจากการตรวจสอบโครงสร้างภาพระดับมหภาคภาคตัดขวางคอมพอสิต ดังรูปที่ 2.25 a และ 2.25 b พบข้อบกพร่องในเนื้อวัสดุคอมพอสิตว่ามีช่องว่าง บริเวณ  $\theta$  รอยประสานของเส้นใยเสริมแรงและเนื้อพื้น และที่กำลังขยายสูงขึ้นดังรูปที่ 2.25c และ 2.25 d พบว่าเกิดการแยกตัว (Debonding) ณ ตำแหน่งดังกล่าว อาจเกิดจากความสามารถในการประสานกันไม่ดี อีกทั้งการสานเส้นเหล็กกล้าไร้สนิมและเส้นใยพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลต พบว่าเส้นใยพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตขาดและแยกออกจากเนื้อพื้นดังรูปที่ 2.25 b



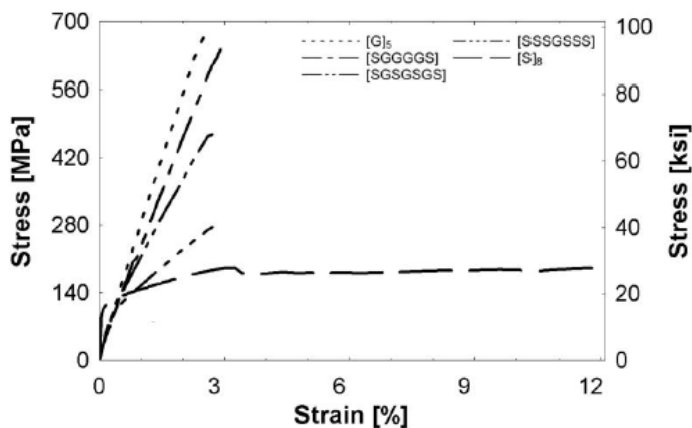
รูปที่ 2.25 ภาพถ่ายภาคตัดขวางชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยแผ่นเส้นใย 2 ชั้น (a) ภาพถ่ายโดยรวมของชิ้นงาน (b) การประสานกันระหว่างแผ่นเส้นใยเหล็กที่สานเป็นแผ่นกับเมทริกซ์ (c) ช่องว่างระหว่างจุดที่ติดกันของเส้นใยเหล็กที่สานกับเมทริกซ์ (d) การประสานกันระหว่างเส้นใยเหล็กที่สานเป็นแผ่นกับเนื้อพื้นที่กำลังขยายสูง

Amanda K. McBride และคณะ, 2017 ได้ทดลองเปรียบเทียบความสามารถในรับแรงของวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ชนิดอีพอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่สัดส่วนต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.5 และทดสอบแรงดึง ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 2.26

ตารางที่ 2.5 สัดส่วนของเส้นใยเสริมแรง

Layer Notation	Glass fiber fraction	Steel fiber fraction	Total fiber volume fraction
[G] <sub>s</sub>	34.7± 0.1%	-	34.7± 0.1%
[SGGGGS]	28.2± 0.1%	8.2%	36.4± 0.1%
[SGSGSS]	20.3± 0.2%	15.7± 0.2%	36.0± 0.4%
[SSSGSSS]	6.5%	22.8± 0.1%	29.3± 0.2%
[S] <sub>s</sub>	-	30.9± 0.5%	30.9± 0.5%





รูปที่ 2.26 วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ชนิดอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 L ที่ปริมาณต่าง ๆ

จากรูปที่ 2.24 วัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ชนิดอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วให้ความสามารถในการรับแรงดึงสูงกว่าคอมพอสิตพอลิเมอร์ชนิดอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิม ในขณะที่เส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิมมีความสามารถในการยืดได้สูง

จากการศึกษาวิจัยต่าง ๆ ข้างต้นจะเห็นได้ว่า วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิม มีสมบัติในการรับแรงดึงและยึดตัวดี ในขณะที่ยังพบรอยแยก ณ รอยประสาน ระหว่างเนื้อพื้นและเส้นใยเสริมแรง ดังนั้น การเลือกใช้พอลิเมอร์ที่ลื่นไหลเสริมแรงด้วยเป็นเนื้อพื้นที่สามารถเชื่อมกับเส้นใยเหล็กกล้าไร้สนิม น่าจะทำให้ปัญหาการแยกตัวของเนื้อพื้นกับเส้นใยลดลงได้

## บทที่ 3

### วัสดุ อุปกรณ์ และ ระเบียบวิธีการดำเนินการ

ในบทนี้ผู้วิจัยอธิบายถึงวัสดุและอุปกรณ์ ที่ใช้ในการศึกษางานวิจัยที่ต้องการการควบคุม เป็นอย่างดี เพื่อให้ผลงานวิจัยที่มีความถูกต้องน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ในบทนี้ผู้วิจัยยังกล่าวถึง ภาพรวมของขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยอีกด้วย

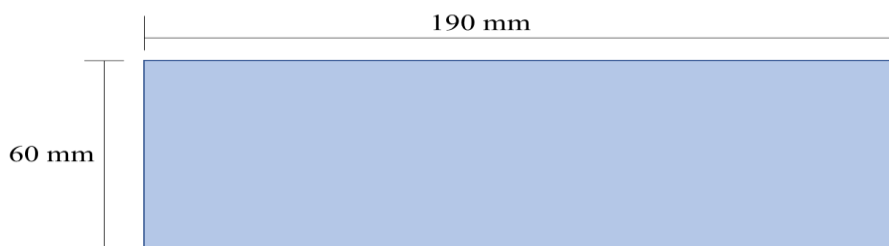
#### 3.1 วัสดุ

วัสดุที่นำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน วัสดุคอมพอสิตในการศึกษานี้ประกอบไปด้วยวัสดุ 2 ประเภท ดังนี้

3.1.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ สัญลักษณ์ย่อ PET ในเนื้อหาคือ มีขนาดก่อนตัดกว้าง 300 มิลลิเมตร ความยาว 450 มิลลิเมตร และ ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ผลิตโดยบริษัท Acrysunday ประเทศญี่ปุ่น ดังรูปที่ 3.1 และจะถูก นำมาใช้เป็นวัสดุเนื้อพื้น ซึ่งมีสมบัติทั่วไปดังตารางที่ 3.1 โดยแผ่น PET จะถูกตัดด้วยเครื่องตัด แผ่นวงจรเพื่อให้ได้ขนาดกว้าง 60 มิลลิเมตร ยาว 190 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2 ในการนำไปขึ้นรูปเป็น ชิ้นงานคอมพอสิต



รูปที่ 3.1 แผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET)



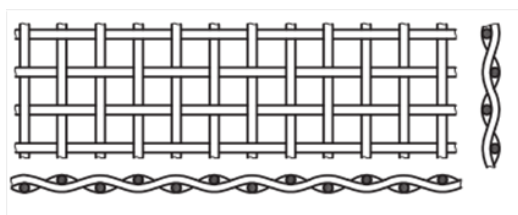
รูปที่ 3.2 ขนาดชิ้นงานพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) ก่อนขึ้นรูปเป็นชิ้นงานคอมพอสิต

ตารางที่ 3.1 สมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต

วัสดุ	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	จุดหลอมเหลว (°C)	อุณหภูมิสภาพ แก้ว (°C)	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิง ความร้อน (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
PET	1.2	260	75	0.15-0.24

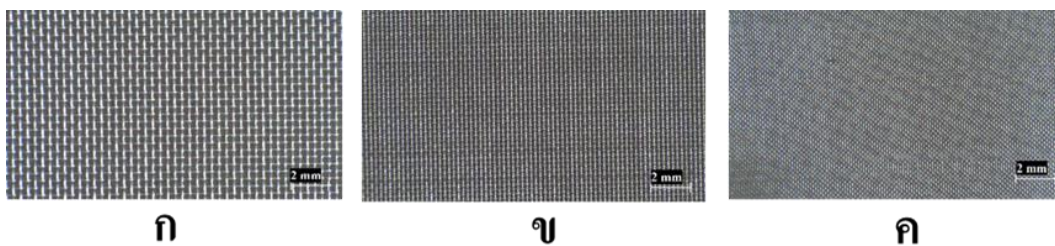
หมายเหตุ ข้อมูลความหนาแน่น ได้จากการทดลอง และ ข้อมูลอื่น ๆ จาก (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, 2010)

3.1.2 ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 (SUS304) โดยสั่งซื้อจากบริษัท ยูโลจี กรุ๊ป (ไทยแลนด์) จำกัด ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรง จำนวน 3 ขนาด คือ 1) เมช (Mesh) 60 2) เมช 100 และ 3) เมช 200 ตามลำดับ โดยเหล็กกล้าไร้สนิมทำตะแกรงมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.2 สำหรับการสานตะแกรงเป็นการสานแบบธรรมดาทั่วไป (Plain Weave) (Suwaninpang 2019) คล้ายกับการทอผ้าทั่วไป ที่นำเส้นลวดสานกันแบบข้ามเส้นต่อไปเรื่อย ๆ โดยโครงสร้างจะเป็นแบบลักษณะ ขึ้น 1 ลง 1 ซึ่งการสานจะใช้เส้นลวดแนวตั้ง และเส้นลวดนอน ดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 แสดงความแตกต่างของตะแกรงแต่ละขนาดเมชที่ใช้ใน โดยขนาดและสมบัติของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละเมชแสดงดังตารางที่ 3.3 ก่อนนำตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานคอมพอสิตจะตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 70 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.5

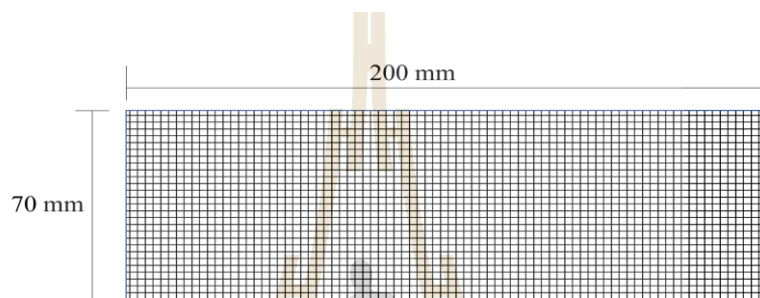


รูปที่ 3.3 ลักษณะจำลองการสานลวดตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมแบบธรรมดาทั่วไป

(Plain Weave) ที่มา [www.meshfromchina.com](http://www.meshfromchina.com)



รูปที่ 3.4 การสานของตะแกรงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช (ก) เมช 60 (ข) เมช 100 และ (ค) เมช 200 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 ขนาดชิ้นงานตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนนำไปขึ้นรูป

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS 304

Component (ธาตุ) Mesh size (ขนาด เมช)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
60	0.055	0.430	1.180	0.030	0.025	18.000	8.380
100	0.035	0.500	1.050	0.027	0.005	17.520	8.200
200	0.055	0.430	1.180	0.030	0.025	18.000	8.380

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท ยูโลจี กรู๊ป (ไทยแลนด์) จำกัด

ตารางที่ 3.3 ขนาดและสมบัติของตะแกรงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304

เบอร์ตะแกรง (Mesh size)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	ความสามารถรับแรงดึง (N) ชิ้นงานกว้าง 15 มิลลิเมตร	น้ำหนักต่อพื้นที่ 30x30 mm (g)
60	0.15	485	0.5138
100	0.10	386	0.6267
200	0.051	314	0.4901

หมายเหตุ ข้อมูลจากการความสามารถในการรับแรงดึงและน้ำหนักได้จากการทดลอง และบริษัท ยูโลจี กรุป (ไทยแลนด์) จำกัด

### 3.2 อุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยมีดังนี้

3.2.1 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) รุ่น MODEL PR2D-W300L350 PM-WCL แสดงดังรูปที่ 3.6 เป็นเครื่องมือสำหรับขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตด้วยการกดอัดร่วมกับการให้ความร้อน การทำงานแรงอัดจะถูกให้โดยระบบไฮดรอลิกอัดที่แผ่นอัดผ่านแม่พิมพ์ส่วนบน และส่วนล่างที่เคลื่อนที่เข้าหากัน โดยเครื่องทำงานต่อเนื่องอัตโนมัติโดยตั้งอุณหภูมิ และเวลาในการขึ้นรูป ตามสภาวะที่ต้องการ ซึ่งเครื่องอัดปรับอุณหภูมิสูงสุดได้ 280 องศาเซลเซียส และแรงอัดได้สูงสุด 2500 psi โดยขนาดของแม่พิมพ์ไม่เกิน 300x350 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) รุ่น MODEL PR2D-W300L350 PM-WCL

3.2.2 เครื่องตัดแผ่นวงจรพิมพ์ SHR-150 (PCB Shearing Machine SHR-150) ดังรูปที่ 3.7 ใช้สำหรับตัดชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตหลังจากขึ้นรูปซึ่งเป็นเครื่องตัดชนิดตั้งโต๊ะทำงานด้วยมือ ออกแบบสำหรับตัดแผ่นวงจรพิมพ์โดยการตัดการขึ้นงานจะใช้แรงเหวี่ยงจนวัสดุแยกออกจากตำแหน่งที่ตัด ซึ่งเครื่องตัดสามารถตัดวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่น เช่น พลาสติก อลูมิเนียม ทองเหลือง กระจกไฟเบอร์ อนึ่งการตัดดังกล่าวจะทำให้ขอบตัดเกิดการเสียรูป เพื่อกำจัดผลของการเสียรูปหลังการตัดด้วยเครื่องดังกล่าว ผู้วิจัยจะใช้การขัดขอบของชิ้นงานคอมพอสิตอีกครั้งด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400



รูปที่ 3.7 เครื่องตัดแผ่นวงจรพิมพ์ SHR-150

3.2.3 เครื่องขัด ดังรูปที่ 3.8 เครื่องขัดกระดาษทรายแบบจานหมุนยี่ห้อ Laizhou Huayin รุ่น Mopao2DE เป็นเครื่องขัดชนิดจานคู่ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 250 มิลลิเมตร งานขัดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ปรับความเร็วในการหมุนของงานขัดสูงสุดได้ 600 ต่อนาที สามารถใช้น้ำหล่อเย็นขณะขัดชิ้นงาน



รูปที่ 3.8 เครื่องขัดชิ้นงานแบบจานหมุน

3.2.4 เครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ อเนกประสงค์ (Universal Testing Machine หรือ UTM) ขนาด 5 กิโลนิวตัน ยี่ห้อ Instron รุ่น 5565 แสดงในรูปที่ 3.9 เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบหาความสามารถในการรับแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานคอมพอสิตหลังขึ้นรูป



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 5 กิโลนิวตัน (kN)

3.2.5 ชุดเครื่องมือสำหรับการประเมินความหนาแน่นของวัสดุ ดังรูปที่ 3.10 ยี่ห้อ METTLER TOLEDO Mettler Toledo รุ่น ML-series เป็นชุดอุปกรณ์ในการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตทั้งในน้ำ และในบรรยากาศ เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของวัสดุคอมพอสิต ซึ่งชุดเครื่องมือดังกล่าวประกอบด้วย เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลทศนิยม 4 ตำแหน่ง และ บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ใช้บรรจุน้ำสำหรับการชั่งน้ำหนักในน้ำ หลังจากชั่งน้ำหนักในบรรยากาศและน้ำ ค่าน้ำหนักที่ได้จะถูกนำมาคำนวณตามสมการที่ 3.1 เพื่อหาค่าความหนาแน่นของวัสดุคอมพอสิต

$$\rho_c = \frac{A}{A-B} (\rho_0 - \rho_l) + \rho_L \quad (3.1)$$



- $\rho_c$  คือ ความหนาแน่นของวัสดุคอมพอสิต
- $\rho_0$  คือ ความหนาแน่นของน้ำขณะทดสอบ
- $\rho_L$  คือ ความหนาแน่นของอากาศขณะทดสอบ
- A คือ น้ำหนักของวัสดุคอมพอสิตชั่งในอากาศ
- B คือ น้ำหนักของวัสดุคอมพอสิตชั่งในน้ำ



รูปที่ 3.10 ชุดอุปกรณ์สำหรับหาทดสอบความหนาแน่น

3.2.6 กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ ยี่ห้อ Leica รุ่น EZ4D พร้อมชุดแสดงภาพที่มีโปรแกรมแสดงรูปที่ 3.11 มีเลนส์ตากล้องขยาย 10 เท่า มีกำลังขยายในช่วง 8 ถึง 35 เท่า เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับถ่ายภาพภาคโครงสร้างภาคตัดขวางระดับมหภาคของชิ้นงานคอมพอสิต



รูปที่ 3.11 กล้องถ่ายภาพสเตอริโอ

3.2.7 ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) ยี่ห้อมิตุโตโย (Mitutoyo) รุ่น 103-129 สเกลวัด 0 - 25 มิลลิเมตร ความละเอียดของการวัด 0.001 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.12 ใช้สำหรับวัดความหนาของชิ้นงานคอมพอสิตหลังขึ้นรูป



รูปที่ 3.12 ไมโครมิเตอร์

3.2.8 เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น 513-128 ดังรูปที่ 3.13 โดยเวอร์เนียคาลิเปอร์มีสเกลวัด 0 ถึง 150 มิลลิเมตร เป็นแบบอ่านค่าด้วยผู้ใช้งาน (MANUAL) ความละเอียดของการวัดจะเท่ากับ 0.02 มิลลิเมตร ใช้สำหรับวัดขนาดด้านอื่น ๆ ของชิ้นงาน



รูปที่ 3.13 เวอร์เนียคาลิเปอร์

3.2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope / SEM) รุ่น JEOL JSM-6010LV ดังรูปที่ 3.14 ใช้สำหรับถ่ายภาพฝัวย่อยแตกหักของชิ้นงานคอมพอสิตหลังทดสอบแรงดึง โดยก่อนถ่ายภาพชิ้นงานคอมพอสิตจำเป็นต้องผ่านการเคลือบทอง (Au-sputtering) ด้วยเครื่อง Neo-Coater รุ่น MP19020NCTR ดังแสดงในรูปที่ 3.15 เป็นเวลา 2 นาที เพื่อให้ผิวชิ้นงานนำไฟฟ้าได้



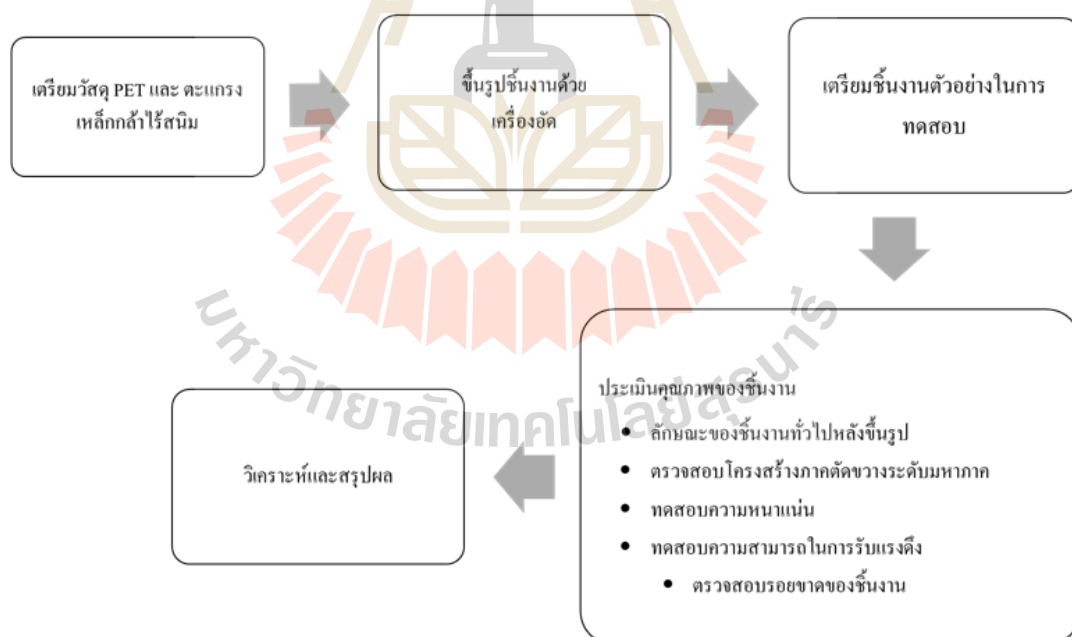
รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.15 เครื่องเคลือบทอง

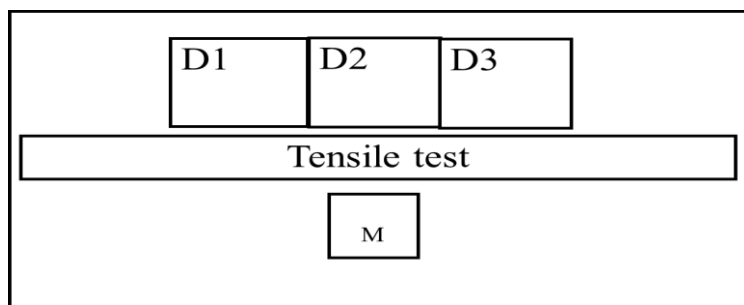
### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยทั่วไป

ภาพรวมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดง ดังรูปที่ 3.16 จากรูปที่ 3.16 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการเตรียมวัสดุที่ใช้ผลิตวัสดุคอมพอสิต ซึ่งประกอบไปด้วย 1) แผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ใช้สำหรับผลิตเป็นวัสดุเนื้อพื้น โดยก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปได้ทำการตัดแผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ด้วยเครื่องตัดแผ่นวงจรมพิมพ์ให้ได้ ขนาด 60 x 190 มิลลิเมตร และ 2) วัสดุเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม ถูกตัดด้วยกรรไกรตัดโลหะให้ได้ขนาด 70 x 200 มิลลิเมตร หลังจากการตัดวัสดุทั้งสองจะถูกนำมาผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิตแล้ว ขั้นตอนถัดมาคือ การขึ้นรูปชิ้นงานคอมพอสิตด้วยเครื่องอัด (Compression molding machine) โดยนำวัสดุมาเรียงประกบกันเพื่อผลิตวัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 ชั้น และ 2 ชั้น ที่ทิศทางวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 0 องศา และ 45 องศาเทียบกับแนวยาวของแผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ซึ่งการขึ้นรูปแต่ละประเภทของวัสดุคอมพอสิตการศึกษานี้จะถูกอธิบายในรายละเอียดใน บทที่ 4 และบทที่ 5 หลังจากขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตเสริมแรงจะถูกนำไปตรวจสอบลักษณะ และประเมินคุณภาพตามลำดับ

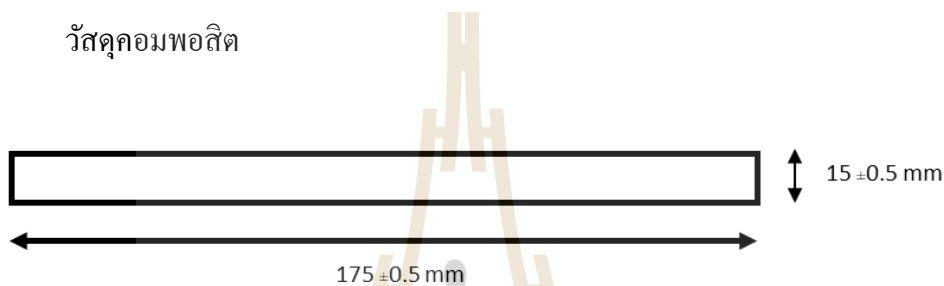


รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

จากรูปที่ 3.16 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในส่วนประเมินคุณภาพของชิ้นงานคอมพอสิต หลังการขึ้นรูป เริ่มจากการประเมินลักษณะทั่วไปของชิ้นงานคอมพอสิตหลังการขึ้นรูปด้วยตาเปล่า จากนั้น ชิ้นงานคอมพอสิตจะถูกแบ่งเป็นส่วน ๆ ดังรูปที่ 3.17 โดย 1) ชิ้นงานคอมพอสิตตำแหน่ง M มีขนาด 20x20 มิลลิเมตร ที่ถูกตัดแบ่งด้วยเครื่องตัดแผ่นวงจรมพิมพ์ ดังระบุในหัวข้อ 3.2.2 และนำไปขัดด้วยเครื่องขัดจานหมุนกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ จากนั้น ขัดละเอียดบนผ้าสักหลาดด้วยอะลูมินา 0.3 และ 0.05 ไมครอน เพื่อใช้ตรวจสอบโครงสร้างภาคตัดขวางระดับมหภาคผ่านกล้องสเตอริโอ เพื่อประเมินหาจุดบกพร่องในเนื้อวัสดุคอมพอสิต และการจัดเรียงของชั้นเสริมแรงในเนื้อพื้นพอลิเอทีลีนเทเรฟทาเลต 2) ชิ้นงานคอมพอสิตตำแหน่ง D1 D2 และ D3 ที่ถูกตัดด้วยเครื่องตัดแผ่นวงจรมพิมพ์จะถูกนำไปขัดกระดาษทรายเบอร์ 600 และ 800 ตามลำดับ ที่บริเวณขอบของชิ้นงานจากการตัด ด้วยเครื่องขัดจานหมุนให้ได้ขนาด 30x30 มิลลิเมตร ชิ้นงาน D1 D2 และ D3 จะถูกนำไปทดสอบหาค่าความหนาแน่นโดยใช้ชุดเครื่องมือ สำหรับการทดสอบหาค่าความหนาแน่นจากการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างในน้ำ และในอากาศ และ 3) ชิ้นงาน Tensile test ที่ถูกนำไปทดสอบความสามารถในการรับแรงดึง ซึ่งถูกตัดด้วยเครื่องตัดแผ่นวงจรมพิมพ์ และขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 และ 600 บริเวณขอบชิ้นงานเพื่อลดรอยเสียรูปจากการตัดด้วยเครื่องขัดแบบจานหมุนให้ได้ขนาดของชิ้นงานตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.18 สำหรับการทดสอบความสามารถในการรับแรงดึงและความสามารถในการยึดตัว จะดำเนินการด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 5 กิโลนิวตัน ยี่ห้อ INTRON รุ่น 5565 ใช้ความเร็วในเคลื่อนที่หัวจับ ชิ้นงาน 2 มิลลิเมตรต่อนาทีตั้งในทิศทางเดียว (Uni-axial) จนชิ้นงานขาดออกจากกันอ่านค่าแรงสูงสุดที่ชิ้นงานคอมพอสิตรับได้ และชิ้นงานจะต้องวัดความยาวก่อน และหลังชิ้นงานทดสอบเมื่อประเมินความสามารถในการยึดตัว หลังจากนั้น ชิ้นงานคอมพอสิตที่ผ่านการทดสอบแรงดึงที่ขาดออกจากกันจะถูกตัดส่วนปลายของรอยขาดด้วยกรรไกรตัดโลหะ และนำไปเคลือบทองและก่อนนำไปตรวจสอบรอยขาดของวัสดุคอมพอสิตภาคตัดขวางชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.17 ตำแหน่งในการตัดเตรียมตัวอย่างสำหรับการตรวจสอบลักษณะและสมบัติของชิ้นงาน  
วัสดุคอมพอสิต



รูปที่ 3.18 ชิ้นงานทดสอบความสามารถในการรับแรงดึง

หลังจากการขั้นตอนการประเมินคุณภาพวัสดุคอมพอสิตจะนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์  
อภิปรายและสรุปผลการทดลองงานวิจัยตามวัตถุประสงค์ในแต่ละข้อของงานวิจัยต่อไป



## บทที่ 4

### ศึกษาการผลิตวัสดุคอมพอลิติกโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรง เหล็กกล้าไร้สนิม 1 ชั้น

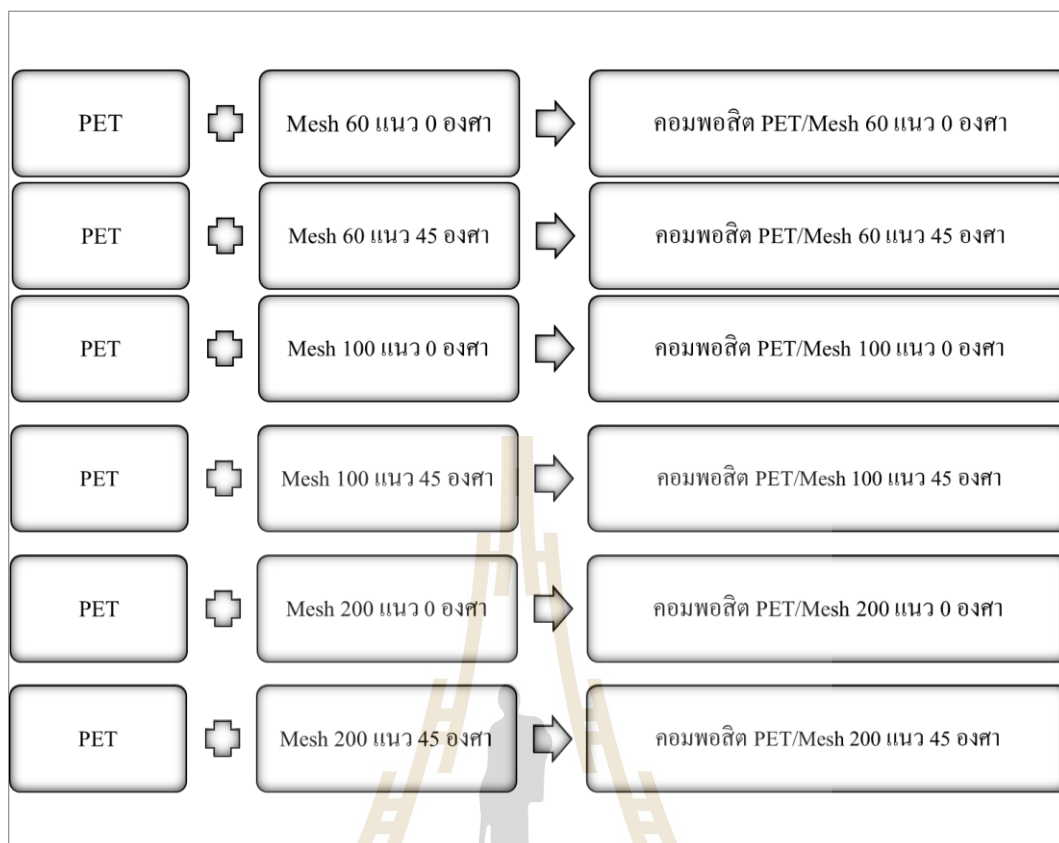
#### 4.1 บทนำ

โลกในยุคปัจจุบันมนุษย์มีแนวคิดร่วมกันที่จะสร้างโลกที่ยั่งยืน กิจกรรมทางเศรษฐกิจต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องไม่ก่อให้เกิดมลพิษ หรือสร้างมลพิษน้อยที่สุด การขนส่งเป็นกิจกรรมทางเศรษฐกิจที่สร้างมลพิษสูงที่สุดกิจกรรมหนึ่ง หนึ่งในวิธีการลดการปล่อยมลพิษจากการขนส่ง คือ การลดน้ำหนักยานยนต์ต่าง ๆ ดังนั้น วัสดุที่นำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนหลาย ๆ ชิ้นส่วนในยานยนต์ จึงถูกเปลี่ยนมาใช้วัสดุที่น้ำหนักเบา และมีความแข็งแรงสูง เช่น การใช้วัสดุคอมพอลิติกแทนเหล็กกล้า ดังตัวอย่าง บริษัทเท็นแคทที่นำวัสดุคอมพอลิติกโพลีเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ มาใช้ในหลาย ๆ จุด อาทิ บนรถยนต์ โครงเบาะนั่ง ฝากระโปรงหน้า ของซูเปอร์คาร์แบรนด์ อีฟาโรมีโอ (Alfa Romeo) ทำให้ลดน้ำหนักโดยรวมของรถยนต์ได้ถึงร้อยละ 20 และยังคงความแข็งแรง และความปลอดภัยในการขับขี่ อีกตัวอย่าง บริษัท Bond-Laminates GmbH เป็นบริษัทในเครือ LANESS พัฒนาโครงสร้างเบาะนั่งรถยนต์ (car seat shell) ผลิตจากคอมพอลิติกเทอร์โมพลาสติกเสริมแรงใยแก้ว ซึ่งมีความแข็งแรง และทนต่อการกัดกร่อน มีน้ำหนักเบาว่าโครงสร้างที่ทำจากเหล็กกล้าถึง 800 กรัม (Om nexus Plastics Intelligence Unit, 2563) เป็นต้น วัสดุคอมพอลิติกโพลีเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber) เป็นหนึ่งในวัสดุเบาที่ถูกคาดการณ์ว่า จะนำมาใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากมีความแข็งแรงสูงขณะที่มีความหนาแน่นของวัสดุต่ำ อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนซับซ้อนได้ง่าย อย่างไรก็ตาม เส้นใยเสริมแรงที่นิยมส่วนใหญ่ทำจากวัสดุเซรามิกส์ เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว และเส้นใยเคฟล่า ทำให้มีข้อจำกัดด้านการยึดตัวได้น้อย เพราะเส้นใยเสริมแรงเซรามิกส์มีความแข็งเปราะ รวมไปถึงมีการยึดเกาะกันระหว่างเนื้อพื้นกับเส้นใยเสริมแรงต่ำ เกิดการแยกตัวของรอยประสาน (Delaminate) ระหว่างวัสดุเนื้อพื้นกับวัสดุเสริมแรงขณะผลิตและการใช้งาน ข้อจำกัดดังกล่าวทำให้วัสดุคอมพอลิติกโพลีเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยไม่สามารถนำผลิตชิ้นส่วนบางประเภท เช่น เพลาคือเหยียง โครงรถยนต์ หรือชิ้นส่วนในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงและยึดตัวได้ดี จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะสร้างวัสดุคอมพอลิติกชนิดใหม่ที่มีสามารถรับแรง และยึดตัวได้ดี จากการเลือกเนื้อพื้นโพลีเอทิลีน และเส้นใยที่มีการยึดเกาะกันดี ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยของ Katayama และคณะ(2008) เรื่องการเชื่อมแผ่น

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่า นอกจากนี้ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และเหล็กกล้าไร้สนิมมีความแข็งแรงสูง และความเหนียวมากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต, PET กับเหล็กกล้าไร้สนิมได้สามารถเชื่อมติดกันได้ โดยรอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงเมื่อเป็นเช่นนี้ ผู้วิจัยจึงคาดการณ์ว่าถ้านำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตกับ ตะแกรงลวดเหล็กไร้สนิมมาประกอบกันเป็นวัสดุคอมพอสิตปัญหาการเกิดการแยกตัวบริเวณรอยประสานน่าจะลดลงและควรได้วัสดุคอมพอสิตคุณภาพสูง ผู้วิจัยจึง ต้องการศึกษความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุคอมพอสิตจากพอลิเมอร์ และศึกษาผลของ ขนาด ทิศทางการวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมต่อสมบัติของคอมพอสิตที่ได้

## 4.2 ระเบียบวิธีการ

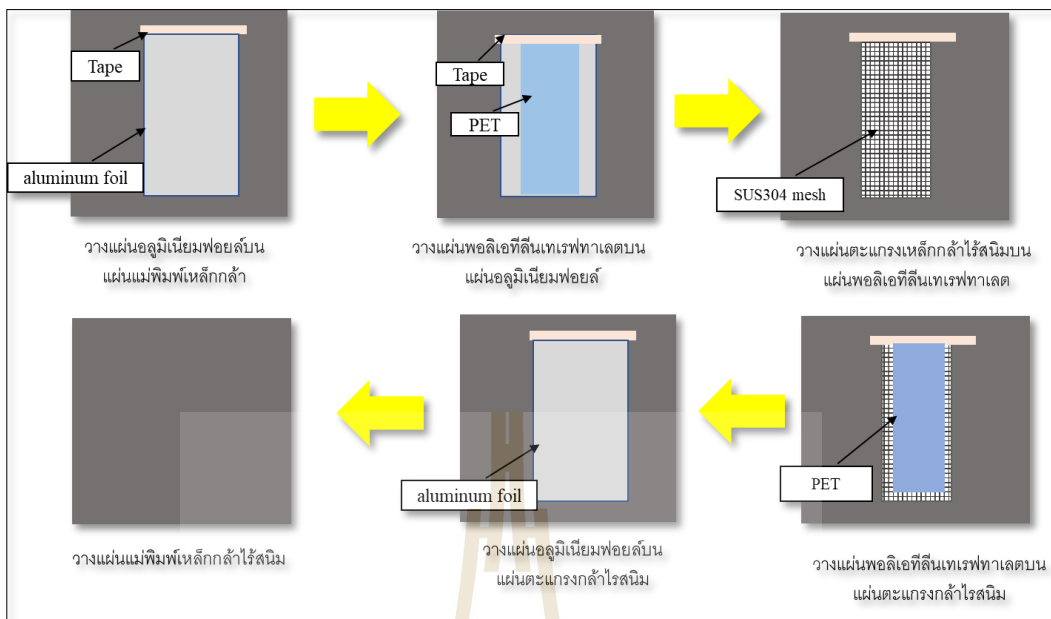
ในการศึกษานี้วัสดุที่นำมาผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิตหนึ่งชิ้นประกอบด้วย แผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ขนาด 60 x 190 มิลลิเมตรหนา 0.5 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น ประกบตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 (SUS304) ซึ่งเป็นวัสดุเสริมแรง ขนาด 70 x 200 มิลลิเมตร จำนวน 1 ชิ้น การผลิตวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 1 ชิ้นนี้ มีการกำหนดประเภทของชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตที่จะขึ้นรูป ดังแสดงรูปที่ 4.1 จากรูปที่ 4.1 ชิ้นงานคอมพอสิตจะแบ่งออกเป็น 6 ประเภท กล่าวคือ คอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมฆ 60 100 และ 200 โดยที่แต่ละตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีทิศทางการวางในแนว 0 องศา และ 45 องศา สำหรับขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานคอมพอสิตและการผลิตชิ้นงานคอมพอสิตมีรายละเอียดดังนี้ ดังรูปที่ 4.2 เป็นการเตรียมชิ้นงานเพื่อผลิตเป็นไปตามสภาวะการทดลองต่าง ๆ ก่อนที่จะนำไปขึ้นรูป ดังรูปที่ 4.3 โดยมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้



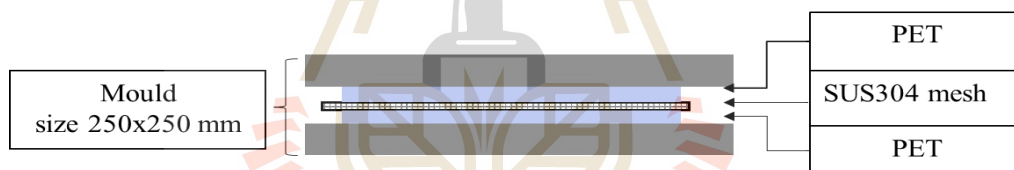
รูปที่ 4.1 ชิ้นงานคอมพอสิต PET เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 ชั้น ที่แนวการวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมต่าง ๆ

#### 4.2.1 การจัดวางชิ้นงานก่อนขึ้นรูป

แผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และแผ่นตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมผ่านการตัดให้ได้ขนาดที่กำหนดข้างต้นแล้ว จะถูกนำมาจัดเรียงเพื่อขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมพอสิตบนแม่พิมพ์ที่ใช้เป็นแผ่นเหล็กกล้าขนาด 250X250 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.2 สำหรับขั้นตอนการจัดเรียงเริ่มจากวางแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์เพื่อป้องกันการติดของวัสดุคอมพอสิตบนแม่พิมพ์ โดยอะลูมิเนียมฟอยล์จะถูกติดด้วยเทปกาวเพื่อไม่ให้หลุดขณะขึ้นรูป จากนั้น นำแผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตวางบนกึ่งกลางแผ่นเหล็กกล้าแม่พิมพ์พร้อมกับติดเทปกาวที่ด้านบนมาติดกับอะลูมิเนียมฟอยล์ และตามด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม และแผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตวางประกบและนำแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์วางประกบอีกทีพร้อมกับติดเทปกาวที่ด้านบนแล้วนำแผ่นแม่พิมพ์เหล็กอีกแผ่นวางประกบ โดยลักษณะการเรียงแต่ละชั้นแสดงดังรูปที่ 4.3



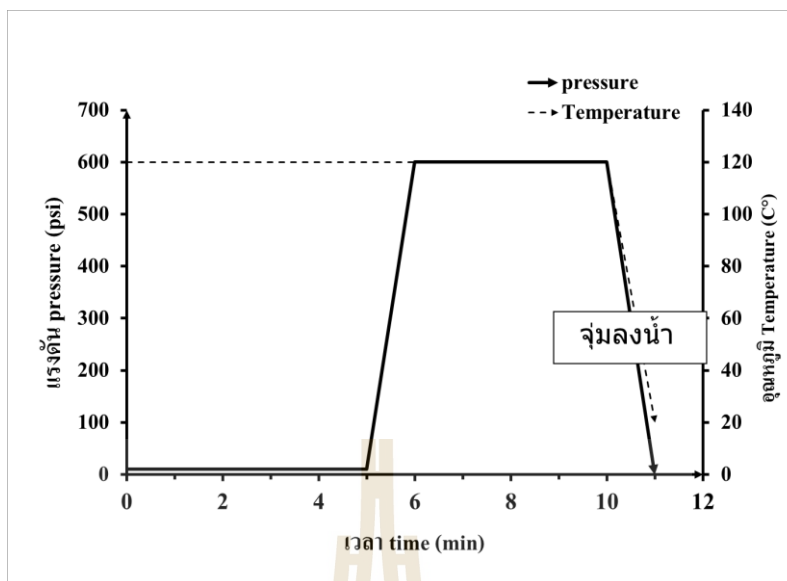
รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนขึ้นรูป



รูปที่ 4.3 ลักษณะการวางเรียงประกอบของชิ้นงานก่อนขึ้นรูป

#### 4.2.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน

หลังจากการจัดเรียงชิ้นงานบนแม่พิมพ์แล้วจะแม่พิมพ์ถูกวางเข้าแม่พิมพ์ของเครื่องอัด (Compression Molding) โดยสภาวะการขึ้นรูปแสดงรูปที่ 4.4 โดยเครื่องอัดขึ้นรูปจะเคลื่อนแม่พิมพ์ล่างดันมาประกบกับแม่พิมพ์บนเป็นเวลา 5 นาทีที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จากนั้นเครื่องจะอัดแม่พิมพ์ชิ้นงานคอมพอสิตเป็นเวลา 5 นาทีที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส แรงดัน 600 psi จากนั้นนำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องอัดมาจุ่มในน้ำ เพื่อให้เย็นตัวดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 สถานะการขึ้นรูปชิ้นงาน



รูปที่ 4.5 ขั้นตอนการนำชิ้นงานจุ่มในน้ำ ก. การนำชิ้นงานเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป ข. การทำให้ชิ้นงานเย็นตัวในน้ำ

หลังจากการขึ้นรูปแล้ว ชิ้นงานคอมพอสิตจะตรวจสอบ ลักษณะของชิ้นงาน โครงสร้างภาคตัดขวางระดับมหภาค ความหนาแน่นและทดสอบแรงดึง โดยละเอียดของวิธีการตรวจสอบได้อธิบายโดยละเอียดแล้วในบทที่ 3

### 4.3 ผลงานวิจัยและการอภิปรายผล

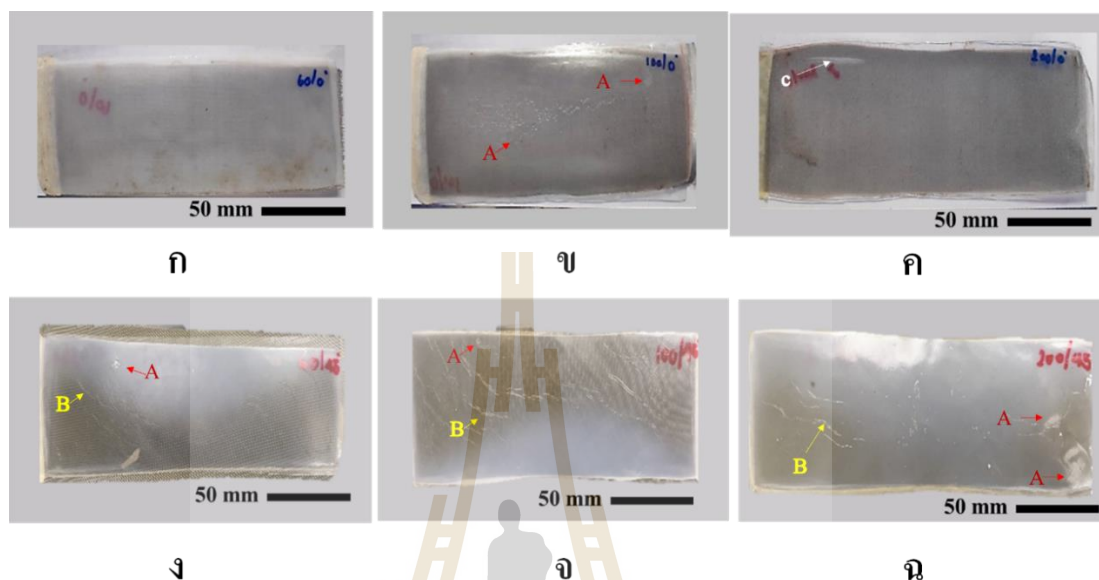
ภายหลังขึ้นรูปชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 ชั้นประเภทต่าง ๆ ผู้วิจัยได้ประเมินคุณภาพของ โดยผลการตรวจสอบมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.3.1 ลักษณะชิ้นงานหลังจากขึ้นรูป

จากรูปที่ 4.6 แสดงลักษณะชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 ชั้นที่แนวการวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมในทิศทาง 0 องศา และ 45 องศาภายหลังการขึ้นรูป จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเมช 60 100 และ 200 ที่วางในแนว 0 องศา และ 45 องศาทั้ง 6 ประเภทที่ผ่านการขึ้นรูปมีความคล้ายกัน กล่าว คือ ชิ้นงานคอมพอสิตมีสีขาวโปร่งแสงจากการสังเกตด้วยตาเปล่าสามารถมองเห็นชั้นตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมด้านใน นอกจากนี้ชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 100 และ 200 ที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปยังมีฟองอากาศในจุดต่าง ๆ เล็กน้อยบนผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) (ง) (จ) และ (ฉ) ณ ตำแหน่ง A ฟองอากาศดังกล่าวน่าจะเกิดขึ้นเกิดจากการใช้เครื่องอัดขึ้นรูป ทำให้ขณะอัดขึ้นรูปชิ้นงานอากาศไม่สามารถไหลออกทันจึงขังอยู่บนผิวชิ้นงาน นอกจากนี้บริเวณขอบใกล้มุมของชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมต่าง ๆ มีการขยายกว้างกว่าขอบส่วนใจกลางของชิ้นงาน เกิดจากการขยายตัวของเนื้อพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตที่ได้รับความร้อนจนอ่อนตัว และเมื่อมีแรงกดอัดเนื้อพอลิเมอร์พยายามที่จะไหลแทรกในรูตะแกรงจนเต็มจนเนื้อส่วนที่เกิน ไหลจากตรงกลางไปด้านข้างจน ทำให้ขอบของชิ้นงานกว้างขึ้น และกว้างมากบริเวณด้านข้างของชิ้นงาน ซึ่งวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 200 มีการขยายของเนื้อพื้นที่บริเวณปลายออกมาด้านข้างมากที่สุด โดยน่าจะเกิดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดขนาดเล็กและसानของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมละเอียดกว่าขนาดเมช 60 และขนาดเมช 100 ทำให้เนื้อพื้นพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตแทรกเข้าได้น้อยกว่า ทำให้ขอบของชิ้นงานขยายกว้างกว่าทั้งทิศทางวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมในแนว 0 องศา และแนว 45 องศา และการขยายตัวนี้ทำให้เกิดการฉีกขาดของชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลต เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 200 วางแนว 0 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ค) ณ ตำแหน่ง c หนึ่งชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 60 100 และ 200 ในทิศทางวางแนว 45 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ง) (จ) และ (ฉ) ณ ตำแหน่ง B เกิดรอยร่นบนชิ้นงาน ซึ่งน่าจะเกิดจากการวางตะแกรงเสริมแรงทิศทาง 45 องศา ขัดขวางการเคลื่อนตัวของเนื้อพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตเข้าไป



ทำให้เนื้อพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตแทรกกระหว่างช่องว่างของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมไม่ดี ส่งผลทำให้ชิ้นงานคอมพอสิตมีผิวของบางตำแหน่งเกิดการขุ่น



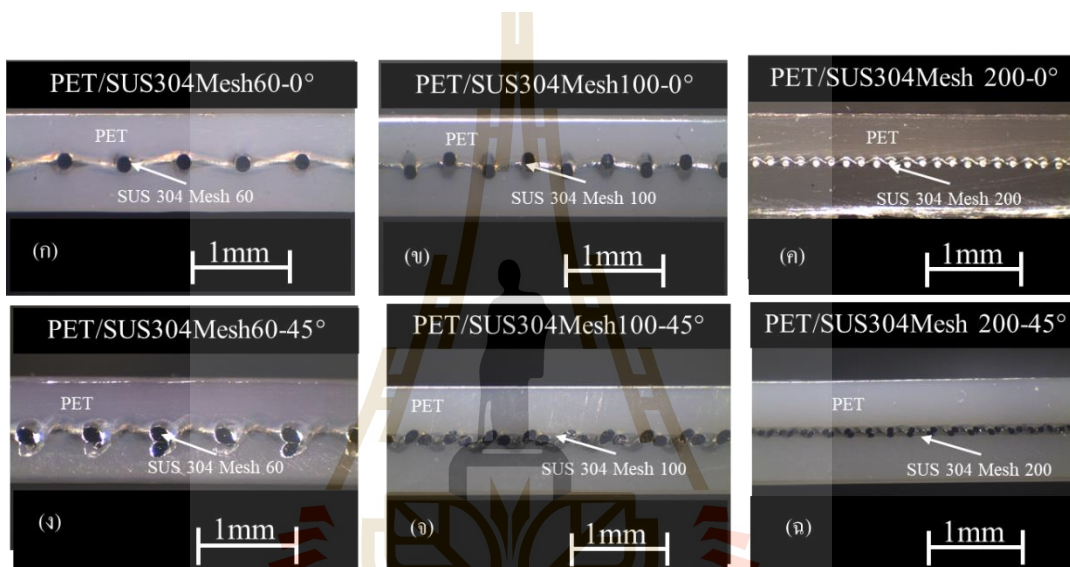
รูปที่ 4.6 ชิ้นงานคอมพอสิตเสริมแรงตะแกรงกล้าไร้สนิมจำนวน 1 ชั้น ภายหลังจากขึ้นรูป

(ก) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 แนว 0 องศา (ข) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 100 แนว 0 องศา (ค) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 200 แนว 0 องศา (ง) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 แนว 45 องศา (จ) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 100 แนว 45 องศา (ฉ) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 200 แนว 45 องศา โดยจุดบกพร่องบนชิ้นงาน (A) เกิดฟองอากาศบนชิ้นงาน (B) เกิดรอยขุ่นบน (C) รอยขีดข่วน

#### 4.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างภาคตัดขวางระดับมหภาค

รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างภาคตัดขวางของชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 ชั้นที่ทิศทางการวางต่าง ๆ ระดับมหภาคภายหลังจากกระบวนการอัดขึ้นรูป จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าภาคตัดขวางของชิ้นงานคอมพอสิตประกอบไปด้วยเนื้อพื้น พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตสลับกับตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมที่อยู่ใจกลาง โดยเนื้อพื้นพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเมื่อได้รับความร้อน และแรงดันในกระบวนการอัดขึ้นรูปเนื้อของพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตจะสามารถแทรกผ่านช่องว่างของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละขนาดชั้นได้ ไม่มีฟองอากาศ ไม่พบรูพรุนในเนื้อพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตของชิ้นงานคอมพอสิต ตลอดจนการประสานระหว่างเนื้อพื้นพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตกับตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเสริมแรง รูปที่

4.7 (ก ข ค ง จ และ ฉ) ไม่พบช่องว่าง ณ รอยประสานในการตรวจสอบโครงสร้างระดับมหภาคของชิ้นงานคอมพอสิต ในขณะที่การวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเสริมแรงที่ทิศทาง 0 องศา และ 45 องศา มีลักษณะของลายลวดเหล็กกล้าไร้สนิมในแนวนอนต่างกัน กล่าวคือการวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเสริมแรงในแนว 0 องศาจะมีลวดในแนวซัดกันไปมาระหว่างการสาน ส่วนการวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเสริมแรงในแนว 45 องศา ลวดในแนวไม่มีการซัดกันของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมในแนวนอนเป็นการยืนยันว่าตะแกรงกล้าไร้สนิมถูกวางตรงตามที่กำหนดไว้ใน การทดลอง



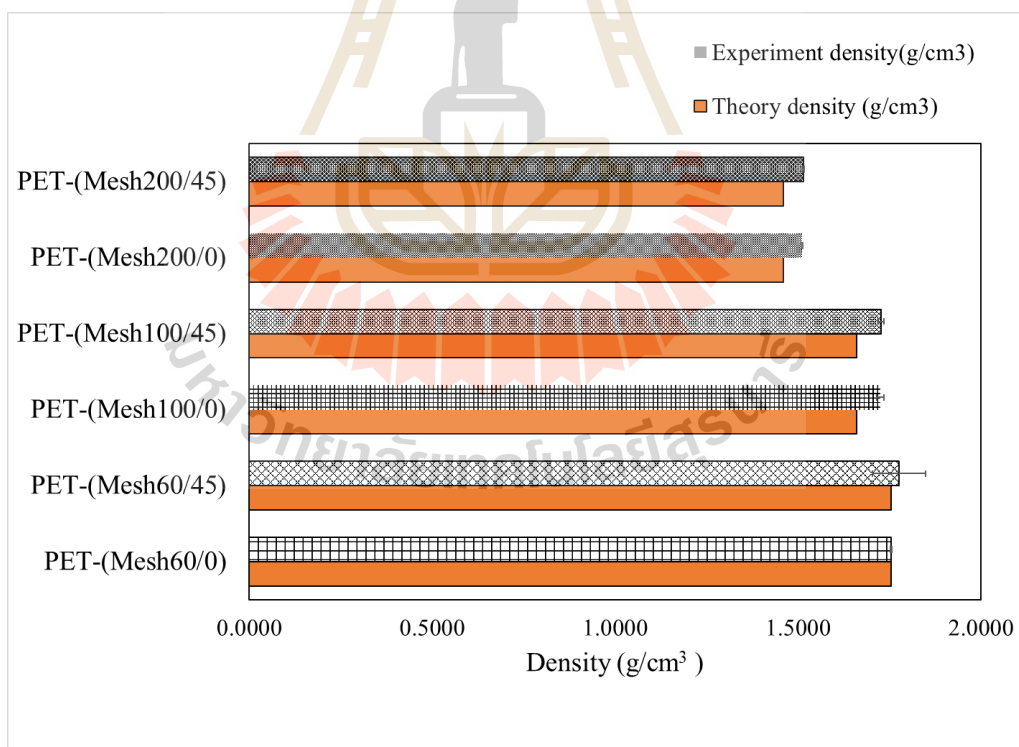
รูปที่ 4.7 โครงสร้างภาคตัดขวางระดับมหภาคของชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 ชั้น

(ก) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 แนว 0 องศา (ข) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 100 แนว 0 องศา (ค) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 200 แนว 0 องศา (ง) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 แนว 45 องศา (จ) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 100 แนว 45 องศา (ฉ) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 200 แนว 45 องศา

#### 4.3.3 ความหนาแน่น

จากการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 1 ชั้น ประเภทต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จาก รูปที่ 4.8 จะเห็นว่า ชิ้นงานคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 จะมีความหนาแน่นสูงกว่าชิ้นงานคอมพอสิตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 100 และ 200

และลดลึกลงตามลำดับ ซึ่งค่าความหนาแน่นของวัสดุคอมพอสิตจะขึ้นกับน้ำหนักต่อพื้นที่ของ ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นหลัก โดยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 มีน้ำหนักต่อพื้นที่สูง และตามด้วย เมช 100 และ เมช 200 ตามลำดับ ในขณะที่อิทธิพลของทิศทางการเสริมแรง ของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมในวงแนว 0 องศาและ 45 องศา มีผลต่อความหนาแน่นของวัสดุ คอมพอสิตภายหลังการอัดขึ้นรูป แม้ดูเหมือนว่าแนวการวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมทิศทาง 45 องศา จะให้ความหนาแน่นสูงกว่าก็ตามแต่ความความคลื่อนที่แสดงทำให้เห็นว่า ความหนาแน่น ใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับผลความหนาแน่นของคอมพอสิตทางการทดลองกับจากการ คำนวณด้วยสมการ 4.1 พบว่า ความหนาแน่นของคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วย ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมหลังอัดขึ้นรูปทางปฏิบัติให้สูงกว่าค่าความหนาแน่นทางการคำนวณทาง ทฤษฎี นั้นเกิดจากขณะการอัดขึ้นรูปเนื้อพื้นพอลิเอทิลีนเทอร์พทาเลตถูกกดอัดให้เข้าเต็มเต็มช่องว่าง ระหว่างตะแกรงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมจนไม่มีรูพรุนภายในชิ้นงาน และไหลออกจากด้านข้างทำให้ ขนาดชิ้นงานใหญ่กว่าขนาดของพอลิเอทิลีนเทอร์พทาเลตเริ่มต้น ดังจะเห็นได้จากชิ้นงานหลังขึ้นรูป กว้างกว่าก่อนการผลิตโดยวิธีการอัดขึ้นรูป



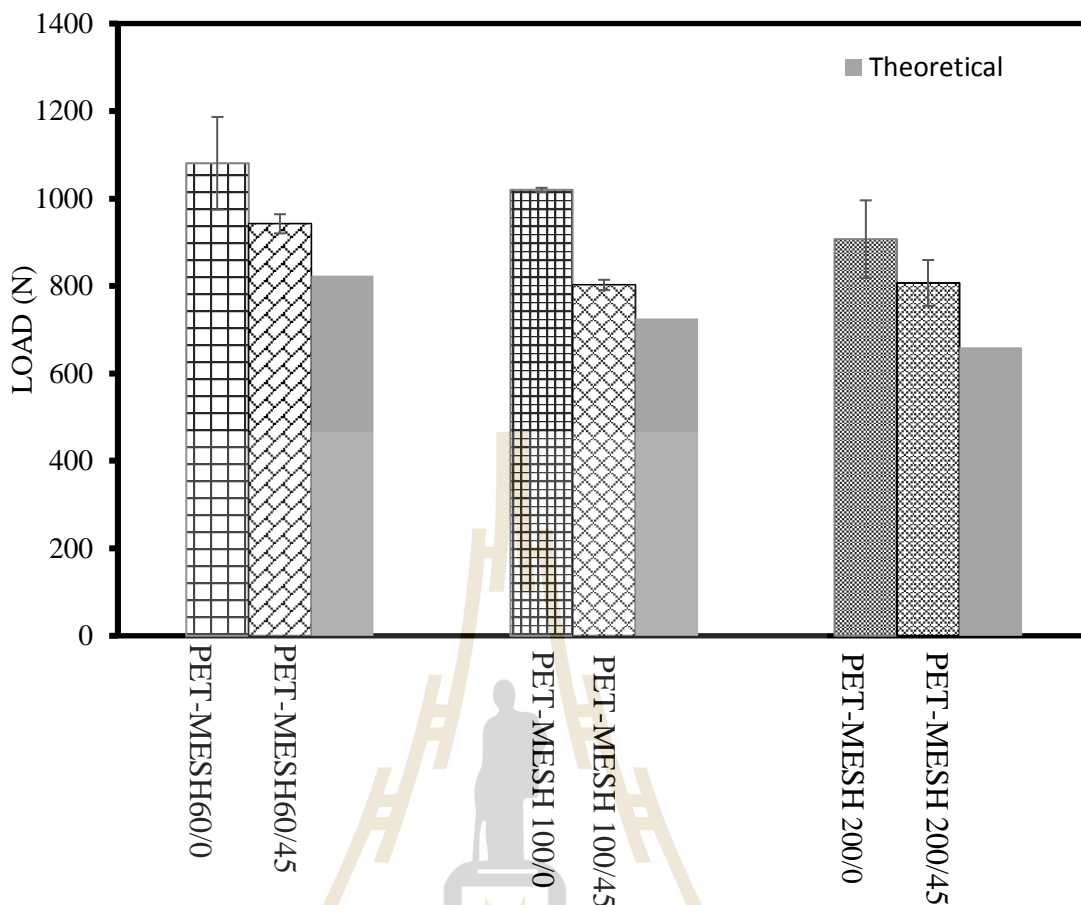
รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วย ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 1 ชั้น ทิศทาง 0 องศา และ 45 องศาที่ขนาดเมช 60 100 และ 200

$$\rho_c = \frac{m_{PET} + m_{Mesh}}{V_{PET} + V_{Mesh}} \quad (4.1)$$

$\rho_c$	คือ	ความหนาแน่นของคอมพอสิตทางทฤษฎี
$m_{PET}$	คือ	น้ำหนักของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต
$m_{mesh}$	คือ	น้ำหนักของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม
$V_{PET}$	คือ	ปริมาตรของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต
$V_{mesh60}$	คือ	ปริมาตรของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม

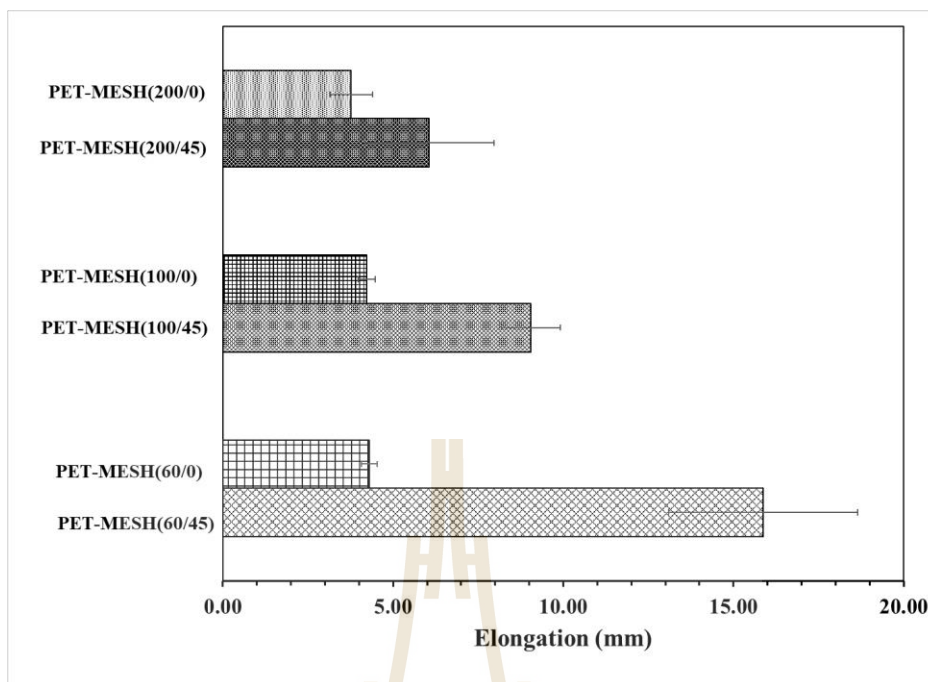
#### 4.3.4 ความสามารถในการรับแรงดึง

จากการทดสอบหาค่าความสามารถในการรับแรงสูงสุดของชิ้นงานคอมพอสิต ได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากรูปที่ 4.9 ดังกล่าวเห็นได้ว่า วัสดุคอมพอสิตต่าง ๆ ที่ขึ้นรูปมาสามารถรับแรงดึงสูงสุดใกล้เคียงกับผลรวมของค่าความสามารถในการรับแรงสูงสุดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรวมกับค่าความสามารถในการรับแรงสูงสุดของตะแกรงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ด้วยเหตุนี้ จึงอาจจะกล่าวได้ว่าวัสดุคอมพอสิตที่พัฒนาขึ้นความสามารถในการรับแรงขึ้นกับวัสดุที่นำมาประกอบกัน โดยชิ้นงานคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยตะแกรงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 จะสามารถรับแรงได้สูงสุด ตามด้วยชิ้นงานคอมพอสิตเสริมแรงด้วยตะแกรงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 100 และ 200 ตามลำดับ ซึ่งทิศทางการวางชั้นเสริมแรงในแนว 0 องศาจะให้ความสามารถในการรับแรงดึงสูงกว่าการเสริมแรงทิศทางการวาง 45 องศา เกิดจากการวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเสริมแรงที่ทิศทางองศาเป็นสถานะนี้เส้นใยรับแรงอยู่ในแนวรับแรงพอดีขณะที่การวางในทิศทาง 45 องศาเส้นใย รับแรงเพียง 45 องศา ทำให้รับแรงได้น้อยลง



รูปที่ 4.9 ความสามารถในการรับแรงดึงสูงสุดของชั้นงานคอมพอสิตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 1 ชั้น

ในส่วนความสามารถในการยึดตัวของชั้นงานแสดงผลการยึดตัวสูงสุด ดังรูปที่ 4.10 จากรูปที่ 4.10 พบว่า วัสดุคอมพอสิต พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 100 และ 200 วางเสริมแรงทิศทางแนว 0 ยึดตัวออกได้น้อยกว่าการแนว 45 องศาอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยัง พบว่า การยึดตัวของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมวางในทิศทาง 0 องศา มีขนาดใกล้เคียงกัน ขณะที่แนวการวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมในทิศทาง 45 องศา ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม เมช 60 จะยึดตัวได้สูงสุดและตามด้วย เมช 100 และ เมช 200 ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้ เพราะขนาดช่องว่างของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม เมช 60 สูงสุด และลดลงเป็นลำดับ จาก เมช 100 และ เมช 200

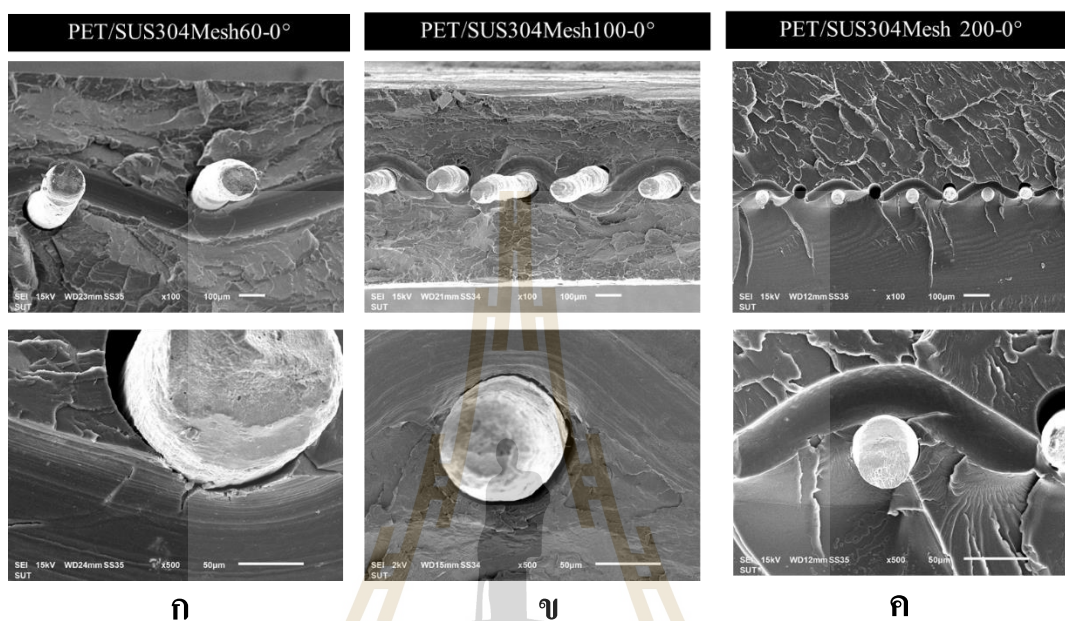


รูปที่ 4.10 ระยะยืดของชิ้นงานคอมพอลิเตสเตริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเสริมแรง จำนวน 1 ชั้น

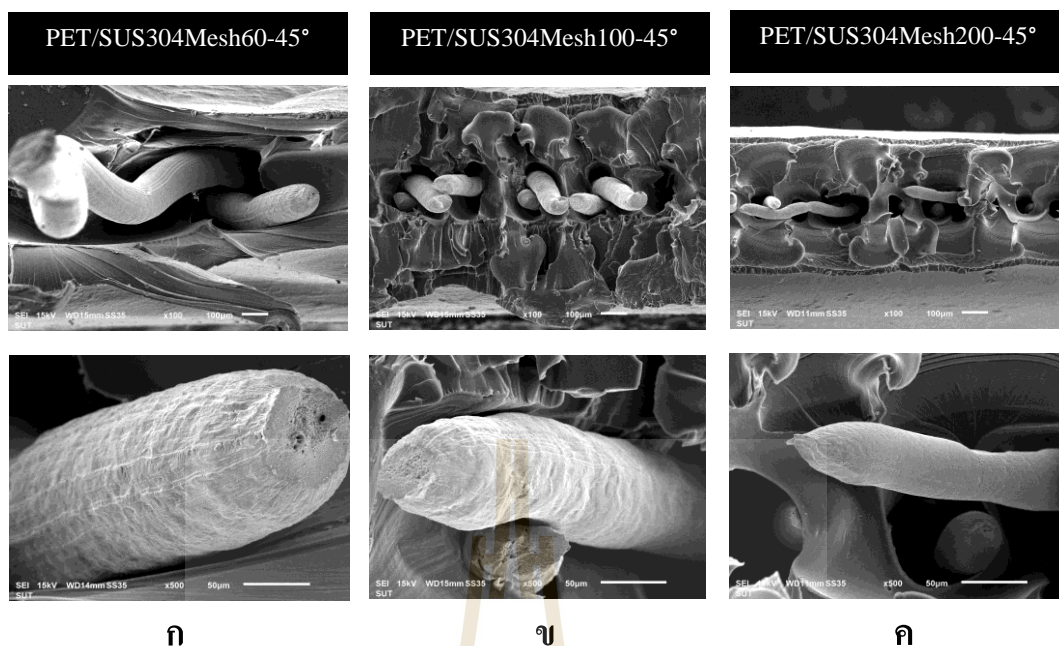
ภายหลังทดสอบความสามารถในการรับแรงดึงจนขาด ชิ้นงานที่ขาดถูกนำมาตรวจสอบลักษณะผิวการขาดของชิ้นงาน จากรูปที่ 4.10 แสดงลักษณะรอยขาดของชิ้นงานวัสดุคอมพอลิเตสเตริมที่ลีนเทรฟทาเลตเสริมด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 100 และ 200 วางในทิศทาง 0 องศา พบว่า พื้นผิวการขาดสังเกตเนื้อพื้นพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลต จะขาดออกก่อนที่ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด โดยวัสดุเนื้อพื้นผิวจะขรุขระ (ragged) และ รอยขาดแบบผิวเรียบ (flat) ผสมกัน แต่ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจะรอยขาดแบบถ้วยกับกรวย (cup-cone) ขณะที่จากรูปที่ 4.11 แสดงการแตกหักของชิ้นงานคอมพอลิเตสเตริมที่ลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด เมช 60 100 และ 200 วางแนว 45 องศา สังเกตได้ว่าลักษณะรอยขาดที่เนื้อพื้น พอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเป็นแบบขรุขระ (ragged) แสดงให้เห็นว่าเนื้อพื้นจะค่อย ๆ ขาดออกจากกันในขณะที่รับแรงดึงก่อนและตามด้วยเส้นใยเสริมแรงที่วางในแนว 45 องศา เกิดการยุบตัวและเข้าหากันและตามด้วยการยึดตัวของเส้นใยจนเส้นใยขาดในที่สุด จากการตรวจสอบผิวรอยแตกนี้เป็นหลักฐานที่ชัดเจนว่า พอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเนื้อพื้นขาดก่อน และการยึดตัวดำเนินต่อไปบนเส้นใยเสริมแรง ในกรณีทางวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเสริมแรงแนว 45 องศา เส้นใยแต่ละเส้นจะยุบตัวหากันก่อน การยุบตัวเข้าหากันของเส้นใยสองเส้นที่ติดกัน ทำให้การยึด



ตัวเกิดได้มากและและจะมากกรณีที่ช่องว่างตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมสูงทำให้การเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม เมช 60 คอมพอสิตที่ได้มีความสามารถในการยึดตัวของการเสริมแรงทิศทาง 45 องศา ดีกว่า 0 องศา



รูปที่ 4.11 ผิวแตกหักของชิ้นงานคอมพอสิตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 ชั้น วางแนว 0 องศา (ก) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 (ข) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 100 และ (ค) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 200



รูปที่ 4.12 การแตกหักของชิ้นงานที่เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 1 ชั้น วางแนว 45 องศา (ก) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 (ข) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 100 (ค) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 200

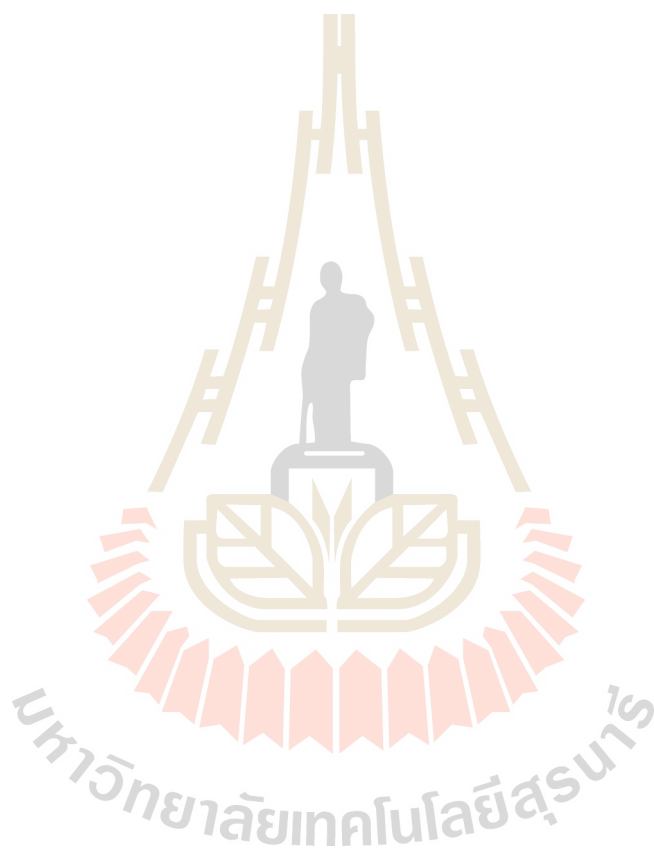
#### 4.4 สรุปผลงานวิจัย

จากผลการทดลองศึกษานี้ผู้วิจัยสามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.4.1 จากการตรวจสอบลักษณะคอมพอสิตที่ได้จากการอัดขึ้นรูปร้อน ชิ้นงานที่ได้ค่อนข้างสมบูรณ์แต่มีจุดบดพร่อง เช่น ฟองอากาศ รอยขุ่น และ นึกขาดในบางชิ้นงาน ในขณะที่การตรวจสอบภาคตัดขวางระดับมหภาคชิ้นงานไม่พบการแยกของวัสดุเนื้อพื้นกับเส้นใยเสริมแรง และความสามารถในการต้านทานแรงดึงของคอมพอสิตมีความต้านทานแรงดึงสูง ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่ามีความเป็นไปได้ที่จะผลิต และได้วัสดุคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

4.4.2 ผลของขนาดตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเสริมแรง ขนาดเมช 60 100 และ 200 ส่งผลต่อสมบัติ ความหนาแน่นของชิ้นงานและความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุคอมพอสิต โดยทั้งความหนาแน่น และ ความสามารถในการรับแรงดึงขึ้นกับสมบัติประกอบกันจึงวัสดุเนื้อพื้น พลาสติกและตะแกรงกล้าไร้สนิม แต่ขึ้นกับตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม ดังนั้น ทำให้คอมพอสิตที่ใช้ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 มีความหนาแน่นและความแข็งแรงสูงสุด

4.4.3 ผลของทิศทางวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเสริมแรง ส่งผลต่อสมบัติในการยึดตัวของคอนกรีตอย่างมาก โดยทิศทางวางแนว 45 องศา จะทำให้ยึดตัวได้สูงกว่าแนวการวาง 0 องศา แต่จะทำให้ความสามารถในการรับแรงดิ่งลดลง



## บทที่ 5

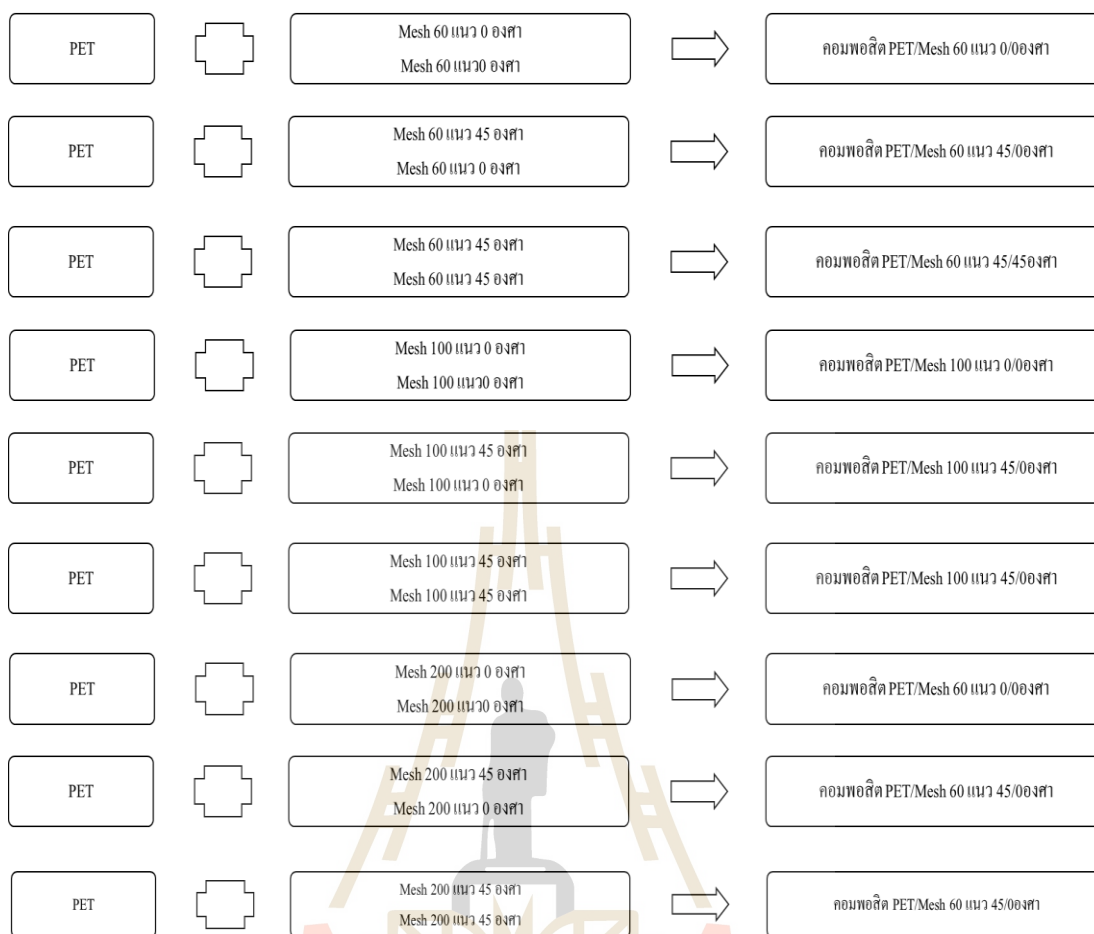
### การผลิตวัสดุคอมพอลิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรง เหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 2 ชั้น

#### 5.1 บทนำ

จากบทที่ 4 ผู้วิจัยได้แสดงให้เห็นแล้วว่าสามารถผลิตคอมพอลิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมได้ด้วยการอัดขึ้นรูปบนแม่พิมพ์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมพร้อมทั้งคอมพอลิตชนิดใหม่ที่ได้นี้มีสมบัติที่ดี โดยสมบัติทางกลของคอมพอลิตขึ้นกับความแข็งแรงของเส้นใยเสริมแรงซึ่งมีอิทธิพลมากที่สุดต่อสมบัติของวัสดุคอมพอลิต ดังนั้น การใช้เส้นใยเสริมแรงเพิ่มขึ้น และทิศทางการวางที่เหมาะสมน่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุคอมพอลิตได้ เช่น งานวิจัยของ T.Seshaiah และ K.Vijaya kumar reddy (2018) ได้ศึกษาผลกระทบของการเส้นใยที่วางตัวในทิศทางต่าง ๆ และจำนวนชั้นในคอมพอลิตอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว พบว่า วัสดุคอมพอลิตอีพ็อกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วจำนวน 1 ชั้นทิศทาง 0 องศา มีความสามารถในการต้านทานแรงดึงสูงแต่ยึดตัวได้น้อย ในขณะที่การเสริมแรงเส้นใยแก้วจำนวน 2 ชั้นในทิศทาง 45/45 องศา คอมพอลิตมีความสามารถในการยึดตัวได้สูงเพื่อยืนยันผลของทิศทางการวางตัวของเส้นใยเสริมแรง และจำนวนชั้นของเส้นใยเสริมแรงต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอลิตห่วย จึงได้ทำศึกษาผลของการใช้ตะแกรงต่าง ๆ ที่จำนวนชั้นเสริมแรง 2 ชั้น ที่วางตัวในแนวการวางต่าง ๆ ต่อสมบัติของวัสดุคอมพอลิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม

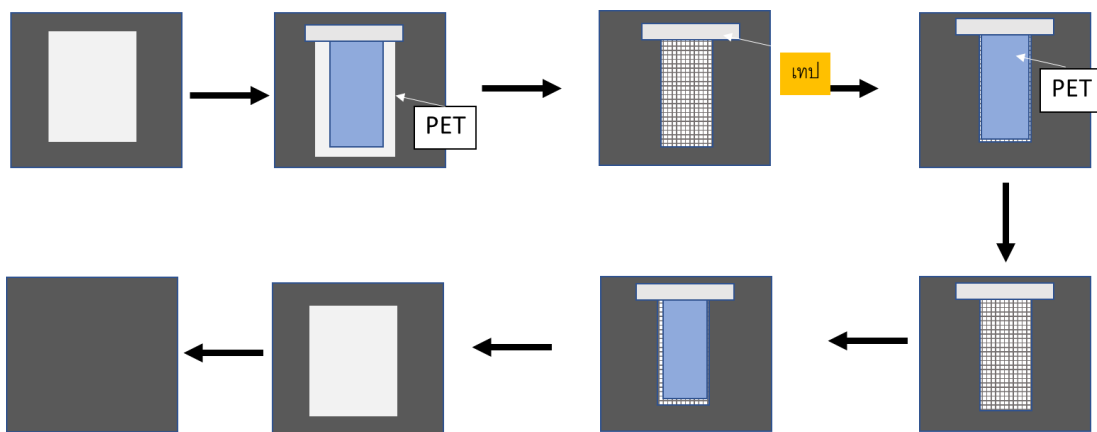
#### 5.2 ระเบียบการทดลอง

ในการศึกษานี้ วัสดุที่นำมาผลิตเป็นวัสดุคอมพอลิตจะใช้วัสดุชนิดเดียวกันกับการผลิตคอมพอลิต 1 ชั้น แต่ในการขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมพอลิตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม ใน การศึกษานี้ใช้ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเสริมแรงจำนวน 2 ชั้น โดยใช้วัสดุเนื้อพื้นพอลิเอทิลีน เทรฟทาเลต (PET) จำนวน 3 แผ่น วางสลับกับวัสดุเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 2 ชั้น ที่ขนาดเมช 60 100 และ 200 ที่วางในทิศทางทั้งให้แนว 0 องศา และ 45 องศา ทำให้ได้วัสดุคอมพอลิตที่ผลิตขึ้น ดังรูปที่ 5.1

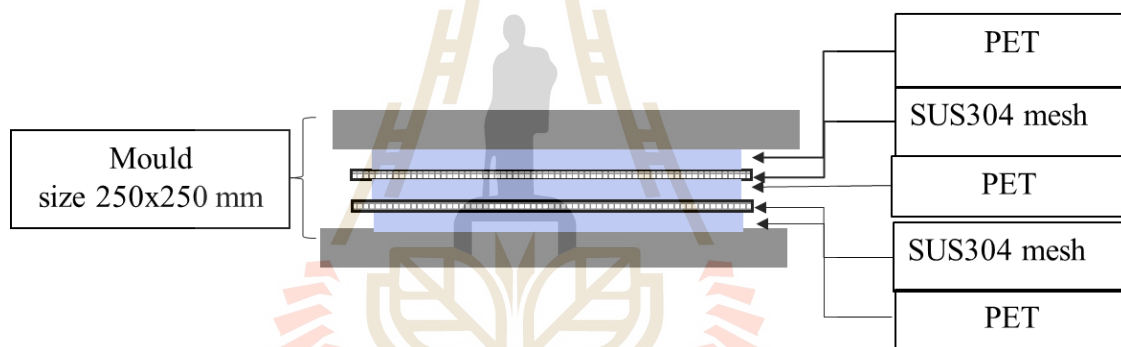


รูปที่ 5.1 ประเภทของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 2 ชั้น

สำหรับขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานจะคล้ายคลึงกับที่ 4 หัวข้อที่ 4.2.2 จากรูปที่ 5.2 แสดงขั้นตอนเรียงชิ้นงานพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตประกบกับชั้นเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมสลับกันตามลำดับ หลังจากการซ้อนกันของวัสดุเนื้อพื้นและวัสดุเสริมแรงแล้วจะได้ชิ้นการเรียงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการเรียงชิ้นงานก่อนขึ้นรูปของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 2 ชั้น ก่อนขึ้นรูป

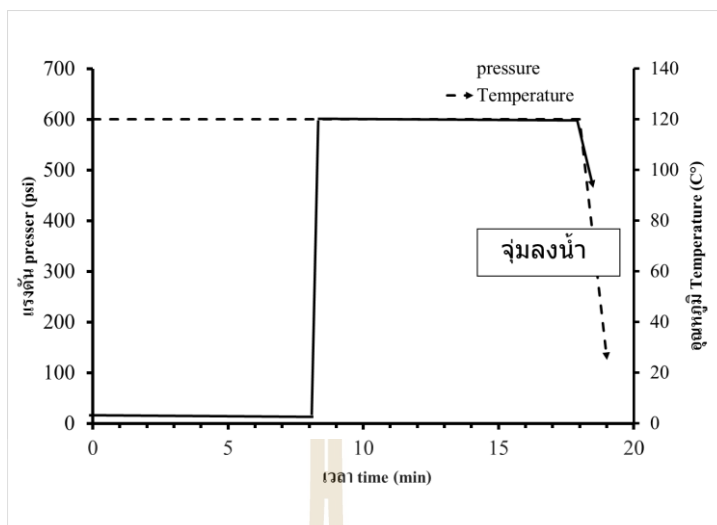


รูปที่ 5.3 การเรียงชิ้นงานก่อนขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมพอสิตวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 2 ชั้น

### 5.2.1 การขึ้นรูปชิ้นงาน

ภายหลังจากการจัดเตรียมชิ้นงานก่อนการขึ้นรูปแล้วชิ้นงานจะถูกอัดด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานภายใต้สภาวะการขึ้นรูป ดังรูปที่ 5.4 โดยสภาวะการขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้ คืออุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อบแห้ง (Pre-heat) เป็นเวลา 8 นาที ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ขณะอบทำการกดอัดขึ้นรูปใช้แรงดัน 600 psi เวลา 10 นาที และทำให้เย็นชิ้นงานด้วยการนำไปจุ่มในน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.3





รูปที่ 5.4 สถานะการขึ้นรูปชิ้นงาน ของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเสริมด้วยแรง  
ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 2 ชั้น

หลังจากนั้นชิ้นงานขึ้นรูปแล้วเรานำชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเสริมด้วยแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 2 ชั้น ไปประเมินคุณภาพ อันประกอบไปด้วย ลักษณะชิ้นงานหลังขึ้นรูป โครงสร้างภาคตัดขวางระดับมหภาค ความหนาแน่น และทดสอบแรงดึง เพื่อศึกษาอิทธิพลของ ขนาด จำนวนชั้น และ ทิศทางการเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม ต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเสริมด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม และนำมาผลมาอภิปราย

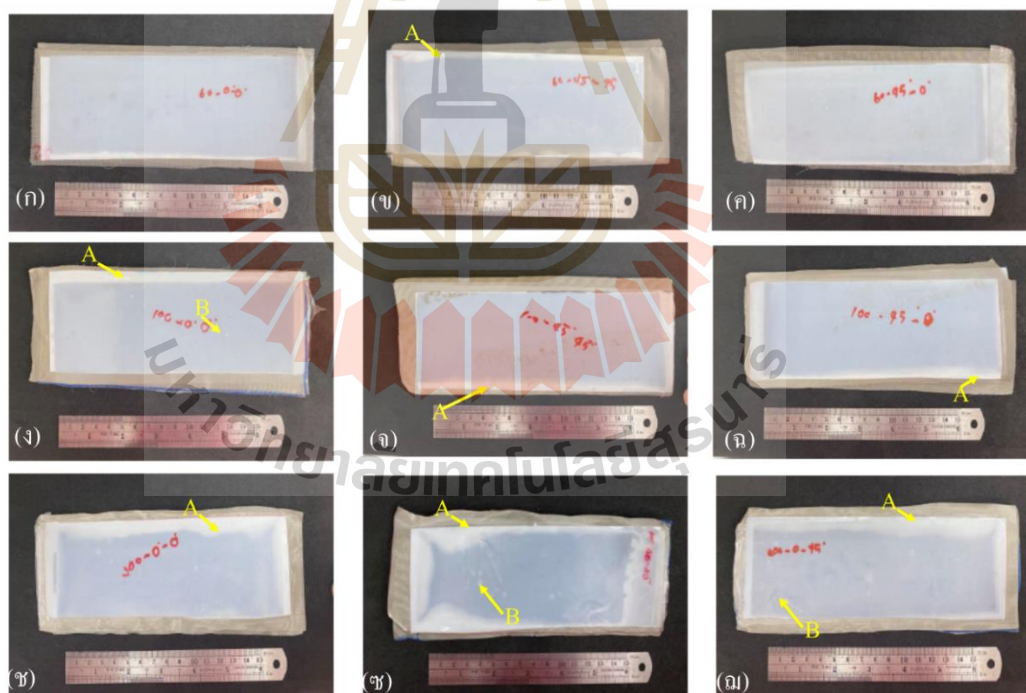
### 5.3 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากการตรวจสอบและประเมินคุณภาพชิ้นงานต่างๆ ได้ผลการทดลองและอภิปรายมีดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 5.3.1 ลักษณะของชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตภายหลังการขึ้นรูป

ลักษณะของชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตภายหลังการขึ้นรูปแสดง ดังรูปที่ 5.5 จากรูปที่ 5.5 พบว่า ชิ้นงานหลังขึ้นรูปมีสีขาวใสคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 1 ชั้น และมีตำหนิบริเวณขอบของชิ้นงานคอมพอสิต ณ ตำแหน่ง A ดังรูปที่ 8.5 (ข ง จ ช และ ฉ) ที่เนื้อของพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเสริม ไม่แทรกเข้าไปในตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งเห็นได้ชัดเจนกับชิ้นงานคอมพอสิตที่ผลิตจากตะแกรงมีความละเอียดสูงขนาดเมช 200 ซึ่งพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตแทรกตัวยากขึ้น ปัญหาดังกล่าวอาจเกิดจากการให้ความร้อนของเครื่องอัด

ขึ้นรูปที่มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ทำให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณตรงกลางแม่พิมพ์ขึ้นงาน เนื้อพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเมื่อได้รับความร้อน ณ ตำแหน่งใจกลางแม่พิมพ์เมื่ออ่อนตัวสามารถไหลเข้าแทรกในตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมในขณะที่บริเวณด้านข้างแม่พิมพ์ที่สัมผัสกับอากาศอุณหภูมิต่ำกว่าเนื้อของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเสริมจึงยึดตัวน้อยกว่าจึงไม่สามารถไหลและแทรกเข้าตะแกรงได้สมบูรณ์ ดังนั้น ในขนาดตะแกรงที่มีความละเอียดของการสานน้อยที่สุดคือ ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 ทั้งในแนว 0 และ 45 ขอบของขึ้นงานมีการแทรกเข้าไปให้ตะแกรงได้มากกว่าตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด เมช 100 และ 200 ที่เสริมในทิศทาง 0 องศา และ 45 องศา นอกจากนี้บางตำแหน่งของขึ้นงานคอมพอสิต ดังรูปที่ 5.5 (ง ข และ ฉ) เกิดฟองอากาศเล็กน้อยบนผิวขึ้นงานเช่นเดียวกับการใช้ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 1 ชั้น นอกจากนี้เรายังพบว่าสถานะที่ใช้ในการขึ้นรูปขึ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 2 ชั้น ใช้เวลาในการขึ้นรูปนานขึ้น เมื่อเทียบกับการขึ้นรูปตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อให้วัสดุคอมพอสิตที่ได้ มีความสมบูรณ์

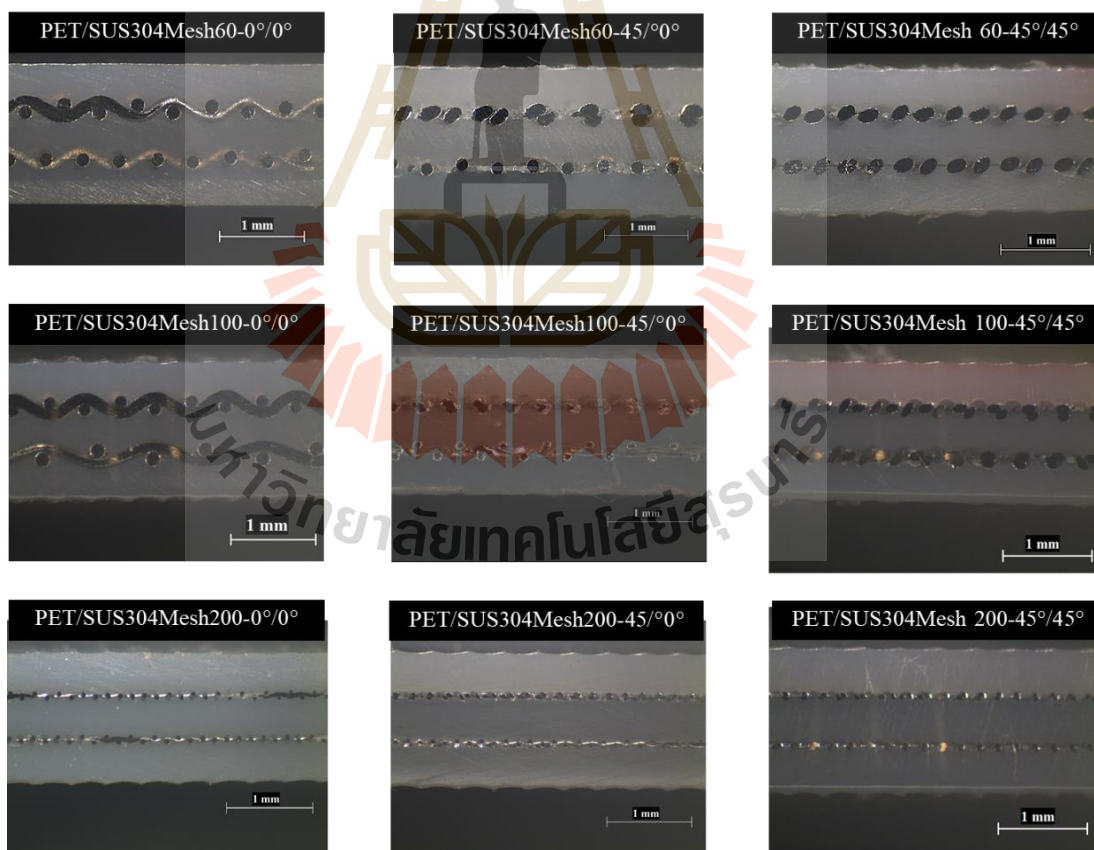


รูปที่ 5.5 ลักษณะของขึ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 2 ชั้น

(ก) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 แนว 0/0 องศา (ข) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 แนว 45/0 องศา (ค) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 แนว 45/45 องศา (ง) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 100 แนว 0/0 องศา (จ) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 100 แนว 45/0 องศา (ฉ) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 100 แนว 45/45 องศา (ช) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 200 แนว 0/0 องศา (ซ) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 200 แนว 45/0 องศา และ (ฅ) ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 200 แนว 45/45 องศา โดย คือ (A) วัสดุเนื้อพื้นที่ไม่แทรกไปในคอมพอสิต (B) ฟองอากาศบนคอมพอสิต

### 5.3.2 โครงสร้างภาคตัดขวางระดับมหภาค

ภายหลังการขึ้นรูปชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 2 ชั้น การตรวจสอบภาคตัดขวางชิ้นงานคอมพอสิตประเภทต่าง ๆ ระดับมหภาค โดยการใช้กล้องสเตอริโอไอให้ผลแสดงดังรูปที่ 5.6

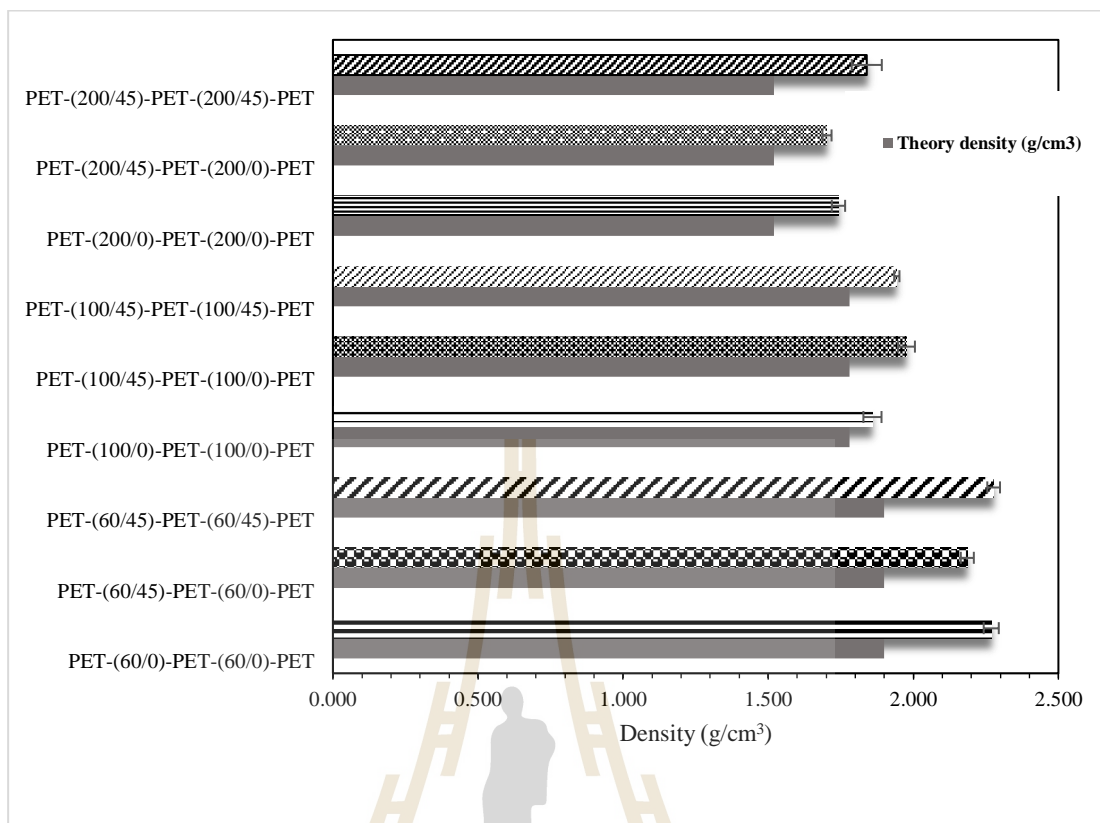


รูปที่ 5.6 โครงสร้างภาคตัดขวางระดับมหภาคชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 2 ชั้น

จากรูปที่ 5.6 พบว่า วัสดุคอมพอสิตชิ้นงานพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 2 ชั้น มีความสมบูรณ์ไม่พบรูพรุน และรอยแตกในเนื้อพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลต นอกจากนี้ยัง พบว่า พอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตยังประสานได้ดีกับตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม เช่นเดียวกับผลการตรวจสอบโครงสร้างภาคตัดขวางชิ้นงานคอมพอสิตที่ใช้ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 1 ชั้น นอกจากนี้จากรูปที่ 5.6 ยังพบลักษณะของตะแกรงเสริมแรงวางตัวต่างกัน เมื่อทิศทางการวางตะแกรงไม่เหมือนกันในการขึ้นรูป ซึ่งยืนยันว่าการผลิตคอมพอสิตที่ถูกต้องตามประเภทที่ต้องการ

### 5.3.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงาน

จากผลการทดสอบหาความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังการขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 5.7 จากรูปที่ 5.7 ความหนาแน่นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดแต่ละเมชทั้ง 60 100 และ 200 ไม่ว่าจะวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมในทิศทางใดก็ตาม ก็ให้ความหนาแน่นใกล้เคียงกัน แต่จะต่างกันตามการใช้ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเมช 60 มีความหนาแน่นมากกว่า เมช 100 และ เมช 200 ตามลำดับ นั้นมาจากผลของขนาดของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละเมชมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน ซึ่งตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเมชขนาด 60 มีน้ำหนักต่อพื้นที่ของตะแกรงสูงกว่าเมชขนาด 100 และ 200 ส่งผลต่อความหนาแน่นรวมของวัสดุคอมพอสิตชนิดนี้ภายหลังการขึ้นรูป นอกจากนี้ถ้าเปรียบเทียบความหนาแน่นของคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 1 ชั้น กับเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 2 ชั้น พบว่า ความหนาแน่นของคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 2 ชั้น มีความหนาแน่นสูงกว่า เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 1 ชั้น ทุกประเภทของตะแกรงที่ใช้ในการศึกษา และถ้าเปรียบเทียบกับความหนาแน่นตามทฤษฎีพบว่า ความหนาแน่นทางการทดลองสูงกว่าความหนาแน่นตามทฤษฎีที่คำนวณจากสมการในบทที่ 4 สมการที่ 4.1 ทุกคอมพอสิตที่ขึ้นรูปที่เป็นนี้ เพราะเรายังพบการขยายตัวของพอลิเอทีลีนทาเรฟภายหลังการขึ้นรูป

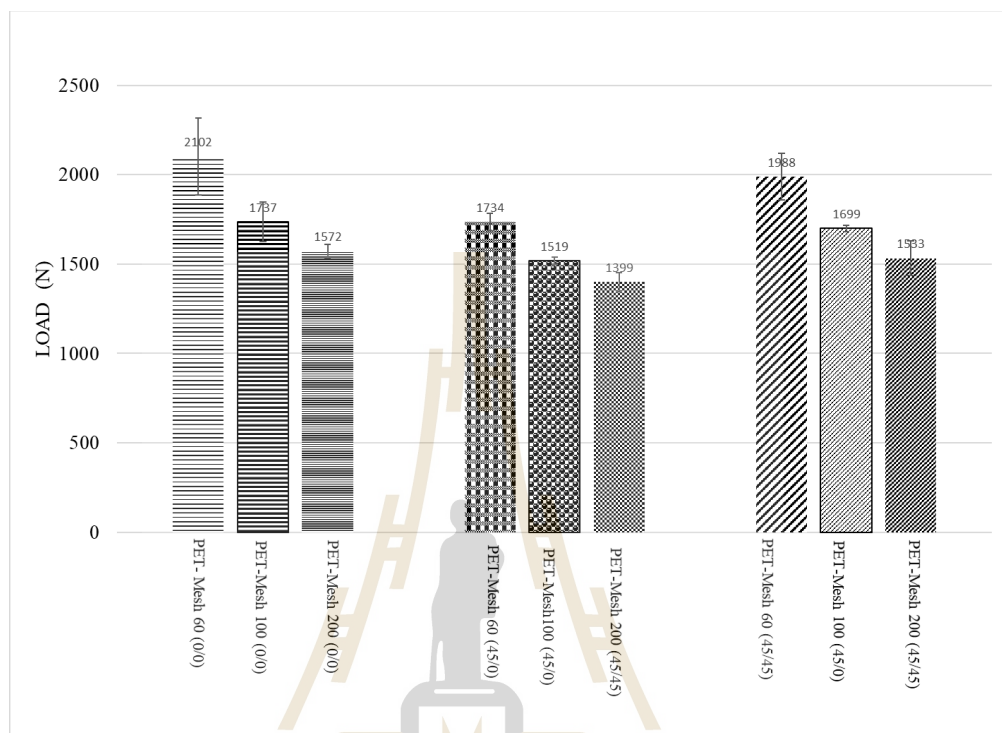


รูปที่ 5.7 ความหนาแน่นคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 2 ชั้น

#### 5.3.4 ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงดึง

เมื่อนำวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยตะแกรง 2 ชั้น ไปทดสอบแรงดึงในแกนทิศทางเดียว (Uni-axial tensile test) ได้ผลการทดสอบดังนี้ การทดสอบความสามารถในการรับแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมที่เมฆ 60 100 และ 200 จำนวน 2 ชั้น ประเภทต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5.8 เมื่อพิจารณาการวางตะแกรงแนวเดียวกัน 2 ชั้น จากรูปที่ 5.8 ความสามารถในการรับแรงดึงของคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเสริมแรงขนาดเมฆ 60 จำนวน 2 ชั้น จะให้แรงดึงสูงกว่าขนาด เมฆ 100 และ เมฆ 200 จำนวน 2 ชั้นและลดล้นลงตามลำดับ ซึ่งพฤติกรรมการรับแรงดึงสูงสุดเกิดขึ้นลักษณะเดียวกันกับคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 1 ชั้น นอกจากนี้ยังพบว่าการวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมทิศทาง 0/0 องศา ให้แรงต้านทานการดึงสูงสุด และ 45/45 องศา ต่ำ ลงมา และ 0 /45 องศาต่ำสุด ที่เป็นเช่นนี้ เพราะทิศ

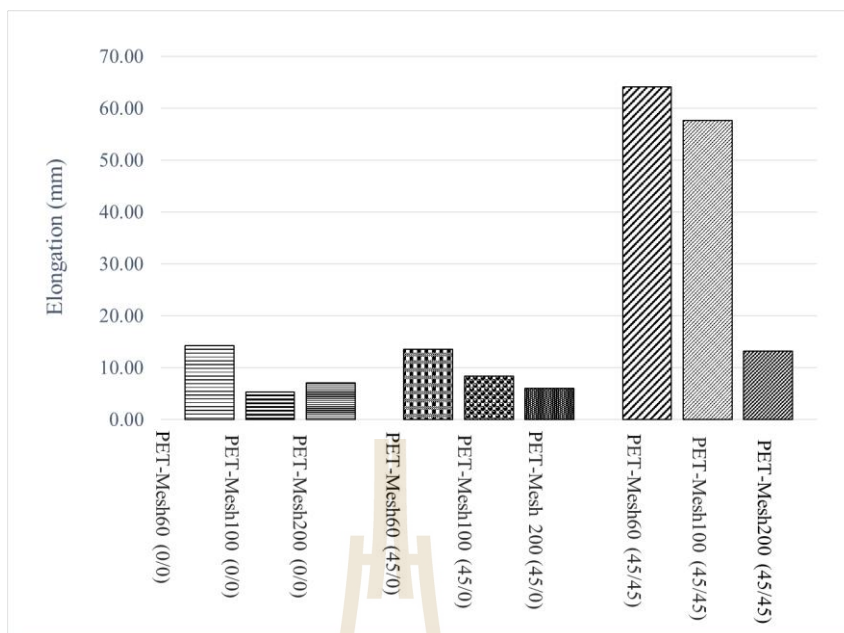
ทางการรับแรงของเส้นลวดเปลี่ยนแปลงตามแนวการวางเส้นลวดทำให้พฤติกรรมรับแรงเปลี่ยนแปลงไปตามแนวโน้มดังกล่าว



รูปที่ 5.8 ความสามารถในการรับแรงดึงของชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์พทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 2 ชั้น

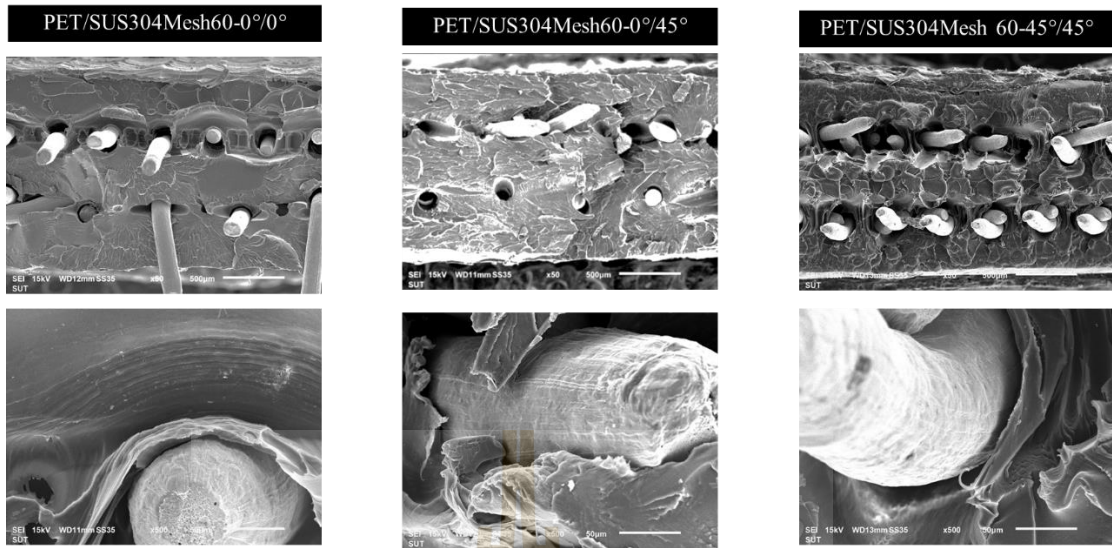
ยิ่งไปกว่านั้น ถ้าเราเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงของคอมพอสิตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 1 ชั้น กับ 2 ชั้น จะพบว่าการเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 2 ชั้น ให้ความสามารถในการรับแรงดีกว่าทุกกรณี



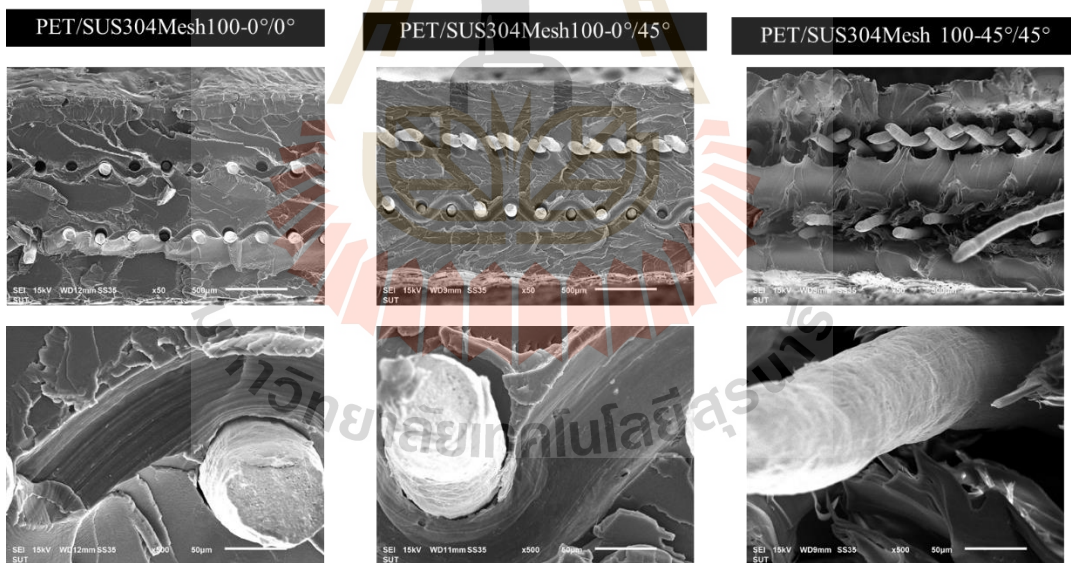


รูปที่ 5.9 ความสามารถในการยืดของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 2 ชั้น

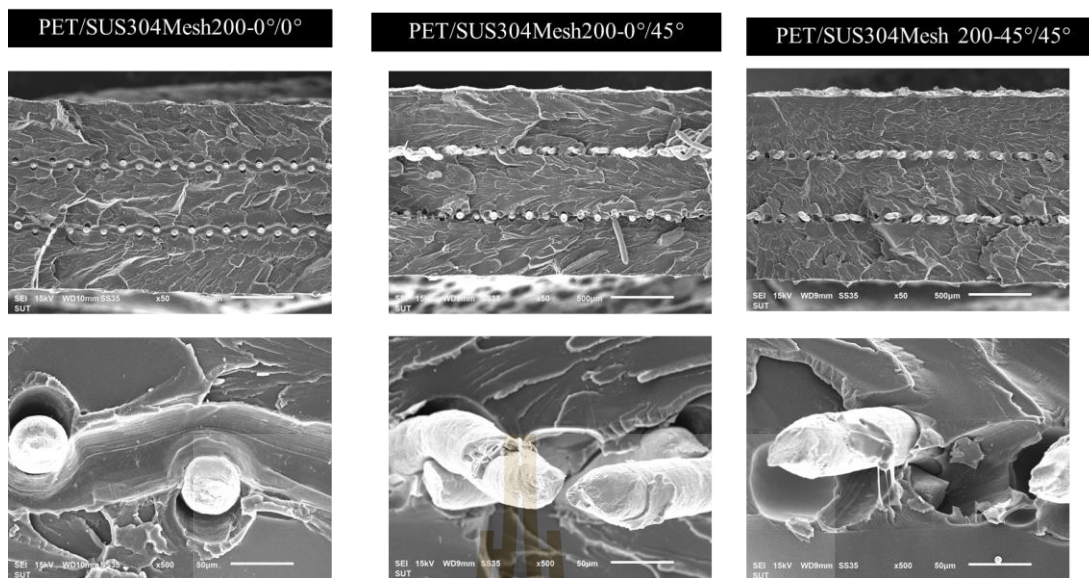
จากรูปที่ 5.9 แสดง ความสามารถในการยืดตัวของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตที่เสริมแรงด้วยตะแกรง 2 ชั้น พบว่า คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม วางในทิศทาง 45/45 องศา ให้ความสามารถในการยืดตัวสูงสุดและวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 45/0 องศา กับ 0/0 องศา ให้ความสามารถในการยืดตัวใกล้เคียงกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบการยืดตัวของคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 1 ชั้น ความสามารถในการยืดตัวของคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 2 ชั้นสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 5.10 การแตกหักของวัสดุคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้า ไไรซินิม 60 จำนวน 2 ชั้น



รูปที่ 5.11 การแตกหักของวัสดุคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้า ไไรซินิมขนาดเมช 100 จำนวน 2 ชั้น



รูปที่ 5.12 การแตกหักของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้า ไร้สนิมขนาดเมช 200 จำนวน 2 ชั้น

หลังจากการทดสอบแรงดึงชิ้นงานคอมพอสิตที่ขาดถูกนำมาทำการตรวจสอบรอยแตก ถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และได้ผลการตรวจสอบดังรูปที่ 5.10 รูปที่ 5.11 และ รูปที่ 5.12 จากรูปที่ 5.1- 5.12 พบว่า เนื้อพื้นพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตมีผิวแตกเรียบ กรณีที่ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมวางในแนว 0/0 องศา และจะมีลักษณะผิวเรียบรูปกรณี่ที่เสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้า ไร้สนิมวางตัวในแนว 45/45 องศา นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเนื้อพื้น น่าจะขาดก่อนเช่นเดียวกันกับการทดสอบแรงดึงในชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 1 ชั้น อีกทั้งยังพบว่า เส้นลวดมีการขาดแบบถั่วและกรวย ซึ่งแสดงถึงการแตกหักแบบเหนียวของลวด อนึ่งด้วยลวดมีการสานกันทำให้เกิดช่องว่างของ ตะแกรงในแนว 45 องศา ทำให้ลวดเคลื่อนที่มชิดกันได้ขณะดึง ทำให้การยึดตัวในแนวการวาง ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 45 องศา สูงมากกว่า 0 องศา

#### 5.4 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองศึกษาอิทธิพลของ ขนาด จำนวนชั้น และทิศทางการเสริมแรงตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถสรุปได้ดังนี้

5.4.1 การผลิตคอมพอลิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมที่หนาขึ้น (ใช้จำนวนชั้นของตะแกรงมากขึ้น) จะต้องใช้เวลาในการกดอัดและ ให้อุณหภูมิ นานขึ้นรูป เพื่อให้ได้งานที่มีความสมบูรณ์เช่นเดิม

5.4.2 ความหนาแน่นของคอมพอลิตพอลิเอทีลีนเทอร์ฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม 2 ชั้นสูงกว่า 1 ชั้น ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ตะแกรงที่มีน้ำหนักต่อพื้นที่ ตะแกรงสูง และไม่ขึ้นกับทิศทางการวางตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม

5.4.3 ความสามารถในการรับแรงดึงของชิ้นงานคอมพอลิตจะเพิ่มขึ้นตามความสามารถ ในการรับแรงของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใส่เข้าไปประกอบเป็นคอมพอลิต ทำให้คอมพอลิตที่ เสริมแรงสองชั้นจะรับแรงได้มากกว่าเสริมแรงชั้นเดียว นอกจากนี้ทิศทางการวางตะแกรงเหล็กกล้า สนิมแบบสองชั้นก็มีผลต่อทั้งความสามารถในการรับแรงดึงและการยืดตัว โดยการวางตะแกรง เหล็กกล้าไร้สนิมให้ลวดยาวตามแนวรับแรงจะทำให้คอมพอลิตรับแรงได้สูงสุด ส่วนวางตัวในแนว 45/45 ทั้งสองชั้น จะได้คอมพอลิตที่ยืดตัวได้มากขึ้น





## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการผลิตวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม และ ทำความเข้าใจถึงอิทธิพลของ ขนาด จำนวนชั้นและ ทิศทางการวางของ ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิต พบว่า ชั้นงานคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผลิตได้ค่อนข้างสมบูรณ์ อีกทั้งจากโครงสร้างภาคตัดขวางระดับมหภาคของคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมไม่พบรูพรุน หรือรอยแตก และพบการประสานของเนื้อเสริมแรงกับพอลิเมอร์เนื้อพื้นดี มีการจัดเรียงระหว่างชั้นเสริมแรงสลับกับเนื้อพื้นสมบูรณ์ตามกำหนด ความหนาแน่นของวัสดุคอมพอสิตอยู่เกณฑ์ต่ำ ความสามารถในการรับแรงดึงเพิ่มตามการเพิ่มจำนวนชั้นของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม และความสามารถในการรับแรงของตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละชนิด ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วย ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม และวัสดุคอมพอสิตนี้อาจจะเป็นวัสดุคอมพอสิตใหม่ที่มีคุณภาพสูง สำหรับสมบัติของคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม ขึ้นกับทั้งขนาดของตะแกรง (ซึ่งสามารถระบุได้ด้วยตัวแปรน้ำหนักต่อพื้นที่ของตะแกรง) ทิศทางการวาง และ จำนวนชั้น โดยความหนาแน่นและความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นตามตะแกรงที่มี น้ำหนักต่อพื้นที่สูง ส่วนความสามารถในการยึดตัวของคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมจะเพิ่มขึ้นตามทิศทางการวางตะแกรงเทียบกับแนวแกนแรง ที่ชั้นงานคอมพอสิตได้รับ และ ขึ้นกับขนาดความกว้างของช่องห่างระหว่างลวดของตะแกรง

#### 6.1 ข้อเสนอแนะ

แม้ว่าจากผลการวิจัยที่ได้พบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะผลิตวัสดุคอมพอสิตพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม แต่ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตชนิดนี้ในระดับอุตสาหกรรม จึงควรมีการศึกษาด้วยกระบวนการขึ้นรูปอื่นๆเพิ่มเติมอันจะช่วยเพิ่มโอกาสให้วัสดุคอมพอสิตชนิดใหม่นี้ได้ใช้งานได้จริงในอนาคต

## รายการอ้างอิง

- [1] หฤทภักดิ์ กิระดิเสวี, นั้ตรชัย วีระนิตติสกุล และ อภิรัตน์ เลาห้. (2552 - 2553). “ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ.”.วิศวกรรมสาร มก. ปีที่ 22 (ฉบับที่ 70): 18-31.
- [2]. Miroslava Klarová .Composite materials. Studentská 11, Ostrava-Poruba, office no: N415, (2015).
- [3] Ratna Chatterjee. Advanced & Emerging Composite Fiber Applications In the Automotive Industry. (November 2012).
- [4] John W.Weeton, Robert A ,Signorelli. Fiber-Metal composite materials .Lewis Research Center. NASA TECHNICAL NOTE (August 1966).
- [5] Caitlin O’ Brien, Amanda McBride, Arash E. Zagh, Kelly A. Burke, Alex Hill .Mechanical behavior of stainless steel fiber-reinforced composites exposed to accelerated corrosion.Merials (Basel). Jul 2017.
- [6] Callens M., Gorbatiikh L., Verpoest. Ductile steel fiber composites with brittle and ductile matrices. Compos.A : Appl .Sci Manuf. 2014.
- [7] M. Callens, M, Smet, B, Goderis, E. Novel ductile steel fiber composites:2016 opportunities and challenges . SIM innovation together with materials. November 2014
- [8] Elizabeth C., Claunch. Forecasting on composites-Market, Product, and Demandes. College of Textiles. 2015.
- [9] Hofstatter, Thomas, Pedersen, David Bue, Tosello, Guido, Hansen, Hans Norgaard . State-of-the-art of fiber-reinforced polymers in additive manufacturing technologies. Journal of Reinforced Plastics & Composites. 2017.
- [10] Salar Bagherpou. Fibre Reinforced Polyester Composites. INTECH open science open minds.2012.
- [11] R.T. Durai Prabhakaran, Tom Løgstrup Andersen, Jakob Ilsted Bech, Hans Lilhol, Investigation of Mechanical Properties of Unidirectional Steel Fiber/Polyester Composites: Experiments and Micromechanical Predictions. POLYMER COMPOSITES (2016) 628–644.



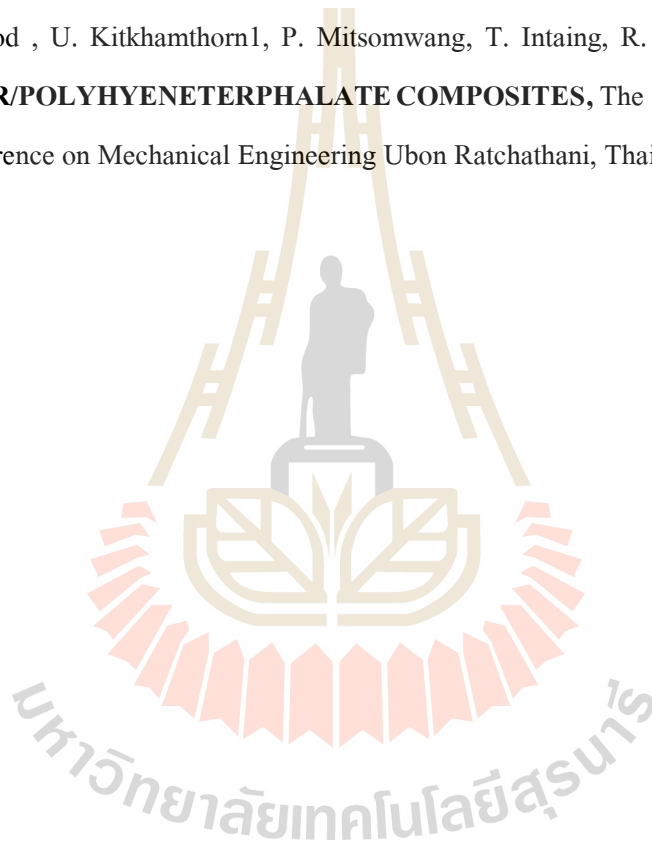
- [12] Amanda K. McBride, Samuel L. Turek, Arash E. Zaghi, Kelly A. Burke. POLYMERS. April 2017.
- [13] Seiji Katayama, Yousuke Kawahito. Laser direct joining of metal and plastic. ScienceDirect. September 2008 1247-1250.
- [14] characteristics-applications-and-properties-of-polymers-2008.
- [15] Jalalvand, M., Czél, G., & Wisnom, M. R. (2015). Parametric study of failure mechanisms and optimal configurations of pseudo-ductile thin-ply UD hybrid composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 74, 123-131. doi: 10.1016/j.compositesa.2015.04.001.
- [16] Fan, M. (2010). Sustainable fibre-reinforced polymer composites in construction. In *Management, Recycling and Reuse of Waste Composites* (pp. 520-568).
- [17] Tawfik, B. E., Leheta, H., Elhewy, A., & Elsayed, T. (2017). Weight reduction and strengthening of marine hatch covers by using composite materials. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9(2), 185-198. doi: 10.1016/j.ijnaoe.2016.09.005.
- [18] Gupta, M. K., & Srivastava, R. K. (2015). Mechanical Properties of Hybrid Fibers-Reinforced Polymer Composite: A Review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55(6), 626-642. doi:10.1080/03602559.2015.1098694.
- [19] ASTM. (2016). Designation: E 2016 – 99e1. In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing: Standard Specification for Industrial Woven Wire Cloth*.
- [20] Silva, R. V., Ueki, M. M., Spinelli, D., Bose Filho, W. W., & Tarpani, J. R. (2009). Thermal, Mechanical, and Hygroscopic Behavior of Sisal Fiber/Polyurethane Resin-based Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(9), 1399-1417. doi:10.1177/0731684409102986.
- [21] ขจร อัจฉิมจิรรัฐติกาล และคณะ (2558). DEVELOPMENT OF FORMING COMPOSITE MATERIAL WITH NATURAL FIBERS-REINFORCE: A REVIEW LITERATURE. Paper presented at the Kasem Bundit Engineering Journal Vol.5 No.1 January - June 2015, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University.



## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รสรินทร์ ดือขุนทด , ณัฐกฤตา ประเสริฐโสภา , ภูษิต มิตรสมหวัง , รัตน์ บริสุทติกุล, กระบวน  
การผลิตและทดสอบพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม, The  
11th Thailand Metallurgy Conference (TMETC11) · Pattaya · Thailand, November 15 –  
16, 2018, หน้า 34-35.

R. Duekhodthod , U. Kitkhamthorn<sup>1</sup>, P. Mitsomwang, T. Intaing, R. Borrisutthekul, **STEEL  
FIBER/POLYHYENETERPHALATE COMPOSITES**, The 11th TSME International  
Conference on Mechanical Engineering Ubon Ratchathani, Thailand 1st – 4th December  
2020.



## วัสดุเชิงประกอบเนื้อฟีนเป็นพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม

รศ.วินทร์ คือขุนทด<sup>1</sup>, ณัฐกฤตา ประเสริฐโตภา<sup>2</sup>, อุษิต มิคตรมทรวง<sup>1</sup>, รัตน บปริฎฐชิตกุล<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประเทศไทย  
<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญชัง ประเทศไทย  
: rattana@gr.sut.ac.th

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบเนื้อฟีนเป็นพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต(PET) เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยการอัดขึ้นรูปร้อน ซึ่งในการทดลองใช้แผ่น PET ความหนา 0.5 mm ประกอบตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมและอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 120 C° แรงอัด 600 psi เวลาที่ใช้อัดขึ้นรูป คือ เวลา 2 นาที, 3 นาที และ 4 นาที ตามลำดับ และตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ขนาดตะแกรง (Mesh) 40 , 60 และ 100 จากการทดลองเราสามารถขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบได้สมบูรณ์ ไม่พบรูพรุนภายในเนื้อ สามารถรับแรงได้ใกล้เคียงกับความสามารถในการรับแรงของวัสดุที่ขึ้นรูปรวมกัน และ ความหนาแน่นสูงสุดไม่เกิน 1.93 g/cm<sup>3</sup> ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าสามารถผลิตวัสดุเชิงประกอบเนื้อฟีน PET เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม ได้ด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปร้อนได้

คำสำคัญ: วัสดุเชิงประกอบ, พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET), ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม, อัดขึ้นรูปร้อน

### 1. บทนำ

วัสดุพอลิเมอร์โดยทั่วไปมีสมบัติด้านแข็งแรง มอดูลัสยืดหยุ่นและอุณหภูมิการใช้งานต่ำแต่มิฉะนั้นก็เบา และขึ้นรูปได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะที่มีความแข็งแรงและมอดูลัสยืดหยุ่นสูงทำให้สามารถใช้งานที่มีแรงกระทำสูงได้ดี แต่ขึ้นรูปได้ยากและทนต่อการกัดกร่อนได้ดี จึงทำให้มีผู้พยายามนำวัสดุทั้งสองมาประกอบกันเป็นวัสดุเชิงประกอบที่ยังรักษาสสมบัติที่ดีของวัสดุเดิมทั้งสองไว้ให้ได้มากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามปัญหาหลักในการผลิตและการใช้งานวัสดุเชิงประกอบนั้น คือ วัสดุเนื้อฟีนกับวัสดุเสริมแรงมีการยึดเกาะกันไม่ได้ส่งผลให้เกิดการแยกตัวของรอยประสาน (Delaminate) ของวัสดุเนื้อฟีนกับวัสดุเสริมแรงขณะผลิตหรือใช้งาน อดงานวิจัยของ Kamyama และคณะ (2008) เรื่องการเชื่อมแผ่น PET กับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมพบว่าเราสามารถเชื่อม PET กับเหล็กกล้าไร้สนิมได้ โดยรอยเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรง เมื่อเป็นเช่นนี้ผู้วิจัยจึงคาดการณ์ว่าถ้านำ PET กับตะแกรงลวดเหล็กไร้สนิมมาประกอบกันเป็นวัสดุเชิงประกอบปัญหาการเกิดการแยกตัวบริเวณ รอยประสานน่าจะลดลงและควรได้วัสดุเชิงประกอบคุณภาพสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัย

จึงต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์จากพอลิเมอร์ชนิดPET เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม.

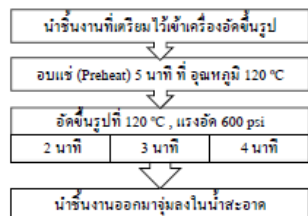
### 2. วิธีการทดลอง

ในการศึกษานี้วัสดุที่นำมาผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบประกอบไปด้วย แผ่น PET ขนาด 60x 190 mm หนา 0.5 mm และ ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 (SUS304) ขนาด 70x 200 mm ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ขนาดมีลักษณะดังตารางที่ 1 จากนั้นนำวัสดุที่เตรียมข้างต้นวางเรียงทับกันให้ตะแกรง SUS 304 (1 แผ่น) ประกอบด้วย PET (2 แผ่น) และนำไปขึ้นรูปที่สภาวะการทดลองต่างๆ ดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะตะแกรง SUS 304 ขนาดต่างๆ

SUS 304 Mesh	Wire Ø (mm)	Opening (mm)	Weigh/Area 30x30 mm (g)
40	0.17	0.463	0.5138
60	0.15	0.271	0.6267
100	0.10	0.153	0.4901

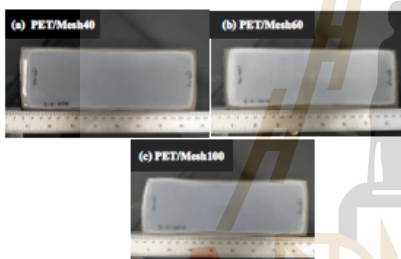
การประชุมวิชาการทางโลหวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11  
15-16 พฤศจิกายน 2561 · พัทยา · ประเทศไทย



รูปที่ 1 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปที่สภาวะการทดลองต่างๆ

โดยชิ้นงานหลังขึ้นรูปจะถูกนำมาทดสอบเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบPET ตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม ด้วยวิธีการดังนี้ คือ ตรวจสอบชิ้นงานด้วยตาเปล่า ตรวจสอบ โครงสร้างภาคตัดขวาง ชิ้นงานระดับมหภาคและการทดสอบความสามารถในการรับแรงตามมาตรฐาน ASTM D3039

### 3. ผลการทดลอง



รูปที่ 2 ชิ้นงานภายหลังจากขึ้นรูปที่ใช้เวลาในการอัดขึ้นรูป 4 นาที

- (a) วัสดุเชิงประกอบPET เสริมแรงด้วย SUS304 ขนาดMesh40
- (b) วัสดุเชิงประกอบPET เสริมแรงด้วย SUS304 ขนาดMesh60
- (c) วัสดุเชิงประกอบPET เสริมแรงด้วย SUS304 ขนาดMesh100

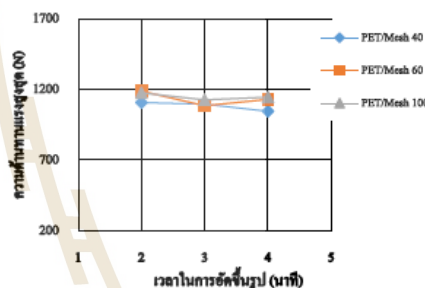
จากรูปที่ 2 ลักษณะชิ้นงานหลังขึ้นรูปมีความคล้ายกัน โดยตรงบริเวณด้านข้างของปลายชิ้นงานจะกว้างกว่าตรงกลางชิ้นงาน เนื่องจากขณะขึ้นรูปแผ่น PET ได้รับความร้อนประกอบกับการให้แรงอัดจะทำให้เนื้อ PET บริเวณปลายชิ้นงานทั้งสองด้านเกิดการไหลออกด้านข้าง และพบว่าชิ้นงาน PET/Mesh 100 จะมีการขยายของเนื้อพื้นที่เป็น PET ออกมาด้านข้างมากที่สุด เพราะมีเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดขนาดเล็กและสานกันละเอียดกว่าขนาด Mesh40 และ Mesh60

รูปที่ 4 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคชิ้นงานหลังขึ้นรูป พบว่าไม่พบรูพรุนในเนื้อของวัสดุเชิงประกอบและ

วัสดุทั้ง 2 ชนิดสามารถยึดเกาะกันโดยไม่พบการแยกตัวระหว่างชั้นของวัสดุเนื้อพื้น PET และวัสดุเสริมแรงตะแกรง SUS 304 ภายหลังจากการอัดขึ้นรูป และเมื่อนำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบไปตัดและทดสอบแรงดึงได้ผลการทดลองในรูปที่ 5 จากรูปที่ 5 พบว่าความสามารถในการรับแรงของวัสดุเชิงประกอบที่ได้ในการศึกษานี้มีขนาดใกล้เคียงกับความสามารถในการรับแรงของวัสดุที่นำมาประกอบกันทั้งสองรวมกัน



รูปที่ 4 ภาพถ่ายโครงสร้างมหภาคชิ้นงานหลังขึ้นรูปที่เวลาในการอัดขึ้นรูป 4 นาที



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงสูงสุดที่ชิ้นงานทนได้และเวลาในการอัดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ PET/ตะแกรงSUS304 ที่สภาวะการทดลองต่างๆ

### 4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะสร้างวัสดุเชิงประกอบชนิด PET เสริมแรงด้วยตะแกรงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการอัดขึ้นรูปร้อนได้ โดยวัสดุเชิงประกอบได้มามีสมบัติไม่พบรูพรุนภายในเนื้อ สามารถรับแรงได้ใกล้เคียงกับความสามารถในการรับแรงของวัสดุที่ขึ้นรูปรวมกันและความหนาแน่นสูงสุดไม่เกิน 1.93 g/cm<sup>3</sup>

### 5. ถัดกิจกรรมประกาศ

มทส. อีสาน สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุและศูนย์เครื่องมือ มทส. อำนวยการสนับสนุนเครื่องมือในงานวิจัย

### 6. เอกสารอ้างอิง

[1] Seiji Katayama, M. Laser direct joining of metal and plastic. Osaka University, Japan. Scripta Materialia 59, 2008, pp. 1247–1250.

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

---

PAPER • OPEN ACCESS

## Steel fiber/polyethylene terephthalate composites

To cite this article: Rossarin Duekthodhod et al 2021 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1137 012026

View the [article online](#) for updates and enhancements.





## Steel fiber/polyethylene terephthalate composites

Rossarin Duekhodthod<sup>1</sup>, Usanee Kitkamthorn<sup>1,\*</sup>, Pusit Mitsomwang<sup>1</sup>, Tawatchai. Intaing<sup>1</sup>, Rattana Borrisutthekul<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Metallurgical Engineering, Institution of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

\* Corresponding Author: k\_usanee@sut.ac.th

### Abstract

Currently, lightweight materials with high performance have been strongly needed to meet the requirements of advanced structural materials. One of the promising lightweight materials is the metals fiber reinforced plastic composite, which usually gives good specific strength and high toughness. However, de-bonding between metal fiber and plastic is the main problem in the production and utilization of the composite. Recently, Katayama, et. al. studied the dissimilar materials joining between plastics and metals such as PET/SUS 304 and so on. The joint was succeeded with the reaction between the metal oxide and functional group in the molecule of the polymer. The possibility to join metal-plastic may provide the new approach to produce new design composites. Thus, the objective of the study is to investigate the feasibility to produce stainless steel fiber reinforced PET plastics composite (SFRP). In experiments, stainless steel mesh and PET sheet with 0.5 mm of thickness were used as materials to fabricate the SFRP composite. The hot pressing of sandwich stacks with inserted SUS304 wire mesh between two PET sheets was performed at 120°C. Results indicated that high strength composite without de-bonding could be obtained.

**Keywords:** Polyethylene terephthalate (PET), Stainless Steel grade 304 (SUS 304)

### 1. Introduction

Automotive part manufacturers have been challenged by new technologies concerned with manufacturing electric vehicles. In order to increase the distance of driving per charge, the application of lightweight materials to reduce the energy consumption rate of electric vehicles, is needed [1]. In the past 30 years ago, lightweight materials have been rapidly developed from high strength steel, to aluminum alloy, and then composites materials. Various composites materials have been developed based on using the difference of the raw materials used such as CFRP composites that are produced with carbon fiber and plastic. However, carbon fiber reinforced plastic provides low toughness, new fiber-reinforced plastic has been needed to be developed in order to improve toughness. The metal fiber-reinforced materials exhibit a 3 to 5 times higher elongation than typical continuous carbon and glass fiber composites and can therefore provide an answer to improve toughness [2-3]. However, the plastic matrix and metal reinforcement are difficult to bond. Therefore, after production, delamination between plastic matrix and metal fiber is easily found [4]. In order to solve the problem, using the compatibility



Content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 3.0 licence](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

Published under licence by IOP Publishing Ltd

between steel fiber and plastic to make fiber reinforced plastic composites will provide the opportunity to obtain high quality materials. Katayama et al., [5] applied the laser bonding for stainless steel/PET composite fabrication. They succeeded in producing of good bonding between stainless steel and PET by the reaction between a functional group in the molecule of the PET and the chromium oxide film on the stainless-steel surface. Therefore, in this work, new composites materials developed by using PET as a matrix, and stainless-steel as fiber have been studied in order to study the feasibility of producing new composites materials.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Materials

Stainless steel fiber reinforced plastic composite (SFRP) was produced from stainless steel meshes and polyethylene terephthalate (PET) plastic. The stainless-steel wire meshes as reinforced materials were cut to a size of 70x20 mm. For the plastic matrix, the polyethylene terephthalate (PET) sheets with the size of 60x190x0.5 mm were used. The material characteristic and their mechanical properties of both materials are expressed in Table 1.

Table 1. Materials characteristics and their mechanical properties.

Materials	Wire Ø (mm)	Opening (mm)	Maximum Load at 15 mm of the width of the specimen (N)
PET	-	-	169
SUS304 mesh 60	0.15	271.0	485
SUS304 mesh 100	0.10	0.153	386
SUS304 mesh 200	0.055	0.432	314

### 2.2 Experimental procedures

SFRP composites were produced by using the compression molding technique with the MODEL PR2D-W3tech00L350 PM-WCL machine as shown in Figure 1. The sandwich stack of stainless-steel mesh in the middle between the PET sheets was performed as shown in Figure 2. The compressive molding process was performed at a mold temperature of 120 OC, the pressure of 60 psi, and a curing time of 5 minutes. After curing, the mold was opened and the sandwich stack was cooled by dipping into the water.

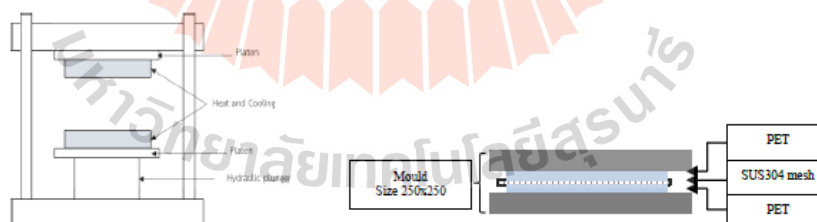


Figure 1. Compression Moulding machine

Figure 2. Schematic of SFRP composites stack layer. (PET/SUS304 mesh /PET)

The integrity of SFRP composites was then investigated by visual inspection, macrostructure observation. The macrostructure observation of SFRP composite cross-section was performed under the stereo microscope and scanning electron microscopes (SEM). Moreover, SFRP composites were cut to the tensile specimens as shown in Figure 3. The tensile testing was performed by Instron 4505 with a crosshead moving speed of 2 mm/min. After tensile testing, the failure samples were characterized under SEM observation.

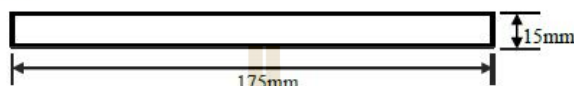


Figure 3. The tensile test specimen shape.

### 3. Results and discussion

#### 3.1 Visual Inspection of SFRP composite

The visual inspection results of the SFRP composite samples with the different wire sizes of stainless-steel mesh were shown in Figure 4. Two layers of PET and stainless-steel mesh were perfectly welded into a single sheet of SFRP composites. The width at the end of all SFRP samples as indicated by the red dash line rectangular was wider than the width at the center of the SFRP sample. Moreover, in SFRP composites with #200 of stainless-steel wire mesh, the tearing of stainless-steel wire mesh was found at the edge of the sample as indicated in Figure 5. The tearing of stainless-steel wire at end of the SFRP sample was caused by that the pressing process was carried out with no constraint. Thus, in order to avoid such ending effect on the tensile test result, the tensile samples were cut only from the center of the SFRP composite sample.



Figure 4. The SFRP composites formed with different stainless-steel wire mesh sizes (a) SFRP SUS304 mesh 60 (b) SFRP SUS304 mesh 100 (c) SFRP SUS304 mesh 200

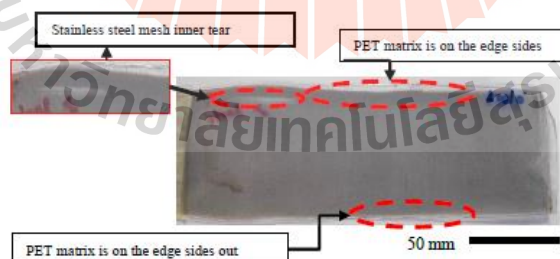
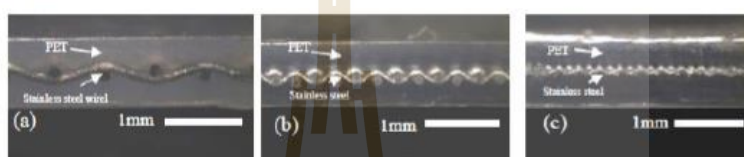


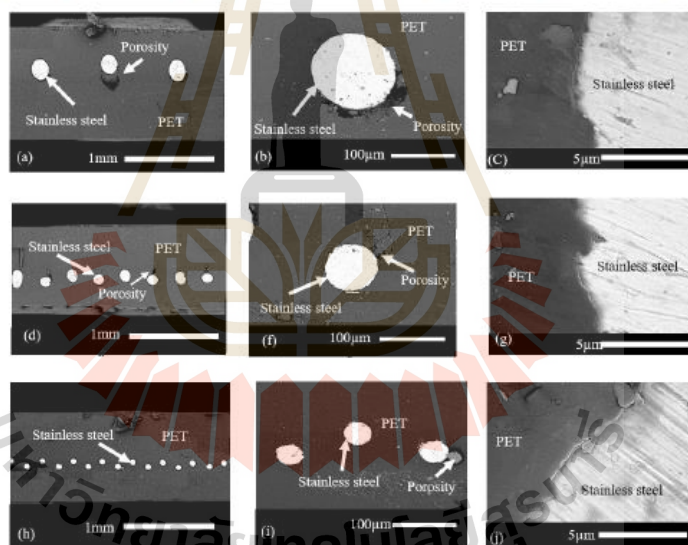
Figure 5. Defect on the sample SFRP with SUS304 mesh 200 composites.

### 3.2 Cross-sectional observations.

Figure 6 shows the cross-section observation of the SFRP composites reinforced with various stainless-steel mesh sizes. From Figure 6, it could be realized that the PET was fully filled into the gaps between the stainless-steel wire mesh. No porosity and gaps between the steel wire mesh and the PET matrix were found under optical microscope observation. However, at higher magnification observation of cross-section of SFRP composites, porosity, and PET unfilled in the hole between the stainless-steel wire mesh were observed as indicated in the dark spots in Figure 6. Although porosity and gaps were present, good bonding between PET stainless steel was achieved as realized in Figure 7(c), Figure 7(g), and Figure 7(j).



**Figure 6.** Macrostructure of a cross-section of the SFRP composites, difference stainless - steel wire mesh, (a) SFRP SUS304 mesh 60 (b) SFRP SUS304 mesh 100 (c) SFRP SUS304 mesh 200 composites.



**Figure 7.** Shows the cross-section of the SFRP composites by SEM.

### 3.3 Tensile testing

Figure 8 shows the maximum tensile resistance loads of SFRP composites with different mesh sizes and the theoretical maximum tensile resistance load of SFRP composites. The theoretical maximum tensile resistance loads of SFRP composites were calculated from the summation of maximum load capacity of



each material that were used to fabricate the SFRP composites. From Figure 8, the experimental maximum tensile resistance loads of the SFRP composites were better than that of the theoretical ones. Moreover, the maximum tensile load of SFRP composites decreased with the lower load capacity of stainless-steel wire mesh used as reinforcement. The elongation of SFRP with different stainless steel wire mesh was shown in Figure 9. It could be recognized that the SFRP composites were ductile materials due to high elongation. Using a larger stainless-steel wire mesh increased the elongation of the SFRP. Moreover, the overview of fracture specimens after the tensile test were shown in Figure 10. The stainless-steel wire was broken in the perpendicular direction to tensile loading. SEM micrographs as shown in Figure 11 reveal the ductile fracture of stainless-steel wire. Furthermore, the de-bonding of PET and stainless-steel wire after the tensile test was observed. Based on the above results, it could be inferred that new SFRP composites have good mechanical properties. Delamination of PET and stainless steel in the fracture samples occurred during tensile testing.

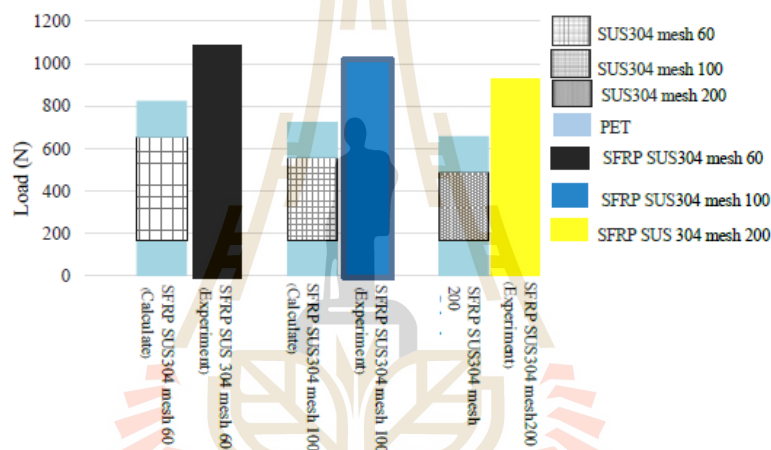


Figure 8. The Maximum tensile loading of SFRP in three different stainless-steel wire mesh sizes fiber in the PET matrix.

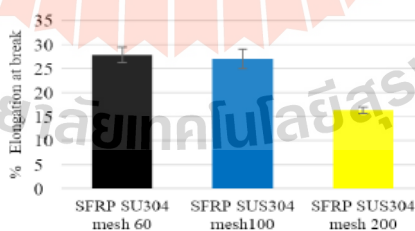
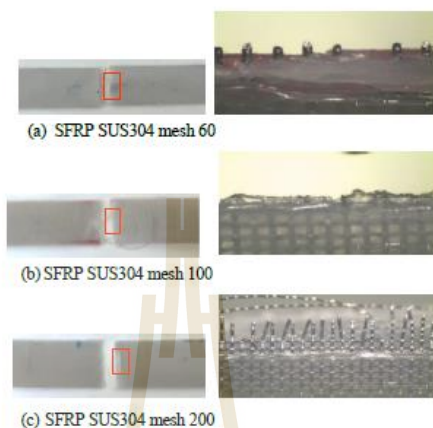
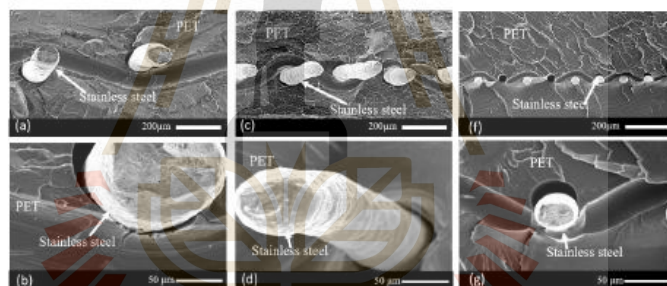


Figure 9. The % elongation at break of SFRP composites in three different stainless-steel wire mesh fiber size in the PET matrix



**Figure 10.** Fracture surface of the SFRP composites, three different stainless-steel wire mesh fiber size in the PET matrix.



**Figure 11.** Fracture surfaces of the SFRP composites, (a, d) SFRP SUS304 mesh 60, (b, e) SFRP SUS 304 mesh 100, (c, f) SFRP SUS 304 mesh 200 composites by SEM.

#### 4. Conclusion

According to the results, SFRP composites made by stainless steel wire mesh and PET were successfully produced by using a compressive molding process. Although some defects, such as porosities and no fill with PET, were found the mechanical properties of developed the SFRP composites were still better than that of raw materials. Moreover, good bonding between PET and stainless-steel wire mesh was achieved, after production. However, after the tensile test, de-bonding between the PET and the stainless-steel wire was still found. Ductile fracture of stainless-steel wire was also observed. The de-bonding between the PET and stainless steel after the tensile test will be possibly solved by refining the compressive molding process conditions in future work. Finally, it could be inferred that SFRP composites between PET and stainless steel are the potential candidate list as a new composite material used in lightweight structures.



#### Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the IMIARU Research Unit at the Suranaree University of Technology in support of the research work.

#### References

- [1] Holmes M 2017 *Reinf. Plast.* **61**(5) 294-298
- [2] Mosleh Y Clemens D Gorbatiikh L Verpoest I and Vuure A 2015 *J. Reinf. Plast. Compos.* **34**(8) 624-635
- [3] Callens M G Gorbatiikh L and Larissa G 2014 *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **61** 235-244
- [4] Yu Z and Zhou A 2013 *Mech. Adv. Mater. Struct.* **20**(5) 361-372
- [5] Katayama S and Kawahito Y 2008 *Ser. Mater.* **59** 1247-1250



## ประวัติผู้เขียน

นางสาวสรินทร์ คือขุนทด เกิดเมื่อวันที่ 16 ธันวาคม พุทธศักราช 2532 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านพะไล ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนบุญวัฒนา 2 อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมื่อปีพุทธศักราช 2555 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้ทำการวิจัยในหัวข้อวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตน บิริสุทธีกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษณีย์ กิตกำธร ในระหว่างการศึกษาต่อได้มีโอกาสช่วยงานภายในหน่วยงานวิจัยหน่วยวิจัยการประยุกต์ใช้โลหะวิทยาเพื่อการขึ้นรูปโลหะ และมีผลงานทางด้านวิชาการมีดังนี้

- 1) ได้เสนอบทคัดย่อเข้าร่วมการประชุมวิชาการทาง โลหวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11 (TMETC11) วันที่ 15-16 พฤศจิกายน 2561 ที่ โรงแรมเดอะ เซอร์เทจ พัทยา บีช รีสอร์ท จ.ชลบุรี เรื่อง วัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นเป็นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เสริมแรงด้วยตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2) ได้เสนอบทความเข้าร่วมการประชุมนานาชาติครั้งที่ 11 ด้านวิศวกรรมเครื่องกล (ICoME 2020) วันที่ 1-4 ธันวาคม 2020 ที่อุบลราชธานี, เรื่อง Steel fiber/polyethylene terephthalate composites