

การวิเคราะห์สมบัติการต้านแรงตัดของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต  
ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2567

FLEXURAL STRENGTH ANALYSIS OF ECO-FRIENDLY SANDWICH  
STRUCTURES USING FINITE ELEMENT METHOD



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2024

การวิเคราะห์สมบัติการต้านแรงดัดของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต  
ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐดนัย พรรณนุเจริญวงศ์)

ประธานกรรมการ

กัญญา กัญญา

(รองศาสตราจารย์ ดร.วีณา พันธุ์เพ็ง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รองศาสตราจารย์ ดร.ตติยา ตรงสถิตกุล)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.วัชรพงษ์ ปะตังทะโล)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กฤษฎณ คชราช : การวิเคราะห์สมบัติการต้านแรงดัดของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต  
ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FLEXURAL STRENGTH  
ANALYSIS OF ECO-FRIENDLY SANDWICH STRUCTURES USING FINITE ELEMENT  
METHOD)

อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร.วิณา พันเพ็ง, 137 หน้า.

คำสำคัญ : ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์/โครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต/แรงดัดงอ/เส้นใยพืช

การวิจัยและการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เพื่อให้เป็นหนึ่งในทางเลือกที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและยั่งยืนแทนที่การใช้งานวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยสังเคราะห์เพียงอย่างเดียว เส้นใยพืช (เช่น ใผ่ แพลกซ์ ปอ กัญชา) มีอยู่มากมาย ยั่งยืน หมุนเวียนได้ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม น้ำหนักเบา ราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ อีกทั้งความโดดเด่นของคุณสมบัติทางกลของเส้นใยธรรมชาติเองสามารถเทียบเคียงกับคุณสมบัติเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดได้ อีกทั้งมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ การใช้งานวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติจึงเป็นที่แพร่หลายอย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการบิน ยนต์ ตกแต่งเฟอร์นิเจอร์ อากาศยานไร้คนขับ (UAVs) ในบทความนี้จะศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของโครงสร้างแบบแซนวิชที่มีแผ่นผิวหน้า (Face Sheet) เสริมแรงด้วยเส้นใยแพลกซ์ (Flax fiber : FF) และแกนกลางเสริมด้วย Lantor Soric XF ซึ่งคอมโพสิตจะถูกผลิตด้วยกระบวนการแว็คคัม อินฟิวชัน (Vacuum infusion Process) ร่วมกับไบโอ-อีพอกซี เรซิน (Bio-Epoxy resin) ในการทดสอบคุณสมบัติทางกล จะทดสอบผ่านมาตรฐานการทดสอบวัสดุการต้านทานการดัดงอภายใต้มาตรฐานการทดสอบ ASTM C393-00 เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) ด้วยโปรแกรม ANSYS workbench® รวมถึงการตรวจสอบปัจจัยพื้นฐานอื่นที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติทางกลของโครงสร้างคอมโพสิตแบบแซนวิชนี้ด้วย

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา กฤษฎณ คชราช

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา วิณา พันเพ็ง

KITSANA KHODCHARAD : FLEXURAL STRENGTH ANALYSIS OF ECO-FRIENDLY SANDWICH STRUCTURES USING FINITE ELEMENT METHOD.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. DR.VEENA PHUNPENG, 137 PP.

Keyword: Finite Element Method /Sandwich Composite Structure/Flexural/Plant Based Fiber

Research and development of natural fiber-reinforced composite materials have continuously increased over the past decade, aiming to offer an environmentally friendly and sustainable alternative to the exclusive use of synthetic fiber-reinforced composites. Plant-based fibers (such as bamboo, flax, jute, and hemp) are abundant, renewable, biodegradable, and environmentally benign. They are also lightweight and more cost-effective than synthetic fibers. Moreover, the outstanding mechanical properties of natural fibers can be comparable to those of certain synthetic fibers. Owing to their biodegradability and advantageous properties, natural fiber-reinforced composites have gained widespread application in various industries, including the automotive sector, furniture manufacturing, and unmanned aerial vehicles (UAVs). This study investigates and analyzes the mechanical properties of a sandwich composite structure consisting of flax fiber (FF)-reinforced face sheets and Lantor Soric XF core. The composite is fabricated using the vacuum infusion process in conjunction with a bio-epoxy resin system. Mechanical testing is performed according to ASTM C393-00 standardized flexural strength test procedures to evaluate the material properties. These experimental results are compared with numerical simulations conducted using the Finite Element Method (FEM) via ANSYS Workbench. Additionally, fundamental factors that significantly influence the mechanical performance of the sandwich composite structure are examined

School of Mechanical Engineering  
Academic year 2024

Student's Signature Kitsana Khodcharad

Advisor's Signature Veena Phunpeng

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จด้วยดีอันเนื่องมาจากการสนับสนุนและให้ความช่วยเหลือ ข้าพเจ้า ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วีณา พันเพ็ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำปรึกษา และข้อเสนอแนะที่มีคุณค่าอย่างยิ่งตลอดระยะเวลาของการดำเนินงานในวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงโอกาสทางการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ตลอดจนความช่วยเหลือในการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะผู้ทรงคุณวุฒิในคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐดนัย พรรณเจริญวงษ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ตติยา ทรงสถิตกุล และอาจารย์ ดร.วัชรพงษ์ ปะตังทะโล ซึ่งได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะ ความคิดเห็นเชิงลึกและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อคุณภาพของวิทยานิพนธ์ รวมถึงการตรวจทานและเสนอคำแนะนำในการแก้ไขเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้อง คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำรวมถึงสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ แม้ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ก็ตาม

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดู อบรม ให้คำแนะนำ และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาตลอด และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

กฤษณ คชราช

18 มิถุนายน 2568

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	5
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
<b>2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>7</b>
2.1 วัสดุคอมโพสิต .....	7
2.2 การผลิตวัสดุคอมโพสิต .....	14
2.3 โครงสร้างวัสดุคอมโพสิตแบบแกนวิช.....	16
2.4 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ.....	18
2.5 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	20
<b>3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>24</b>
3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	24
3.2 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย.....	26

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>4</b>	<b>วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ.....</b>	<b>27</b>
4.1	ความสำคัญของความต้องการวัสดุจากธรรมชาติ.....	27
4.2	ผลเสียจากคอมโพสิตสังเคราะห์ สารพิษ / การปล่อยคาร์บอน .....	29
4.3	วัสดุทางเลือกที่ยั่งยืน ทั้งเมทริกซ์ เส้นใยเสริมแรงและแกนกลาง .....	31
4.4	การขึ้นรูปและการทดสอบวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแฟลกซ์ .....	35
<b>5</b>	<b>การพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเส้นใยแฟลกซ์ .....</b>	<b>41</b>
5.1	การเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตผ่านกระบวนการขึ้นรูป.....	41
5.2	การปรับปรุงด้วยการบ่มตัวของเรซิน.....	43
5.3	การใช้สารเติมแต่ง .....	47
5.4	การใช้แกนเสริมความหนาสำหรับโครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิต .....	52
<b>6</b>	<b>ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิต.....</b>	<b>58</b>
6.1	โครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิตกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพ .....	59
6.2	การสร้างแบบจำลองของโครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิต .....	60
6.3	การกำหนดคุณลักษณะในโครงสร้างคอมโพสิต .....	64
6.4	การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ของโครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิต.....	68
<b>7</b>	<b>การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิต .....</b>	<b>71</b>
7.1	การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลจากการทดลองและไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	71
7.2	การเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึงของโครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิต .....	72
7.3	การเปรียบเทียบความแข็งแรงของโครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิต .....	75
<b>8</b>	<b>การออกแบบสำหรับโครงสร้างของอากาศยานไร้คนขับ.....</b>	<b>77</b>
8.1	การจำลองการวิเคราะห์โครงสร้างปีกของอากาศยานไร้คนขับ .....	77
8.2	การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างปีก .....	80
<b>9</b>	<b>สรุปและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>84</b>
9.1	สรุปผลการวิจัย.....	84

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
9.2 ข้อเสนอแนะ .....	85
รายการอ้างอิง .....	86
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกระบวนการผลิตคอมโพสิต .....	92
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการผลิตคอมโพสิต .....	100
ภาคผนวก ค บทความวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ระหว่างการศึกษา .....	105
ประวัติผู้เขียน .....	137

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 มาตรฐานและขอบเขตการทดสอบวัสดุ.....	38
5.1 รายละเอียดชิ้นงานทดสอบ.....	45
5.2 ขนาดชิ้นงานทดสอบ.....	50
5.3 ระบุขนาดชิ้นงานทดสอบ.....	55
6.1 คุณสมบัติเส้นใยเมทริกซ์และแกน.....	61
7.1 ความคลาดเคลื่อนของการทดสอบจริงและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	74
8.1 วัสดุที่ใช้ศึกษาในโครงสร้างปีก.....	79

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต.....	3
2.1 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต.....	8
2.2 วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์.....	9
2.3 ลักษณะโครงสร้างการวางตัวของวัสดุเสริมแรงในเมทริกซ์ .....	11
2.4 เส้นใยเสริมแรง (a) เส้นใยคาร์บอน (b) เส้นใยแก้ว (c) เส้นใยอะรามิด (d) เส้นใยธรรมชาติ.....	13
2.5 การจัดเรียงตัวของเส้นใยแต่ละประเภท (a) เส้นใยสั้นแบบจัดเรียงแบบสุ่ม (b) เส้นใยสั้นจัดเรียงแบบทิศทางเดียวกัน (c) เส้นใยยาวแบบจัดเรียงในทิศทางเดียวกัน (d) เส้นใยยาวจัดเรียงแบบถัก .....	14
2.7 กระบวนการเว้าคัมแบ็กกิง .....	15
2.8 กระบวนการเว้าคัมอินฟิวชัน .....	15
2.9 การพันเส้นใย.....	16
2.10 วัสดุแกนโฟม PVC.....	17
2.11 วัสดุแกนแบบทรงรวงผึ้งจากอลูมิเนียม .....	17
2.12 วัสดุแกนแบบ LANTOR SORIC® XF .....	18
2.13 TENSILE TESTING .....	19
2.14 FLEXURAL TESTING (A) 3-POINT BENDING (B) 4-POINT BENDING.....	20
2.15 ตัวอย่างแบบจำลองด้วยโมดูล MD (a) unidirectional fiber (b) random fiber (c) woven (d) chopped fiber .....	21
2.16 ตัวอย่างแบบจำลองด้วยโมดูล ACP .....	22
2.17 ตัวอย่างแบบจำลองด้วยโมดูล STATIC STRUCTURAL.....	23
3.1 โมดูล MATERIAL DESIGNER .....	25
3.2 โมดูล ACP (PRE).....	25
3.3 โมดูล STATIC STRUCTURAL .....	26
3.4 มาตรฐานการทดสอบวัสดุ ASTM C393-00 .....	26

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 มูลค่าตลาดโดรนปี 2024 ถึง 2034.....	27
4.2 มูลค่าตลาดวัสดุคอมโพสิตปี 2023 ถึง 2033 .....	28
4.3 ตัวอย่างตัวชี้วัดของการวัดระดับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม .....	30
4.4 ตัวอย่างเส้นใยจากธรรมชาติ .....	31
4.5 ต้นแฟล็กซ์ .....	33
4.6 แกนแบบ LANTOR SORIC .....	34
4.7 กระบวนการเว้าคัมอินฟิวชัน .....	36
4.8 อัตราการให้ความร้อนที่ 5°C / min ของการบ่มเรซิน .....	37
4.9 ตัวอย่างขนาดชิ้นงานทดสอบ .....	37
4.10 การกระจายตัวของแรงดัดงอและการโก่งตัว .....	39
4.11 การกระจายตัวของความเค้นดัดงอและความเครียด .....	40
5.1 อัตราการให้ความร้อนที่ 1°C / min ของการบ่มเรซิน .....	44
5.2 ภาพเปรียบเทียบระหว่างการทำอัตราความร้อน 2 รูปแบบ .....	46
5.3 SEM แสดงการยึดเกาะกันของเมทริกซ์ (a) ภาพจากตัวอย่างของอัตราการให้ความร้อน 5 °c/min (b) ภาพจากตัวอย่างของอัตราการให้ความร้อน 1 °c/min .....	47
5.4 ผงถ่านจากน้ำมันเตา.....	48
5.5 กระบวนการเว้าคัมแบ็กกิง .....	49
5.6 การกระจายตัวของความต้านทานแรงดัดงอในปริมาณการเติม FCP .....	51
5.7 การกระจายตัวของความเค้นดัดงอในปริมาณการเติม FCP .....	51
5.8 LANTOR SORIC XF .....	53
5.9 การขึ้นรูปโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต .....	54
5.10 การกระจายตัวของโหนดดัดงอในโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต .....	56
6.1 การเปรียบเทียบโหนดดัดงอของเมทริกซ์ 2 ประเภท.....	59
6.2 รูปทรง RVE แบบ HEXAGONAL .....	60
6.3 โมดูล MATERIAL DESIGNER .....	61

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.4 ข้อมูลวัสดุใน ENGINEERING DATA.....	61
6.5 เริ่มต้นการออกแบบในโมดูล MD.....	62
6.6 การเลือก TYPE ของการเสริมแรงในคอมโพสิต .....	62
6.7 การกำหนดของเมทริกซ์และตัวเสริมแรง.....	62
6.8 รูปทรงของ RVE แบบ HEXAGONAL.....	63
6.9 การกำหนดสัดส่วนเส้นใยเสริมแรงต่อเมทริกซ์และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเสริมแรง	63
6.10 การกำหนดขนาดของ MESH.....	63
6.11 ผลลัพธ์จากการจำลองคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต .....	63
6.12 การเชื่อมต่อโมดูล MD ไปสู่โมดูล ACP.....	65
6.13 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการจำลอง.....	65
6.14 การเชื่อมต่อรูปทรงที่ออกแบบไว้เข้าสู่โมดูล ACP .....	65
6.15 MESH สำหรับโครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิต.....	65
6.16 กำหนดชนิดของวัสดุและขนาด.....	66
6.17 การวางชั้นของเส้นใยเสริมแรง และการกำหนดทิศทาง .....	66
6.18 การกำหนดจุดอ้างอิงของทิศทางเส้นใย .....	67
6.19 การกำหนดลำดับชั้นของโครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิต.....	67
6.20 การเชื่อมต่อข้อมูลจากโมดูล ACP เข้าสู่โมดูล STATIC STRUCTURAL.....	67
6.21 การกำหนดการสัมผัสกันของโครงสร้างและหัวกด .....	69
6.22 การกำหนดชนิดของการผิวสัมผัสแบบ FRICTIONAL .....	69
6.23 การกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของหัวกด.....	69
6.24 คำสั่งเริ่มการวิเคราะห์ .....	70
7.1 การเปรียบเทียบแรงดัดงอของการทดสอบจริงและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	73
7.2 การเปรียบเทียบความแข็งแรงของการทดสอบจริงและการจำลอง.....	75
8.1 ขนาดของ RIB รูปทรง AIRFOIL NACA 4412 .....	78
8.2 โครงสร้างปีก UAVS .....	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.3 WING STRUCTURE ANALYSIS .....	80
8.4 การกระจายตัวของความเค้นในโครงสร้างปีก.....	81



# บทที่ 1

## บทนำ

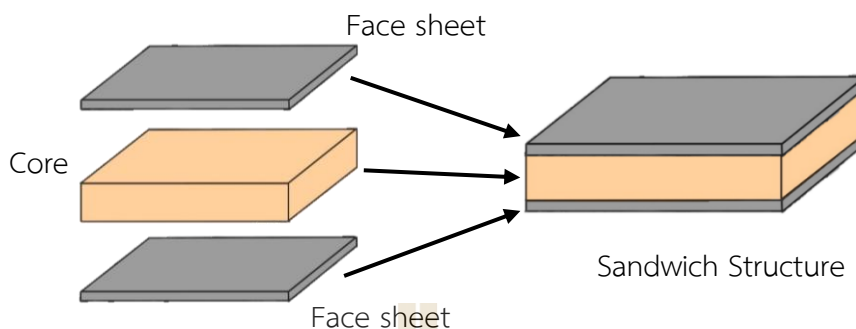
การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตดำเนินการมาอย่างยาวนาน โดยพบได้ตั้งแต่กลุ่มอุตสาหกรรมในด้านโครงสร้าง กิ่งโครงสร้าง การตกแต่งเฟอร์นิเจอร์ และอุปกรณ์กีฬา เป็นต้น วัสดุคอมโพสิตมักใช้เส้นใยสังเคราะห์ อย่าง เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว แต่จุดสนใจเกี่ยวกับความยั่งยืนและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมกลายเป็นประเด็นสำคัญที่มุ่งเน้นให้เกิดการวิจัยและพัฒนาเพิ่มมากขึ้น

### 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตในปัจจุบันมีความก้าวหน้าสูงมากเมื่อเทียบกับการใช้งานวัสดุประเภทนี้ในอดีต เหตุผลสำคัญของการนำวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอากาศยาน ยานยนต์ การกีฬาหรือแม้แต่งานตกแต่งเฟอร์นิเจอร์ เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมของตัววัสดุเอง เช่น ความแข็งแรงที่สูงเมื่อเทียบกับน้ำหนักของวัสดุที่เบา ความทนทานทั้งทางความร้อนและทางไฟฟ้า ทำให้วัสดุประเภทนี้กลายเป็นตัวเลือกลำดับต้นๆ ในอุตสาหกรรมที่กล่าวมา อากาศยานไร้คนขับมีชิ้นส่วนประกอบและโครงสร้างสำคัญที่ใช้วัสดุคอมโพสิตในการผลิตอยู่มากมาย โดยเฉพาะ ลำตัว ปีก ใบพัดและพื้นผิว อีกทั้งความต้องการใช้งานของอากาศยานไร้คนขับสำหรับการปฏิบัติในหน้าที่ต่างๆ เพิ่มสูงขึ้น ทำให้วัสดุคอมโพสิตที่ใช้เป็นส่วนประกอบและโครงสร้างเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตเสริมด้วยเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน ให้คุณสมบัติที่ดีเยี่ยมและตอบสนองความต้องการสำหรับการผลิตอากาศยานไร้คนขับได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตาม ต้นทุนในการผลิตคอมโพสิตด้วยเส้นใยสังเคราะห์เหล่านี้ค่อนข้างสูง อีกทั้งความต้องการที่จะผลักดันให้คอมโพสิตเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถรีไซเคิลได้อย่างยั่งยืน ตลอดจนความพยายามนำสิ่งที่ได้จากธรรมชาติมาใช้ในงานผลิตคอมโพสิตก็ตอบรับอย่างแพร่หลายและเป็นจุดสนใจใหม่ๆ ให้กับผู้พัฒนาคอมโพสิตได้เล็งเห็นความสำคัญนี้อีกด้วย การนำวัสดุคอมโพสิตไปใช้ในงานขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตวัสดุที่จะทำให้คุณสมบัติเชิงกลตอบรับกับภาระกระทำภายนอกได้มากน้อยเพียงใด ชนิดของเส้นใยและเมทริกซ์ รวมถึงการวางลำดับชั้นและทิศทางของเส้นใยล้วนทำให้วัสดุคอมโพสิตมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันและเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในประเภทต่างๆ ได้ (Rahmani et al., 2014)

วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติกำลังเป็นที่นิยมและดึงดูดความสนใจของนักวิจัยมากยิ่งขึ้น เพื่อนำมาใช้แทนเส้นใยที่มาจากสัตว์สังเคราะห์ เนื่องด้วยความง่ายต่อการย่อยสลาย ต้นทุนต่ำและน้ำหนักเบา อีกทั้งยังต้องการลดผลกระทบที่เป็นอันตรายของวัสดุชั้นสูงที่มีต่อสิ่งแวดล้อม การย่อยสลายวัสดุโดยสมบูรณ์เป็นสิ่งจำเป็นและค่อนข้างท้าทายในเวลาเดียวกัน (Khalid et al., 2021) การใช้เส้นใยพืชเป็นส่วนเสริมแรงกำลังมีเพิ่มมากขึ้นสำหรับการใช้งานในด้านโครงสร้าง แต่ยังคงเป็นที่จำกัดในการใช้งานขนาดใหญ่ เช่น โครงรถยนต์ โครงสร้างสะพาน หรือส่วนประกอบสำหรับรับน้ำหนักขนาดใหญ่อื่นๆ เป็นต้น เนื่องจากประสิทธิภาพที่อาจลดลงเมื่อใช้งานในระยะยาว หรือในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง นอกจากนี้ยังมีความเข้มงวดของกระบวนการผลิตที่จะต้องได้มาตรฐานการผลิตที่สม่ำเสมอและการควบคุมคุณภาพที่มีประสิทธิภาพ รวมถึงการเสื่อมสภาพจากสิ่งแวดล้อมของเส้นใยธรรมชาติเอง เช่น การดูดซึมความชื้นที่สูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ หรือการสัมผัสของน้ำ ที่อาจทำให้ความแข็งแรงทางกลลดลงได้ ซึ่งเป็นปัจจัยที่จำเป็นจะต้องพิจารณาให้เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน จึงทำให้ยังไม่สามารถทดแทนวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์ได้อย่างเต็มรูปแบบในการใช้งานโครงสร้างขนาดใหญ่ (Shahzad, 2012)

โครงสร้างวัสดุคอมโพสิตแบบแกนวิชเป็นการแทรกวัสดุแกนกลาง (Core) ที่มีน้ำหนักเบา (เช่น โฟมพีวีซี แกนไม้บัลซ่า แกนอลูมิเนียม) ระหว่างแผ่นผิวของคอมโพสิตสองแผ่น (Face sheets) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เพื่อช่วยเสริมความหนาของวัสดุคอมโพสิต ทำให้โครงสร้างโดยรวมมีคุณสมบัติที่ดีและเสริมการรับแรงจากภาวะกระทำภายนอกได้ดียิ่งขึ้น โครงสร้างประเภทนี้นิยมนำไปใช้สำหรับชิ้นส่วนของเครื่องบิน (เช่น โครงสร้างปีก พื้นห้องโดยสาร ประตูห้องน้ำ ช่องเก็บสัมภาระ) เนื่องด้วยโครงสร้างวัสดุประเภทนี้มีความแข็งแรงมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักของโครงสร้างวัสดุเอง ทำให้สามารถรับแรงได้ดีโดยไม่ทำให้น้ำหนักรวมของโครงสร้างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังเป็นฉนวนทางความร้อน ทางไฟฟ้า และเสียงได้เป็นอย่างดี รวมถึงอุตสาหกรรมอื่นอย่าง อุตสาหกรรมยานยนต์ที่โครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิตถูกนำไปใช้เป็นส่วนชิ้นอย่าง ฝากระโปรงหน้า พื้นรถ ประตู กันชน เป็นต้น ด้วยจุดมุ่งหมายที่ต้องการลดน้ำหนักของรถลง แต่ยังคงความแข็งแรงของโครงสร้างเอาไว้ หรืออุตสาหกรรมตกแต่งและเฟอร์นิเจอร์ ที่มีการนำโครงสร้างเหล่านี้ไปใช้งาน เช่น ชั้นวางของ โต๊ะ แผงผนังตกแต่ง เป็นต้น ตัวอย่างการนำไปใช้งานเหล่านี้ทำให้โครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิตเป็นองค์ประกอบสำคัญในงานวิศวกรรมในปัจจุบัน



รูปที่ 1.1 โครงสร้างแบบแซนด์วิชคอมโพสิต

กระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิตมีอยู่หลากหลายวิธีการ โดยการผลิตอย่างง่ายที่สุดคือการขึ้นรูปด้วยมือ (Hand Lay-up) ซึ่งไม่สิ้นเปลืองในแง่ของต้นทุนและเวลา เหมาะสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานอย่างง่าย แต่สำหรับวัสดุคอมโพสิตที่ต้องการประสิทธิภาพที่สูงขึ้น จำเป็นต้องใช้กระบวนการอื่นเพิ่มเติมสำหรับการผลิตเพื่อให้สามารถควบคุมปริมาณสัดส่วนของเส้นใยต่อปริมาณของเมทริกซ์ที่เฉพาะมากยิ่งขึ้น กระบวนการเว็คคัม อินฟิวชันด้วยสุญญากาศถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สัดส่วนของเมทริกซ์และเส้นใยทำได้ดีขึ้น อีกทั้งยังสามารถทำให้เรซินกระจายตัวได้ดีขึ้นและทำให้เส้นใยมีการอัดเรียงรวมกลุ่มกันได้ดีมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการใช้งานความดันบรรยากาศกักไว้อยู่ตลอดเวลาในระหว่างการผลิตหรือการทำให้ระบบข้างในเป็นสุญญากาศ โดยวิธีการผลิตวัสดุประเภทนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและต้องการความสม่ำเสมอของสัดส่วนเรซินและเส้นใยเสริมแรง (Moudood et al., 2019)

การประเมินคุณสมบัติเชิงกลผ่านการทดสอบวัสดุทางกายภาพโดยตรงนั้นทำให้เกิดการสิ้นเปลืองวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ รวมถึงต้นทุนในการพัฒนาที่สูงเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำเป็นต้องผลิตซ้ำเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ นอกจากนี้การควบคุมสภาพแวดล้อมในระหว่างการทดสอบ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน ล้วนแล้วแต่ส่งผลที่อาจจะทำให้การประเมินคุณสมบัติมีความคลาดเคลื่อนและส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของผลการประเมินได้ ด้วยปัจจัยเหล่านี้ทำให้ในปัจจุบันการวิเคราะห์และประเมินคุณสมบัติเชิงกลผ่านการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์นั้น (Computer Aided Engineering : CAE) ช่วยอำนวยความสะดวกได้เป็นอย่างดี ทำให้รวดเร็ว แม่นยำและประหยัดต้นทุนได้มากกว่า โปรแกรม ANSYS Workbench® มีโมดูลอย่าง ANSYS Material Design ที่สามารถนำมาใช้ออกแบบวัสดุที่มีลักษณะคุณสมบัติที่เฉพาะ เช่น วัสดุคอมโพสิต และสามารถนำไปประเมินคุณสมบัติเชิงกลเพื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองและการทดสอบจริงได้ โดยพบว่าประสิทธิภาพของเครื่องมือนี้มีค่าทางการคำนวณใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริงมากที่สุด

(Rayhan & Rahman, 2020) Abid Hossen Bhuiyan รายงานผลการวิเคราะห์คุณสมบัติการต้านทานแรงดึงและแรงดัดงอในวัสดุคอมโพสิตที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) โดยกำหนดขอบเขตของการทดสอบให้เหมือนกันกับการทดลองจริงผ่านเครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) เช่น ขนาด ความหนาแน่น โมดูลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง รูปแบบของการยึดตรึงชิ้นส่วนทดสอบ ซึ่งพบว่าการทำนายผลมีประสิทธิภาพสูงและมีความแม่นยำสูง (Bhuiyan et al., 2023) ANSYS Material Designer เป็นหนึ่งในโมดูลที่สามารถประเมินคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตได้อย่างมีประสิทธิภาพและครอบคลุม โดยสามารถทำนายความแข็งแรงของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยทิศทางเดียว (Unidirectional Reinforced Composites) และกำหนดคุณสมบัติความเป็นเนื้อผสมของคอมโพสิตได้ (Phunpeng, Boransan, et al., 2023) Saiaf Rayhan รายงานว่าการใช้ ANSYS Material Designer มีประสิทธิภาพในการคำนวณความแข็งแรงของคอมโพสิตที่เป็นทิศทางเดียวภายในระยะเวลาอันสั้น โดยผลลัพธ์ของการประมาณค่าคุณสมบัติเชิงกลที่แม่นยำสูงสุดอยู่ในแบบจำลองของ Bridging และค่าโมดูลัสแรงเฉือนในระนาบจะเริ่มคลาดเคลื่อนจากการทดลองเมื่ออัตราส่วนปริมาตรเส้นใยต่อเมทริกซ์ของคอมโพสิตมากกว่า 0.6 (Rayhan & Rahman, 2020)

เส้นใยแฟลกซ์หรือเส้นใยแฟลกซ์ (Flax Fiber) เป็นเส้นใยที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตของยุโรป เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ ยานยนต์และคอมโพสิต และมีการผลิตเพิ่มอย่างต่อเนื่องมากกว่า 120% ตั้งแต่ปี 2014 ถึงปัจจุบัน (Hemp., 2024) รวมถึงการรายงานของบริษัท ARRIS® ที่ได้นำเส้นใยแฟลกซ์มาใช้ในการผลิตงานโครงสร้าง โดยรายงานที่คอมโพสิตที่ได้จากเส้นใยแฟลกซ์มีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่า 5% ในกระบวนการผลิต เมื่อเทียบกับเส้นใยคาร์บอน (ARRIS, 2023) สำหรับการใช้งานในโครงสร้างด้วยคอมโพสิตชีวภาพ เส้นใยแฟลกซ์เป็นหนึ่งในสาม (เส้นใยแฟลกซ์ เส้นใยกัญชงและเส้นใยปอ) ของเส้นใยจากธรรมชาติที่มีศักยภาพสูงที่สุดที่สามารถใช้ทดแทนเส้นใยสังเคราะห์อย่างเส้นใยแก้วในคอมโพสิตได้ โดยเส้นใยแฟลกซ์มีประสิทธิภาพสูงสุดในแง่ของต้นทุนต่อหน่วยน้ำหนักที่สูงสุด (Yan et al., 2014) การผลิตคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยแฟลกซ์ในการเสริมแรง Sarkar Forkan แนะนำให้ใช้เมทริกซ์ที่เป็น ไบโอบีพอกซี เรซิน แทนที่การใช้เรซินแบบทั่วไปในกระบวนการผลิตด้วย เพราะทำให้เส้นใยเกาะตัวกับเมทริกซ์ได้ดีและเมทริกซ์ไม่หลุดออกขณะนำชิ้นงานไปทดสอบ อีกทั้งความเข้ากันได้ดีของ ไบโอบีพอกซี เรซิน และเส้นใยแฟลกซ์ช่วยลดการหลุดร่อนระหว่างเส้นใยเสริมแรงและเมทริกซ์ได้ (Sarkar et al., 2020a)

จากเหตุผลที่กล่าวมา ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาคุณสมบัติเชิงกลที่เกิดขึ้นในโครงสร้างวัสดุแบบแกนวิชที่แผ่นผิวหน้าเสริมแรงด้วยเส้นใยแฟลกซ์ (Flax Fiber) และแกนรีไซเคิล Lantor Soric XF โดยจะถูกใช้เป็นแกนกลางของโครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิต ใช้งานร่วมกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพ หรือ ไบโอ อีพอกซี เรซิน โดยตัวอย่างการทดสอบจะถูกผลิตด้วยกระบวนการแว็คคัม อินฟิวชันด้วยสูญญากาศหรือวิธีแว็คคัมอินฟิวชันเรซิน (Vacuum Infusion Resin) โดยการจัดเรียงทิศทางวางเส้นใยจะแตกต่างกันออกไปเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการรับแรงเมื่อจัดวางเส้นใยในทิศทางต่างๆ ตัวอย่างของโครงสร้างคอมโพสิตในการศึกษานี้จะถูกประเมินคุณสมบัติทางกลผ่านการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ANSYS Workbench® และตรวจสอบความแม่นยำของการวิเคราะห์ผลกับการทดสอบตามมาตรฐานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อจำลองการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตแบบแกนวิชที่แผ่นผิวหน้าเสริมแรงด้วยเส้นใยแฟลกซ์ (Flax Fiber) และแกน Lantor Soric XF ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม ANSYS Workbench®
- 2) เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตแบบแกนวิชที่แผ่นผิวหน้าเสริมแรงด้วยเส้นใยแฟลกซ์ (Flax Fiber) และแกน Lantor Soric XF
- 3) เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตแบบแกนวิชจากการประเมินผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดลอง
- 4) เพื่อออกแบบโครงสร้างวัสดุแบบแกนวิชคอมโพสิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับงานโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับ

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1) เส้นใยแฟลกซ์แบบทิศทางเดียว (Unidirectional) มีน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ 200 g/m<sup>2</sup>
- 2) เมทริกซ์แบบไบโอ อีพอกซี เรซิน SR GreenPoxy 33 (SR33) และสารทำแข็ง SD 4993 Hardener
- 3) แผ่นเสริมแรงที่ใช้เป็นแกนกลางของโครงสร้างแกนวิชคอมโพสิตคือ Lantor Soric XF
- 4) กำหนดทิศทางเส้นใยและจำนวนชั้นการจัดวางสำหรับแผ่นผิวหน้า คือ [0°]<sub>3</sub>
- 5) วัสดุคอมโพสิตจะถูกผลิตด้วยกระบวนการแว็คคัม อินฟิวชัน (Vacuum Infusion Resin)
- 6) แผ่นผิวหน้าและแกนกลางสำหรับโครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิตจะถูกยึดด้วยกระบวนการแว็คคัม อินฟิวชัน (Vacuum Infusion Resin)

7) การทดสอบคุณสมบัติแรงดัดงอของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต จะทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุ ASTM C393-00

8) การจำลองการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้วยระเบียบวิธีไฟต์ไนต์เอลิเมนต์จะใช้งานด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench®

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) สามารถประเมินคุณสมบัติเชิงกลในโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตที่แผ่นผิวหน้าเสริมแรงด้วยเส้นใยแฟลกซ์ (Flax Fiber) และแกน Lantor Soric XF ผ่านการใช้งานคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์งานทางวิศวกรรม (CAE) เพื่อลดระยะเวลาในการทดสอบและต้นทุนการทดสอบ

2) เพื่อพัฒนาโครงสร้างแซนวิชคอมโพสิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับใช้กับอากาศยานไร้คนขับ (UAV)

3) เพื่อเป็นองค์ความรู้ในการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์งานด้านวิศวกรรมในการสร้างและพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบคอมโพสิตโครงสร้างแบบแซนวิช

4) เพื่อเป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตอื่นๆ โดยใช้วัสดุที่ได้จากธรรมชาติ

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุคอมโพสิตเป็นที่นิยมในหลายอุตสาหกรรมที่ต้องการนำวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและให้คุณสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยม โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมอากาศยานและยานยนต์เนื่องจากช่วยลดน้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างแต่ยังคงสามารถมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานอยู่ แต่อย่างไรก็ตามการได้มาซึ่งวัสดุคอมโพสิตนั้นต้องผ่านกระบวนการผลิตที่เหมาะสมในแต่ละลักษณะการใช้งาน รวมถึงพิจารณาปัจจัยทางสภาพแวดล้อมของการนำไปใช้งานอีกด้วย ในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคอมโพสิต

#### 2.1 วัสดุคอมโพสิต

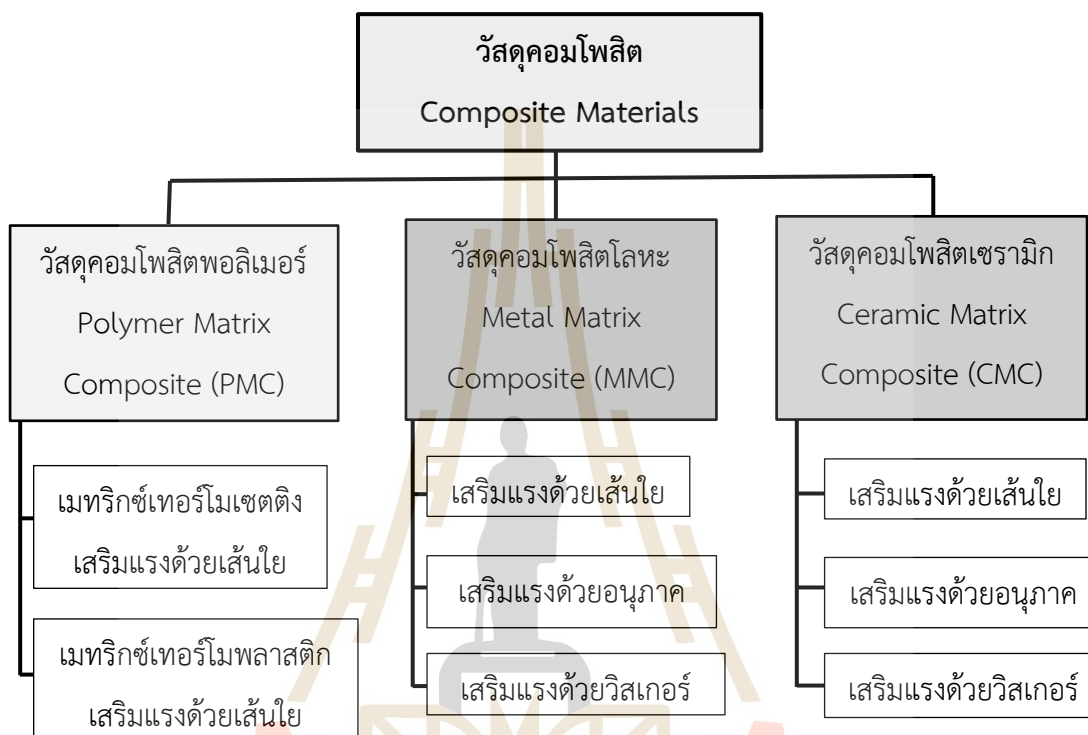
วัสดุคอมโพสิต หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันทั้งทางกายภาพและทางเคมี ทำให้คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบเพื่อใช้ประโยชน์เฉพาะงาน โดยไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ การผสมกันของวัสดุเหล่านี้จะไม่เป็นเนื้อเดียวกันแต่จะแยกกันเป็นเฟส (Phase) ที่เห็นได้อย่างชัดเจน องค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิตได้แก่ วัสดุที่เป็นเนื้อหลักและเป็นเนื้อต่อเนื้อ เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุส่วนเสริมที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักนั้น เรียกว่า ตัวเสริมแรง (Reinforcement) โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มตัวเสริมแรงและทำให้วัสดุคอมโพสิตเป็นรูปร่างขึ้น ส่วนตัวเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเชิงกล เช่น การรับแรงกระทำจากภายนอก ซึ่งถือว่าเป็นส่วนที่จะกำหนดคุณสมบัติหลักของวัสดุคอมโพสิต ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีคุณสมบัติตามต้องการ

##### 2.1.1 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ เมทริกซ์และตัวเสริมแรง ดังนั้นการจำแนกวัสดุคอมโพสิตตามชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์จะสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

- 1) วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC)
- 2) วัสดุคอมโพสิตโลหะ (Metal matrix composite, MMC)
- 3) วัสดุคอมโพสิตเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC)

และยังสามารถจำแนกย่อย ต่อไปได้อีกตามลักษณะของตัวเสริมแรง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งตัวเสริมแรงอาจมีลักษณะแตกต่างกัน ได้แก่ อนุภาค (Particle) เส้นใย (Fiber) และเส้นใยสั้นหรือวิสเกอร์ (Whisker) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3

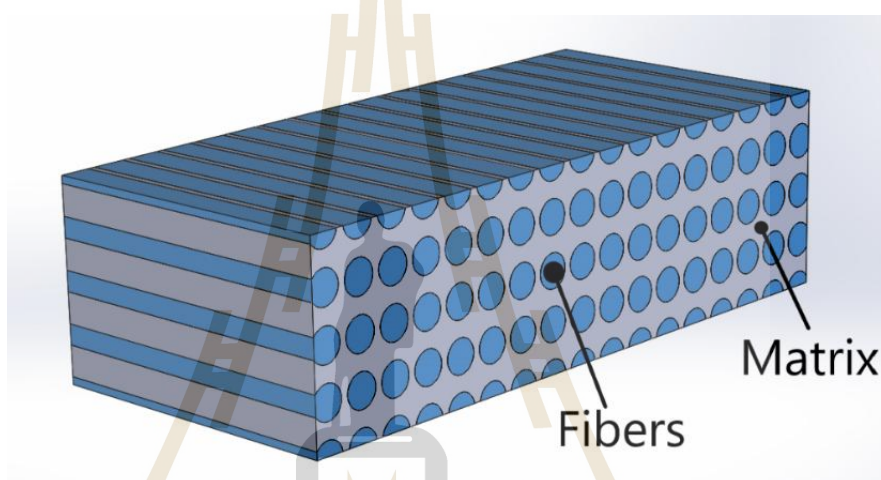


รูปที่ 2.1 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต

### 2.1.2 วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์

โดยธรรมชาติพอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่สูงนัก มีความหนาแน่นต่ำ และมีความทนทานต่อการกัดกร่อน การเสริมแรงให้พอลิเมอร์ทำได้โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีความแข็งแรงมากขึ้น ดังรูปที่ 2.2 โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงสำหรับวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์มักเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง เพื่อทำหน้าที่ในการรับแรงและกระจายแรงกระทำภายนอก โดยวัสดุคอมโพสิตจะมีความแข็งแรงสูงที่สุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง (Malalli & Ramji, 2022) การเสริมแรงนี้ทำให้เมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนรูปร่างคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตจะเป็นคุณสมบัติร่วมที่เกิดจากคุณสมบัติของเมทริกซ์พอลิเมอร์และคุณสมบัติของเส้นใยเสริมแรงประกอบกัน ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงทำหน้าที่รับแรงกระทำ แต่สำหรับระยะยืด

สูงสุดนั้น วัสดุคอมโพสิตจะมีความสามารถในการยืดสูงสุดได้ไม่เกินระยะยืดสูงสุดของเส้นใยเสริมแรง สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์ควรมีความเหนียวทนทานมากพอที่จะห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงไว้ ตัวเสริมแรงในรูปของอนุภาคมีส่วนเสริมความแข็งแรงได้ไม่ดีเท่ากับสารเสริมแรงในรูปของเส้นใย เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของตัวเสริมแรงส่งผลต่อการกระจายแรง จึงนิยมเรียกตัวเสริมแรงในรูปอนุภาคว่า สารเติมแต่ง (Filler) วัสดุคอมโพสิตจะมีความแข็งแรงมากขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยทำให้ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 2.2 วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ (Muhammad et al., 2022)

### 2.1.3 เมทริกซ์พอลิเมอร์

สารเนื้อหลัก หรือเมทริกซ์ (Matrix) เป็นวัสดุที่เป็นสารเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีความต่อเนื่องกันอย่างสมบูรณ์ บทบาทหลักของเมทริกซ์คือการเป็นพื้นที่รองรับและจับยึดวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกัน อีกทั้งยังช่วยรักษาขนาดรูปร่าง และคงสภาพของวัสดุคอมโพสิตไว้ โดยทั่วไปเมทริกซ์จะมีความเหนียวและความแข็งแรงเฉพาะตัวของเมทริกซ์แต่ละชนิด ถึงแม้ว่าความแข็งแรงหลักของวัสดุคอมโพสิตจะได้มาจากตัวเสริมแรง แต่เมทริกซ์ก็มีส่วนสำคัญต่อคุณสมบัติเชิงกลโดยรวมเช่นกัน เมทริกซ์ไม่ได้ถูกออกแบบมาใช้สำหรับรับน้ำหนักได้มาก แต่จะช่วยมัดรวมกลุ่มเส้นใยและกระจายแรงไปหาเส้นใย นอกจากนี้ยังป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเส้นใยบริเวณพื้นผิวของวัสดุและช่วยป้องกันการแพร่กระจายของรอยแตกร้าวจากเส้นใยหนึ่งไปยังอีกเส้นใยหนึ่งด้วย ในปัจจุบันเมทริกซ์พอลิเมอร์เป็นที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิต โดยเมทริกซ์

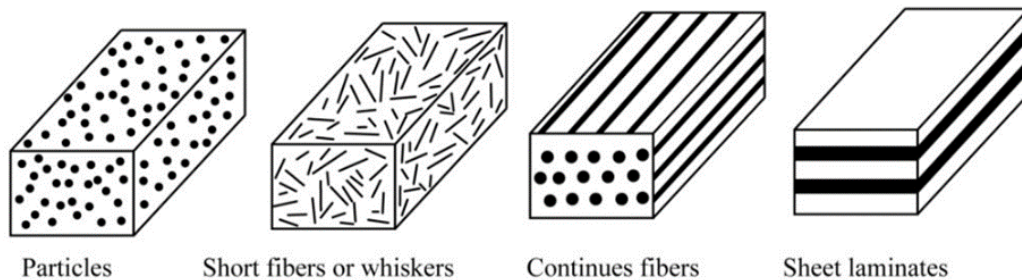
พอลิเมอร์สามารถจำแนกได้ออกอีกเป็น 2 ประเภท คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และ เทอร์โมเซต (Thermoset)

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เป็นประเภทเมทริกซ์ที่มีความยืดหยุ่นสูง เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดความยืดหยุ่นและเปลี่ยนรูปร่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตให้เกิดเป็นรูปร่างแบบต่างๆ ขึ้นได้และเมื่ออุณหภูมิของเมทริกซ์ประเภทนี้ลดลงก็จะแข็งตัวและรักษารูปร่างนั้นไว้ได้ อีกทั้งโครงสร้างในระดับโมเลกุลของเมทริกซ์ประเภทนี้มีความแข็งแรงสูง มีการเชื่อมต่อระหว่างสายโมเลกุลที่น้อย จึงทำให้สามารถนำกลับมาเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ได้ ตัวอย่างของเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้ ได้แก่ พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เป็นต้น

เทอร์โมเซต (Thermoset) เป็นประเภทเมทริกซ์ที่มีความแข็งแรงสูง เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดความยืดหยุ่นและเปลี่ยนรูปร่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้ แต่เมทริกซ์ประเภทนี้เมื่อเย็นตัวลงจะคงรูปร่างและรักษาสภาพนั้นไว้ตลอด ไม่สามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ได้ เนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างสายโมเลกุลมีเป็นจำนวนมากและมีความแข็งแรงสูง เทอร์โมเซตเมทริกซ์เหมาะสำหรับการใช้งานในลักษณะที่สภาพแวดล้อมต้องการความคงทนต่อการเปลี่ยนของอุณหภูมิที่สูง ตัวอย่างของเมทริกซ์เทอร์โมเซตที่นิยมใช้ ได้แก่ อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) พอลิยูรีเทน (Polyurethane) เป็นต้น

#### 2.1.4 ตัวเสริมแรง

ตัวเสริมแรง (Reinforcement) เป็นวัสดุที่ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มสูงมากขึ้น บทบาทสำคัญของตัวเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตคือการรองรับแรงกระทำภายนอกที่ถูกส่งผ่านมาจากเมทริกซ์ โดยทั่วไปวัสดุเสริมแรงจะมีความแข็งแรงสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับเมทริกซ์แรงกระทำภายนอกจึงจะถูกส่งผ่านเมทริกซ์เข้าสู่ตัวเสริมแรงได้โดยไม่เกิดความเสียหายกับวัสดุ ปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของวัสดุคอมโพสิตจึงถูกกำหนดด้วยประเภทของตัวเสริมแรง ชนิดวัสดุของตัวเสริมแรง และรวมถึงทิศทางของตัวเสริมแรงด้วย ลักษณะโครงสร้างการวางตัวของตัวเสริมแรงสามารถจำแนกได้ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างการวางตัวของวัสดุเสริมแรงในเมทริกซ์ (Bartleby, 2024)

อนุภาค (Particle) มีลักษณะเป็นเม็ดผงขนาดเล็ก มีหลายขนาดขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุที่ใช้และวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น ไมโครพาร์ติเคิล (Micro-particles) ที่มีขนาดประมาณ 1 – 100 ไมครอน ซึ่งสามารถใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและเติมเต็มส่วนที่เป็นช่องว่างระหว่างวัสดุคอมโพสิตได้ เช่น อนุภาคซิลิกา อนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์ เป็นต้น

เส้นใยสั้น (Whiskers) เป็นเส้นใยที่มีลักษณะคล้ายเส้นใยสั้นๆ นิยมใช้สำหรับการปรับปรุงลักษณะของการรับแรงเฉพาะจุด รอยแตกร้าวและการสึกหรอ ตัวอย่างวัสดุที่นำมาทำเส้นใยแบบสั้นได้แก่ อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) คาร์บอนซิลิคอน (SiC) เป็นต้น

เส้นใยต่อเนื่อง (Fibers) เป็นหนึ่งในตัวเสริมแรงที่เป็นที่นิยมในการผลิตวัสดุคอมโพสิตและใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งเส้นใยได้มาจากการสังเคราะห์ (เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว) และเส้นใยจากธรรมชาติ (เช่น เส้นใยแฟลกซ์ เส้นใยปอ)

แผ่นเสริมแรง (Sheet Laminate) มีลักษณะเป็นแผ่นบางหรือชั้นบาง อาจได้มาจากเส้นใยหรือผ้า เพื่อช่วยให้การกระจายแรงกระทำภายนอกได้อย่างสม่ำเสมอทั่ววัสดุ และควบคุมการแพร่กระจายของรอยแตกได้เป็นอย่างดี

### 2.1.5 การเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต

การเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตนิยมใช้เส้นใยต่อเนื่อง (Continuous Fibers) ดังรูปที่ 2.4 โดยเส้นใยมักจะมีค่าความต้านทานแรงในแนวเส้นใยที่สูง การยึดตัวต่ำ ทำให้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นสูงขึ้นไปด้วย เมื่อรวมเข้ากับเมทริกซ์ประเภทเทอร์โมเซต เช่น อีพอกซีเรซิน จะทำให้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีอย่างมาก เส้นใยแบบต่อเนื่องสามารถเป็นได้ทั้งเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยจากธรรมชาติ ดังนี้

เส้นใยแก้ว (Glass Fibers) มีองค์ประกอบของอลูมินา-ไลม์-โบโรซิลิเกต (Alumina-Lime-Borosilicate) ถือเป็นหนึ่งในตัวเสริมแรงที่โดดเด่นสำหรับคอมโพสิตเมทริกซ์พอลิเมอร์

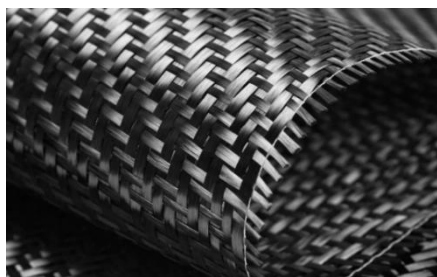
เนื่องจากคุณสมบัติทางกลที่โดดเด่น ความแข็งแรงสูง ทนต่อแรงกระแทก ทนความร้อนได้สูง เป็นฉนวนไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี แต่ยังมีน้ำหนักที่มากกว่าเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยอะรามิด

เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fibers) เป็นเส้นใยที่มีองค์ประกอบของ กราไฟท์ (Graphite) เส้นใยประเภทนี้มีความแข็งแรงสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นใยชนิดอื่นๆ แต่ก็มีน้ำหนักมากกว่าเส้นใยอื่น สามารถใช้งานสำหรับการทนความร้อนได้สูงมาก ทำให้ต้นทุนในการผลิตเส้นใยประเภทนี้มีมูลค่าสูงตามไปด้วย

เส้นใยอะรามิด (Aramid Fibers) มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี ความหนาแน่นต่ำกว่าเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว มีความยืดหยุ่นและเหนียวมากกว่า สามารถต้านทานความเสียหายจากแรงกระแทกได้เป็นอย่างดี และยังมีคุณสมบัติเด่นเป็นพิเศษต่อการทนต่อตัวทำละลาย เชื้อเพลิง สารหล่อลื่น ความร้อน ด้วยคุณสมบัติที่มีความเหนียวที่สูงกว่าเส้นใยประเภทอื่น จึงมักนำมาผลิตสายเคเบิลหรือเชือกประสิทธิภาพสูง ตัวอย่างเส้นใยประเภทนี้ เช่น เคฟลาร์ (Kevlar)

เส้นใยธรรมชาติ (Natural Fibers) เส้นใยธรรมชาติสามารถเป็นได้ทั้ง เส้นใยจากสัตว์ เช่น เส้นใยจากขนแกะ เป็นต้น และจากพืช เช่น เส้นใยแฟลกซ์ เส้นใยใฝ่ เส้นใยกัญชา เส้นใยสัปะรด เป็นต้น มีการนำเส้นใยจากธรรมชาติมาทดแทนเส้นใยสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากด้วยความง่ายต่อการย่อยสลาย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ต้นทุนต่ำและน้ำหนักเบา เส้นใยจากธรรมชาติบางชนิดมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยมและสามารถเทียบเคียงกับเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดได้อีกด้วย

นอกจากชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นเส้นใยจะมีส่วนสำคัญในการออกแบบและผลิตวัสดุคอมโพสิตให้สามารถนำมารองรับการใช้งานได้ตามต้องการแล้ว สิ่งที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้เส้นใยเหล่านี้ ยังรวมถึงทิศทางของเส้นใยอีกด้วย



(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 2.4 เส้นใยเสริมแรง (a) เส้นใยคาร์บอน (b) เส้นใยแก้ว (c) เส้นใยอะรามิด (d) เส้นใยธรรมชาติ (Pur Carbon, 2025, Mitch J., 2018, CA Composite, 2025, ual, 2025)

### 2.1.6 ทิศทางของเส้นใย

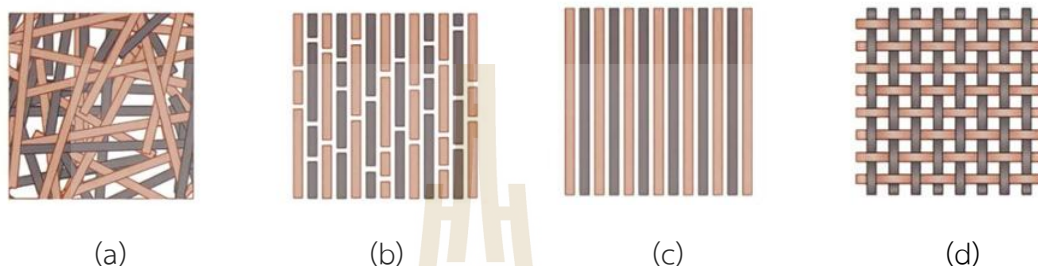
รูปแบบการวางตัวของเส้นใยและทิศทางของเส้นใยเป็นหนึ่งในความสำคัญและมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต ดังรูปที่ 2.5 เนื่องจากทิศทางของเส้นใยมีผลโดยตรงต่อทิศทางของการรับแรงกระทำภายนอกของวัสดุคอมโพสิต ตัวอย่างการวางทิศทางของเส้นใยสามารถแสดงได้ดังนี้

เส้นใยแบบทิศทางเดียว (Unidirectional) เป็นเส้นใยตรงไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมด เป็นได้ทั้ง เส้นใยยาวต่อเนื่องและเส้นใยสั้น ซึ่งทำให้วัสดุคอมโพสิตรับแรงกระทำภายนอกได้ในแนวทิศทางของเส้นใยได้โดยตรง แต่หากมีการรับแรงในทิศทางนอกเหนือจากแนวเส้นใยก็ทำให้วัสดุคอมโพสิตนั้นอ่อนแอและเสียหายได้เช่นกัน การผลิตจึงมักจะวางเส้นใยซ้อนกันขึ้นไปเรื่อยๆ ในทิศทางที่หลากหลายเพิ่มเติมด้วย

เส้นใยแบบสุ่มทิศทาง (Randomly Oriented) เป็นการวางเส้นใยในทิศทางแบบสุ่ม ไม่มีการกำหนดทิศทางที่เฉพาะ การรับแรงของวัสดุคอมโพสิตเมื่อเสริมด้วยเส้นใยประเภทนี้ จะรับแรงได้ไม่สูงเท่าวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงในทิศทางเดียวกับการรับแรง

เส้นใยแบบสาน (Fabric) เป็นการนำเส้นใยมาสานกันเป็นแพทเทิร์น (Pattern) หรือรูปแบบเฉพาะ ทำให้มีทิศทางของเส้นใย 2 ทิศทางตั้งฉากกัน ซึ่งมักนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตจะสามารถรับแรงกระทำได้หลายทิศทางได้มากกว่าเส้นใยแบบทิศทางเดียว นอกจากการจัดวางรูปแบบทิศทางของเส้นใยจะมีส่วนสำคัญในการทำให้วัสดุคอมโพสิตสามารถรองรับแรงกระทำได้ในทิศทางที่ต้องการแล้วนั้น กระบวนการผลิตซึ่งทำให้ได้มาของวัสดุคอมโพสิตก็มีหลากหลายวิธีและทำให้วัสดุคอมโพสิตมีคุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันอีกเช่นกัน



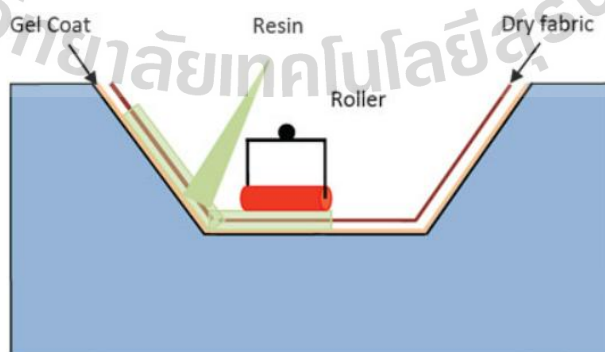
รูปที่ 2.5 การจัดเรียงตัวของเส้นใยแต่ละประเภท (a) เส้นใยสั้นแบบจัดเรียงแบบสุ่ม (b) เส้นใยสั้นจัดเรียงแบบทิศทางเดียวกัน (c) เส้นใยยาวแบบจัดเรียงในทิศทางเดียวกัน (d) เส้นใยยาวจัดเรียงแบบถัก (Spartec Composites, 2021)

## 2.2 การผลิตวัสดุคอมโพสิต

กระบวนการผลิตคอมโพสิตมีอยู่หลากหลายวิธีการ ตั้งแต่การวางด้วยมือ ที่เป็นวิธีการผลิตที่ง่ายและใช้เวลาน้อยที่สุด ไปจนถึงการพันเส้นใย การถัก และการพิม 3 มิติ ในแต่ละกระบวนการล้วนเหมาะกับลักษณะความต้องการของการนำวัสดุคอมโพสิตไปใช้งานที่แตกต่างกันออกไป

### 2.2.1 กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือ (Hand Lay-up)

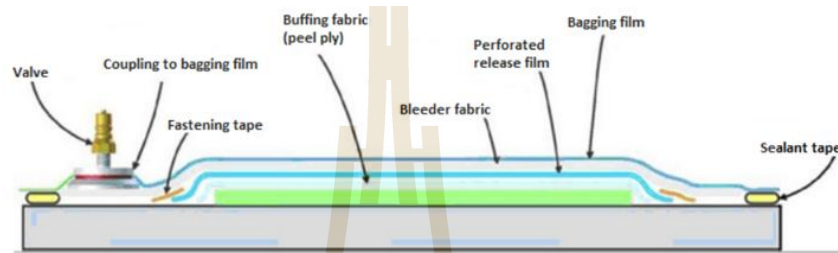
เป็นกระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิตที่ง่ายที่สุด โดยจะใช้วิธีการวางเส้นใยลงบนแม่พิมพ์และเทเมทริกซ์ที่ผสมกันแล้วระหว่าง เรซินและสารทำแข็ง ไปทั่วบริเวณของเส้นใยทั้งหมด จากนั้นเพิ่มลำดับชั้นของเส้นใยขึ้นไปเรื่อยๆ เพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการแบบไว้ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือ (Mohite P. M., 2025)

### 2.2.2 กระบวนการแว็คคัมแบ็กกิง (Vacuum bagging)

เป็นกระบวนการผลิตที่คล้ายกันกับการวางด้วยมือ คือการวางเส้นใยและเมทริกซ์ให้ทั่วบริเวณ แต่จะทำให้ระบบนั้นเป็นสุญญากาศโดยการปิดถุงให้เรียบร้อยและเริ่มทำสุญญากาศ โดยจะใช้แรงดันบรรยากาศลดลงมาจากการดูดอากาศออกจากระบบเพื่อให้เมทริกซ์ที่เคลือบอยู่เกาะติดกันกับเส้นใยและอยู่กับที่จนกว่าเมทริกซ์จะแข็งตัว ดังรูปที่ 2.7

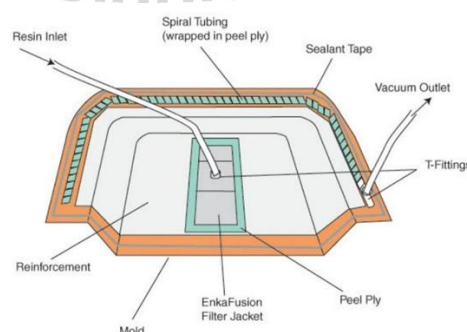


รูปที่ 2.7 กระบวนการแว็คคัมแบ็กกิง (KEVRA, 2025)

ในการศึกษานี้จะใช้กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือควบคู่ไปกับกระบวนการแว็คคัมแบ็กกิงเพื่อให้วัสดุคอมโพสิตมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่สามารถควบคุมอัตราส่วนการผสมของเส้นใยและเมทริกซ์ได้ ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### 2.3.3 กระบวนการแว็คคัมอินฟิวชัน (Vacuum Infusion)

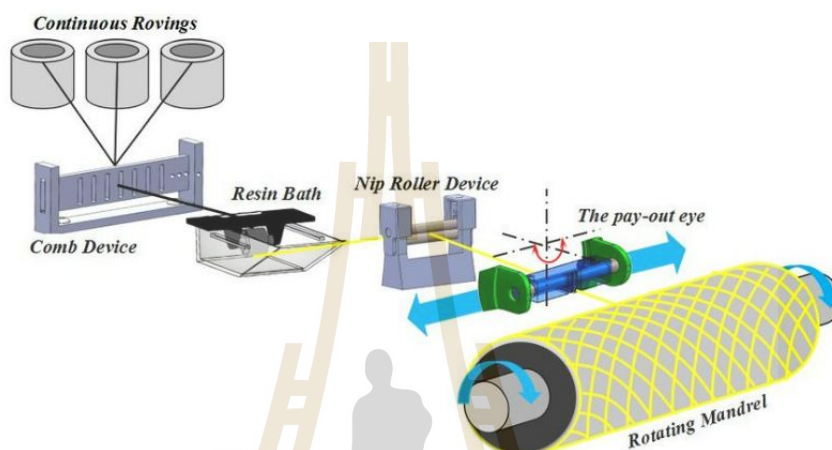
กระบวนการผลิตนี้จำเป็นต้องใช้เมทริกซ์ที่มีความหนืดไม่สูงมาก โดยมีการเชื่อมต่อท่อทางเข้าและทางออกในระบบและเริ่มทำให้เป็นสุญญากาศ เมทริกซ์จะถูกดูดเข้าไปในระบบ (Resin Inlet) และกระจายตัวไปทั่วบริเวณที่เส้นใยวางอยู่ ซึ่งเมทริกซ์ส่วนเกินจะออกไปที่ท่อทางออก (Vacuum Outlet) กระบวนการนี้เหมาะมากสำหรับการผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีรูปร่างซับซ้อนและขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กระบวนการแว็คคัมอินฟิวชัน (Performance composite Inc., 2025)

### 2.3.4 การพันเส้นใย (Filament Winding)

กระบวนการนี้มีประโยชน์อย่างมากในทางอุตสาหกรรม แม้พิมพ์มักจะเรียวยาวอาจเป็นรูปวงกลมหรือสี่เหลี่ยมขนาดต่างๆ และจะนำเส้นใยที่ผ่านการชุบเมทริกซ์มาพันรอบแกนและสามารถเป็นผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้งานด้านอื่นๆ ต่อได้ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การพันเส้นใย (ACM Co., 2025)

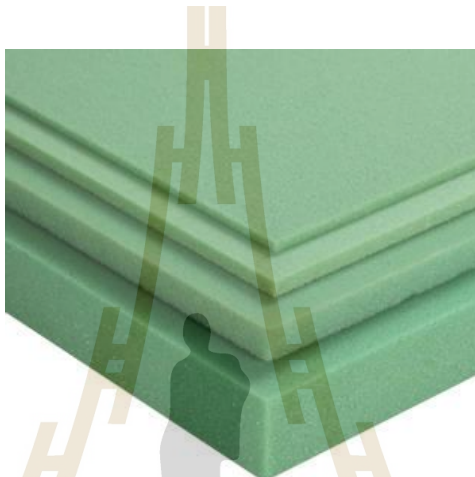
## 2.3 โครงสร้างวัสดุคอมโพสิตแบบแซนวิช

โครงสร้างวัสดุแบบแซนวิช (Sandwich Structure) เป็นโครงสร้างประเภทหนึ่งของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งได้เพิ่มส่วนที่เป็นวัสดุแกนกลาง (Core Material) ที่มีน้ำหนักเบาและความหนาแน่นต่ำแทรกระหว่างกลางแผ่นคอมโพสิตผิวหน้า 2 แผ่น (Face sheet) และถูกยึดติดกันด้วยกาวอีพอกซีหรือฟิล์มกาว (Adhesive film) แซนวิชคอมโพสิตถูกนำมาประยุกต์ใช้เพิ่มคุณสมบัติการรับแรงดัดงอแรงเฉือน รวมถึงแรงดึง ให้ดีมากยิ่งขึ้น ทำให้โครงสร้างรองรับแรงกระทำได้ดีมากยิ่งขึ้นและน้ำหนักไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และยังคงรูปร่างของโครงสร้างได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

### 2.3.1 วัสดุแกนกลาง (Core Material)

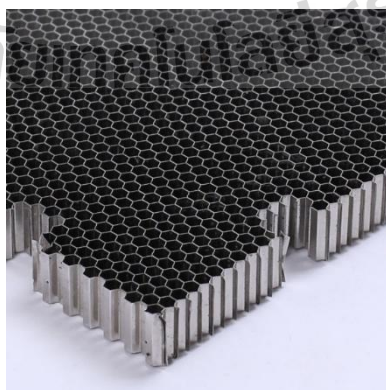
วัสดุแกนกลางเป็นชั้นที่อยู่ตรงกลางของโครงสร้างแบบแซนวิช ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของการใช้งานวัสดุแกนคือเพื่อต้องการเพิ่มความหนาของโครงสร้างแบบแซนวิชโดยไม่ทำให้น้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ วัสดุแกนกลางสามารถรองรับแรงอัดและแรงเฉือนในโครงสร้างแบบแซนวิชได้ การเลือกใช้งานวัสดุแกนก็เป็นส่วนสำคัญของการออกแบบโครงสร้างให้เหมาะสมสำหรับการรองรับแรงกระทำจากภายนอก ตัวอย่างวัสดุแกน เช่น แกนโฟม แกนอะรามิด รั้งผึ้ง เป็นต้น

วัสดุแกนโฟม (Foam core) ส่วนใหญ่นั้นจะถูกใช้ในงานด้านวิศวกรรมที่สำคัญๆ เช่น อากาศยาน ยานยนต์ อาคาร การเดินเรือ และยานอวกาศ เป็นต้น เนื่องจากมีน้ำหนักที่เบามาก และมีความสามารถในการยืดหยุ่นที่ดี โดยแกนโฟมที่เป็นที่นิยมนำมาใช้งานมากที่สุดคือ พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC), พอลิเมทาโครลิไมด์ (PMI) และพอลิยูรีเทน (PU) นอกเหนือจากนี้ ก็ยังมีโฟมโลหะ เช่น โฟมอลูมิเนียม ที่สามารถใช้เพื่อให้ได้คุณสมบัติความแข็งที่สูงและความสามารถในการทนความร้อนที่สูงขึ้น ดังรูป 2.10



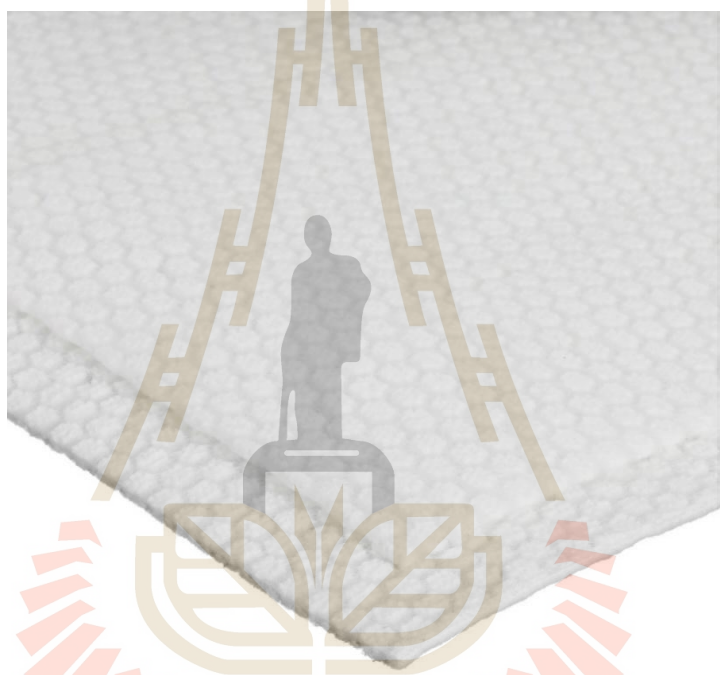
รูปที่ 2.10 วัสดุแกนโฟม PVC (easycomposites, 2025)

วัสดุแกนทรงรังผึ้ง (Honeycomb Core) ลักษณะโครงสร้างเป็นเซลล์หกเหลี่ยมที่จัดเรียงต่อเนื่องกันคล้ายรังผึ้ง ซึ่งโครงสร้างนี้ช่วยให้วัสดุสามารถรับแรงได้ทั้งในแนวระนาบ (เช่น แรงที่มากระทำในแนวยาวของแผ่นวัสดุ) และในแนวตั้งฉากกับระนาบ (เช่น แรงกดหรือแรงดัดที่มากระทำในทิศทางความหนา) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ วัสดุที่นิยมนำมาผลิตเป็นแกนรูปทรงรังผึ้งคือ อลูมิเนียม ดังรูป 2.11 เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน นอแม็กอะรามิด (Nomex) คาร์บอนไฟเบอร์ โฟม เป็นต้น



รูปที่ 2.11 วัสดุแกนแบบทรงรังผึ้งจากอลูมิเนียม (AD METAL, 2018)

แผ่นเสริมแรง Lantor Soric® ชนิด XF เป็นแผ่นเสริมแรงที่ถูกพัฒนาโดยบริษัท Lantor® Composites ที่มีจุดเด่นคือ สามารถเป็นแกนของโครงสร้างคอมโพสิตแบบแซนวิชได้ในหลากหลายงานและหลายรูปทรง เนื่องด้วยเป็นแกนที่สามารถยืดหยุ่นได้ ผลิตจากวัสดุรีไซเคิลจากพลาสติก PET ชนิดแกนแบบ XF มีจุดเด่นในกระบวนการผลิตแบบแว็คคัม อินฟิวชัน (Infusion Resin) เนื่องจากมีรูปทรงที่ทำให้เรซินผ่านได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งการไม่ดูดซับเรซินไว้ในแกน Lantor Soric® ทำให้ลดน้ำหนักจากการที่แกนดูดซับเรซินลงได้อีกด้วย ดังรูป 2.12 (Soric®, 2025a)



รูปที่ 2.12 วัสดุแกนแบบ Lantor Soric® XF (easycomposites, 2025)

## 2.4 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) ความเหนียว (Ductility) เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของวัสดุเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำ ในงานวิศวกรรมคุณสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมากเพราะการเลือกใช้วัสดุเพื่อให้สามารถรองรับและทนทานต่อแรงกระทำในรูปแบบต่างๆ ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลเหล่านี้สามารถนำไปใช้เพื่อออกแบบและคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับลักษณะของการใช้งานได้

การทดสอบวัสดุเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดัดงอ ความต้านทานแรงกดอัด ความต้านทานแรงเฉือน มักจะได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปหาค่าอื่นๆ ที่เป็นค่า

เฉพาะตัวของวัสดุแต่ละประเภทได้ เช่น ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ความคราก (Yield) เป็นต้น

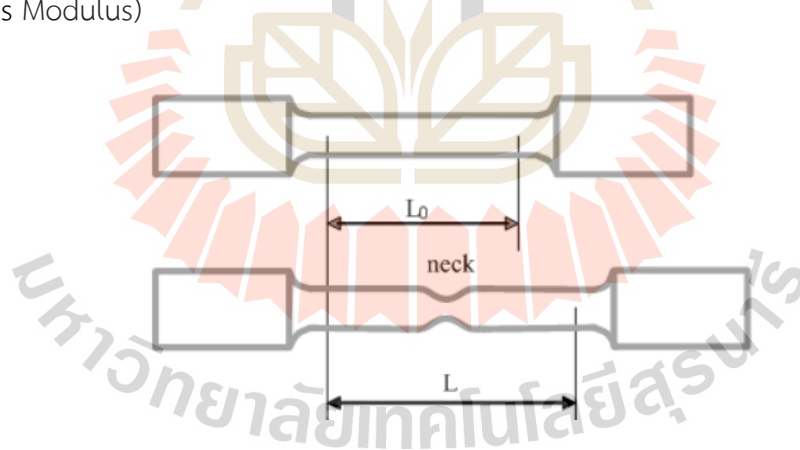
#### 2.4.1 ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)

การวัดการยืดตัวจากแรงดึงและการวัดค่ามอดูลัสแรงดึงเป็นหนึ่งในตัวบ่งชี้ที่สำคัญที่สุดของความแข็งแรงในวัสดุและเป็นคุณสมบัติที่ระบุอย่างกว้างขวางที่สุดของวัสดุ การทดสอบแรงดึงคือการวัดความสามารถของวัสดุในการทนต่อแรงที่มีแนวโน้มที่จะดึงออกจากกันและเพื่อกำหนดว่าวัสดุจะยืดออกได้มากน้อยเพียงใดก่อนแตกหัก ดังรูปที่ 2.13 โดยอาศัยความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดเพื่ออธิบายค่ามอดูลัสของวัสดุโดยเป็นค่าเฉพาะตัวของวัสดุ ดังสมการที่ (1)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

เมื่อ  $E$  คือ มอดูลัสของยัง (Young's modulus)  
 $\sigma$  คือ ค่าความเค้น (Stress) คือแรงดึง ( $F$ ) กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด ( $A$ )  
 $\epsilon$  คือ ค่าความเครียด (Strain) คือความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป ( $\Delta L$ ) ต่อความยาวเริ่มต้น ( $L$ )

ซึ่งการทดสอบนี้สามารถวัดค่าที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ เช่น ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus)

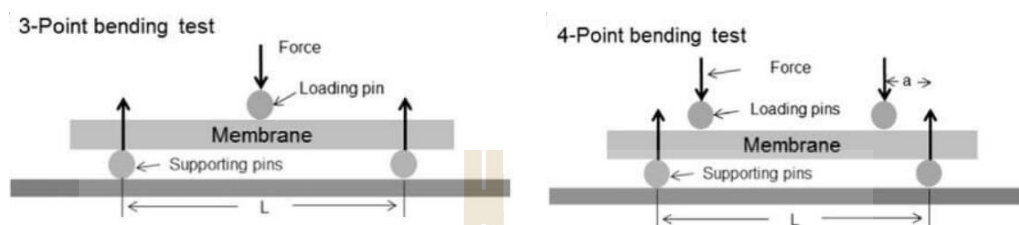


รูปที่ 2.13 Tensile Testing (Dmitri K., 2023)

#### 2.4.2 ความต้านทานแรงดัดงอ (Flexural Strength)

การทดสอบความต้านทานแรงดัดงอ เพื่อวัดความดัดงอของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ โดยการทดสอบการดัดงอของวัสดุ สามารถทำได้ 2 รูปแบบ คือ การดัดงอแบบ 3 จุด (3-point bending) และการดัดงอแบบ 4 จุด (4-point bending) ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งจะมีการวางฐานรองวัสดุที่

กำหนดระยะห่างตามมาตรฐานการทดสอบ จากนั้นหัวกดจะถูกกดลงมาเพื่อทดสอบการดัดของวัสดุ และสามารถตรวจสอบค่าความต้านทานการดัดงอ (Flexural Strength) และค่ามอดูลัสของการดัดงอ (Flexural Modulus) ได้



รูปที่ 2.14 Flexural Testing (a) 3-point bending (b) 4-point bending (Kui et al., 2016)

แรงดัดสูงสุดหรือระดับความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในบริเวณผิวของชิ้นงานทดสอบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (2)$$

เมื่อ	$\sigma_f$	คือ ค่าความเค้นแรงดัด ( $N/m^2$ , Pa)
	P	คือ แรงกระทำสูงสุดกับชิ้นงานทดสอบ (N)
	L	คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ, Span (m)
	b	คือ ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ (m)
	h	คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (m)

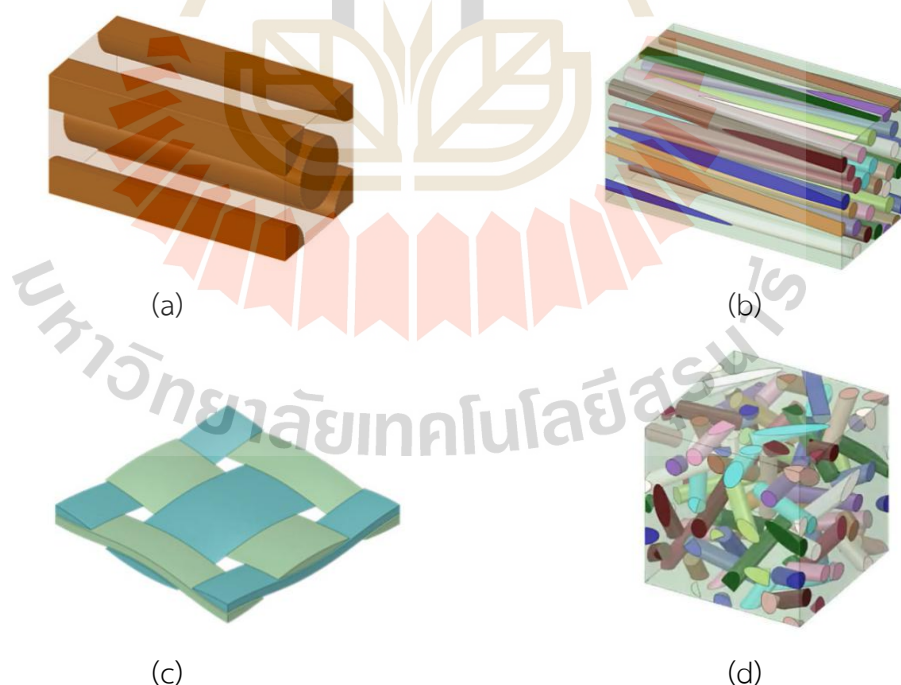
## 2.5 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการวิเคราะห์และแก้ปัญหาทางวิศวกรรมและฟิสิกส์ ซึ่งประกอบด้วย การแบ่งปัญหาที่ซับซ้อนออกเป็นส่วนเล็กๆ ที่เรียกว่า "องค์ประกอบไฟไนต์" (Finite Elements) ซึ่งสามารถคำนวณได้ง่าย จากนั้นจะทำการรวมผลลัพธ์จากแต่ละองค์ประกอบเพื่อให้ได้คำตอบของปัญหาใหญ่ วิธีการแก้ปัญหานี้เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่ทำให้การวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมทำได้ง่ายขึ้น สะดวก รวดเร็ว ประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตเพื่อทดสอบจริงและมีความแม่นยำสูง การทดสอบสามารถทำได้ไม่จำกัดจำนวนครั้ง สามารถทำซ้ำหรือปรับเปลี่ยนข้อมูลวิเคราะห์ได้สะดวก อีกทั้งการประเมินผลลัพธ์ที่สามารถประเมินได้หลายรูปแบบและครอบคลุมทั้งกลศาสตร์ของแข็ง กลศาสตร์ของไหล และความร้อน (Xiaolin Chen, 2015)

โปรแกรมสำหรับการใช้งานการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์งานทางวิศวกรรม คือโปรแกรม ANSYS Workbench® ซึ่งมีโมดูลที่มีให้หลากหลายตั้งแต่การวิเคราะห์ในแบบสถิต (Static Analysis) การวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ที่เกี่ยวเนื่องกับเวลา (Dynamic Analysis) การวิเคราะห์การไหลของของไหล (Fluid Analysis) การวิเคราะห์ในเชิงของความร้อน (Thermal Analysis) และรวมถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติในวัสดุประเภทคอมโพสิตอีกด้วย (Composite Materials Analysis)

### 2.5.1 ANSYS Material Designer (MD)

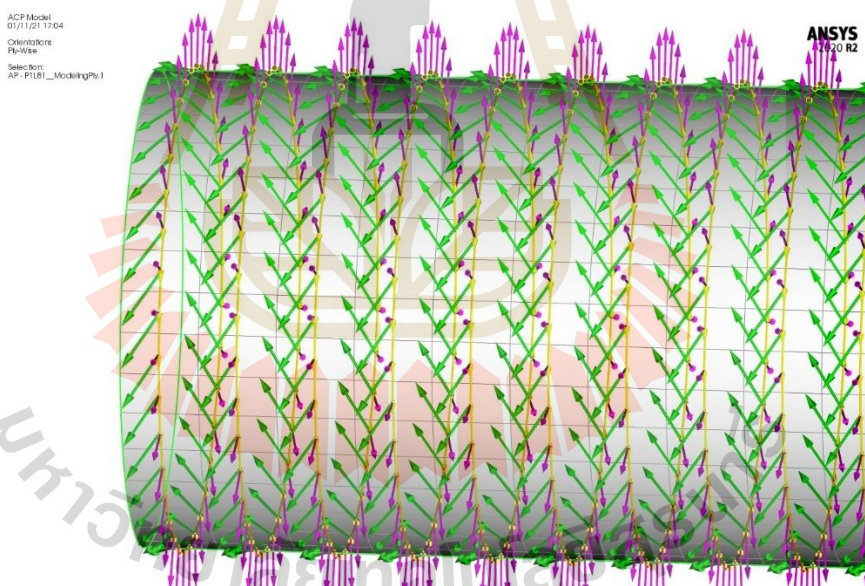
ANSYS Material Designer เป็นโมดูลหนึ่งในโปรแกรม ANSYS ที่ใช้สำหรับการสร้างและจำลองโครงสร้างรวมถึงการวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์เอลิเมนต์ในระบบโครงสร้างแบบจุลภาค (Microscale) ของวัสดุทางวิศวกรรมโดยเฉพาะวัสดุคอมโพสิต สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุโดยใช้หลักการทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โครงสร้างจุลภาคที่สามารถกำหนดรูปแบบตั้งแต่รูปแบบของการใช้ตัวเสริมแรง ทั้งแบบ เส้นใยต่อเนื่องทิศทางเดียว แบบอนูภาคเสริมแรง หรือเส้นใยถักทอ เป็นต้น รวมถึงการกำหนดอัตราส่วนระหว่างเมทริกซ์และตัวเสริมแรงซึ่งข้อมูลที่ถูกกำหนดในระดับจุลภาคนี้จะถูกนำไปทำนายคุณสมบัติเชิงกลในระดับมหภาค (Macroscale) ของวัสดุ เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ในเชิงโครงสร้างหรือการวิเคราะห์อื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างแบบจำลองด้วยโมดูล MD (a) Unidirectional fiber (b) Random fiber (c) Woven (d) Chopped fiber (Ansys How To. 2018)

## 2.5.2 ANSYS Composite PrepPost (ACP)

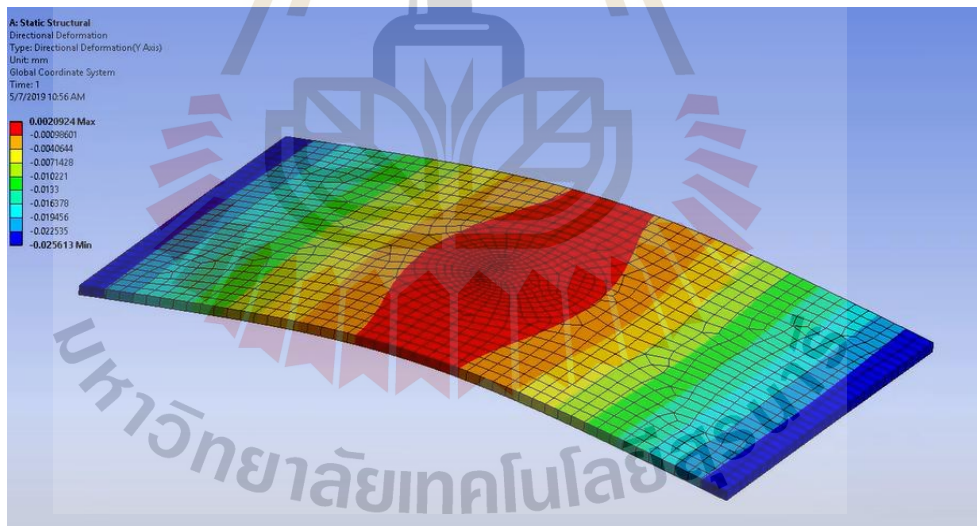
ANSYS Composite PrepPost เป็นเครื่องมือซอฟต์แวร์ที่มีวิธีการครอบคลุมสำหรับการใช้วิเคราะห์และการออกแบบวัสดุคอมโพสิต ช่วยให้สามารถจำลองรูปแบบที่ซับซ้อนได้อย่างง่ายขึ้น ทั้งการกำหนดลำดับชั้นการวางและทิศทางของเส้นใย ACP สามารถใช้ในการประเมินความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตภายใต้สภาวะโหลดแบบต่างๆ และวิเคราะห์ความล้มเหลวแบบต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เชื่อมต่อกับซอฟต์แวร์วิเคราะห์ประเภทอื่นได้ครอบคลุม เช่น ANSYS Material Designer ที่สามารถออกแบบโครงสร้างคอมโพสิตในระดับจุลภาคได้ เพื่อให้ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์มีความแม่นยำใกล้เคียงกับการทดสอบ หรือ ANSYS Mechanical เพื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลเพิ่มเติมได้ ดังรูปที่ 2.16 การวิเคราะห์ในโมดูลวิเคราะห์ของ ACP มีอยู่ 2 ส่วนคือ ACP Pre และ ACP Post ซึ่งจะเป็นโมดูลวิเคราะห์สำหรับการสร้างรวมถึงการกำหนดค่าของโครงสร้างคอมโพสิตในขั้นของการจำลอง และการแสดงผลพร้อมถึงการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุคอมโพสิตตามลำดับ



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างแบบจำลองด้วยโมดูล ACP (Magma, 2021)

### 2.5.3 ANSYS Static Structural

ANSYS Static Structural เป็นเครื่องมือจำลองพฤติกรรมทางกลภายใต้ภาวะโหลดคงที่มีประสิทธิภาพสูง รองรับการวิเคราะห์โครงสร้างแบบแซนวิช ซึ่งมีความซับซ้อนจากการประกอบด้วยวัสดุหลายชั้นที่มีสมบัติเชิงกลต่างกัน จุดเด่นของโมดูลนี้คือความสามารถในการจำลององค์ประกอบ ที่ครอบคลุมทั้งชั้นผิว (face sheets) และแกนกลาง (core) อย่างละเอียด การใช้งานในโครงสร้างแซนวิชทำให้สามารถประเมินค่าความเค้น-ความเครียดในแต่ละชั้นของวัสดุ วิเคราะห์แรงเฉือนในแกนกลาง และตรวจสอบความเสียหายจากทฤษฎีความเสียหายแบบต่าง ๆ เช่น Tsai-Wu, Tsai-Hill และ Hashin ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 2.17 โมดูลยังสามารถนำเข้าภาระกระทำ (Load) หลายรูปแบบ เช่น แรงกระจาย แรงที่จุด ความดัน หรือผลจากอุณหภูมิ เพื่อจำลองสภาพการใช้งานจริงได้อย่างใกล้เคียง นอกจากนี้ ยังสามารถวิเคราะห์ผลกระทบเชิงพลศาสตร์หรือความร้อนผ่านการเชื่อมโยงกับโมดูลอื่น (Coupled Analysis) ได้อย่างดี รวมถึงข้อดีที่สำคัญอีกประการ คือช่วยลดการทดลองทางกายภาพ ประหยัดเวลาในการออกแบบ และสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เชิงโครงสร้างได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างแบบจำลองด้วยโมดูล Static Structural

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการขึ้นรูปและศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตแบบแซนวิชที่แผ่นผิวหน้าเสริมแรงด้วยเส้นใยแฟล็กซ์ (Flax Fiber) และแกน Lantor Soric® XF ผลิตร่วมกับเมทริกซ์ไบโอ-อีพอกซี (Bio-epoxy) โดยใช้กระบวนการผลิตแบบแวคคัม อินฟิวชัน (Vacuum Infusion Resin) การศึกษาจะดำเนินการปรับปรุงแบบการจัดวางของเส้นใย การใช้งานร่วมกับแผ่นแกนเสริมแรง รวมถึงความเข้ากันได้ของเส้นใยเสริมแรงและเมทริกซ์ การควบคุมสัดส่วนของเส้นใยต่อเมทริกซ์ และทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench ผ่านโมดูล Material Designer (MD), Composite Prep-Post (ACP) ในการออกแบบ และ ANSYS Static Structure ในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล เช่น จะทดสอบความต้านทานแรงดัดงอและเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติจากการทดสอบจริงตามมาตรฐานการทดสอบความต้านทานแรงดัดงอ ASTM C393-00 ตามลำดับ รวมถึงการศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของโครงสร้างในลักษณะนี้

#### 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ขั้นตอนการศึกษาสามารถแบ่งหัวข้อการศึกษาได้ดังนี้

##### 3.1.1 การศึกษาค้นคว้าและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาค้นคว้าวิธีการ กระบวนการ ที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย รวมถึงรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัย จากทั้งวารสาร หนังสือ บทความวิชาการ จากแหล่งข้อมูลที่เชื่อถือได้ ทั้งทางทฤษฎีและวิธีการทดลอง คุณสมบัติสำคัญของเส้นใยแฟล็กซ์ รูปแบบการผลิตเส้นใย และความสามารถในการหาเส้นใยเพื่อนำมาใช้ทำวิจัยได้ อีกทั้งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการสร้างแบบจำลอง

##### 3.1.2 ผลิตวัสดุคอมโพสิต

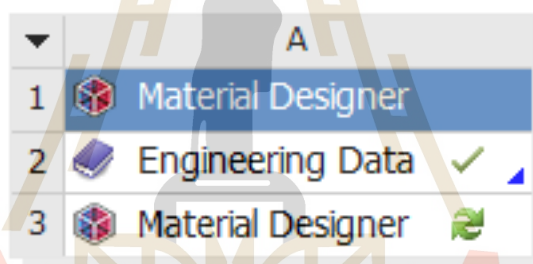
การผลิตวัสดุคอมโพสิตด้วยวิธีการผลิตแบบแวคคัม อินฟิวชัน (Vacuum Infusion Resin) การกำหนดทิศทางของการวางเส้นใย จำนวนชั้นเส้นใย สัดส่วนเส้นใยต่อสัดส่วนเมทริกซ์ โดยมีวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้งานในกระบวนการผลิตทั้งหมดจะถูกระบุไว้ในภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตคอมโพสิต

### 3.1.3 ผลิตโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตแบบแซนวิช

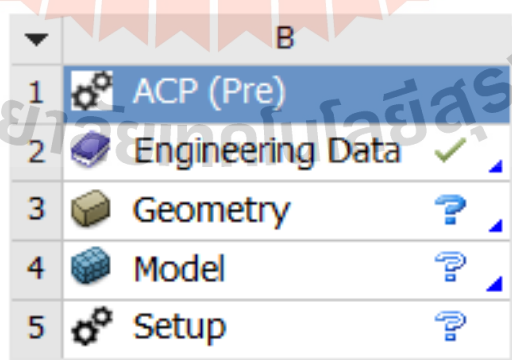
การผลิตโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตโดยใช้เทคนิคเดียวกันกับการผลิตคอมโพสิต คือ การเว้นคัม อินพีวชันสำหรับการยึดติดระหว่างแผ่นผิวหน้าและวัสดุแกน ซึ่งจะดำเนินการผลิตโครงสร้างนี้ไปพร้อมกันกับแผ่นผิวหน้า เพื่อให้ได้โครงสร้างที่ประกอบกันเรียบร้อย โดยที่ไม่ต้องใช้แผ่นกาวมายึดติดระหว่างแผ่นผิวหน้าและแกนกลาง

### 3.1.4 สร้างแบบจำลองโครงสร้างคอมโพสิตแบบแซนวิช

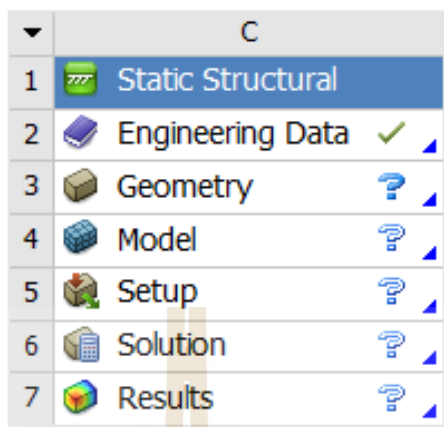
สร้างคุณสมบัติของโครงสร้างคอมโพสิตแบบแซนวิชด้วยซอฟต์แวร์ ANSYS® Material Designer ดังรูปที่ 3.1 และแบบจำลองสำหรับคอมโพสิตด้วยซอฟต์แวร์ ANSYS® Composite Prep Post (ACP) ดังรูปที่ 3.2 จากนั้นทดสอบคุณสมบัติเชิงกลโดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS® Static Structure ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.1 โมดูล Material Designer



รูปที่ 3.2 โมดูล ACP (Pre)



รูปที่ 3.3 โมดูล Static Structural

### 3.1.5 ทดสอบวัสดุตามมาตรฐานการทดสอบ

ทดสอบวัสดุที่ได้จากกระบวนการผลิต โดยกำหนดทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบความต้านทานแรงดัดงอตามมาตรฐาน ASTM C393-00 ดังรูปที่ 3.4 เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของโครงสร้าง ซึ่งดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine : UTM) ที่แสดงไว้ในภาคผนวก ก



Designation: C 393 – 00

#### Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 393; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

รูปที่ 3.4 มาตรฐานการทดสอบวัสดุ ASTM C393-00

## 3.2 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย

ห้องปฏิบัติการวัสดุคอมโพสิต อาคารเครื่องมือ 16 และอาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ถนนสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

## บทที่ 4

### วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ

ความก้าวหน้าทางวิศวกรรมในปัจจุบันมีการพัฒนาอย่างก้าวกระโดดจากอดีต รวมถึงการนำแหล่งทรัพยากรหมุนเวียนที่ได้มาจากธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมหลากหลาย ประเภทได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง ด้วยความสามารถตอบสนองความต้องการด้านความยั่งยืนและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังส่งเสริมการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่า และเกิดประโยชน์สูงสุดในกระบวนการผลิตและใช้งาน

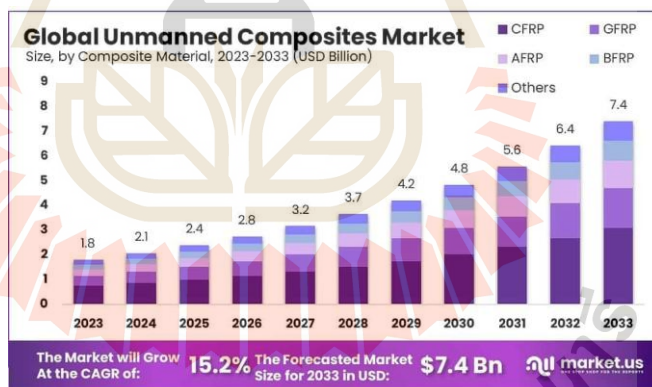
#### 4.1 ความสำคัญของความต้องการวัสดุจากธรรมชาติ

ในปัจจุบันการใช้งานคอมโพสิตมีปริมาณความต้องการเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกๆ ปี เพราะในหลายอุตสาหกรรมต้องการความโดดเด่นเฉพาะตัวของคอมโพสิตในการนำไปใช้งานในชิ้นส่วนทั้งชิ้นส่วนโครงสร้าง ชิ้นส่วนกึ่งโครงสร้าง และแม้แต่อุปกรณ์สำหรับการตกแต่งและเฟอร์นิเจอร์ โดยเฉพาะกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยานที่ทำให้คอมโพสิตกลายเป็นตัวเลือกลำดับแรกๆ สำหรับนำไปใช้งานในกลุ่มอุตสาหกรรมเหล่านี้ (Spasenović & Blagojevic, 2021) ตัวอย่างเช่น อากาศยานไร้คนขับ (UAVs) ก็เป็นหนึ่งในตัวอย่างของการนำคอมโพสิตไปใช้ในชิ้นส่วนโครงสร้างต่างๆ เช่น โครงสร้างปีก ชุดล้อลงจอด ลำตัว ใบพัด เป็นต้น (Hairi et al., 2023) อีกทั้งความต้องการการใช้งานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการรายงานของเว็บไซต์ Market.US (2025) ที่ชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มมูลค่าตลาดของอากาศยานไร้คนขับในปี 2024 อยู่ที่ 36.4 พันล้านเหรียญสหรัฐ และคาดว่าจะการเติบโตของมูลค่าตลาดโดรนจะสูงถึง 95.4 พันล้านเหรียญสหรัฐ ภายในปี 2034 ด้วยอัตราการเติบโตต่อปี 10.1% ดังแสดงในรูป 4.1 โดยคาดว่าจำนวนโดรนที่ไม่ใช่ของภารกิจทางการทหารจะมีเกิน 13 ล้านลำ ภายในปี 2030



รูปที่ 4.1 มูลค่าตลาดโดรนปี 2024 ถึง 2034 (Market.us, 2025)

จากการรายงานดังกล่าว เป็นจุดผลักดันทำให้ตลาดของความต้องการวัสดุคอมโพสิตสำหรับการนำมาผลิตโครงสร้างในอากาศยานไร้คนขับนั้นสูงขึ้นตามไปด้วย โดยแนวโน้มเหล่านี้ช่วยพัฒนาและทำให้งานวิจัยสำคัญๆ ต้องการมุ่งเน้นไปที่การช่วยเพิ่มคุณสมบัติทั้งเชิงกลเชิงเคมีในระดับทั้งจุลภาคและมหภาครวมถึงเทคโนโลยีที่นำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุคอมโพสิต ตามการรายงานของเว็บไซต์ Market.US (2024) ที่ชี้อัตราการเติบโตของตลาดวัสดุคอมโพสิตที่จะสูงขึ้นถึง 15.2% ต่อปี ตั้งแต่ 2023 ไปจนถึงปี 2033 และอาจมีมูลค่าสูงตามการคาดการณ์อยู่ที่ 7.4 พันล้านเหรียญสหรัฐ ในปี 2033 โดยเส้นใยเสริมแรงล้วนแล้วแต่เป็นเส้นใยสังเคราะห์เกือบทั้งหมด ดังแสดงในรูป 4.2 (Market.us, 2024)จากแนวโน้มการใช้งานที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเหล่านี้ กลับทำให้กลายเป็นจุดที่เกิดความน่ากังวลและการตระหนักถึงความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากว่าคอมโพสิตส่วนใหญ่ที่ใช้ในงานในปัจจุบันนั้นเป็นคอมโพสิตที่ทำมาจากวัสดุประเภทสังเคราะห์ และประเด็นหลักเมื่อคอมโพสิตสังเคราะห์เหล่านี้หมดอายุการใช้งาน จะทำให้เกิดปัญหาของการสะสมขยะอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมที่สามารถกำจัดและย่อยสลายไปเองได้ยาก (Rossitti et al., 2025) สิ่งเหล่านี้อาจจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม หรือแม้แต่ผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นต่อมนุษย์เองด้วยเช่นกัน ทำให้ศักยภาพของวัสดุจากธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้นั้นเป็นตัวเลือกที่ใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าวัสดุสังเคราะห์ทั่วไป



รูปที่ 4.2 มูลค่าตลาดวัสดุคอมโพสิตปี 2023 ถึง 2033 (Market.us, 2024)

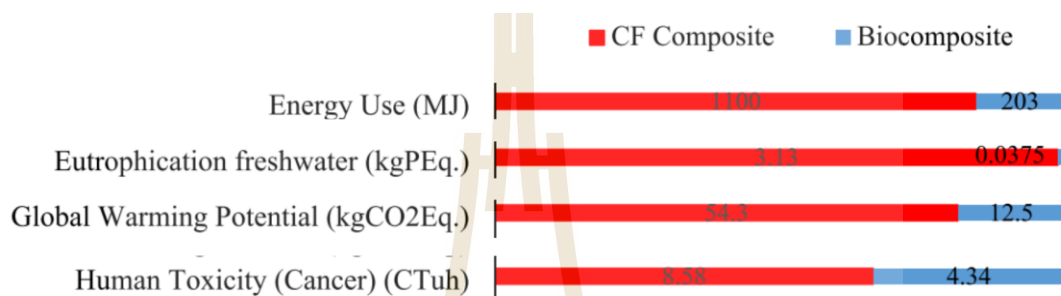
จุดกระตุ้นสำคัญที่กล่าวมานั้นทำให้ตัวเลือกจากธรรมชาติทั้งเมทริกซ์ที่สกัดได้จากพืชและเส้นใยเสริมแรงที่มาจากทั้งพืชและขนสัตว์ (Abdellah et al., 2023) รวมไปถึงแกนกลางบางประเภทที่มาจากวัสดุเคลือบพลาสติกที่เป็นกรนำเอาขยะเหลือทิ้งมาเปลี่ยนรูปให้เป็นแกนเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตได้ ส่วนประกอบสำหรับวัสดุคอมโพสิตที่มาจากธรรมชาติกลายเป็นจุดสนใจให้กับนักวิจัยทั้งหลาย ด้วยความต้องการที่ว่าการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมนั้นทำให้ทางเลือกของแหล่งวัสดุที่มาจากธรรมชาติเหล่านี้ตอบสนองต่อความตระหนักด้านสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี

นอกจากจุดสนใจเกี่ยวกับความยั่งยืนทางธรรมชาติแล้วนั้น การเลือกใช้วัสดุจากธรรมชาติช่วยให้ลดต้นทุนทางการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ (Kamarudin et al., 2022) เพราะวัสดุเสริมแรงที่มาจากธรรมชาติมักจะมีราคาที่ถูกกว่าวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์และสามารถหาได้ง่ายในระดับท้องถิ่น รวมไปถึงกระบวนการผลิตเส้นใยเสริมแรงจากธรรมชาติเหล่านี้โดยทั่วไปแล้วจะใช้พลังงานในกระบวนการผลิตที่ต่ำกว่าเส้นใยเสริมแรงจากการสังเคราะห์ ทำให้ลดการปล่อยมลพิษที่มาจากกระบวนการผลิตออกสู่ธรรมชาติและประหยัดทรัพยากรด้านพลังงานได้อีกด้วย (Zulkarnain et al., 2024)

#### 4.2 ผลเสียจากคอมโพสิตสังเคราะห์ สารพิษ / การปล่อยคาร์บอน

วัสดุคอมโพสิตสังเคราะห์ในปัจจุบันถูกออกแบบเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้งานทางด้านวิศวกรรมและอุตสาหกรรมที่ทันสมัย โดยเฉพาะความต้องการความแข็งแรงแต่ยังคงมีน้ำหนักที่เบาซึ่งถือเป็นข้อดีและข้อโดดเด่นอย่างยิ่ง แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตสังเคราะห์และความทนทานจะสูงมาก แต่ปัญหาที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและอาจจะต่อมนุษย์เองก็ตามจะมีผลในด้านลบเป็นอย่างมากในอนาคต (Carvalho et al., 2024) โดยเฉพาะในเรื่องของสารพิษและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) หนึ่งในปัญหาหลักที่เกี่ยวข้องกับคอมโพสิตสังเคราะห์คือการใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายในกระบวนการผลิต เนื่องจากว่าโดยทั่วไปแล้ววัสดุคอมโพสิตจะมีองค์ประกอบของเส้นใยเสริมแรงแบบสังเคราะห์ เช่น คาร์บอนไฟเบอร์และกลาสไฟเบอร์รวมถึงพอลิเมอร์เรซินที่จะเป็นสารเนื้อหลัก ซึ่งเรซินเหล่านี้มีองค์ประกอบของสารระเหยง่ายบางชนิดผสมอยู่ (Volatile Organic Compounds: VOCs) ที่ใช้เป็นสารเติมแต่งและสารทำละลายในเรซิน สารระเหยนี้สามารถระเหยออกสู่อากาศโดยรอบระหว่างกระบวนการผลิต ส่งผลให้เกิดปัญหาในด้านของสุขภาพเมื่อมีการสูดดมอากาศที่มาจากมลพิษของสารระเหยนี้เป็นเวลานาน (Nzimande et al., 2024) ตามรายงานของ Karthikeyan, Constance and Ashish (2023) ซึ่งให้เห็นถึงความอันตรายต่อศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential, kgCO<sub>2</sub>Eq.) ที่เป็นหน่วยวัดผลกระทบของก๊าซเรือนกระจกเทียบกับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) มีปริมาณสูงจากการใช้งานคอมโพสิตสังเคราะห์ 54.3 kgCO<sub>2</sub>Eq. แต่การใช้งานวัสดุคอมโพสิตชีวภาพแสดงผลที่น้อยกว่าถึง 4 เท่า (12.5 kgCO<sub>2</sub>Eq.) แสดงให้เห็นศักยภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ดี และศักยภาพของวัสดุคอมโพสิตสังเคราะห์ที่ส่งผลมากกว่าอย่างมากเมื่อเทียบกับวัสดุคอมโพสิตชีวภาพสำหรับการก่อให้เกิดกระบวนการที่ทำให้แหล่งน้ำมีสารอาหารมากเกินไปหรือกระบวนการยูโทรฟิเคชันในน้ำจืด (Eutrophication Freshwater, kgPEq.) ซึ่งก่อให้เกิดความเข้มข้นสูงของปริมาณธาตุ

อาหารอย่าง ฟอสฟอรัส โดยผลกระทบนี้อาจทำให้การเจริญเติบโตของสาหร่ายบุ่ม (Algal Bloom) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และส่งผลให้ระบบนิเวศทางน้ำลดลงหรือเสียหายได้ เช่น การขาดออกซิเจนในน้ำ น้ำเน่าเสีย และสารพิษ เป็นต้น รวมไปถึงพลังงานที่ใช้และความเป็นพิษต่อมนุษย์ด้านการก่อมะเร็ง นอกจากนี้ยังมีข้อมูลยืนยันว่าวัสดุคอมโพสิตสังเคราะห์จะก่อให้เกิดอันตรายที่สูงกว่าวัสดุคอมโพสิตเกรดชีวภาพทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (Ramachandran et al., 2023)



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างตัวชี้วัดของการวัดระดับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Ramachandran et al., 2023)

หลังจากหมดอายุการใช้งานวัสดุคอมโพสิตสังเคราะห์แล้วนั้น ปัญหาสำหรับการกำจัดคอมโพสิตสังเคราะห์ยังคงมีประเด็นที่ต้องระวังเกี่ยวกับผลกระทบอยู่เหมือนกัน เนื่องจากว่าคอมโพสิตสังเคราะห์เหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เองโดยธรรมชาติหรืออาจจะใช้เวลาย่อยสลายที่ยาวนานอาจใช้เวลานานหลายร้อยปี วิธีการที่มักจะนิยมใช้สำหรับการกำจัดคอมโพสิตสังเคราะห์คือการเผาทำลายและการฝังกลบดิน ซึ่งทั้งสองวิธีที่ใช้กันในปัจจุบันนั้นล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การปล่อยสารมลพิษออกสู่อากาศและสภาพแวดล้อมโดยรอบหากนำไปเผาทำลาย หรือการปล่อยมลพิษลงสู่ดินและแหล่งน้ำหากนำไปฝังกลบดิน (Ziemińska-Stolarska et al., 2024)

แม้ว่าคอมโพสิตสังเคราะห์จะมีประโยชน์อย่างมากในด้านความแข็งแรงและความทนทานที่สูง แต่ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมก็เป็นสิ่งที่ต้องตระหนักและหาแนวทางที่จะช่วยลดผลกระทบจากปัญหาเหล่านี้ให้ได้ ทางออกอย่างยั่งยืนของปัญหาเหล่านี้ของคอมโพสิตสังเคราะห์คือการใช้และพัฒนาเทคโนโลยีที่จะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้วัสดุทางเลือกที่ยั่งยืน วัสดุจากธรรมชาติ หรือวัสดุหมุนเวียน วัสดุรีไซเคิล เป็นต้น สำหรับสารเนื้อหลักหรือเมทริกซ์มีตัวเลือกที่ยั่งยืนจากการพัฒนาเรซินทางชีวภาพที่ทำให้สามารถย่อยสลายเรซินได้ง่ายมากยิ่งขึ้น (Pokharel et al., 2022) อีกทั้งยังลดพลังงานจากกระบวนการผลิตได้อีกด้วย และสำหรับ

ตัวเสริมแรงที่เป็นเส้นใยจากธรรมชาติทั้งจากเส้นใยพืช เช่น เส้นใยแฟลกซ์ เส้นใยไผ่ เส้นใยปอ เส้นใย กัญชา เป็นต้น และเส้นใยจากขนสัตว์ เช่น เส้นใยขนแกะ เส้นใยไหม เป็นต้น ดังรูป 4.4 เส้นใย ธรรมชาติเหล่านี้เป็นตัวเลือกที่ยั่งยืนที่สามารถนำมาเป็นเส้นใยเสริมแรงสำหรับวัสดุคอมโพสิตทาง ชีวภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างเส้นใยจากธรรมชาติ (Kator et al., 2024)

#### 4.3 วัสดุทางเลือกที่ยั่งยืน ทั้งเมทริกซ์ เส้นใยเสริมแรงและแกนกลาง

แนวทางที่กำลังได้รับความสนใจจากนักพัฒนาและนักวิจัยหลายกลุ่มคือตัวเลือกของวัสดุที่มาจากธรรมชาติเนื่องจากเป็นแนวทางที่ให้ความยั่งยืนมากกว่าโดยเฉพาะในกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ที่จะต้องเผชิญกับปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรที่กำลังเกิดขึ้นในปัจจุบัน วัสดุธรรมชาติที่เข้ามาทดแทนอาจช่วยลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นจากวัสดุสังเคราะห์ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูง แม้ว่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ได้จากธรรมชาติอาจไม่แข็งแรงเทียบเท่ากับวัสดุจากการสังเคราะห์ แต่ข้อดีในแง่ของน้ำหนักที่เบากว่า ความยืดหยุ่นสูง ราคาต้นทุนการผลิตที่ถูกลงและที่สำคัญคือความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Elfaleh et al., 2023) ทำให้เหมาะสมกับการใช้งานในโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงในระดับปานกลาง เช่น ชั้นส่วนกึ่งโครงสร้างภายในรถยนต์ ชั้นส่วนอากาศยานไร้คนขับ กลุ่มของตกแต่งและเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น

ปัจจุบันมีการพัฒนาใช้งานเมทริกซ์เกรดชีวภาพ (Biodegradable Matrix) ที่เป็นพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วมักจะถูกผลิตจากแหล่งธรรมชาติที่มาจากพืช เช่น มันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด หรือกรดพอลิแลคติก (Polylactic Acid - PLA) ซึ่งได้จากการหมักน้ำตาล (Vroman & Tighzert, 2009) ความโดดเด่นของเมทริกซ์ประเภทนี้คือมีคุณสมบัติที่สำคัญในการย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อหมดอายุการใช้งาน แต่จุดที่จะต้องให้ความสำคัญคือการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีสภาพอากาศที่รุนแรง อาจส่งผลในข้อจำกัดด้านคุณสมบัติเชิงกลที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงและสภาวะกัดกร่อนบางอย่างได้ (Oun et al., 2024) ในปัจจุบันมีเมทริกซ์เกรดชีวภาพหลายประเภทถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงและความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่สูงขึ้น เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoates - PHA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพประเภทหนึ่งที่ผลิตด้วยจุลินทรีย์และมีความสามารถในการย่อยสลายได้ในสภาพแวดล้อมทางทะเล หรืออีกประเภทที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ มีความแข็งแรงสูง มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและอุณหภูมิสูงกว่า PLA คือ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene Succinate - PBS) (Rafiqah et al., 2021) นอกจากนี้การเสริมแรงให้กับเมทริกซ์สามารถทำได้หลายประเภท ตั้งแต่การใช้งานร่วมกับเส้นใยจากธรรมชาติ เช่น เส้นใยแฟลกซ์ การใช้สารเติมแต่งหรืออนุภาคนาโน เช่น นาโนเซลลูโลส หรืออนุภาคจำพวกแร่ธาตุที่ใช้เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงและเสถียรภาพของวัสดุ ก็เป็นหนึ่งในแนวทางที่มักนิยมใช้เพื่อทำให้เมทริกซ์เกรดชีวภาพนี้มีคุณสมบัติที่โดดเด่นมากยิ่งขึ้น สามารถนำไปแข่งขันและเปรียบเทียบกับเมทริกซ์ประเภทพอลิเมอร์สังเคราะห์ได้

ข้อดีอีกประการของเมทริกซ์เกรดชีวภาพคือสามารถลดการพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตพอลิเมอร์ ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและปริมาณขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันถึงแม้เมทริกซ์เกรดชีวภาพนี้จะมีข้อดีในแง่ของความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่ชัดเจน การผลิตเมทริกซ์เกรดชีวภาพเหล่านี้ยังคงมีต้นทุนที่สูงกว่าเนื่องจากความซับซ้อนในการผลิตที่มีมากกว่าการผลิตเมทริกซ์แบบสังเคราะห์ ทำให้การพัฒนาเมทริกซ์เกรดชีวภาพยังคงเป็นประเด็นที่สำคัญที่นักวิจัยหลายกลุ่มหรือภาคอุตสาหกรรมกำลังให้ความสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างแพร่หลายมากขึ้น

เส้นใยเสริมแรงจากธรรมชาติอย่าง เส้นใยแฟลกซ์ (Flax Fiber) เป็นหนึ่งในเส้นใยจากพืชที่นิยมนำมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงและมักใช้มากในการนำมาเป็นเส้นใยเสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต เส้นใยชนิดนี้ได้มาจากต้นแฟลกซ์ ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นพืชชนิดหนึ่งที่ปลูกได้ง่ายและใช้ทรัพยากรน้อยกว่าพืชเสริมแรงแบบอื่นๆ เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบโครงสร้างหลักของแฟลกซ์ ทำให้มีความแข็งแรง

เชิงกลที่สูงและทนต่อแรงดึงได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดอย่างเส้นใยแก้วชนิดอี (E-Glass Fiber) ที่ให้คุณสมบัติความต้านทานแรงดึงที่ใกล้เคียงกันมากในความหนาแน่นที่เท่ากัน (Parodo et al., 2024) อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบาและมีสีที่สวยงาม เหมาะสำหรับการนำไปตกแต่งเป็นเฟอร์นิเจอร์ หรือแม้แต่อุตสาหกรรมยานยนต์ก็ยังมี การนำคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยแฟล็กซ์เสริมแรงตกแต่งภายในสำหรับรถยนต์บางประเภทอีกด้วย (Yan et al., 2014) อีกคุณสมบัติที่สำคัญของเส้นใยแฟล็กซ์คือการดูดซับแรงกระแทกและเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นที่ดี อีกทั้งยังเข้ากันได้ดีกับเมทริกซ์ประเภทเรซินชีวภาพ (Kazmi et al., 2023) แต่อย่างไรก็ตาม เส้นใยจากธรรมชาติอย่างเส้นใยแฟล็กซ์นี้ยังมีข้อเสียที่เป็นจุดสำคัญคือเรื่องของ การดูดซับความชื้นที่สูง ซึ่งสิ่งนี้จะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งาน ความแข็งแรงและขนาดของวัสดุเมื่อมีการสัมผัสกับความชื้นที่สูงในสภาพแวดล้อม การแก้ปัญหาอย่างรวดเร็วสามารถทำได้โดยการพ่นสารเคลือบที่ผิวของคอมโพสิตหรือจะเป็นการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายต่างชนิดเพื่อให้เส้นใยอิมมิดัวและไม่ดูดซับความชื้นเพิ่มและทนต่อการเสื่อมสภาพได้ (Bekele et al., 2023)



รูปที่ 4.5 ต้นแฟล็กซ์ (The Modern Dane, 2021)

แกนกลางเสริมแรง (Core Material) เป็นส่วนเพิ่มเข้ามาแทรกตรงกลางระหว่างแผ่นคอมโพสิต 2 แผ่น ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต จุดประสงค์หลักของการใช้แกนคือ เพื่อเพิ่มความหนาของโครงสร้าง และช่วยเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด (Moment of Inertia) โดยไม่ทำให้น้ำหนักของโครงสร้างเพิ่มขึ้นมากเกินไป ปัจจุบันแกนที่นิยมใช้จะเป็นแกนแบบโฟมและแกนที่เป็นลักษณะที่มีรูปทรงรังผึ้ง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแกนที่มาจาก การสังเคราะห์และก็จะก่อให้เกิดปัญหาของขยะที่ไม่ย่อยสลายตามมาเมื่อหมดอายุการใช้งาน ทำให้ทางเลือกที่ต้องการแนวทางการลด

ปริมาณขยะและความยั่งยืนในภาคอุตสาหกรรม การใช้งานแกนกลางจากการรีไซเคิล (Recycled Core Materials) ที่เป็นการแปรรูปขยะเหลือทิ้งมาเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล ทำให้สามารถนำมาใช้เพื่อเป็นแกนชั้นกลางของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตได้ วัสดุแกนกลางที่พบได้ทั่วไปในการนำมารีไซเคิล ได้แก่ โฟมโพลียูรีเทนจากอุตสาหกรรมรถยนต์ แผ่นกระดาษลูกฟูก หรือเส้นใยจากวัสดุเหลือทิ้ง เช่น กล้วยงา ปาล์มและชานอ้อย เป็นต้น (Valenzuela Expósito et al., 2024)

หนึ่งในแกนกลางเสริมแรงที่มาจากรีไซเคิลที่นิยมใช้งานในอุตสาหกรรมคือ Lantor Soric Core ดังรูปที่ 4.6 เป็นวัสดุแกนที่รีไซเคิลมาจากขวดพลาสติก PET มีลักษณะเป็นรูปทรงแบบรังผึ้ง ซึ่งถูกออกแบบมาสำหรับการใช้งานร่วมกับเส้นใยแฟล็กซ์และเมทริกซ์เกรดชีวภาพ (Soric®, 2025b) วัสดุแกนประเภทนี้เป็นโครงสร้างแบบเซลล์ปิด ทำให้มีความแข็งแรงที่สูงและไม่ดูดซับเมทริกซ์มากเกินไป ทำให้น้ำหนักโดยรวมหลังผ่านกระบวนการผลิตไม่ได้เพิ่มขึ้นมากอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมการบิน ยานยนต์ เรือ หรืออุตสาหกรรมที่ต้องการวัสดุที่มีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ซึ่งวัสดุแกนประเภทนี้จะถือว่าเป็นแกนที่ยั่งยืน หมุนเวียนทรัพยากร ลดต้นทุนการผลิตเพราะต้นทุนผลิตจะถูกกว่าการผลิตแกนใหม่ ลดของเสียจากอุตสาหกรรมและช่วยลดปริมาณขยะที่ไม่ย่อยสลายได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติของแกนแบบรีไซเคิลนี้อาจจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิตและการรีไซเคิล



รูปที่ 4.6 แกนแบบ Lantor Soric (Epoxyshop, 2025)

โดยสรุป วัสดุทางเลือกจากธรรมชาติไม่ว่าจะเป็นเมทริกซ์เกรดชีวภาพ เส้นใยแฟล็กซ์ หรือแกนกลางจากการรีไซเคิล ล้วนมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมวัสดุให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ทั้งในแง่ของการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ลดของเสีย และเพิ่มโอกาสในการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน แนวทางการพัฒนาและปรับปรุงวัสดุเหล่านี้ยังคงเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจและมีศักยภาพในการเติบโตอย่างต่อเนื่องในอนาคต ซึ่งทั้ง 3 ประเภทของวัสดุทั้ง เมทริกซ์เกรด

ชีวภาพ เส้นใยแฟลกซ์ และวัสดุแกนจากการรีไซเคิลนี้ จะเป็นองค์ประกอบหลักในกระบวนการผลิต โครงสร้างแบบแกนคอมโพสิตในงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

#### 4.4 การขึ้นรูปและการทดสอบวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแฟลกซ์

กระบวนการขึ้นรูปของวัสดุคอมโพสิตมีกระบวนการขึ้นรูปที่หลากหลายแบบขึ้นอยู่กับ ลักษณะความต้องการที่จะนำวัสดุไปใช้งาน ประเภทของวัสดุและกระบวนการที่เลือกใช้ผลิตเป็นส่วน สำคัญที่จะต้องพิจารณาสำหรับการผลิตวัสดุคอมโพสิต การผลิตวัสดุคอมโพสิตโดยทั่วไปแล้วกระบวนการ ขึ้นรูปอย่างง่ายของวัสดุคอมโพสิตคือการขึ้นรูปด้วยมือทั่วไป (Hand Lay-Up) ด้วยวิธีการที่จัดวาง เส้นใยลงไปในแม่พิมพ์ก่อนแล้วใช้ลูกกลิ้งหรือแปรงเติมและทาเมทริกซ์หรือเรซินให้ทั่วเพื่อให้ซึมเข้า เส้นใยและปล่อยให้แข็งตัวตามอุณหภูมิทั่วไป ซึ่งเหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูปรวดเร็ว รูปร่างไม่ ซับซ้อน เช่น งานต้นแบบหรืองานตัวอย่าง เป็นต้น สำหรับโครงสร้างที่ต้องการสัดส่วนของเส้นใยและ เมทริกซ์ที่สม่ำเสมอ รวมถึงคุณสมบัติเชิงกลที่ทั่วถึงตลอดทั้งแผ่นคอมโพสิต อาจจะใช้วิธีการสำหรับ กระบวนการผลิตคอมโพสิต เช่น วิธีการแวคคัม อินฟิวชัน (Vacuum Infusion Resin Process) ซึ่ง เป็นวิธีที่ทำให้กระบวนการขึ้นรูปเป็นระบบปิด และใช้ระบบสุญญากาศเพื่อทำให้ความดันบรรยากาศ ดันเมทริกซ์เข้าสู่เส้นใย

กระบวนการผลิตคอมโพสิตสำหรับบทนี้จะใช้เส้นใยแฟลกซ์สำหรับนำมาใช้เป็นเส้นใย เสริมแรงร่วมกับเมทริกซ์สองแบบคือแบบสังเคราะห์และเกรดชีวภาพสำหรับสารเนื้อหลัก กระบวนการผลิตจะขึ้นรูปผ่านวิธีการแวคคัม อินฟิวชัน (Vacuum Infusion Resin Process) หลัง ผ่านกระบวนการผลิตคอมโพสิตจะถูกนำเข้าสู่อบเพื่อบ่มเรซินให้มีประสิทธิภาพสูงสุดด้วยการให้ อุณหภูมิสูงสุดที่ 100°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย แฟลกซ์เมื่อผ่านการรับแรงดัดงอด้วยการทดสอบการรับแรงดัดงอแบบ 3 จุด (3 Point Bending) ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D7264 ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine - UTM) เพื่อศึกษาคุณสมบัติความต้านทานแรงดัดงอเมื่อใช้เส้นใยเสริมแรงจากธรรมชาติ และเมทริกซ์ทั้ง 2 ประเภท

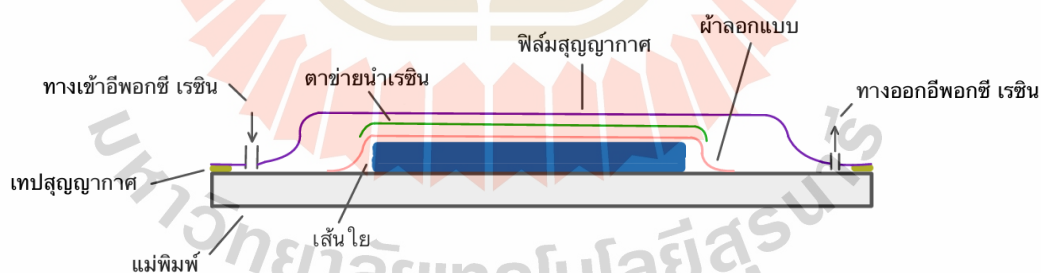
##### 4.4.1 วัสดุขึ้นรูป

วัสดุคอมโพสิตที่ใช้ขึ้นรูปคือมีเส้นใยเสริมแรงจากเส้นใยแฟลกซ์และเมทริกซ์สอง ประเภทคือ เมทริกซ์แบบสังเคราะห์และเมทริกซ์เกรดชีวภาพ เพื่อศึกษาความแข็งแรงของเส้นใย แฟลกซ์กับเมทริกซ์ทั้ง 2 แบบว่าเมทริกซ์ประเภทใดให้คุณสมบัติความต้านทานแรงดัดงอที่ดีมากกว่า

โดย เมทริกซ์แบบสังเคราะห์คือ อีพอกซีเรซิน ชนิด ER570 และเมทริกซ์เกรดชีวภาพคือ SR Green Poxy 33 ซึ่งจะมีชิ้นงานทดสอบซ้ำทั้งหมด 5 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่างชิ้นงาน

#### 4.4.2 กระบวนการขึ้นรูป

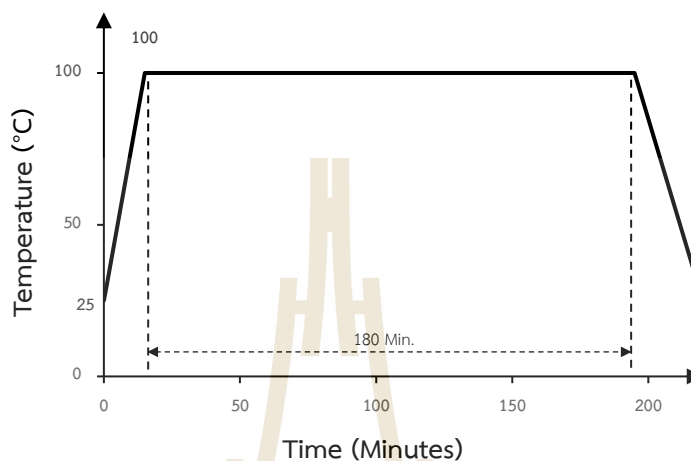
กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการแวกคัม อินฟิวชันจะเริ่มต้นด้วยแม่พิมพ์อลูมิเนียมที่มีขนาดใหญ่เพียงพอสำหรับขนาดของชิ้นงานทดสอบ โดยจะผ่านการทำความสะอาดด้วยสารทำความสะอาดชื่อว่า อาซิโตน (Acetone) เพื่อขจัดคราบไขมันและสิ่งสกปรกอื่นๆ ที่บริเวณผิวของแม่พิมพ์ จากนั้นแม่พิมพ์จะถูกเคลือบด้วยน้ำยาถอดแบบ ซึ่งนิยมใช้สารโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol – PVA) หรืออาจจะใช้แว็กซ์ (Wax) เคลือบผิวของแม่พิมพ์แทนได้ โดยสารถอดแบบเหล่านี้จะช่วยทำให้ชิ้นงานนั้นไม่ติดกับแม่พิมพ์จนไม่สามารถแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ ขั้นตอนถัดไปคือการนำเส้นใยแฟลกซ์ที่ถูกตัดตามขนาด  $220 \times 100 \text{ mm}^2$  ในทิศทางเดียวกันทั้งหมดที่  $0^\circ$  (Unidirectional) วางซ้อนกันทั้งหมด 6 ชั้น ก่อนจะถูกรางด้วยผ้าลอกแบบ (Peel Ply) เพื่อให้สามารถลอกแผ่นชิ้นงานออกจากวัสดุขึ้นรูปอื่นๆ ได้ จากนั้นชิ้นงานจะถูกรางทับด้วยตาข่ายนำเรซิน (Infusion Mesh) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นผ้าตาข่ายสานกันสำหรับช่วยให้เรซินกระจายตัวไปทั่วบริเวณของเส้นใย ไม่ให้เรซินกระจุกตัวอยู่บริเวณใดบริเวณหนึ่งของแม่พิมพ์มากเกินไป ก่อนจะถูกห่อหุ้มด้วยฟิล์มสุญญากาศ (Vacuum Bag) เป็นชั้นสุดท้าย เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศเข้าสู่ระบบในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป โดยจะต่อท่อสำหรับทางเข้าของเรซินและท่อทางออกที่ต่อเข้ากับเครื่องปั๊มสุญญากาศเพื่อดูอากาศออกไปอีกฝั่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กระบวนการแวกคัมอินฟิวชัน

หลังจากที่กระบวนการแวกคัม อินฟิวชันเสร็จสมบูรณ์ ชิ้นงานขึ้นรูปคอมโพสิตจะถูกนำเข้าสู่อบเพื่อบ่มเรซินด้วยอุณหภูมิ  $100^\circ \text{C}$  เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่  $5^\circ \text{C}$  ต่อนาที เมื่อครบ 3 ชั่วโมงจึงจะลดความร้อนลงมาในระดับอุณหภูมิห้องที่  $30^\circ \text{C}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปทั้งหมดนี้จะทำเช่นเดียวกันกับเมทริกซ์ทั้ง 2 ประเภท ซึ่งจะใช้เวลาทั้งหมดในตู้อบกระบวนการนี้ประมาณ 220 นาที หลังจากนั้น

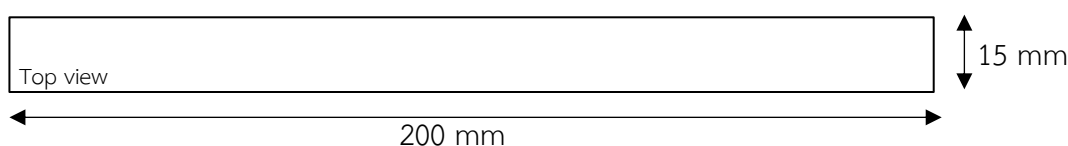
คอมโพสิตจะถูกตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากการนำออกจากตู้อบ ก่อนจะเข้าสู่การเตรียมชิ้นงานคอมโพสิตสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 4.8 อัตราการให้ความร้อนที่ 5°C / min ของการบ่มเรซิน

#### 4.4.3 การทดสอบคุณสมบัติแรงดึงของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์

อย่างไรก็ตาม คอมโพสิตที่ใช้เส้นใยแฟลกซ์ยังคงมีข้อจำกัดด้านความแข็งแรงและความทนทานเมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยสังเคราะห์ เช่น คาร์บอนไฟเบอร์หรือไฟเบอร์กลาส ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมเชิงกลของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ภายใต้แรงดึงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากสามารถช่วยให้เข้าใจถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุ รวมถึงสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาวัสดุคอมโพสิตให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น การทดสอบเพื่อประเมินคุณสมบัติความต้านทานแรงดึงของคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแฟลกซ์จะอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D7264 โดยชิ้นงานทดสอบจะถูกตัดให้มีขนาดทดสอบอยู่ที่ 200 × 15 mm<sup>2</sup> ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และความหนาของชิ้นงานทดสอบแต่ละชิ้นจะแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 สำหรับการทดสอบแรงดึงแบบ 3 จุด ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM) รุ่น LD100 โดยกำหนดความเร็วเคลื่อนที่ของหัวกดด้านบนเท่ากับ 2 mm/min ระยะของฐานรองรับ (Support Span) จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนที่เทียบกับความหนาคือ 32:1 หมายความว่าถ้าชิ้นงานทดสอบมีความหนา 1 mm ระยะของฐานรองรับจะเท่ากับ 32 mm และการทดสอบในแต่ละประเภทจะมีการทดสอบซ้ำในชิ้นงานที่มีเงื่อนไขขึ้นรูปเหมือนกัน 5 ชิ้น



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างขนาดชิ้นงานทดสอบ

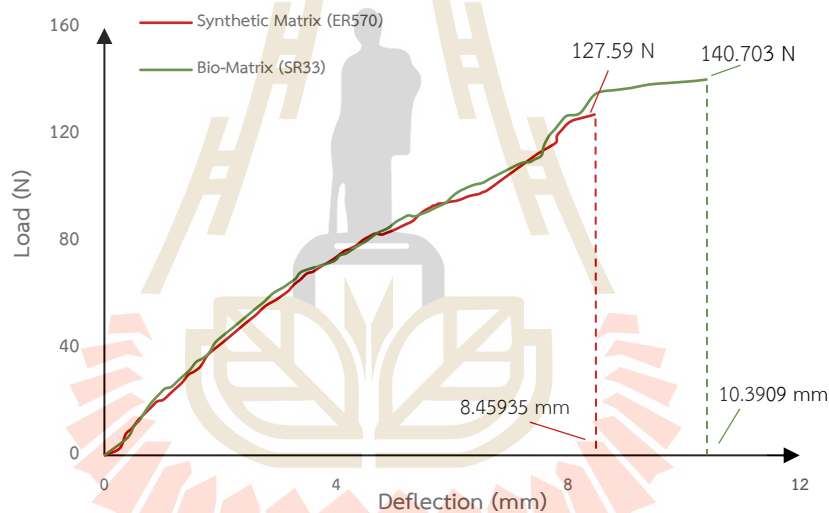
ตารางที่ 4.1 มาตรฐานและขอบเขตการทดสอบวัสดุ

การทดสอบความต้านทานแรงดัดงอ		
ประเภทเมทริกซ์	อีพอกซี เรซิน ER570 (เมทริกซ์สังเคราะห์)	ไบโอ-อีพอกซี SR33 (เมทริกซ์เกรดชีวภาพ)
จำนวนชิ้นงานทดสอบ	5	5
ขนาดชิ้นงาน (ยาว x กว้าง x หนา)	200 x 15 x 1 mm	200 x 15 x 1 mm
ความเร็วหัวกด	2 mm/min	2 mm/min
ระยะฐานรองรับ (Span)	32 mm	32 mm
มาตรฐานทดสอบ	ASTM D7264	

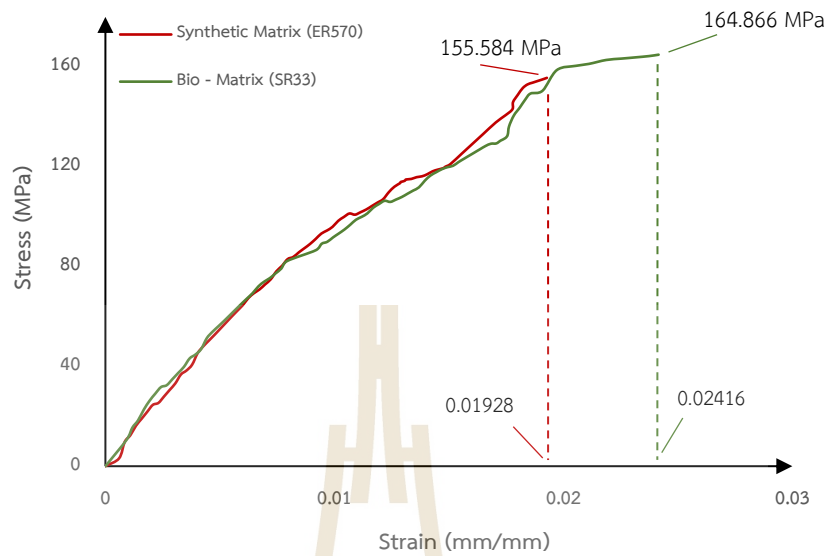
#### 4.4.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติแรงดัดงอของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์

ในการทดสอบวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์เพื่อประเมินคุณสมบัติเชิงกลและพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงกระทำเมื่อต้องรับภาระโหลดแบบดัดงอ โดยพิจารณาถึงปัจจัยที่อาจมีผลต่อความแข็งแรงและความสามารถในการรับแรงของวัสดุ ซึ่งรวมถึงประเภทของเรซินที่ใช้เป็นเมทริกซ์และกระบวนการผลิต การทดสอบความต้านทานแรงดัดงอถูกดำเนินการตามมาตรฐานที่เหมาะสม โดยวิเคราะห์การรับโหลดกระทำแบบดัดงอสูงสุด (Maximum Load) ระยะการโก่งตัวของชิ้นงานทดสอบ (Deflection) ค่าความเค้นดัด (Flexural Stress) ค่าความเครียดของการเสียรูปจากการดัดงอ (Flexural Strain) และความสัมพันธ์ของทั้งค่าความเค้นและค่าความเครียด เพื่อทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ภายใต้โหลดดัดงอ โดยพบว่าพฤติกรรมของความต้านทานโหลดกระทำแบบดัดงอและระยะการโก่งตัวมีค่าสูงสุดสำหรับเมทริกซ์แบบสังเคราะห์คือ 127.59 N และ 8.45935 mm ซึ่งเมทริกซ์เกรดชีวภาพวัดค่าได้ 140.703 N และ 10.3909 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.10 รวมถึงการวิเคราะห์ค่าความเค้นดัดงอและค่าความเครียดของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ โดยพบว่าคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์มีพฤติกรรมต้านทานความเค้นดัดงออยู่ที่ 155.584 MPa และมีค่าความเครียด 0.01928 mm/mm สำหรับเมทริกซ์แบบสังเคราะห์ และคุณสมบัติความต้านทานแรงดัดงอพร้อมกับค่าความเครียดของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์พร้อมกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพคือ 164.866 MPa และ 0.02416 mm/mm ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ตามลำดับ จากผลลัพธ์ที่แสดงพฤติกรรมภายใต้การรับแรงดัดงอของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์นั้นพบว่า ความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยแฟลกซ์และเมทริกซ์แบบเกรดชีวภาพให้ประสิทธิภาพการรับโหลดดัดงอได้สูงกว่าเส้น

ใยแฟลกซ์ที่ขึ้นรูปกับเมทริกซ์แบบสังเคราะห์ ความสามารถในการรับโหลดแบบดัดงออยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานวัสดุที่มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่ดี อย่างไรก็ตามปัจจัยที่น่าสนใจสำหรับการทดสอบการรับโหลดแบบดัดงอของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ของทั้ง 2 ประเภทเมทริกซ์นี้ มีค่าความรับแรง ระยะโก่งตัว รวมถึงค่าความเค้นดัดงอและค่าความเครียดเสียรูปที่ไม่ได้แตกต่างกันมากเกินไป ซึ่งอาจจะเกิดจากสภาพแวดล้อมของการทดสอบที่อาจจะเอื้อต่อการทดลองประเภทใดประเภทหนึ่งมากกว่ากัน หรืออาจเกิดในขณะกระบวนการผลิตคอมโพสิตที่ทำให้เมทริกซ์แบบสังเคราะห์ กระจายตัวไม่สม่ำเสมอไม่ครอบคลุมทั้งเส้นใย ซึ่งอาจจะส่งผลต่อคุณสมบัติของคอมโพสิตได้ แต่อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ที่ขึ้นรูปร่วมกับเมทริกซ์ทั้ง 2 ประเภทมีความใกล้เคียงกันในแง่ของคุณสมบัติเชิงกล สิ่งนี้ช่วยยืนยันและเป็นแนวทางใหม่สำหรับการใช้งานเมทริกซ์เกรดชีวภาพเพื่อความยั่งยืนทางทรัพยากรและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของแรงดัดงอและการโก่งตัว



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของความเค้นดัดงอและความเครียด

โดยสรุปจากการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมและคุณสมบัติการต้านทานแรงดัดงอของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ร่วมกับเมทริกซ์ 2 ประเภทคือ เมทริกซ์แบบสังเคราะห์และเมทริกซ์เกรดชีวภาพ โดยพบว่าจากกระบวนการผลิตคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ร่วมกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพนั้นให้ผลลัพธ์ในส่วนของพฤติกรรมและคุณสมบัติการต้านทานแรงดัดงอสูงกว่าทั้งการรับโหลดสูงสุดขณะทำการทดสอบ (Maximum Load) และระยะการโก่งตัว (Deflection) แสดงให้เห็นค่าที่สูงกว่าเช่นเดียวกัน เนื่องจากเมทริกซ์เกรดชีวภาพให้ความเหนียวและความยืดหยุ่นกับคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์มากกว่าแบบสังเคราะห์ เช่นเดียวกับกับค่าความเค้นดัดงอ (Flexural Stress) ที่เมทริกซ์เกรดชีวภาพให้ค่าที่สูงกว่าเมทริกซ์แบบสังเคราะห์ รวมถึงค่าความเครียด (Flexural Strain) ที่เกิดจากความเค้นในวัสดุ จากผลลัพธ์การประเมินคุณสมบัติการดัดงอของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์สามารถสรุปได้ว่า การใช้งานเส้นใยเสริมแรงจากธรรมชาติให้ผลลัพธ์ที่ดีเมื่อใช้งานร่วมกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นกระบวนการผลิตคอมโพสิตก็เป็นส่วนสำคัญในการทำให้คุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตมีความแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับวิธีการและเทคนิคของการผลิต ในบทถัดไปจะกล่าวถึงการเพิ่มคุณสมบัติของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ร่วมกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพโดยผ่านกระบวนการผลิตและวิธีอื่นเพิ่มเติม

## บทที่ 5

### การพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเส้นใยแฟลกซ์

วัสดุคอมโพสิตที่เสริมด้วยเส้นใยธรรมชาติกำลังตอบสนองความต้องการในหลายอุตสาหกรรมที่ต้องการความยั่งยืนในการใช้งานคอมโพสิต เส้นใยแฟลกซ์เป็นหนึ่งในเส้นใยเสริมแรงจากธรรมชาติที่ได้รับความสนใจเป็นลำดับต้นๆ ด้วยโครงสร้างทางกายภาพที่เหมาะสมต่อการนำมาเสริมแรงในคอมโพสิต อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ยังคงเป็นประเด็นสำคัญในการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้มาซึ่งการใช้งานที่เหมาะสมในแต่ละอุตสาหกรรม ในบทนี้จึงเป็นการมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ผ่านการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปแบบต่างๆ เช่น การใช้สารเติมแต่ง การปรับปรุงการบ่มตัวของเรซิน เป็นต้น

#### 5.1 การเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตผ่านกระบวนการขึ้นรูป

คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในช่วงหลายปีมานี้ ด้วยเหตุผลหลักของความต้องการที่จะทำให้วัสดุคอมโพสิตนั้นเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีความยั่งยืน สามารถหมุนเวียนและย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ เส้นใยแฟลกซ์เป็นหนึ่งในเส้นใยธรรมชาติที่ได้รับความนิยมนำมาเสริมแรงให้กับคอมโพสิตเพราะมีโครงสร้างเซลล์ลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีค่าของมอดูลัสยืดหยุ่นที่สูง (Elastic Modulus) มีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้ดี ลดความเปราะที่เกิดขึ้นในคอมโพสิตและเพิ่มความเหนียวในตัวคอมโพสิตได้ ทำให้เหมาะต่อการใช้งานเป็นวัสดุเสริมแรงในคอมโพสิต (Colamartino et al., 2023) อีกทั้งยังเข้ากันได้เป็นอย่างดีเมื่อใช้งานเส้นใยแฟลกซ์ร่วมกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพหรือไบโอเมทริกซ์ที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ เช่น กรดพอลิแลกติก พอลิเมอร์ชีวภาพจากแป้ง ซึ่งย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี (Sarkar et al., 2020b) อย่างไรก็ตาม เพื่อให้คอมโพสิตมีคุณสมบัติเชิงกลที่สูงสามารถนำไปใช้งานได้ จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติผ่านกระบวนการผลิตและองค์ประกอบของวัสดุให้เหมาะสม

การปรับปรุงคุณสมบัติของคอมโพสิตผ่านกระบวนการขึ้นรูปมีหลากหลายวิธีการ ตั้งแต่การบำบัดทางเคมี การใช้สารเคลือบ สารเติมแต่ง เป็นต้น การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยแฟลกซ์ก็มีจุดสนใจอยู่หลายประการ เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ วิธีที่นิยมใช้ได้แก่ การบำบัดด้วยการใช้สารละลายต่าง หรือการบำบัดด้วยอัลคาไลน์ (Alkaline Treatment) เพื่อ

กำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนออกจากพื้นผิวของเส้นใยแฟลกซ์ ทำให้ผิวของเส้นใยหยาบมากขึ้นและเพิ่มผิวสัมผัสกับเมทริกซ์ (Prabhu et al., 2022) นอกจากนี้ยังมีการใช้สารยึดเกาะบางประเภทเช่น ซิลาเนส (Silane Coupling Agents) ซึ่งช่วยสร้างพันธะทางเคมีกับเมทริกซ์และเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยแฟลกซ์และเมทริกซ์ (Yang et al., 2023) สำหรับเมทริกซ์ชีวภาพที่โดยทั่วไปแล้วมักจะมีสภาพเปราะ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต การใช้สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น เช่น พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol - PEG) เพื่อลดความเปราะของเมทริกซ์และช่วยเพิ่มความเหนียว รวมถึงความสามารถในการกระจายตัวของเส้นใยแฟลกซ์ภายในเมทริกซ์ นอกเหนือจากการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยแฟลกซ์ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายและการปรับปรุงเมทริกซ์แล้วนั้น โครงสร้างของคอมโพสิตก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ การเลือกใช้รูปแบบการจัดเรียงของเส้นใย เช่น แบบทอ (Woven Fabric) หรือแบบสุ่ม (Random Orientation) มีผลต่อการกระจายแรงและการต้านทานการแตกร้าวของคอมโพสิต นอกจากนี้ การใช้เทคนิคการผลิตคอมโพสิตที่ต่างกัน เช่น การขึ้นรูปด้วยมือ (Hand Lay-up), แวกคัม แบ็คคิง (Vacuum bagging), แวกคัม อินฟิวชัน (Vacuum Infusion Resin) ล้วนแล้วทำให้คุณสมบัติเชิงกลแตกต่างกันออกไป

โดยสรุป การพัฒนาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตมีตั้งแต่การปรับปรุงทั้งก่อนกระบวนการขึ้นรูป ระหว่างกระบวนการขึ้นรูปและไปจนถึงหลังจากที่ขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว ซึ่งล้วนแล้วแต่ให้คุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันออกไปให้เหมาะสมกับแต่ละความต้องการที่จะนำคอมโพสิตไปใช้งาน รวมถึงการนำเทคโนโลยีใหม่ๆ เช่น การใช้สารอนุภาคนาโนเสริมแรง หรือการปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยการควบคุมอุณหภูมิและความดัน สามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ การพัฒนาคอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติไม่เพียงช่วยให้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูงขึ้น แต่ยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและตอบสนองต่อแนวโน้มของอุตสาหกรรมที่มุ่งเน้นความยั่งยืนอีกด้วย

ในบทนี้จะทำการศึกษาคูณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ร่วมกับเมทริกซ์ชีวภาพ โดยการวิเคราะห์เกี่ยวกับความต้านทานแรงดัดงอ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยการทดสอบส่วนใหญ่จะให้ความสำคัญกับการทดสอบแรงดัดแบบ 3 จุด เพื่อให้ได้มาของข้อมูลเกี่ยวกับความสามารถของคอมโพสิตในการรับแรง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบโครงสร้างที่ต้องรับน้ำหนัก โดยที่คอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ร่วมกับเมทริกซ์ชีวภาพนี้นั้น จะถูกปรับปรุงและพัฒนาคุณสมบัติผ่านการใช้อุณหภูมิขณะที่บ่มตัว การใช้สารเติมแต่งที่มาจากเถ้าจากการเผาน้ำมันเตา และการใช้แผ่นเสริมแรง Lantor Soric เพื่อใช้เสริมความหนาของคอมโพสิตให้

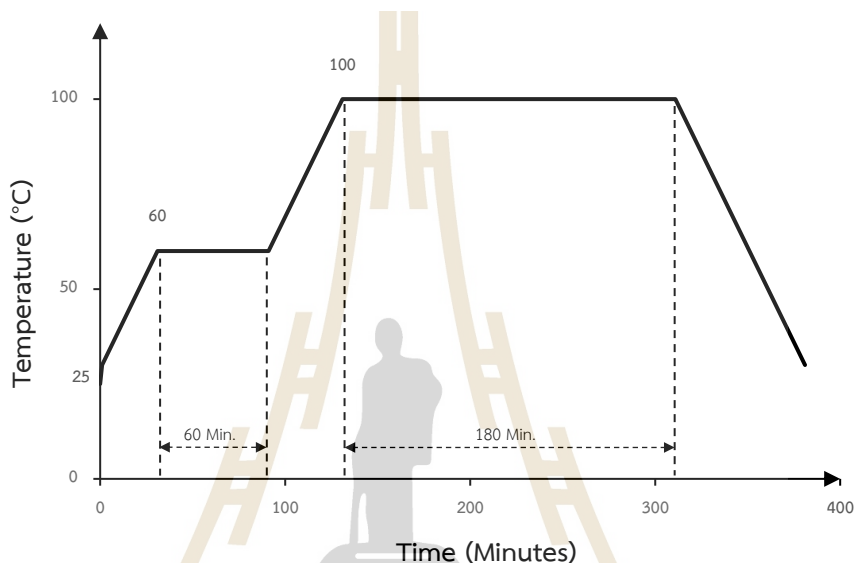
เป็นโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต โดยการพัฒนาทั้งหมดจะถูกทดสอบด้วยมาตรฐานการทดสอบความต้านทานแรงดัดงอของคอมโพสิต และวิเคราะห์จุดสำคัญของพฤติกรรมจากการรับแรงดัดงอ (Maximum Load) ระยะโก่งตัว (Deflection) ความเค้นดัดงอ (Flexural Stress) และความเครียด (Flexural Strain) ที่มาจากการทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด (3 Point Bending) ผ่านเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM)

## 5.2 การปรับปรุงด้วยการบ่มตัวของเรซิน

การบ่มตัวของเมทริกซ์หรือเรซินเป็นกระบวนการที่สำคัญในการผลิตวัสดุคอมโพสิต ซึ่งการบ่มเรซินนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงจากสถานะของเหลวของเรซินไปเป็นของแข็งผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารทำให้แข็ง (Hardener) ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและกลไกของเรซินอย่างมีนัยสำคัญ การปรับปรุงด้วยการบ่มตัวของเรซินจึงเป็นกระบวนการที่จะต้องให้ความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของคอมโพสิตปลายทาง เช่น ความแข็งแรง ความทนทาน ความสามารถในการรับแรง และความเสถียรของโครงสร้าง การบ่มตัวของเรซินมีอยู่หลายวิธีซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินและการใช้งานที่ต้องการ โดยอย่างง่ายที่สุดคือเมื่อเรซินผสมกับสารทำให้แข็งแล้ว ก็ปล่อยให้แข็งตัวเองตามอุณหภูมิห้องทั่วไปซึ่งระยะเวลาที่ปล่อยให้แข็งขึ้นอยู่กับประเภทนั้นๆ ของเรซิน เช่น เรซินประเภทเทอร์โมเซต (thermosetting resin) อย่าง อีพ็อกซี (epoxy), พอลิเอสเทอร์ (polyester) จะต้องผ่านกระบวนการบ่มตัวเพื่อให้แข็งตัวถาวร การบ่มตัวนี้สามารถทำได้โดยใช้ความร้อนจากตู้อบ สารเร่งปฏิกิริยา การบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ ความร้อนจากรังสีอินฟราเรด หรือในบางกรณีอาจใช้แสงอัลตราไวโอเลต (UV) ซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการบ่มให้สั้นลงและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการได้อย่างมาก ดังนั้น การปรับปรุงด้วยการบ่มตัวของเรซินจึงเป็นกระบวนการที่ต้องมีการควบคุมและออกแบบอย่างละเอียดเพื่อให้ได้คุณสมบัติของวัสดุตามที่ต้องการ ไม่ว่าจะเป็นการบ่มด้วยความร้อน ความดัน รังสี หรือเทคนิคอื่นๆ

การพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟล็กซ์ที่ขึ้นรูปร่วมกับเมทริกซ์สังเคราะห์จะถูกปรับปรุงในระหว่างกระบวนการผลิตแบบแวคคัม (Vacuum Infusion Resin) โดยการขึ้นรูปจะใช้ขั้นตอนเหมือนกันกับรายละเอียดในหัวข้อ 4.4.2 กระบวนการขึ้นรูป โดยจะใช้จำนวนชั้น (Layers) ของเส้นใยแฟล็กซ์ซ้อนกันทั้งหมด 6 ชั้น มีขนาด  $220 \times 100 \text{ mm}^2$  ในทิศทางเดียวกันทั้งหมดคือ 0 องศา เมื่อแล้วเสร็จกระบวนการแวคคัม อินฟิวชันแล้วนั้น คอมโพสิตจะถูกนำเข้าสู่ตู้อบเพื่อบ่มเรซิน แต่จะถูกกำหนดให้ใช้รูปแบบการให้ความร้อนแบบใหม่ที่มีอัตราความร้อน  $1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยจะเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราความร้อนนี้ไปจนถึงอุณหภูมิที่ 60 °C จากนั้นค้างคงที่ไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนจะถูกเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 1 °C/min ไปจนถึง 100 °C โดยรักษาสภาพอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนจะปล่อยให้เย็นตัวลงมาจนถึงอุณหภูมิห้องทั่วไปด้วยอัตรา -1 °C/min และปล่อยให้เย็นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากเสร็จสิ้นก็จะเข้าสู่การเตรียมชิ้นงานคอมโพสิตเพื่อสำหรับการทดสอบต่อไป



รูปที่ 5.1 อัตราการให้ความร้อนที่ 1°C / min ของการบ่มเรซิน

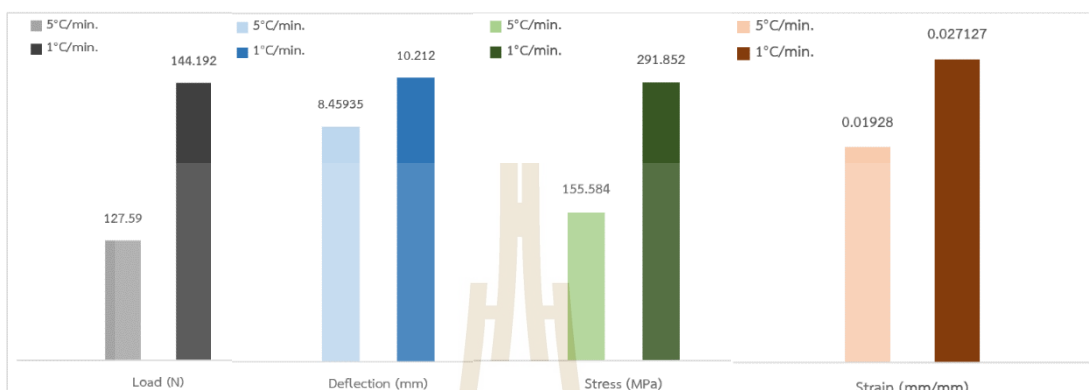
มาตรฐานการทดสอบแบบ ASTM D7264 จะถูกใช้เพื่อกำหนดทิศทางการทดสอบในครั้งนี้ เพื่อประเมินคุณสมบัติความต้านทานแรงดัดงอแบบ 3 จุด ของคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแฟลกซ์ ที่จะเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการบ่มตัวเมทริกซ์ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ต่างกัน 2 รูปแบบคือ 5 °C/min และ 1 °C/min โดยชิ้นงานทดสอบจะถูกตัดให้มีขนาดทดสอบอยู่ที่ 200 x 15 mm<sup>2</sup> และความหนาของชิ้นงานทดสอบจะแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 สำหรับการทดสอบความต้านทานแรงดัดงอคอมโพสิตจะผ่านการประเมินคุณสมบัติด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM) รุ่น LD100 โดยกำหนดความเร็วเคลื่อนที่ของหัวกดด้านบนเท่ากับ 2 mm/min ระยะของฐานรองรับ (Support Span) จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนที่เทียบกับความหนาคือ 32:1 หมายความว่าระยะของฐานรองรับจะเท่ากับ 32 mm สำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีความหนา 1 mm และการทดสอบในแต่ละประเภทจะมีการทดสอบซ้ำในชิ้นงานที่มีเงื่อนไขขึ้นรูปเหมือนกัน 5 ชิ้น

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดชิ้นงานทดสอบ

ประเภทเมทริกซ์	อีพอกซี เรซิน ER570
รูปแบบการบ่มเรซิน	ให้อัตราความร้อน 1°C/min.
จำนวนชิ้นงานทดสอบ	5
ขนาดชิ้นงาน (ยาว x กว้าง x หนา)	200 x 15 x 1 mm
ความเร็วหัวกด	2 mm/min
ระยะฐานรองรับ (Span)	32 mm

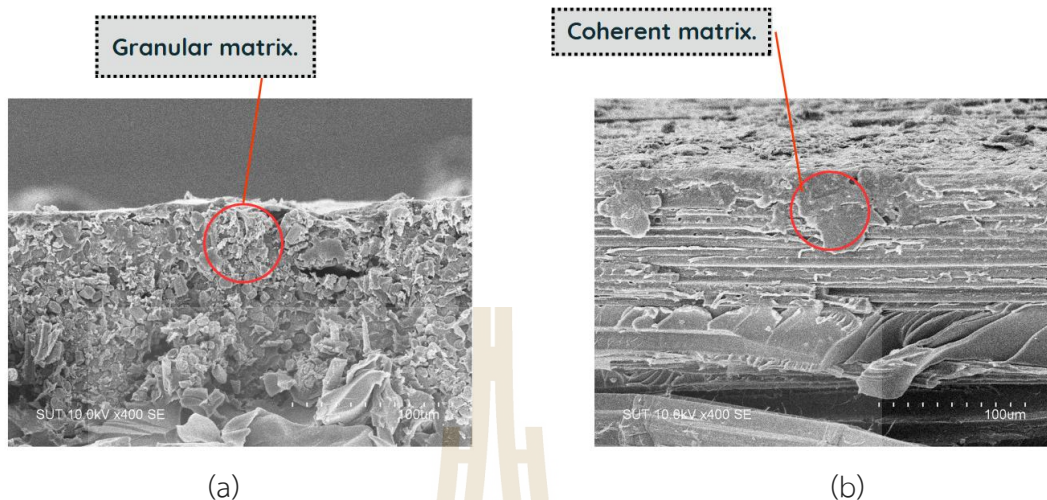
ผลลัพธ์การทดสอบจากการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ ร่วมกับเมทริกซ์อีพอกซี ที่ผ่านการปรับวิธีการบ่มเรซินที่ให้อัตราความร้อนที่ต่างกัน 2 แบบ คือ 5 °C/min และ 1°C/min ผ่านการทดสอบเพื่อประเมินพฤติกรรมของคอมโพสิตเมื่อรับโหลดกระทำเพื่อหาคุณสมบัติความต้านทานแรงดัดงอผ่านการทดสอบดัดงอแบบ 3 จุด (3 Point Bending) โดยวิเคราะห์การรับโหลดกระทำแบบดัดงอสูงสุด (Maximum Load) ระยะการโก่งตัวของชิ้นงานทดสอบ (Deflection) ค่าความเค้นดัด (Flexural Stress) ค่าความเครียดของการเสียรูปจากการดัดงอ (Flexural Strain) และความสัมพันธ์ของทั้งค่าความเค้นและค่าความเครียด เพื่อเปรียบเทียบอัตราการให้ความร้อนที่เหมาะสมที่ทำให้คุณสมบัติการต้านทานแรงดัดงอของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยพบว่าสำหรับการให้อัตราความร้อนที่ 5°C/min สำหรับการบ่มเรซินขณะกระบวนการผลิตคอมโพสิตนั้น ให้ค่าความต้านทานโหลดกระทำสูงสุดอยู่ที่ 127.59N แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการให้อัตราความร้อนที่ต่ำกว่าคือ 1 °C/min พบว่ามีค่าความต้านทานโหลดกระทำสูงสุดที่สูงกว่า โดยวัดค่าได้ 144.192 N ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติที่ดีมากยิ่งขึ้นเมื่อให้อัตราความร้อนในการบ่มตัวของเรซินที่ต่ำลง ซึ่งการที่เรซินที่ผ่านการได้รับอัตราความร้อนที่ต่ำ จะมีระยะเวลาในการแข็งตัวที่ช้ากว่าซึ่งทำให้เรซินนั้นมีการกระจายตัวที่ดีกว่าและการแข็งตัวครอบคลุมมากกว่าและเมื่อพิจารณาค่าความเค้นที่มาจากการทดสอบพบว่า ความเค้นดัดงอ (Flexural Stress) เกิดขึ้นสูงสุดที่คอมโพสิตที่มีการบ่มตัวด้วยอัตราการให้ความร้อน 1 °C/min โดยมีค่าอยู่ที่ 291.852 MPa และความเครียด (Flexural Strain) วัดค่าได้อยู่ที่ 0.027127 mm/mm แสดงให้เห็นถึงความเหนียวและ

การยืดตัวที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่ให้อัตราการให้ความร้อนที่  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ภาพเปรียบเทียบระหว่างการให้อัตราความร้อน 2 รูปแบบ

จากผลลัพธ์ที่วิเคราะห์ได้ภายใต้โหมดตัดขวางของคอมโพสิต พบว่าการให้อัตราการให้ความร้อนที่ต่ำสำหรับการบ่มตัวเรซินระหว่างการขึ้นรูปนั้น ทำให้คุณสมบัติความต้านทานแรงดึงของวัสดุมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น การให้ความร้อนแบบค่อยเป็นค่อยไปทำให้เรซินมีระยะเวลาในการจัดเรียงตัวให้เหมาะสมแก่โครงสร้าง ซึ่งช่วยลดการขยายตัวหรือหดตัวเร็วเกินไปจนทำให้เรซินนั้นไม่เป็นโครงสร้างเดียวกันจนเกิดการเสื่อมสภาพของเรซินและทำให้ประสิทธิภาพของคุณสมบัติเชิงกลลดลง ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope – SEM) ช่วยยืนยันโครงสร้างภายในที่ทำให้เห็นการเปรียบเทียบกันระหว่างเรซินที่ถูกบ่มด้วยอัตราการให้ความร้อนที่สูงกว่าเท่ากับ  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ที่แสดงให้เห็นว่าเรซินนั้นเกิดการจับตัวและแข็งตัวอย่างรวดเร็วเกินไป จนทำให้เรซินมีลักษณะที่เป็นแบบเม็ดละเอียด (Granular Matrix) และแบบที่เรซินถูกบ่มด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ต่ำกว่าคือ  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  แสดงให้เห็นถึงความเป็นเนื้อเดียวกันและรวมกันอยู่เป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ของเรซิน (Coherent Matrix) ดังแสดงในรูปที่ 5.3 การยึดเกาะกันของเส้นใยและเรซินนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีทำให้การใช้รูปแบบการบ่มเรซินแบบนี้จะถูกนำไปใช้เพื่อการขึ้นรูปและใช้วิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเพิ่มเติมในบทต่อไป



รูปที่ 5.3 SEM แสดงการยึดเกาะกันของเมทริกซ์ (a) ภาพจากตัวอย่างของอัตราการให้ความร้อน 5 °C/min (b) ภาพจากตัวอย่างของอัตราการให้ความร้อน 1 °C/min

### 5.3 การใช้สารเติมแต่ง

การใช้สารเติมแต่งในคอมโพสิตเป็นหนึ่งในแนวทางที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติบางประการให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานที่เฉพาะเจาะจงได้ สารเติมแต่งมักจะแบ่งตามประเภทของวัตถุประสงค์ที่ต้องการไปใช้งาน ได้แก่ สารเติมแต่งประเภทที่เพิ่มความแข็งแรง (Reinforcing Fillers) สารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Functional Additives) สารเติมแต่งเพิ่มความทนทานต่อสภาพแวดล้อม (Durability Enhancers) และสารเติมแต่งที่ช่วยในกระบวนการผลิตคอมโพสิต (Processing Aids) เป็นต้น ซึ่งสารเติมแต่งแต่ละแบบก็จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป โดยส่วนใหญ่แล้วสารเติมแต่งมักจะใช้สำหรับเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอมโพสิต ตัวอย่างเช่น ผงแก้ว (Glass Powder) ไมโครสเฟียร์แก้ว (Glass Microspheres) อนุภาคเซรามิก (Ceramic Particles) กราฟีน (Graphene) ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon Black) จากตัวอย่างที่กล่าวมาล้วนแต่เป็นสารเติมแต่งที่จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติให้กับคอมโพสิตทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นและประสิทธิภาพความทนทานก็เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน การเลือกใช้สารเติมแต่งที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับประเภทของคอมโพสิตและการใช้งานที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น ในอุตสาหกรรมยานยนต์ การใช้สารเติมแต่งที่ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ เช่น ไมโครบีด (Microbeads) หรืออนุภาคโพลิเมอร์แบบกลวง (Hollow Polymer Particles) สามารถช่วยลดน้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างของยานพาหนะและ

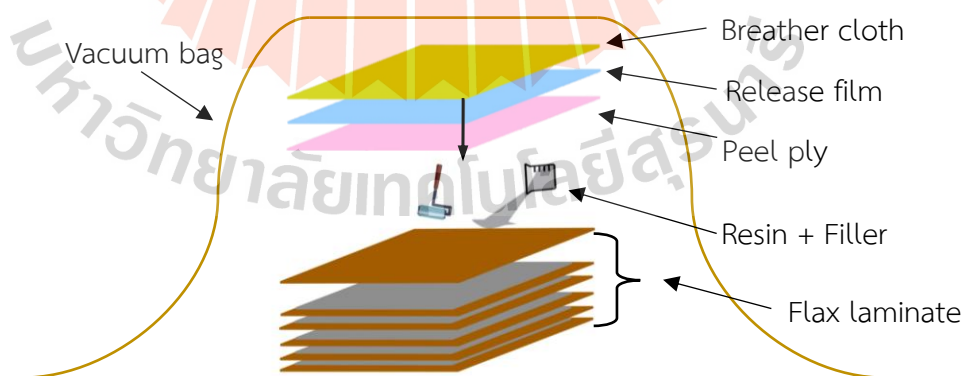
เพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงได้ ในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ สารเติมแต่งที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงต่อหน่วยน้ำหนัก เช่น คาร์บอนไฟเบอร์นาโน เป็นที่นิยมเพื่อให้โครงสร้างมีความแข็งแรง แต่ยังคงมีน้ำหนักเบา อย่างไรก็ตาม การใช้สารเติมแต่งในคอมโพสิตก็มีข้อจำกัดเกี่ยวกับ ปริมาณของสารเติมแต่งที่เหมาะสม ควบคุมปริมาณที่แม่นยำและการกระจายตัวของสารเติมแต่งในเมทริกซ์ จะต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีและมีโครงสร้างที่เสถียร เนื่องจากว่า การให้ปริมาณสารเติมแต่งที่ไม่เหมาะสมนั้นแทนที่จะทำให้คุณสมบัติของคอมโพสิตดีขึ้นแต่อาจจะส่งผลในด้านลบแทน (Shahabaz et al., 2023)

สารเติมแต่งที่ได้มาจากถ่านในบริเวณเตาเผา น้ำมันเตามีลักษณะคล้ายกับผงคาร์บอน ซึ่งให้ชื่อว่า ผงถ่านจากน้ำมันเตา (Furnace Charcoal Powder - FCP) ดังแสดงในรูป 5.4 มีลักษณะเป็นผงถ่านสีดำละเอียดโดยที่ผงเติมแต่งนี้จะถูกนำมาใช้กับคอมโพสิตเสริมเส้นใยพลาสติกพร้อมกับเมทริกซ์สังเคราะห์เพื่อดูพฤติกรรมที่ตอบสนองต่อการรับแรงแบบดัดงอเมื่อใช้สารเติมแต่งที่มีปริมาณแตกต่างกัน 4 รูปแบบ คือ ตัวอย่างที่ไม่มีสารเติมแต่งเลย ตัวอย่างที่มีสารเติมแต่งในคอมโพสิต 5% ตัวอย่างที่มีสารเติมแต่งในคอมโพสิต 10% และตัวอย่างทดสอบที่มีสารเติมแต่งในคอมโพสิต 15% จากนั้นจะตรวจสอบและประเมินเพื่อวิเคราะห์ความเค้นดัดงอ ความเครียดดัดงอ ที่เกิดขึ้นเมื่อรับโหลดในลักษณะนี้ด้วย



รูปที่ 5.4 ผงถ่านจากน้ำมันเตา

กระบวนการขึ้นรูปคอมโพสิตจะใช้วิธีการที่มีชื่อ แวกคัม แบ็กกิง (Vacuum Bagging) ดังรูป 5.5 โดยเริ่มจากการเตรียมเส้นใยแฟลกซ์ที่มีขนาด  $220 \times 100 \text{ mm}^2$  ในทิศทางเดียวกันทั้งหมดคือ 0 องศา เป็นจำนวน 6 ชั้นสำหรับในแต่ละรูปแบบการศึกษา กระบวนการโดยรวมจะคล้ายกันกับหัวข้อที่ 4.2.2 กระบวนการขึ้นรูป แต่ส่วนที่ต่างคือขั้นตอนการเติมเรซินที่ผสมสารเติมแต่งดังนี้ เริ่มจากการวางเส้นใยแฟลกซ์ในชั้นแรกและเทตามด้วยเรซินที่ถูกผสมด้วยสารเติมแต่งในปริมาณต่างๆ (Filler addition) ที่กำหนดไว้ในรูปแบบการทดสอบตามตารางที่ 5.2 เกลี่ยเรซินให้ทั่วบริเวณของเส้นใย เมื่อเรียบร้อยดีแล้วก็วางเส้นใยแฟลกซ์ชั้นถัดไปตามด้วยการเทเรซินและการเกลี่ยให้ทั่วบริเวณทำซ้ำแบบนี้ไปจนครบ 6 ชั้นของเส้นใยแฟลกซ์ จากนั้นจึงวางผ้าลอกแบบ (Peel Ply) เพื่อช่วยให้สามารถลอกชิ้นงานออกมาได้ง่าย จากนั้นวางทับด้วยแผ่นฟิล์มนำอากาศหรือรีลีสฟิล์ม (Release Film) สำหรับนำอากาศหรือเรซินส่วนเกินออกจากคอมโพสิต ขั้นตอนถัดไปคือการวางผ้าซันน้ำยาหรือผ้าบริดเตอร์ (Breather Cloth) เพื่อดูดซับเรซินส่วนเกินที่ออกมาจากรีลีสฟิล์ม และสุดท้ายทั้งหมดจะถูกห่อหุ้มด้วยถุงสุญญากาศเพื่อใช้ทำระบบสุญญากาศให้คอมโพสิตถูกกดและแพ็คตัวกันอย่างดีที่สุด ซึ่งถุงสุญญากาศจะมีท่อคอนเน็กเตอร์ที่เชื่อมต่อออกไปสู่เครื่องปั๊มสุญญากาศอีกที เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการในส่วนนี้ คอมโพสิตจะถูกนำเข้าสู่ตู้อบเพื่อบ่มเรซิน โดยใช้โปรไฟล์ในการบ่มเรซินที่ให้ผลลัพธ์ประสิทธิภาพกับคอมโพสิตที่ดีที่สุดคือ อัตราการให้ความร้อนที่  $1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการบ่มเรซินแล้ว คอมโพสิตจะถูกพักไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนจะเข้าสู่การเตรียมชิ้นงานคอมโพสิตเพื่อสำหรับการทดสอบต่อไป



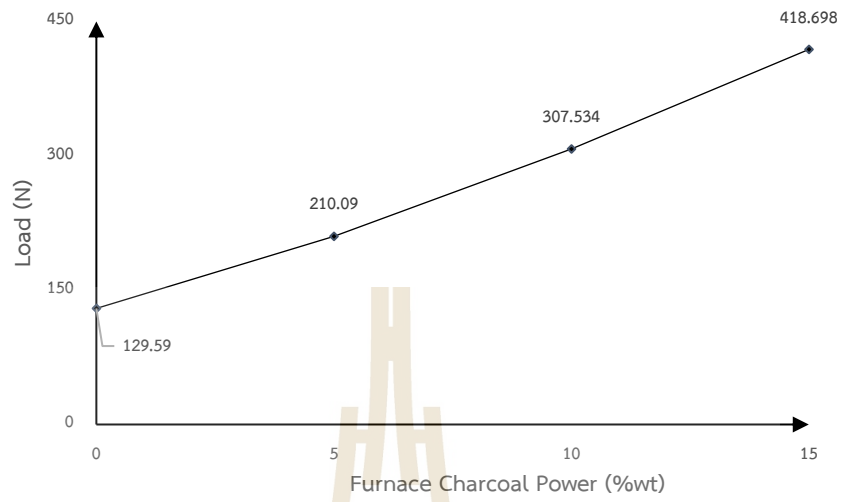
รูปที่ 5.5 กระบวนการแวกคัม แบ็กกิง

คอมโพสิตที่ขนาดเท่ากันกับการทดสอบในหัวข้อก่อนหน้า และใช้มาตรฐานการทดสอบที่เหมือนกันคือ ASTM D7264/D7264 M - 07 ส่วนความหนาและข้อมูลชิ้นงานทดสอบเบื้องต้นจะถูกระบุไว้ใน ตารางที่ 5.2 การทดสอบในแต่ละประเภทจะมีการทดสอบซ้ำในชิ้นงานที่มีเงื่อนไขเดียวกัน 5 ชิ้น

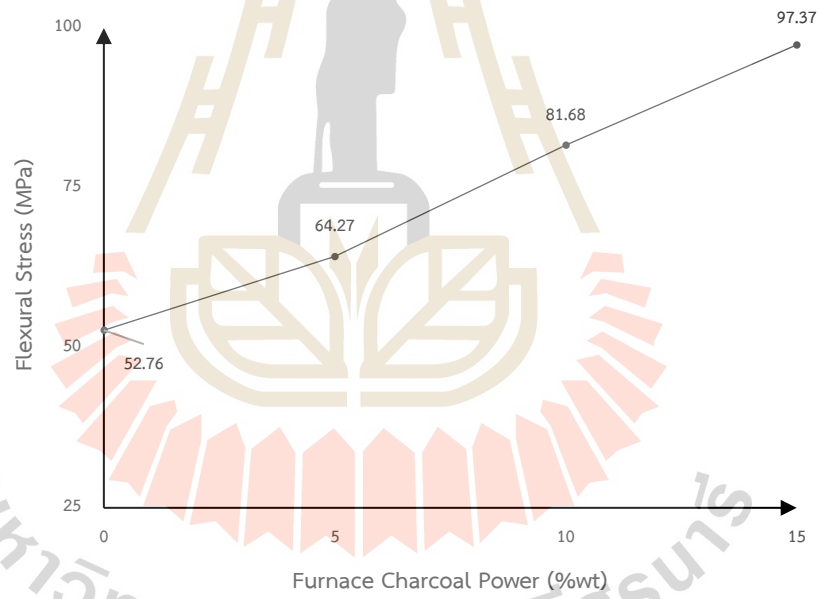
ตารางที่ 5.2 ขนาดชิ้นงานทดสอบ

Specimen	Filler addition	Dimension	Thickness
F0	0%	150 x 15 mm <sup>2</sup>	4.52 ±0.2 mm
F5	5%	150 x 15 mm <sup>2</sup>	5.23 ±0.2 mm
F10	10%	150 x 15 mm <sup>2</sup>	6.21 ±0.2 mm
F15	15%	150 x 15 mm <sup>2</sup>	6.98 ±0.2 mm
Crosshead speed rate		2 mm/min	

ผลลัพธ์จากการทดลองเติมสารเติมแต่ง FCP ที่มาจากถ่านในเตาเผา น้ำมันเตา โดยใช้ในการเติมแต่งเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติความต้านทานแรงดัดงอของคอมโพสิตที่เสริมเส้นใยแฟลกซ์ซึ่งมีปริมาณของการเติมผง FCP นี้เท่ากับ 5% 10% และ 15% เพื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่มีสารเติมแต่งเลย โดยวิเคราะห์การรับโหลดกระทำแบบดัดงอสูงสุด (Maximum Load) ระยะการโก่งตัวสูงสุด (Deflection) ค่าความเค้นดัด (Flexural Stress) ค่าความเครียดของการเสียรูปแบบดัดงอ (Flexural Strain) และความสัมพันธ์ของทั้งค่าความเค้นและความเครียด โดยพบว่า ตัวอย่างทดสอบที่มีการเติมผงถ่านน้ำมันเตาที่ 15% แสดงพฤติกรรมที่ให้ค่าความต้านทานโหลดแบบดัดงอสูงสุดเมื่อเทียบกับคอมโพสิตจากตัวอย่างทดสอบอื่น ดังแสดงในรูปที่ 5.6 โดยวัดค่าความต้านทานโหลดดัดงอสูงสุดได้ 418.7 N แต่มีระยะโก่งตัวที่น้อยที่สุด เนื่องจากการใช้สารเติมแต่งส่งผลให้ชิ้นงานคอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยวัดค่าได้ 6.66 mm ทำให้สามารถยืนยันได้ว่า การเติมสารเติมแต่งแบบผงถ่านจากน้ำมันเตาในกระบวนการผลิตคอมโพสิต ส่งผลให้ความแข็งแรงของคอมโพสิตสูงขึ้น ซึ่งสารเติมแต่งเหล่านี้ช่วยเสริมความแข็งแรงของเมทริกซ์และเพิ่มการยึดเกาะของเส้นใยแฟลกซ์กับเมทริกซ์จนส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงเพิ่มมากขึ้น แต่ในทางกลับกันก็ทำให้คอมโพสิตที่เติม FCP ในปริมาณที่สูงมีพฤติกรรมแบบเปราะที่มาก อีกทั้งความเค้นดัดงอก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูป 5.7 โดยวัดค่าได้ 97.37 MPa สำหรับคอมโพสิตที่มี FCP อยู่ 15%



รูปที่ 5.6 การกระจายตัวของความต้านทานแรงดัดงอในปริมาณการเติม FCP



รูปที่ 5.7 การกระจายตัวของความเค้นดัดงอในปริมาณการเติม FCP

สำหรับผลลัพธ์ของตัวอย่างอื่นที่มีการเติมผงถ่านจากน้ำมันเตา มีแนวโน้มของความเค้นดัดสูงสุดที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความเค้นดัดสูงสุดที่เกิดจากคอมโพสิตที่เติมสารเติมแต่งที่ 15% ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวที่ไม่สมบูรณ์ของผงถ่านน้ำมันเตา การรวมตัวกันของอนุภาคผงถ่านน้ำมันเตาจนเป็นกลุ่มก้อน และมีความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้างภายในจนนำไปสู่ความเค้นที่ไม่สม่ำเสมอของคอมโพสิต รวมถึงหากเพิ่มปริมาณของอัตราส่วนผงถ่าน FCP นี้จะทำให้โครงสร้างโดยรวมของคอมโพสิตมีความเปราะมากยิ่งขึ้น อีกทั้งในกระบวนการผลิตเมื่อมีการเติม FCP มากกว่า 15% จะทำให้การผสมกันกับเรซินทำได้ยากมากขึ้นและทำให้ผงถ่านเหล่านี้จับกลุ่มกันเป็นก้อนและไม่ผสมกันกับเรซิน และอาจทำให้โครงสร้างของคอมโพสิตมีแนวโน้มที่จะแตกหักแบบเปราะมากขึ้นเมื่อได้รับแรงดัด

#### 5.4 การใช้แกนเสริมความหนาสำหรับโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต

โครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตเป็นที่นิยมนำมาใช้ในงานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ ยานยนต์ วิศวกรรมทางทะเล เป็นต้น โครงสร้างนี้ประกอบขึ้นมาจากแผ่นผิวหน้า (Face Sheets) ที่มีความแข็งแรงสูง 2 อัน ประกบที่ผิวด้านบนและผิวด้านล่าง โดยมีแกนกลาง (Core) ที่มีน้ำหนักเบาที่ทำหน้าที่รับแรงเฉือนเป็นหลักแทรกอยู่ตรงกลาง เหตุผลสำคัญของการประกอบคอมโพสิตให้เป็นโครงสร้างแบบแซนวิชคือเพื่อต้องการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของคอมโพสิตในการรับแรงเฉือนและเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของคอมโพสิตให้สูงขึ้น แต่การที่จะทำให้ความหนาของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นด้วยการใช้ความหนาที่มาจากเส้นใยเสริมแรงวางซ้อนทับกันเพียงอย่างเดียว ทำให้น้ำหนักโดยรวมของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย จึงจำเป็นต้องใช้แกนกลางที่มีน้ำหนักเบาเข้ามาแทรกระหว่างแผ่นผิวหน้าแทน ซึ่งตัวอย่างชนิดของแกนกลางประเภทต่างๆ กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ซึ่งเทคนิคการผลิตโครงสร้างแบบแซนวิชต้องทำให้แผ่นผิวหน้าและแกนกลางติดแน่นกันเป็นอย่างดี วิธีการที่นิยมคือการใช้ฟิล์มกาวความแข็งแรงสูง (Adhesive Film) เป็นตัวเชื่อมระหว่างผิวหน้าและแกนเข้าด้วยกัน และอีกวิธีคือทำโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตตั้งแต่กระบวนการขึ้นรูป โดยใช้วิธีการแวคคัม อินฟิวชัน (Vacuum Infusion Resin) กล่าวคือโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตนี้ทั้งแผ่นผิวหน้าและแกนกลางจะถูกขึ้นรูปพร้อมกัน

แกนเสริมความหนาให้กับคอมโพสิตที่ใช้ในกระบวนการผลิตคือแกนแบบ Lantor Soric XF ดังรูปที่ 5.8 เป็นผลิตภัณฑ์จากบริษัท Lantor Composites® ที่พัฒนามาตั้งแต่ 2002 โดยเป็นแกน

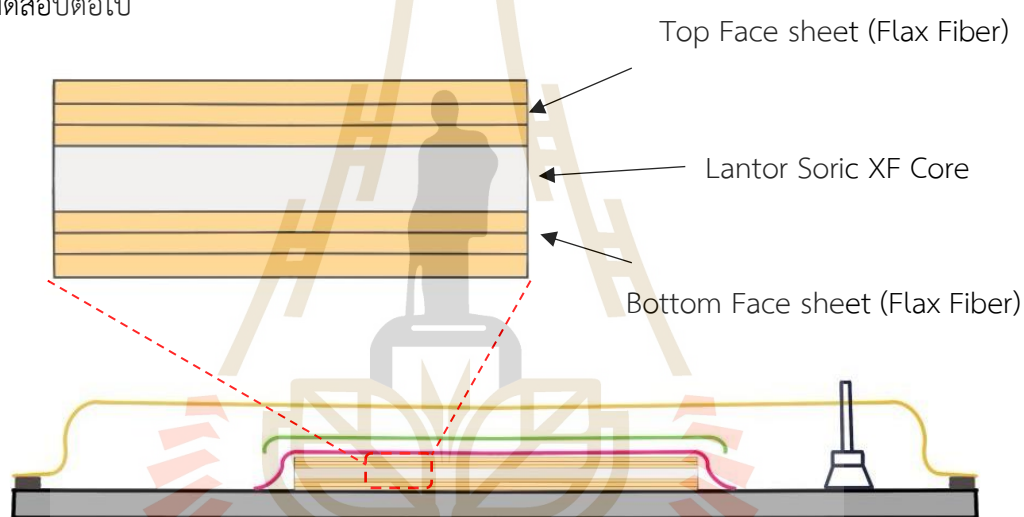
ที่ทำมาจากโพลีเอสเตอร์ที่ได้มาจากการรีไซเคิลขยะอย่าง ขวดพลาสติก PET ซึ่งส่งเสริมการใช้ ทรัพยากรหมุนเวียน ลดของเสียที่มาจากขยะเหลือทิ้งและช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย การใช้งานแกนเสริมความหนาแบบ Lantor Soric XF มีข้อโดดเด่นหลายประการตัวอย่างเช่น แกนมี ความยืดหยุ่นสูง สามารถปรับให้เข้ากับรูปร่างแบบต่างๆ ของชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูปได้ อีกทั้งแกน ประเภท Soric XF ที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวในการช่วยควบคุมการกระจายตัวของเรซินได้เป็นอย่างดี ลดปริมาณการดูดซับเรซินมากเกินไปที่อาจส่งผลกระทบต่อน้ำหนักของโครงสร้างโดยรวม ทั้งยังสามารถ กระจายแรงกระทำและรองรับแรงกระทำแบบกดตัดได้เป็นอย่างดี ทำให้เหมาะกับการนำมาเพื่อช่วย พัฒนาคุณสมบัติความต้านทานแรงดัดงอของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะทำให้ โครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตนี้เป็นโครงสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีความยั่งยืน (Soric®, 2025a)



รูปที่ 5.8 Lantor Soric XF

กระบวนการผลิตโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตจะถูกขึ้นรูปทั้งเส้นใยแฟลกซ์เสริมแรง แกนแบบ Soric XF และเมทริกซ์สังเคราะห์ ER570 โดยผ่านกระบวนการแบบแว็คคัม อินฟิวชัน (Vacuum Infusion Process) โดยการขึ้นรูปจะใช้ขั้นตอนที่คล้ายกันกับรายละเอียดในหัวข้อ 4.4.2 กระบวนการขึ้นรูป โดยใช้จำนวนใช้ของเส้นใยแฟลกซ์ทั้งหมด 6 ชั้น ซึ่งจะแบ่งเป็น 3 ชั้น สำหรับแผ่น ผิวหน้าด้านบน (Top Face) และ 3 ชั้น สำหรับแผ่นผิวหน้าด้านล่าง (Bottom Face) โดยมีแกนกลาง Soric XF แทรกอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นผิวหน้า โดยเส้นใยแฟลกซ์จะถูกกำหนดทิศทางเป็นแบบ

เดียวกันทั้งหมดคือ 0 องศา ซึ่งจะวางซ้อนทับกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.9 มีขนาดโดยรวมทั้งหมด  $220 \times 100 \text{ mm}^2$  ทั้งเส้นใยและแกนกลางจะวางเรียงพร้อมกันบนแม่พิมพ์อลูมิเนียมที่ถูกทำความสะอาดและเตรียมผิวสำหรับการขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นจะถูกวางด้วยผ้าลอกแบบ ตาข่ายนำเรซิน และห่อหุ้มด้วยฟิล์มสุญญากาศตามลำดับ โดยมีท่อต่อเป็นทางเข้าและทางออกสำหรับเรซินที่ขอบของแม่พิมพ์ หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการแวกคัม อินฟิวชันแล้วคอมโพสิตจะถูกนำเข้าเตาอบเพื่อบ่มเรซินให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดตามรูปแบบการให้อัตราความร้อนในหัวข้อ 5.2 ที่กำหนด อัตราความร้อนอยู่ที่  $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  จากอุณหภูมิห้องไปจนถึง  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากเสร็จสิ้นการบ่มเรซิน คอมโพสิตจะถูกพักทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนจะเข้าสู่การเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบต่อไป



รูปที่ 5.9 การขึ้นรูปโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต

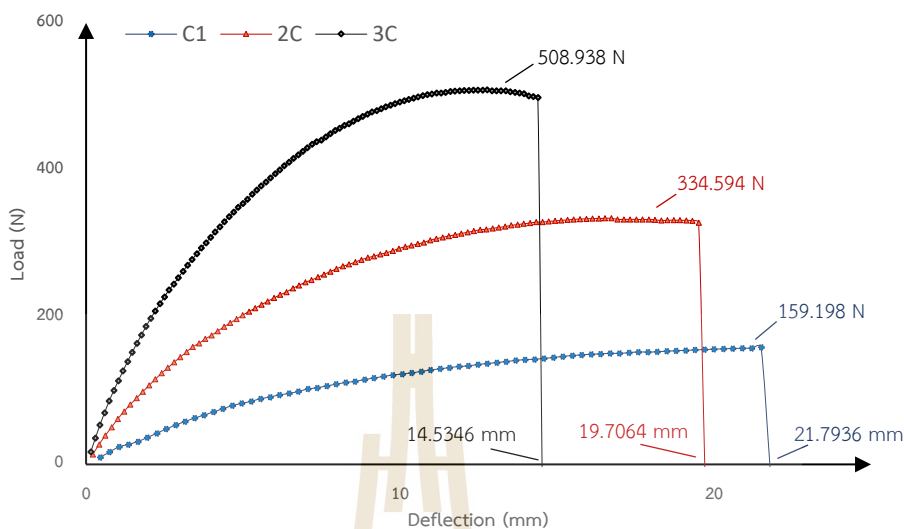
การทดสอบคุณสมบัติความต้านทานแรงดัดงอเพื่อประเมินประสิทธิภาพของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตจะถูกทดสอบผ่านมาตรฐานการทดสอบ ASTM C393-00 โดยจะทำการทดสอบการดัดงอ 3 จุด (3 Point bending) โดยคอมโพสิตจะถูกเตรียมมาเพื่อทดสอบ 3 ประเภทการทดสอบสำหรับความหนาของแกนกลางที่แตกต่างกัน 3 ขนาดคือ C1 จำนวนแกน 1 ชั้น มีความหนา 2.5 mm, C2 จำนวนแกน 2 ชั้น มีความหนา 5 mm และ C3 จำนวนแกน 3 ชั้น มีความหนา 7.5 mm เพื่อหาคุณสมบัติความต้านทานแรงดัดงอและความแข็งแรงสูงสุดว่าขนาดของแกนกลางที่เหมาะสมอยู่ที่ขนาดเท่าไร โดยชิ้นงานจะมีขนาดทดสอบความยาว 200 mm ความกว้าง 15 mm และความหนาของชิ้นงานแต่ละประเภทการทดสอบจะระบุไว้ในตารางที่ 5.3 การทดสอบจะใช้เครื่อง

ทดสอบเบเนกประสงค์ (UTM) รุ่น LD100 โดยกำหนดความเร็วการเคลื่อนที่ของหัวกดด้านบนเท่ากับ 6 mm/min และระยะของฐานรองรับ (Support Span) จะกำหนดตามมาตรฐานการทดสอบอยู่ที่ 150 mm ซึ่งในการทดสอบแต่ละประเภทจะมีการทดสอบซ้ำในชิ้นงานที่มีเงื่อนไขการขึ้นรูปเดียวกัน 5 ชิ้น

ตารางที่ 5.3 ระบุขนาดชิ้นงานทดสอบ

Sample Name	Core Layer	Total Core Thickness (mm)	Face sheet Thickness (mm)	Specimen Dimension (mm <sup>2</sup> )	Specimen Thickness (mm)	Crosshead Speed
C1	1	2.5 ± 0.2	1.35	150 x 15	5.2 ± 0.2	6 mm/min
C2	2	5 ± 0.2			7.7 ± 0.2	
C3	3	7.5 ± 0.2			10.2 ± 0.2	

ผลลัพธ์จากการทดสอบความต้านแรงดึงของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตที่มีเส้นใยแฟล็กซ์เสริมแรง แกนกลางแบบ Soric XF หลายขนาดขึ้นรูปร่วมกับเมทริกซ์สังเคราะห์ ER570 โดยศึกษาอิทธิพลของแกนกลางที่เพิ่มเข้ามาในคอมโพสิตเกี่ยวกับพฤติกรรมการรับแรงดึงชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ซึ่งได้รับผลโดยตรงมาจากแกนกลางที่หนามากขึ้น ทำให้หน้าตัดชิ้นงานหนาและรับแรงได้ดียิ่งขึ้น โดยพบว่า โหลดกระทำสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบอยู่ที่ 508.938 N สำหรับโครงสร้างแบบแซนวิชที่มีความหนาแกนกลางขนาด 7.5 mm แต่ระยะการโก่งตัววัดค่าได้ 14.5346 mm ซึ่งเป็นระยะโก่งตัวที่น้อยที่สุด เนื่องจากขนาดแกนที่หนามากยิ่งขึ้น จะทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นส่งผลให้การยืดตัวหรือการโก่งตัวลดลงภายใต้แรงเดียวกัน โมเมนต์ความเฉื่อยที่เพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างสามารถกระจายแรงตัดไปยังพื้นที่ของวัสดุได้กว้างขึ้น และลดการเกิดการโก่งตัวได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 5.10 การกระจายตัวของโหลดติดตั้งในโครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิต

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงกระทำและระยะโก่งตัวของโครงสร้าง (Load – Deflection Curve) พบว่าความชัน (Slope) จากการประเมินเบื้องต้นนั้น การที่โครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิต C3 ที่มีแกนกลางขนาด 7.5 mm ให้ความชันที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับแกนที่บางกว่า ซึ่งบ่งบอกได้ว่าความแข็งแรงของวัสดุต่อการยึดตัวนั้น จะมีค่าสูงที่สุดที่โครงสร้างแกนวิช C3

โดยสรุป การเสริมความหนาแกนกลาง Lantor Soric XF ให้กับคอมโพสิตให้เป็นโครงสร้างแบบแกนวิชนั้นมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดของคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยพลาสติกเป็นเส้นใยเสริมแรงขึ้นรูปร่วมกับเมทริกซ์สังเคราะห์ ER570 การเลือกใช้ความหนาที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของการใช้งาน กล่าวคือหากต้องการโครงสร้างที่มีความแข็งแรงดัดสูงและสามารถต้านทานแรงดัดได้ดีโดยยังคงมีความยืดหยุ่นของโครงสร้างอย่างเพียงพอ ขนาดแกนในช่วง 2.5 mm ถึง 5 mm อาจเป็นตัวเลือกที่เหมาะสม ในขณะที่หากต้องการเพิ่มความแข็งแรงโดยรวมของโครงสร้างและลดการโก่งตัว การใช้แกนกลางที่หนาขึ้น เช่น 7.5 mm อาจเป็นทางเลือกที่ดี แต่ต้องพิจารณาถึงผลกระทบของน้ำหนักและการกระจายแรงดัดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างโดยรวมด้วย การวิเคราะห์นี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาโครงสร้างแบบแกนวิชให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้

หากต้องการเพิ่มความต้องการด้านความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อาจจะเปลี่ยนประเภทของเมทริกซ์เป็นประเภทแบบเกรดชีวภาพ เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการเหล่านี้ได้ โดยสรุปแล้วในบทนี้เป็นการประเมินคุณสมบัติและพฤติกรรมต่อการรับโหลดติดตั้ง เพื่อเป็นแนวทาง

สำหรับการพัฒนาคอมโพสิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้นและเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ ได้ ในบทความนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟล็กซ์และขึ้นรูปร่วมกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพ SR33 รวมถึงการจำลองการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม ANSYS Workbench®



## บทที่ 6

### ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิต

การใช้งานวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยประเภทต่างๆ มีแนวโน้มการเติบโตอย่างต่อเนื่องและเป็นที่ต้องการสูงในหลายอุตสาหกรรมที่ตอบรับการใช้งานวัสดุที่ให้ความแข็งแรงสูงโดยมีน้ำหนักที่เบา การแพร่หลายของความต้องการวัสดุคอมโพสิต ทำให้ปริมาณของเสียในกระบวนการขึ้นรูปเพื่อทดสอบคุณสมบัติก่อนนำไปใช้งานและความสิ้นเปลืองทรัพยากรนั้นเพิ่มสูงมากขึ้น การวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM) ได้กลายเป็นเครื่องมือสำคัญในการเข้ามาแก้ไขปัญหาและกำลังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ข้อโดดเด่นที่สำคัญคือการวิเคราะห์ด้วย FEM นี้สามารถสร้างแบบจำลองได้อย่างรวดเร็ว การวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมได้อย่างแม่นยำและควบคุมปัจจัยสำคัญในขณะทดสอบได้เป็นอย่างดี (David Müzel et al., 2020) การประเมินคุณสมบัติเชิงกลที่สามารถปรับเปลี่ยนการวิเคราะห์เพื่อประเมินคุณสมบัติซ้ำได้หลายเงื่อนไข ทำให้ไม่สิ้นเปลืองวัสดุที่ต้องการนำมาทดสอบ ประหยัดเวลาและต้นทุนการผลิต

วัสดุคอมโพสิตที่ประกอบไปด้วยคุณสมบัติที่มาจากวัสดุแต่ละประเภทที่นำมาใช้ผลิต ทำให้เกิดความซับซ้อนในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน การใช้ FEM มีความสามารถในการจำลองพฤติกรรมของวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ โดยการสร้างแบบจำลองที่สามารถกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของคอมโพสิตในแต่ละชั้นได้ ทั้งทิศทางของการวางเส้นใยเสริมแรง ความหนาของชั้นวัสดุ ชนิดและคุณสมบัติเฉพาะตัวของเมทริกซ์กับเส้นใยเสริมแรง การวิเคราะห์คุณสมบัติสามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ระดับจุลภาค (Microscale) ไปจนถึงระดับมหภาค (Macroscale) ช่วยให้เราสามารถเชื่อมโยงพฤติกรรมของวัสดุในระดับโครงสร้างขนาดใหญ่ได้

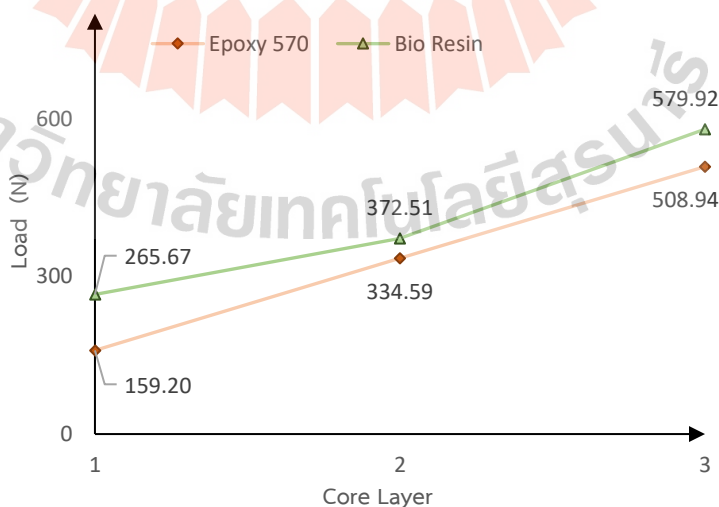
ในหลายอุตสาหกรรมที่มีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นจำนวนมาก อย่างอุตสาหกรรมอากาศยาน การเข้ามามีบทบาทของ FEM เพื่อใช้ประเมินและทำนายพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงกระทำในรูปแบบต่างๆ รวมถึงการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างให้มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยไม่เสียเวลาในการวิเคราะห์และทรัพยากรที่ต้องใช้จนเกินความจำเป็น (Rais-Rohani et al., 2004) เทคโนโลยีจาก

คอมพิวเตอร์ที่พัฒนาอย่างต่อเนื่องในปัจจุบันก็เป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้การวิเคราะห์ FEM มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ที่สูงขึ้นอีกด้วย

## 6.1 โครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิตกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพ

โครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิตที่เสริมด้วยเส้นใยแฟลกซ์จะมีกระบวนการผลิต รวมถึงขนาดและมาตรฐานการทดสอบเหมือนกันกับรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.4 การใช้แกนเสริมความหนาสำหรับโครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิต แต่จะเปลี่ยนประเภทของเมทริกซ์จากเมทริกซ์สังเคราะห์ ER570 เป็นเมทริกซ์เกรดชีวภาพ SR33 และจะใช้ข้อมูลของการรับแรงดัดงอ ความเค้น รวมถึงการประเมินมอดูลัสจากผลลัพธ์นี้ไปเปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์ผ่านการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench®

ผลลัพธ์จากการทดสอบโครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิตที่ใช้งานร่วมกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพ SR33 พบว่าความสามารถของโครงสร้างในการต้านทานโหลดดัดงอสูงสุดมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น ในโครงสร้างที่มีแกน 1 ชั้นหนา 2.5 mm มีความต้านทานเพิ่มขึ้นจาก 159.20 N (เมทริกซ์สังเคราะห์) เป็น 265.67 N (เมทริกซ์ชีวภาพ) และมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรงดัดงอทั้งตัวอย่างโครงสร้างทั้ง 3 ขนาดแกนคือ ทั้งแบบ 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น ดังรูป 6.1 สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่า เมทริกซ์เกรดชีวภาพทำให้ความต้านทานแรงดัดงอโดยรวมของโครงสร้างแบบแกนวิชเพิ่มขึ้นได้ ข้อมูลผลลัพธ์ของการรับแรงดัดงอ รวมถึงการประเมินมอดูลัสจากผลลัพธ์ที่ใช้เมทริกซ์แบบชีวภาพนี้ไปเปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์ผ่านการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench®

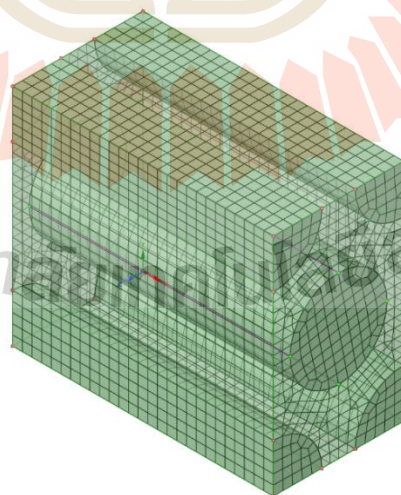


รูปที่ 6.1 การเปรียบเทียบโหลดดัดงอของเมทริกซ์ 2 ประเภท

## 6.2 การสร้างแบบจำลองของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต

โครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต ถูกยืนยันจากหัวข้อ 5.4 ว่าให้คุณสมบัติความต้านทานแรงดัดงอที่ดี การประเมินค่าความสามารถของโครงสร้างในการต้านทานแรงดัดงอ (Bending Load) ที่ผ่านการทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด (3-Point Bending) รวมถึงระยะการโก่งตัวที่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญด้วย ข้อมูลการวิเคราะห์โดยละเอียดถูกกล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 5.4 และจะนำคุณสมบัติเชิงกลพื้นฐานเบื้องต้นมาเพื่อใช้เป็นข้อมูลการวิเคราะห์ในโปรแกรม ANSYS Workbench®

Material Designer โมดูลของโปรแกรม ANSYS Workbench® จะถูกใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตที่แผ่นผิวหน้าเสริมด้วยเส้นใยแฟล็กซ์และแกนเสริมแรงแบบ Lantor Soric XF โดยการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยองค์ประกอบที่เป็นตัวแทนของโครงสร้างจุลภาคทั้งหมดด้วยการแสดงทางสถิติที่แม่นยำของคุณสมบัติวัสดุ (Representative Volume Element - RVE) โดยเลือกใช้การกำหนดลักษณะของปริมาตรที่เป็นตัวอย่างของโครงสร้างให้เป็นรูปทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal) ดังแสดงในรูป 6.3 (Phunpeng, Boransan, et al., 2023) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเท่ากับ 5 ไมโครเมตร โดยพิจารณาพันธะระหว่างเมทริกซ์ เส้นใยเสริมแรงและแกนกลางเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ ไม่มีช่องว่างหรือความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้น โดยที่คุณสมบัติของแต่ละวัสดุนั้นจะถูกระบุไว้ใน ตารางที่ 6.1 ซึ่งอ้างอิงกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและข้อมูลจำเพาะของบริษัทผู้ผลิต เพื่อใช้ข้อมูลเหล่านี้ไปจำลองและใช้สำหรับคำนวณคุณสมบัติของโครงสร้างโดยรวมทั้งหมด



รูปที่ 6.2 รูปทรง RVE แบบ Hexagonal

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติเส้นใยเมทริกซ์และแกน

ข้อมูลเฉพาะ	Flax Fiber	Bio -Resin SR33	Lantor Soric XF
Longitudinal Modulus, $E_{11}$ (GPa)	54.1	3.1	0.1
Transverse Modulus, $E_{22}$ (GPa)	7.0		
Transverse Modulus, $E_{33}$ (GPa)	7.0		
Longitudinal shear modulus, $G_{12}$ (GPa)	3.0	1.14	0.02
Transverse shear modulus, $G_{23}$ (GPa)	2.0		
Transverse shear modulus, $G_{13}$ (GPa)	3.0		
Major Poisson's ratio, $\nu_{12}$	0.3	0.354	0.2
Minor Poisson's ratio, $\nu_{23}$	0.75		
Minor Poisson's ratio, $\nu_{13}$	0.3		

ลำดับของการสร้างแบบจำลองของคุณสมบัติคอมโพสิตด้วยโมดูล Material Designer ผ่านโปรแกรม ANSYS Workbench มีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกโมดูล Material Designer ใน Tool box ของโปรแกรม ANSYS Workbench



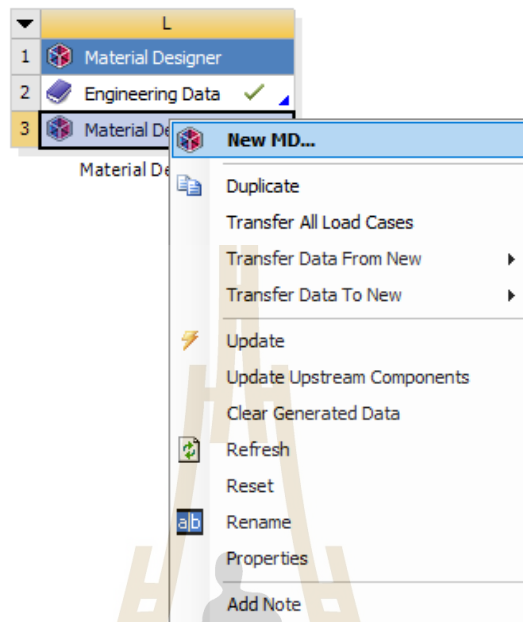
รูปที่ 6.3 โมดูล Material Designer

2. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุทั้งเส้นใยแฟล็กซ์และเมทริกซ์เกรดชีวภาพผ่านโมดูล Engineering Data จากข้อมูลที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.1

	A	B	C	D	E
	Property	Value	UNIT		
1					
2	Material Field Variables				
3	Orthotropic Elasticity	Table			
4	Young's Modulus X direction	54.1	GPa		
5	Young's Modulus Y direction	7	GPa		
6	Young's Modulus Z direction	7	GPa		
7	Poisson's Ratio XY	0.3			
8	Poisson's Ratio YZ	0.75			
9	Poisson's Ratio XZ	0.3			
10	Shear Modulus XY	3	GPa		
11	Shear Modulus YZ	2	GPa		
12	Shear Modulus XZ	3	GPa		

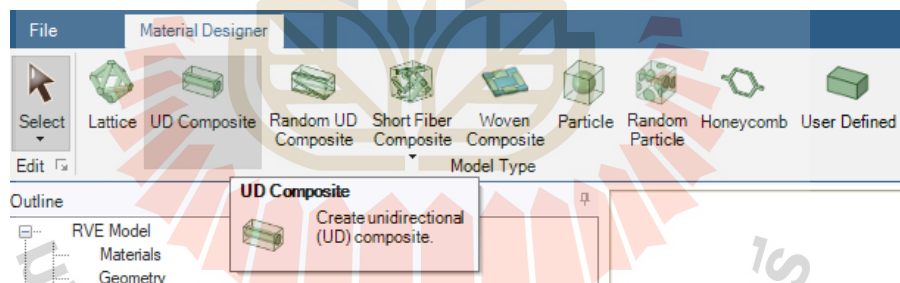
รูปที่ 6.4 ข้อมูลวัสดุใน Engineering Data

3. เริ่มการออกแบบวัสดุผ่านโมดูล Material Designer โดยเลือก New MD...



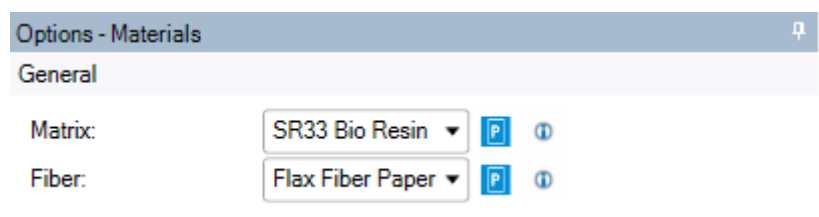
รูปที่ 6.5 เริ่มต้นการออกแบบในโมดูล MD

4. เลือก Model Type สำหรับการกำหนดรูปแบบของสารเสริมแรง



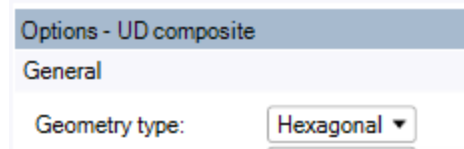
รูปที่ 6.6 การเลือก Type ของการเสริมแรงในคอมโพสิต

5. กำหนดวัสดุที่จะใช้ในการทำคอมโพสิตทั้งเมทริกซ์และสารเสริมแรง



รูปที่ 6.7 การกำหนดของเมทริกซ์และตัวเสริมแรง

6. กำหนดข้อกำหนดในการสร้างคอมโพสิต โดยกำหนดประเภทของ Geometry ที่เป็นรูปทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal) ตามที่ได้กำหนดไว้



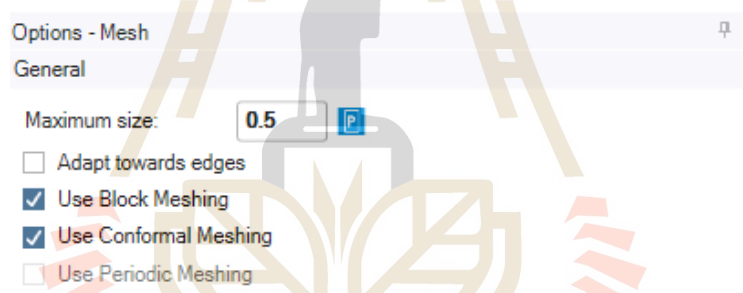
รูปที่ 6.8 รูปทรงของ RVE แบบ Hexagonal

7. กำหนดอัตราส่วนระหว่างเส้นใยเสริมแรงและเมทริกซ์ โดยกำหนดให้คงที่เท่ากับ 0.5 ทุกการทดสอบ รวมถึงกำหนดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเท่ากับ 5 ไมโครเมตร



รูปที่ 6.9 การกำหนดสัดส่วนเส้นใยเสริมแรงต่อเมทริกซ์และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเสริมแรง

8. กำหนดขนาดของ Mesh Size เท่ากับ 0.5 mm



รูปที่ 6.10 การกำหนดขนาดของ Mesh

9. ตรวจสอบคุณสมบัติที่ผ่านการจำลองคุณสมบัติของเส้นใยแฟล็กซ์และเมทริกซ์เกรด

ชีวภาพ

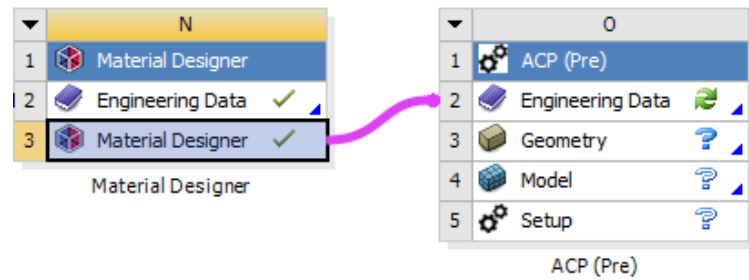
Name	Value	Unit	P
Engineering Constants			
E1	11553	MPa	<input type="checkbox"/>
E2	4707	MPa	<input type="checkbox"/>
E3	4707	MPa	<input type="checkbox"/>
G12	1805.1	MPa	<input type="checkbox"/>
G23	1494.7	MPa	<input type="checkbox"/>
G31	1805.1	MPa	<input type="checkbox"/>
nu12	0.32435		<input type="checkbox"/>
nu13	0.32435		<input type="checkbox"/>
nu23	0.57454		<input type="checkbox"/>
Logs			
RVE.log			
Solver logs			

รูปที่ 6.11 ผลลัพธ์จากการจำลองคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต

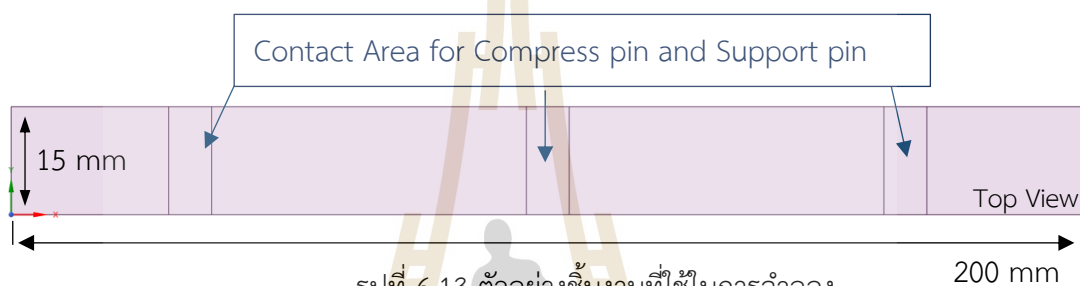
คุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ร่วมกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพที่มาจาก การจำลองคุณสมบัติผ่านโมดูล Material Designer ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.12 ซึ่งทราบข้อมูล Young's Modulus, Poisson's ratio และ Shear Modulus ของคอมโพสิตที่ขึ้นอยู่กับทิศทางของระนาบเส้นใย (x, y, z) หลังจากการจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเสริมเส้นใยแฟลกซ์ร่วมกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพเรียบร้อยแล้ว หัวข้อถัดไปจะเป็นการกำหนดคุณลักษณะของคอมโพสิตที่จะกำหนดลำดับชั้นการวางเส้นใย ทิศทางการวางคอมโพสิต ของแผ่นคอมโพสิตและแกนกลาง

### 6.3 การกำหนดคุณลักษณะในโครงสร้างคอมโพสิต

ANSYS Composite PrepPost (ACP) โมดูลของโปรแกรม ANSYS Workbench® ที่มีประสิทธิภาพสำหรับการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิต โดยโมดูลนี้จะถูกใช้สำหรับกำหนดลักษณะของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตที่ถูกส่งมาจากการจำลองคุณสมบัติเชิงกลผ่านโมดูล Material Designer ดังรูป 6.13 คลอบคลุมตั้งแต่การกำหนดองค์ประกอบของวัสดุ กำหนดการวางลำดับชั้นเลย์เอาต์ (Lay-up) ของคอมโพสิต การตั้งค่าพารามิเตอร์เชิงกลที่เกี่ยวข้อง และการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง รูปทรงของการทดสอบจะกำหนดเป็นแบบคูปองสี่เหลี่ยมผืนผ้าปกติ (Coupon Shape) โดยมีความยาวและความกว้างขนาด  $200 \times 15 \text{ mm}^2$  ตามลำดับ ดังรูป 6.14 โดยชิ้นงานจะมีลักษณะเป็นแบบโมเดลแผ่นบาง (Shell Element Model) เนื่องจากชิ้นงานที่จะใช้ในงานวิเคราะห์มีความหนาเท่ากันตลอดทั้งชิ้นงานและมีความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวและความกว้างของชิ้นงาน อีกทั้งโมดูล ACP ก็สามารถใช้งานร่วมกับ Shell Model เท่านั้น ทำให้การสร้างโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตสำหรับการวิเคราะห์จำเป็นต้องแยกออกเป็น 2 โมเดล คือ Shell Model สำหรับการกำหนดคุณสมบัติต่างๆ ของแผ่นผิวหน้า (Face Sheet) โดยกำหนดผ่านโมดูล ACP และ Model สำหรับแกนกลางจะถูกกำหนดเป็นวัสดุเนื้อเดียวที่มีคุณสมบัติเท่ากันทั้งหมด (Isotropic Material) ก่อนจะนำไปสร้างพันธะร่วมกัน (Contact) ในโมดูลสำหรับการวิเคราะห์ต่อไป



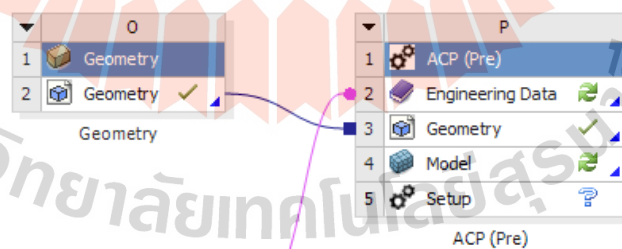
รูปที่ 6.12 การเชื่อมต่อโมดูล MD ไปสู่โมดูล ACP



รูปที่ 6.13 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการจำลอง

ลำดับขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตด้วยโมดูล ANSYS Composite PrepPost (ACP) ผ่านโปรแกรม ANSYS Workbench มีขั้นตอนดังนี้

1. เชื่อมต่อ Result ที่ได้มาจากการจำลองคุณสมบัติของคอมโพสิตจากโมดูล Material Designer เข้ากับ Engineering Data ของโมดูล ACP
2. เลือกชิ้นงานในคำสั่ง Geometry ที่ออกแบบไว้ก่อนหน้านี้ให้เข้ามาสู่โมดูล



รูปที่ 6.14 การเชื่อมต่อรูปทรงที่ออกแบบไว้เข้าสู่โมดูล ACP

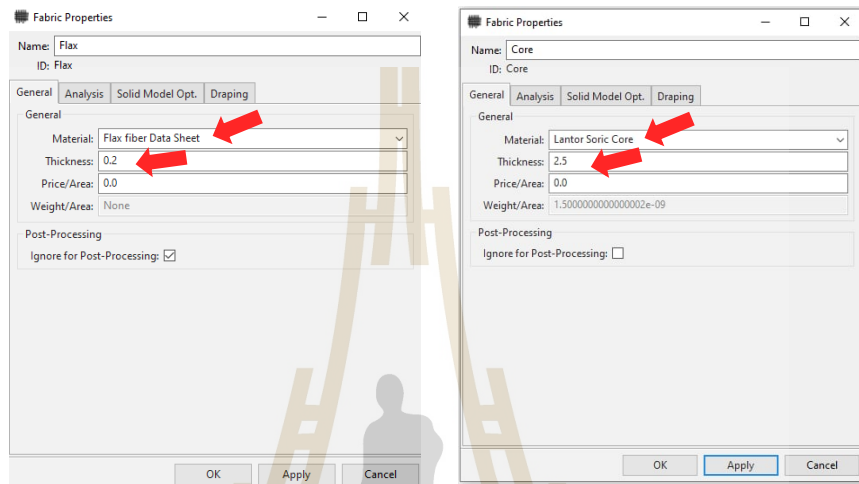
3. สร้าง Mesh Element ให้กับตัวอย่างชิ้นงานในคำสั่งของ Model



รูปที่ 6.15 Mesh สำหรับโครงสร้างแซนวิชคอมโพสิต

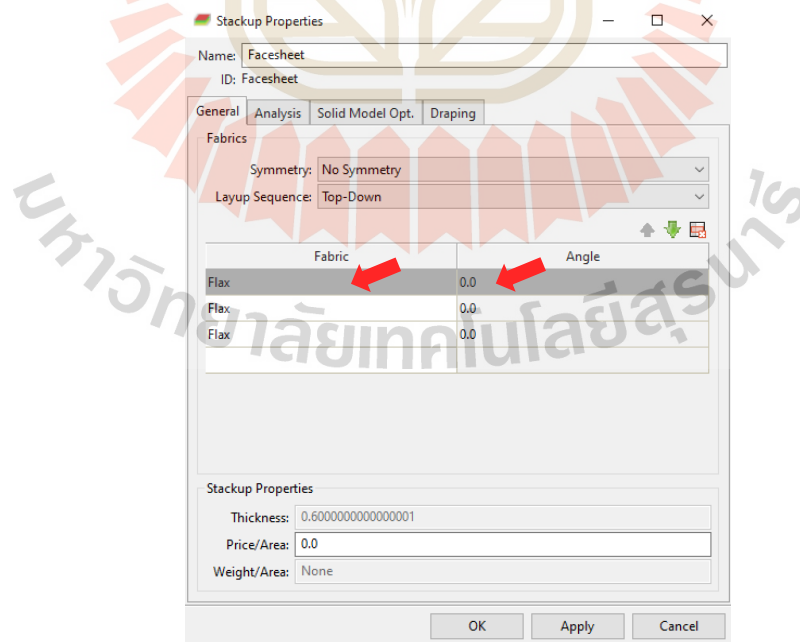
4. เข้าสู่คำสั่ง Setup ของโมดูล ACP เพื่อกำหนดคุณลักษณะของคอมโพสิต
5. กำหนดขนาดและชนิดของวัสดุที่จะใช้เป็นสารเสริมแรงของคอมโพสิตในการตั้งค่า Fabric

Properties



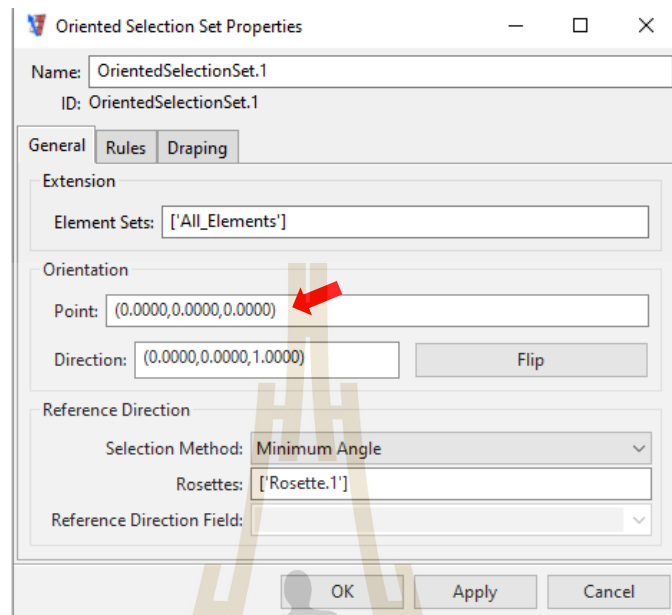
รูปที่ 6.16 กำหนดชนิดของวัสดุและขนาด

6. กำหนดการจัดวางคอมโพสิตแต่ละชั้น รวมถึงทิศทางของเส้นใยสำหรับแผ่นผิวหน้า (Face Sheets) ในการตั้งค่า Stackup Properties



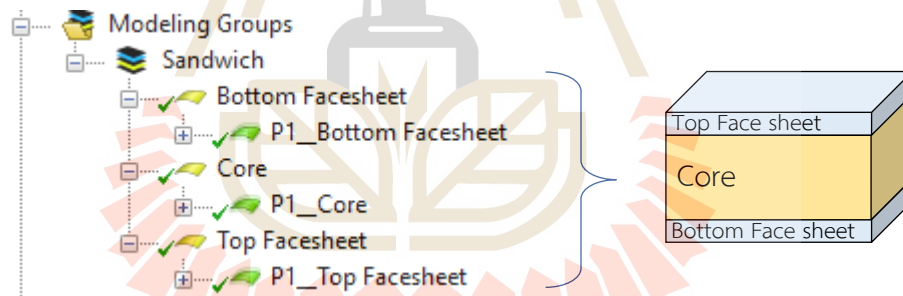
รูปที่ 6.17 การวางชั้นของเส้นใยเสริมแรง และการกำหนดทิศทาง

### 7. กำหนดจุดอ้างอิงของทิศทางเส้นใยในการตั้งค่า Oriented Selection Sets



รูปที่ 6.18 การกำหนดจุดอ้างอิงของทิศทางเส้นใย

### 8. กำหนดชั้นของโครงสร้างแซนวิชคอมโพสิตทั้งหมด ในการตั้งค่า Modeling Groups



รูปที่ 6.19 การกำหนดลำดับชั้นของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต

### 9. หลังจากเสร็จสิ้นการกำหนดคุณลักษณะของคอมโพสิตแล้ว จากนั้นเชื่อมต่อการตั้งค่า Setup จากโมดูล ACP เข้าสู่ Model ในโมดูลการวิเคราะห์ Static Structural



รูปที่ 6.20 การเชื่อมต่อข้อมูลจากโมดูล ACP เข้าสู่โมดูล Static Structural

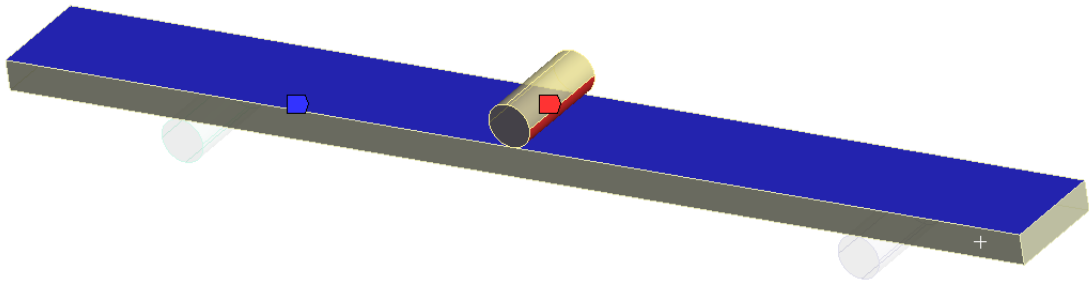
การกำหนดคุณลักษณะของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตที่แผ่นผิวหน้าเสริมด้วยเส้นใย แพลกซ์ร่วมกับเมทริกซ์เกรดซีวภาพและแกนกลางแบบ Lantor Soric XF โดยคุณสมบัติเชิงกลมาจากโมดูล Material Designer (MD) การจัดวางทิศทางและลำดับชั้นคอมโพสิตจากโมดูล ANSYS Composite PrepPost (ACP) หลังจากผ่านการจำลองคุณสมบัติของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตทั้ง 2 โมดูลเรียบร้อยแล้ว หัวข้อถัดไปจะเป็นการกำหนดรูปแบบ วิธีการและขอบเขตของการจำลองการทดสอบวัสดุ โดยผ่านการทดสอบการดัดงอ 3 จุด (3 Point Bending) ด้วยโมดูล Static Structural เพื่อประเมินคุณสมบัติความต้านทานแรงดัดงอ ทั้งการต้านทานโหลดสูงสุด (Maximum Load) ความเค้นดัดงอ (Flexural Stress) ความเครียด (Flexural Strain) รวมถึงโมดูลัสแรงดัดงอ (Flexural Modulus) ของโครงสร้าง

#### 6.4 การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต

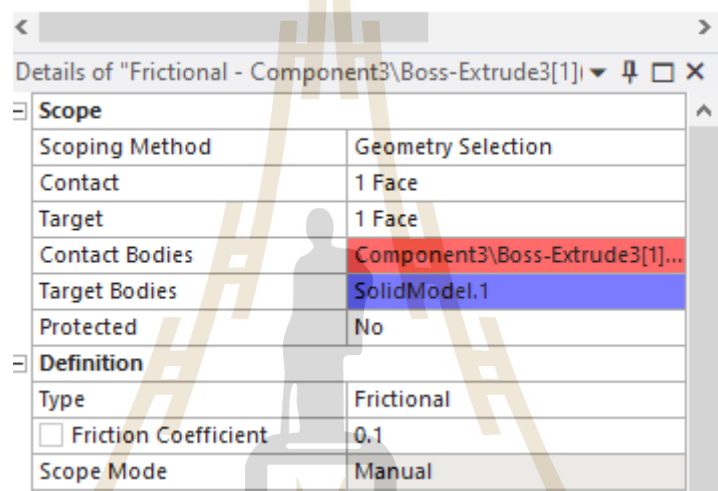
ในปัจจุบันนั้น ความก้าวหน้าทางโครงสร้างวิศวกรรมที่ใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ มีความซับซ้อนและพัฒนาที่สูงมาก การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลเพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของโครงสร้าง รวมถึงพฤติกรรมของวัสดุภายใต้สภาวะของการรับแรงในรูปแบบต่างๆ การใช้คอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์รวมถึงประเมินปัญหาทางวิศวกรรมมีบทบาทสำคัญในการช่วยให้การวิเคราะห์โครงสร้างผ่านโมดูล Static Structural ผ่านโปรแกรม ANSYS Workbench โดยโมดูลนี้จะใช้เพื่อกำหนดขอบเขตของการจำลองการทดสอบดัดงอ 3 จุด (3 Point Bending) ของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต โดยโมดูลนี้สามารถทำการคำนวณคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ เช่น โหลดกระทำสูงสุด (Maximum Load) ความเค้นดัดงอ (Flexural Stress) ความเครียดดัดงอ (Flexural Strain) และโมดูลัสดัดงอ (Flexural Modulus) โดยเงื่อนไขของการเคลื่อนที่ของหัวทดสอบจะกดลงไปบนผิวด้านบนของคอมโพสิตจนถึงระยะ 6 mm เพื่อยังรักษาพฤติกรรมของวัสดุว่ายังเป็นแบบยืดหยุ่นอยู่ (Elastic Deformation) ของโครงสร้างที่อ้างอิงข้อมูลมาจากการทดสอบจริง

ลำดับขั้นตอนของการกำหนดขอบเขตของการทดสอบการดัดงอ 3 จุด (3 Point Bending) ด้วยโมดูล Static Structural ผ่านโปรแกรม ANSYS Workbench มีขั้นตอนดังนี้

1. เชื่อมต่อการตั้งค่า Setup ที่มาจากโมดูล ACP เข้าสู่ Model ของโมดูล Static Structural
2. ตรวจสอบหน้าสัมผัส (Contact) ของโครงสร้างคอมโพสิตระหว่างหัวกดและฐานรองรับ โดยกำหนดประเภทเป็นของผิวสัมผัสเป็นแบบ Frictional

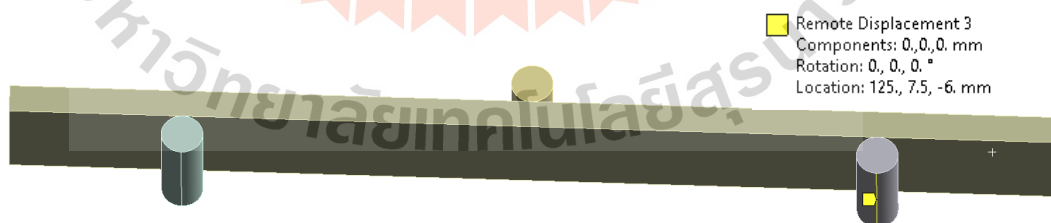


รูปที่ 6.21 การกำหนดการสัมผัสกันของโครงสร้างและหัวกด



รูปที่ 6.22 การกำหนดชนิดของการผิวสัมผัสแบบ Frictional

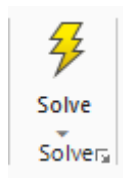
3. กำหนดฐานรองรับทั้ง 2 ฝั่งให้อยู่กับที่โดยไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ และกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของหัวกดด้านบน โดยระยะของการกดสูงสุดจะกดไปจนถึงระยะ 6 mm



รูปที่ 6.23 การกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของหัวกด

4. เริ่มวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างเมื่ออยู่ภายใต้โหลดดัดงอแบบ 3 จุด ด้วยคำสั่ง

Solve



รูปที่ 6.24 คำสั่งเริ่มการวิเคราะห์

คุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยโมดูล Static Structural มีความจำเป็นในการกำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ให้ถูกต้อง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแม่นยำ รวมถึงการนำผลลัพธ์ของคุณสมบัติเชิงกลจากการประเมินด้วยโปรแกรมนี้ไปเปรียบเทียบกับคุณสมบัติเชิงกลที่ได้มาจากการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของโมเดลการจำลองและปรับปรุงการกำหนดพารามิเตอร์หรือตัวแปรอื่นๆ เข้ามาเพิ่มเติมเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองและการทดสอบจริงมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยผลจากการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ทั้ง 2 ประเภทนี้จะถูกอธิบายในบทถัดไป

## บทที่ 7

### การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต

ก่อนการใช้งานวัสดุคอมโพสิตหรือแม้แต่วัสดุรับแรงประเภทอื่นๆ ก็ตามนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องผ่านการประเมินเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของวัสดุเมื่ออยู่ภายใต้โหลดกระทำแบบต่างๆ ก่อนการนำไปใช้งานสำหรับการรับแรงจริง โดยการเข้ามาของคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม (CAE) มีบทบาทสำคัญที่ช่วยให้สามารถประเมินคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุได้อย่างรวดเร็วและลดต้นทุนของการผลิตวัสดุเพื่อทดสอบจริง แต่การวิเคราะห์ที่มาจากผลการจำลองผ่านโปรแกรมวิเคราะห์เพียงอย่างเดียว อาจส่งผลให้ผลลัพธ์ไม่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงของพฤติกรรมของวัสดุ การกำหนดตัวแปรสำคัญและระบุขอบเขตของการวิเคราะห์ที่ชัดเจนจะทำให้ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์แม่นยำมากขึ้น อีกทั้งการนำผลลัพธ์ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงของวัสดุเพื่อตรวจสอบคลาดเคลื่อนของผลการทดลองจะช่วยยืนยันโมเดลการวิเคราะห์และเพิ่มความน่าเชื่อถือที่มาจากผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้

เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้มาจากการทดสอบจริงและที่มาจากผลการจำลองนั้น มีความสอดคล้องกันในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม มีปัจจัยบางอย่างที่ทำให้เกิดความแตกต่างของผลลัพธ์ที่มาจาก การประเมินทั้ง 2 วิธีนี้ เช่น ความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างของวัสดุที่นำไปทดสอบจริง ที่อาจจะมี ความไม่เท่ากันของเส้นใยในบางพื้นที่ หรือปริมาณที่ไม่เท่ากันของเมทริกซ์ในบางพื้นที่ เป็นต้น รวมถึง ความไม่แน่นอนของสภาพแวดล้อมในระหว่างกระบวนการผลิตและการทดสอบวัสดุจริงที่อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการวัดค่าบางอย่าง ในทางกลับกันกับการวิเคราะห์ผ่านการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ที่แสดงผลลัพธ์ที่มาจากพฤติกรรมของวัสดุแบบสมบูรณ์

#### 7.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลจากการทดลองและไฟไนต์เอลิเมนต์

การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่มาจากผลการทดสอบจริงของวัสดุและจากการจำลองผ่านโปรแกรม ANSYS Workbench® จะใช้โครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตที่แผ่นผิวหน้าเสริมแรงด้วยเส้นใย แพลกซ์ แกนเสริมแรงแบบ Lantor Soric XF ขนาด 2.5 mm 5 mm และ 7.5 mm ใช้งานร่วมกับ

เมทริกซ์เกรดชีวภาพ SR33 ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปจะใช้วิธีการและขั้นตอนคล้ายกันกับรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.4 โดยใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยวิธีแวกคัม อินฟิวชัน (Vacuum Infusion Process) รวมถึงข้อมูลผลลัพธ์ของความต้านทานแรงดัด ความเค้นดัด โมดูลัสดัดงอ ที่มาจากการทดสอบในหัวข้อ 5.4 เช่นเดียวกัน ซึ่งข้อมูลจะถูกวิเคราะห์เปรียบเทียบกันกับการวิเคราะห์ผ่านการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench®

โมเดลที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบผลลัพธ์คุณสมบัติเชิงกลจะเป็นการจำลองโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตที่แผ่นผิวหน้าเสริมแรงด้วยเส้นใยแฟลกซ์ แกนเสริมแรงแบบ Lantor Soric XF ขนาด 2.5 mm 5 mm 7.5 mm ร่วมกันกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพชนิด SR33 ผ่านโมดูลทั้ง 3 คือ Material Designer (MD) สำหรับการจำลองโครงสร้างจุลภาคและประเมินคุณสมบัติเชิงกล ถัดมาคือโมดูล Ansys Composite Prep-Post (ACP) สำหรับการกำหนดคุณลักษณะของคอมโพสิต เช่น ทิศทางของเส้นใย จำนวนลำดับชั้นของการวาง แกนอ้างอิงของทิศทางเส้นใย เป็นต้น และประเมินคุณสมบัติเชิงกลผ่านโมดูล Static Structural โดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์นี้มีลำดับขั้นตอนการทำงานคล้ายกันกับรายละเอียดที่อธิบายไว้ในบทที่ 6

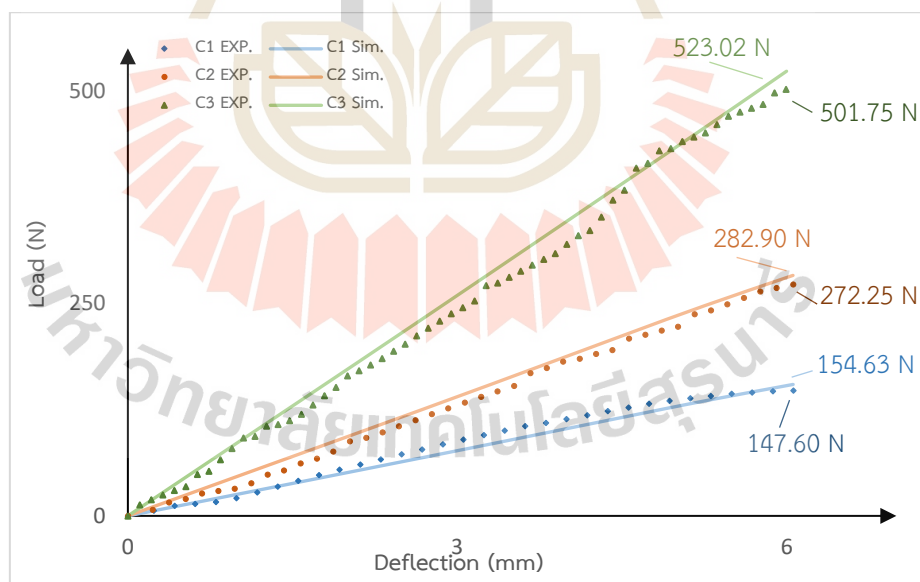
ดังนั้น จะเปรียบเทียบผลลัพธ์ของคุณสมบัติเชิงกลที่มาจาก การทดสอบจริงและการจำลองในขอบเขตพฤติกรรมของวัสดุที่อยู่ในช่วง พฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) หรืออยู่ในช่วงของกราฟเส้นตรงในความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะโก่งตัว (Load – Deflection Curve) เท่านั้น โดยจะกำหนดการวิเคราะห์ในระยะเวลาที่การโก่งตัวของตัวอย่างชิ้นงานเท่ากันทั้งหมด คือ 6 mm โดยระยะนี้ยังอยู่ในช่วงพฤติกรรมแบบเชิงเส้นของทั้ง 3 ประเภทของตัวอย่างโครงสร้าง โดยผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตนี้จะถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป

## 7.2 การเปรียบเทียบความต้านทานแรงดัดของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต

การเปรียบเทียบของความต้านทานแรงดัดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตระหว่างผลการทดสอบจริงและการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จะพิจารณาข้อมูลผ่านกราฟความสัมพันธ์ของโหลดและระยะโก่งตัวที่ตำแหน่งเดียวกัน โดยการตรวจสอบจะมุ่งเน้นไปที่การวัดค่าเชิงตัวเลขที่ได้มาจากทั้ง 2 วิธีการและประเมินความคลาดเคลื่อน (Error) ว่ามีปริมาณที่มากน้อย

เพียงใด เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในระดับที่ยอมรับได้ และจะรวมถึงการประเมินความชันร่วมด้วยเพื่อระบุจุดตัดต่อโดยรวมของโครงสร้าง

กราฟแสดงความต้านทานแรงดัดของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตที่ตำแหน่งการโก่งงอที่ระยะเดียวกันคือ 6 mm ดังแสดงในรูปที่ 7.1 พบว่าค่าความต้านทานแรงดัดอระหว่างการทดสอบจริงและจากการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench® ให้ค่าของโหลด ณ ตำแหน่งเดียวกันที่ใกล้เคียงกันมาก เช่น ในตัวอย่าง C1 ที่มีแกนหนา 2.5 mm วัดความต้านทานแรงดัดอเท่ากับ 154.63 N และ 147.60 N สำหรับค่าจากการจำลองและการทดสอบจริง ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของความหนาแกนกลางมีอิทธิพลที่ชัดเจนต่อโครงสร้างที่ทำให้ค่าแรงดัดอเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือการทำให้โครงสร้างเกิดการโก่งตัวที่ระยะ 6 mm โครงสร้างที่หนาที่สุดอย่าง C3 ที่มีแกนหนา 7.5 mm มีความแข็งแรงที่สูงเนื่องจากหน้าตัดของการรับแรงที่เพิ่มมากขึ้น จึงต้องใช้แรงที่มากขึ้นเพื่อให้ได้ระยะการโก่งงอที่เท่ากัน รวมถึงเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ได้มาจากการทดสอบจริงและไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (Relative Error) มีค่าเท่ากับ 4.76% สำหรับตัวอย่าง C1 ซึ่งอยู่ในช่วงยอมรับไม่เกิน  $\pm 10\%$  หมายความว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้



รูปที่ 7.1 การเปรียบเทียบแรงดัดอของการทดสอบจริงและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการวิเคราะห์ความเค้นในโครงสร้างแบบแกนวิช จะพิจารณาความเค้นดัดในชั้นผิว (Facing Stress) ซึ่งจะถูกคำนวณตามสมการที่ 3 ซึ่งเป็นสมการที่กำหนดจากมาตรฐานการทดสอบโครงสร้างแบบแกนวิชคอมโพสิต โดยจะเป็นการเปรียบเทียบค่าของแรงกระทำ (Load) ที่ตำแหน่งการโค้งงอของโครงสร้างเท่ากับ 6 mm เท่ากันทั้งหมด เพื่อประเมินค่าความเค้นที่แผ่นผิวหน้าจากผลการทดสอบจริงเทียบกับความเค้นที่ได้มาจากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ พร้อมทั้งค่าความคลื่อนที่เกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 7.1

$$\sigma = \frac{P \cdot S}{2t(d+c)b} \quad (3)$$

เมื่อ	$\sigma$	คือ ความเค้นดัดในแผ่นผิวหน้า (MPa)
	P	คือ แรงกระทำ (N)
	S	คือ ระยะห่างของฐานรองรับชิ้นงาน (mm)
	t	คือ ความหนาของแผ่นผิวหน้า (mm)
	d	คือ ความหนาโดยรวมของโครงสร้างแกนวิช (mm)
	c	คือ ความหนาของแกนกลาง (mm)
	b	คือ ความกว้างของโครงสร้างแกนวิช (mm)

ตารางที่ 7.1 ความคลาดเคลื่อนของการทดสอบจริงและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

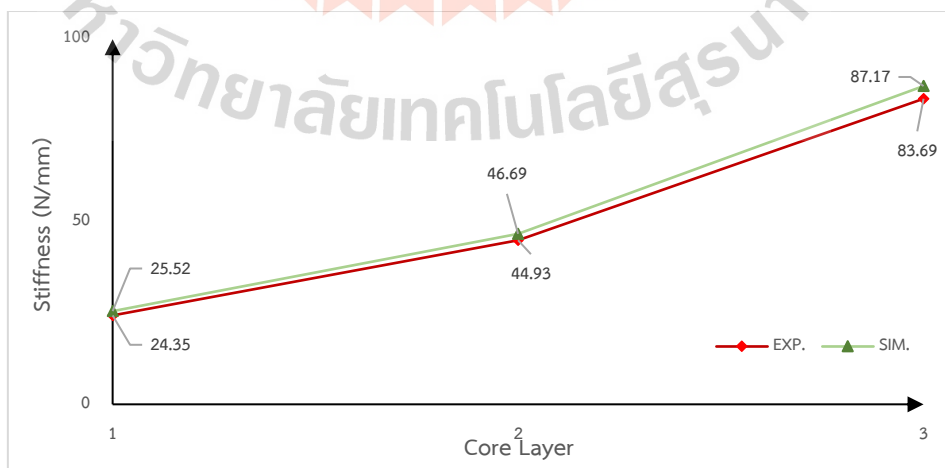
ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ	พารามิเตอร์	ผลลัพธ์จากการทดสอบจริง	ผลลัพธ์จากการจำลอง	ค่าความคลาดเคลื่อน
C1 (Core = 2.5 mm)	Load (N)	147.603	154.63	4.76%
	Facing Stress (MPa)	195.781	207.836	6.16%
C2 (Core = 5 mm)	Load (N)	272.25	282.90	3.92%
	Facing Stress (MPa)	199.881	210.491	5.31%
C3 (Core = 7.5 mm)	Load (N)	501.754	523.02	4.24%
	Facing Stress (MPa)	254.708	269.043	5.63%

ความเค้นที่แผ่นผิวหน้ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อมีความหนาของแกนเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของแรง (Load) ที่มีปริมาณมากกว่าการเพิ่มขึ้นของความหนาที่จะส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานแรงดัด ซึ่งสอดคล้องกันกับการพิจารณาว่าเมื่อโครงสร้างสามารถต้านทานโมเมนต์ในการดัดได้มากขึ้น ดังนั้น เพื่อให้เกิดระยะการโก่งตัวที่เท่ากัน (6 mm) แรงที่จะมากระทำต้องสูงมากขึ้นและส่งผลให้ความเค้นที่ผิวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

### 7.3 การเปรียบเทียบความแข็งแรงของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต

การศึกษาการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรง (Flexural Stiffness) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการต้านทานการเสียรูปภายใต้แรงดัดของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตที่มีเส้นใยเสริมแรงคือเส้นใยฟลิกซ์ร่วมกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพ SR33 และแกนเสริมแรง Lantor Soric XF โดยสามารถวิเคราะห์ได้ผ่านความชันในช่วงพฤติกรรมยืดหยุ่นของกราฟแรงกระทำและระยะโก่งตัว ซึ่งจะแสดงความต้านทานทั้งโครงสร้างได้ดีกว่าการพิจารณาค่ามอดูลัสของวัสดุแต่ละประเภท อีกทั้งยังลดความซับซ้อนของการพิจารณามอดูลัสที่จำเป็นจะต้องแยกวัสดุที่นำมาใช้ในโครงสร้างออกจากกัน

จากการประเมินความชันในรูปที่ 7.1 พบว่าตัวอย่างโครงสร้าง C3 ให้ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างที่สูง เนื่องจาก ความสามารถในการรับโหลดสูงสุดเมื่อพิจารณาระยะโก่งตัวที่เท่ากัน โดยคำนวณค่า Stiffness ได้อยู่ที่ 83.69 N/mm และ 87.17 N/mm สำหรับการทดสอบจริงและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาตัวอย่าง 1C และ 2C มีค่าความแข็งแรงจากการที่ต้านทานแรงกระทำได้น้อยลงทั้งจากการทดสอบจริงและการจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 การเปรียบเทียบความแข็งแรงของการทดสอบจริงและการจำลอง

ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างที่ใช้แกนเสริมแรงแบบ Lantor Soric XF มีผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างนี้ การเพิ่มขึ้นของแกนกลางมีความสอดคล้องกันของผลลัพธ์ที่ความต้านทานแรงดัดงอที่เพิ่มขึ้น ค่าความเค้นที่ผิวหน้าเพิ่มขึ้น และความแข็งแรงโดยรวมของโครงสร้างก็เพิ่มขึ้นตามขนาดแกนเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นผลที่มาจากการเพิ่มขึ้นของความต้านทานโมเมนต์ดัดงอที่มาจากความหนาแกน แต่ในทางกลับกัน ระยะของการโก่งตัวของวัสดุมีการลดลงอย่างต่อเนื่องจากความหนาแกน ทำให้การเลือกขนาดแกนที่เหมาะสมเพียงพอและมีความยืดหยุ่นที่เหมาะสมในการใช้งานมีความจำเป็นก่อนการนำไปใช้งาน ดังนั้น โครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตที่มีขนาดแกน 2.5 mm จะถูกนำไปกำหนดการออกแบบสำหรับโครงสร้างปีกของอากาศยานไร้คนขับ ในบทที่ 8 เพื่อประเมินการรับแรงยกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างปีก รวมถึงระยะของการโก่งตัวของโครงสร้างปีกว่ายังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในการนำไปใช้งานหรือไม่



## บทที่ 8

### การออกแบบสำหรับโครงสร้างของอากาศยานไร้คนขับ

อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs) มีบทบาทสำคัญในหลายภาคส่วน ทั้งการสำรวจ การถ่ายภาพ การขนส่ง หรือการเกษตรสมัยใหม่ แนวโน้มของการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับในปัจจุบันเป็นไปอย่างก้าวกระโดด โครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตเป็นหนึ่งในโครงสร้างวัสดุที่มักจะถูกนำมาใช้งานเป็นโครงสร้างของอากาศยานไร้คนขับ เนื่องจากความแข็งแรงที่สูงเมื่อเทียบกับน้ำหนักที่เบาของวัสดุ ทำให้ความเหมาะสมของการนำโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตไปใช้งานในอากาศยานจึงเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง ไม่เพียงแค่นั้นประสิทธิภาพในความสามารถของการปฏิบัติการและการบินเท่านั้น แต่ความสำคัญของการออกแบบที่คำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มีมากยิ่งขึ้นหลังจากที่อากาศยานไร้คนขับเหล่านี้หมดอายุการใช้งานแล้ว การเข้ามามีบทบาทของวัสดุจากธรรมชาติจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในการใช้ทรัพยากรที่หมุนเวียนได้ มาทดแทนวัสดุสังเคราะห์แบบเดิม อย่างไรก็ตาม กระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรมที่ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของการนำไปใช้งานจริง ทั้งประสิทธิภาพทางกล ความทนทานต่อสภาพแวดล้อม จึงเป็นประเด็นสำคัญในการพัฒนาโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตเหล่านี้ อีก เพื่อให้ตอบสนองความต้องการในทุกด้านของการใช้งานในโครงสร้างของอากาศยานไร้คนขับ

#### 8.1 การจำลองการวิเคราะห์โครงสร้างปีกของอากาศยานไร้คนขับ

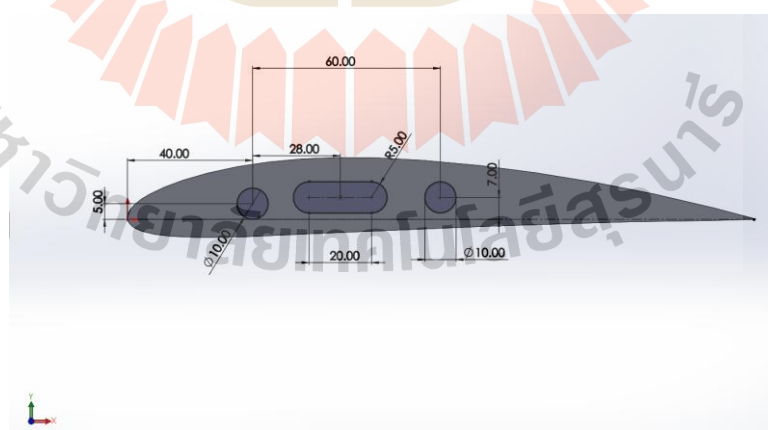
องค์ประกอบที่มีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพการบินของ UAVs ได้แก่ โครงสร้างปีก ซึ่งมีหน้าที่สำคัญในการสร้างแรงยก (Lift) ด้วยเหตุนี้ การออกแบบและการวิเคราะห์โครงสร้างปีกมีกระบวนการสำคัญในการวิเคราะห์คือ การพิจารณาถึงความแข็งแรงทางกล ความสามารถในการรับแรงดัดงอ แรงเฉือน รวมถึงความสามารถในการรับแรงสั่นสะเทือน ตลอดจนปัจจัยด้านน้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างที่เป็นหนึ่งในประเด็นสำคัญที่จะต้องได้รับการพิจารณาอย่างละเอียด

โครงสร้างปีกของ UAVs มักจะมีลักษณะเป็นแผ่นบาง (Shell) ที่บริเวณผิวของโครงสร้าง โดยมีโครงหลักวางตามแนวยาวของปีกและมีความสำคัญสำหรับรับแรงกระทำอย่าง แรงดัดงอ แรงเฉือน ที่เกิดจากแรงยกในระหว่างการบินคือ สปาร์ (Spar) รวมถึงโครงเสริมที่จัดวางตามแนวขวางของโครงสร้างปีก ที่มีหน้าที่รักษารูปร่างพื้นที่ให้แผ่นผิวที่ปีกยังอยู่ในรูปทรงที่กำหนดตามหลักอากาศ

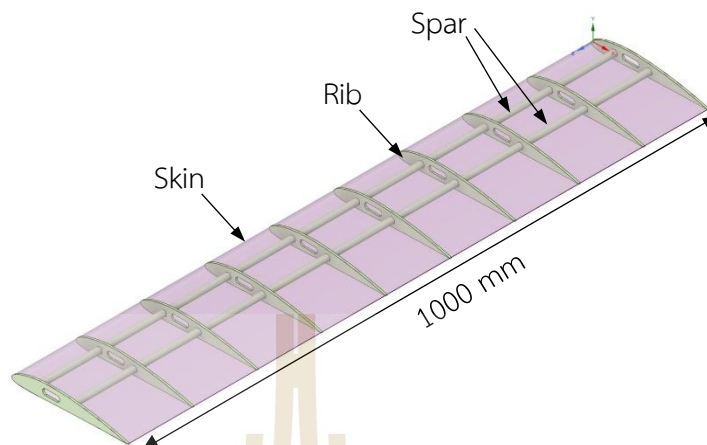
พลศาสตร์ (Aerodynamic) รักษารูปร่างของโครงสร้างปีกด้วย ริป (Rib) โครงสร้างเหล่านี้มักผลิตจากวัสดุที่มีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง เช่น อลูมิเนียมอัลลอยหรือคอมโพสิต เป็นต้น

วิธีการประเมินคุณสมบัติของอากาศยานไร้คนขับมักใช้วิธีการในการทดสอบทางกายภาพในห้องปฏิบัติการจริง แต่มักจะใช้เวลาและเงินทุนในการทดสอบที่สูง ปัจจุบันการจำลองการวิเคราะห์ผ่านคอมพิวเตอร์ สามารถช่วยลดระยะเวลาในการทดสอบและต้นทุนของการทดสอบได้เป็นอย่างมาก หนึ่งในเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์คือ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ที่สามารถประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้โหลดภาวะกระทำแบบต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ

การออกแบบโครงสร้างปีกของอากาศยานไร้คนขับจะกำหนดเป็นปีกแบบยึดตรง (Fixed Wing) โดยมีชิ้นส่วนโครงสร้างอยู่ 3 ประเภท คือ ริป สปาร์ และผิวของปีก โดยกำหนดลักษณะของริปเป็นรูปทรงของแผนอากาศหรือแอร์ฟอยล์ (Airfoil) NACA 4412 ซึ่งเป็นรูปทรงของแอร์ฟอยล์ที่นิยมสำหรับโครงสร้างปีกของอากาศยานไร้คนขับ มีขนาดความยาวคอร์ด (Chord length) คือ 200 mm และมีความหนาของริปเท่ากับ 3 mm ดังแสดงในรูปที่ 8.1 รวมถึงตำแหน่งการวางโครงสร้างถัดมาคือ สปาร์ ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแท่งยาว 1,000 mm มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm จำนวนทั้งหมด 2 เส้น และพื้นผิวของโครงสร้างที่จะกำหนดเป็นลักษณะของแผ่นผิวบางคลุมไปทั้งโครงสร้างของปีก ดังแสดงในรูปที่ 8.2 การกำหนดวัสดุที่จะใช้สำหรับการวิเคราะห์เป็นไปตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 8.1 รวมถึงคุณสมบัติอื่นๆ ของโครงสร้างเช่นกัน



รูปที่ 8.1 ขนาดของ Rib รูปทรง Airfoil NACA 4412



รูปที่ 8.2 โครงสร้างปีก UAVs

ตารางที่ 8.1 วัสดุที่ใช้ศึกษาในโครงสร้างปีก

Structure	Materials	Modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Total Weight (kg)
Spar	AL-2024	73.8	0.34	2,770	2.1
Rib	AL-2024				
Wing Skin	Sandwich Structure	11.553 (along the fiber direction)	0.32	1,025	

การวิเคราะห์จะดำเนินการด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench® โดยกำหนดเป็นการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างจากการรับแรงยกตัวของปีก ที่มีความยาวปีก (Wing Span) เท่ากับ 1,000 mm ถูกจับยึดให้อยู่กับที่ หนึ่งด้าน (Fix Support) ส่วนอีกด้านปล่อยแบบอิสระคล้ายกับลักษณะของคานแบบปลายยื่น (Cantilever Beam) รวมถึงกำหนดแรงกระทำจากแรงโน้มถ่วงที่บริเวณศูนย์กลางของโครงสร้างและพิจารณาแรงยกที่กระทำต่อโครงสร้างปีก ที่เกิดจากหลักอากาศพลศาสตร์ที่ความเร็ว 20 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วโดยเฉลี่ยของอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กในระหว่างการบิน (Phunpeng, Sumklang, et al., 2023) ซึ่งสามารถคำนวณแรงยกได้ดังสมการที่ 4

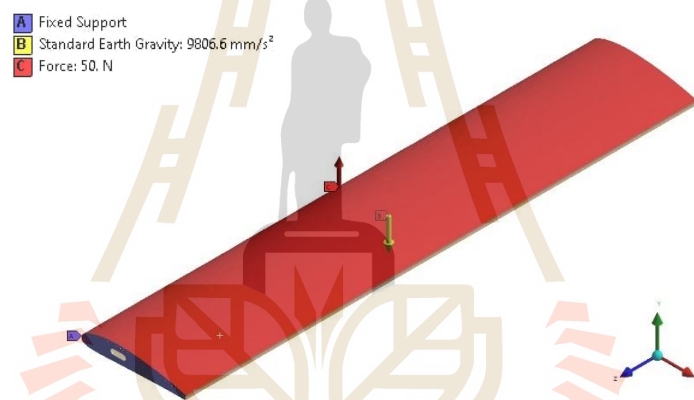
$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_L \quad (4)$$

เมื่อ  $L$  คือ แรงยกที่กระทำต่อปีก (Lift Force, N)

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ (Air Density, kg/m<sup>3</sup>)

- V คือ ความเร็วปะทะของโครงสร้างปีก (Aircraft Velocity, m/s)  
 A คือ พื้นที่ผิวของปีก (Wing Area, m<sup>2</sup>)  
 C<sub>l</sub> คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (Lift coefficient)

พื้นผิวของโครงสร้างปีกจะถูกออกแบบให้เป็นโครงสร้างวัสดุแบบแซนวิชคอมโพสิตที่ใช้งานเส้นใยพลาสติกเป็นเส้นใยเสริมแรงร่วมกับเมทริกซ์แบบชีวภาพ SR33 และแกนกลางแบบ Lantor Soric XF ขนาด 2.5 mm ซึ่งจะถูกออกแบบรวมถึงการจัดเรียงเส้นใยผ่านโมดูลวิเคราะห์ ACP Pre วิธีเดียวกันกับตัวอย่างในบทที่ 6.2 การกำหนดคุณลักษณะในโครงสร้างคอมโพสิต จากนั้นจึงนำเข้าสู่การวิเคราะห์ผ่านโมดูล Static Structural ดังแสดงในรูปที่ 8.3



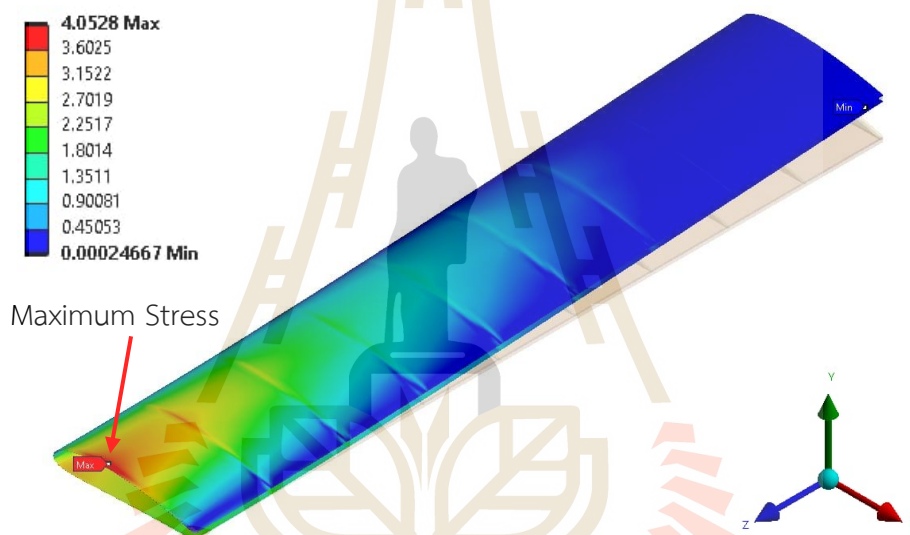
รูปที่ 8.3 Wing Structure Analysis

## 8.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างปีก

การวิเคราะห์คุณสมบัติพิจารณาควบคู่กันระหว่างผลของการกระจายความเค้น (Stress Distribution) ความเครียด (Strain Distribution) และการโก่งตัว (Deflection) ของโครงสร้างโดยรวม ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะสะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุและชิ้นส่วนโครงสร้างภายใต้ภาระที่กำหนดไว้ โดยในกรณีของโครงสร้างปีกที่พื้นผิวเป็นแบบแซนวิชคอมโพสิต การวิเคราะห์จะระบุการตอบสนองต่อแรงที่พื้นผิวของแผ่นผิวหน้า (Face Sheet) ของแซนวิชคอมโพสิตเป็นหลัก เนื่องจากเป็นส่วนที่รับแรงกระทำสูงสุดเมื่อเทียบกับแกนกลาง (Core) โดยการวิเคราะห์ข้อมูล

เหล่านี้จะดำเนินการอย่างเป็นลำดับ เริ่มตั้งแต่การระบุจุดที่มีค่าความเค้นสูงสุดของโครงสร้างปีก และพิจารณาว่าความเค้นดังกล่าวอยู่ภายใต้ขอบเขตความแข็งแรงของวัสดุหรือไม่

ลักษณะการกระจายความเค้นของโครงสร้างปีก พบว่าบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณโคนปีกหรือว่าส่วนที่ปีกติดอยู่กับลำตัว (Root Wing) ซึ่งจะเป็นบริเวณที่กำหนดให้ถูกยึดอยู่กับที่ในการจำลองผ่านโปรแกรม ความเค้นที่รวมในทุกทิศทางที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ (Von-Mises Stress) มีค่า 4.05 MPa โดยเกิดขึ้นสูงที่สุดที่แผ่นผิวหน้าด้านบนนอกสุด และการกระจายของความเค้นมีปริมาณลดลงเมื่อพิจารณาที่บริเวณไกลออกไปจาก Root Wing จนไปถึงส่วนปลายของโครงสร้างปีก ดังแสดงในรูปที่ 8.4



รูปที่ 8.4 การกระจายตัวของความเค้นในโครงสร้างปีก

การเปรียบเทียบกับตัวอย่างการวิเคราะห์เพื่อประเมินความเค้นที่เกิดขึ้นในปริมาณแรงยกที่เท่ากันนั้น จากตัวอย่างการศึกษาของ Veena, Sireegorn and Thongchart (2023) ที่พบว่าความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผิวของโครงสร้างปีก จากวัสดุ AL-2024 มีปริมาณความเค้น (Equivalent Stress) เท่ากับ 7.3735 MPa ซึ่งพบว่าโครงสร้างแบบแซนวิชมีความเค้นที่น้อยกว่าอยู่ที่ 4.05 MPa ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า โครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตมีประสิทธิภาพในการกระจายแรงดัดงอได้ดีมากกว่า จากทั้งระยะของแกนที่หนาขึ้น ช่วยเพิ่มความต้านทานในการรับแรงดัดงอ ทำให้โครงสร้างโดยรวมมีความแข็งแรงในด้านการดัดงอสูงกว่าวัสดุเนื้อเดียวอย่าง AL-2024 ในเงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน และรวมถึงระยะของการโค้งตัวเนื่องจากแรงยก พบว่าจากการจำลองมีค่าการโค้งตัวอยู่ที่ 1.8 mm เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Veena et al. ที่ระบุว่ามีการโค้งตัวเกิดขึ้น 1.4 mm ซึ่ง

มีความสมเหตุสมผลจากการที่ค่ามอดูลัสของ AL-2024 ที่มีค่าสูงกว่าค่ามอดูลัสของเส้นใยเสริมแรงในคอมโพสิต จากการเปรียบเทียบผลการจำลองนี้ พบว่าโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตสามารถนำมาใช้เป็นพื้นผิวของโครงสร้างปีกของอากาศยานไร้คนขับได้ แต่จะต้องพิจารณาในส่วนของน้ำหนักโดยรวมของโครงสร้าง ซึ่งน้ำหนักของโครงสร้างที่ใช้คอมโพสิตแบบแซนวิช จะมีผิวปีกที่หนากว่า และมีน้ำหนักรวม 2.1 กิโลกรัม แต่ตามรายงานที่นำมาเปรียบเทียบ ผิวปีกมีความหนาที่น้อยกว่า และมีน้ำหนักน้อยกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 1.8 กิโลกรัม (Phunpeng, Sumklang, et al., 2023)

การวิเคราะห์ทฤษฎีความเสียหายเพื่อตรวจสอบค่าความปลอดภัยของโครงสร้างจะคำนวณผ่านสมการที่ 5 ตามทฤษฎีของ Hashin Failure Criteria เนื่องจากแผ่นผิวหน้าที่ได้รับโหลดแบบกดอัดเกิดค่าความเค้นสูงสุด จึงจะวิเคราะห์ในโหมดความล้มเหลวแบบ Fiber Compressive Failure โดยค่า Failure Index ที่น้อยกว่า 1 แสดงว่าไม่เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง

$$\text{Fiber Compressive Failure: } F_f^C = \left( \frac{\sigma_1}{X_c} \right)^2 \quad (5)$$

เมื่อ  $\sigma_1$  คือ ความเค้นกดอัดที่เกิดขึ้น (MPa)

$X_c$  คือ ความแข็งแรงกดอัดตามแนวเส้นใย (MPa)

$$FoS_{\text{Hashin}} \approx \frac{1}{\sqrt{F_f^C}} \quad (6)$$

ซึ่งจากการคำนวณนั้นพบว่า ค่า Failure Index มีค่าเท่ากับ 0.00467 และเมื่อพิจารณาในค่าความปลอดภัย (Factor of Safety, FoS) ดังสมการที่ 6 ซึ่งพบว่ามีค่าความปลอดภัยประมาณ 14.6 ดังนั้น การประเมินผลลัพธ์ของค่าความปลอดภัยและทฤษฎีความเสียหายของคอมโพสิตที่ใช้เป็นพื้นผิวของโครงสร้างปีกของอากาศยานไร้คนขับ ผลลัพธ์ทั้งหมดระบุความสอดคล้องกันว่า โครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตนี้มีค่าความปลอดภัยสูง และไม่พบความเสียหายจากรูปแบบความล้มเหลวจากเส้นใยแตกหักเนื่องจากแรงกดอัด จึงสามารถสรุปได้ว่า โครงสร้างปีกของอากาศยานไร้คนขับที่พื้นผิวนี้ใช้เป็นโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตที่มีแผ่นผิวหน้าคือเส้นใยเสริมแรงร่วมกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพ SR33 และแกนแบบ Lantor Soric XF มีความสามารถในการรับแรงที่เพียงพอในการใช้งาน

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงยกที่กำหนดที่ได้ศึกษาไว้พบว่า โครงสร้างที่ออกแบบไว้ให้ค่าความปลอดภัยและค่าความแข็งแรงต่อความเสียหายตามทฤษฎี Hashin มีค่าที่สูงเกินจำเป็นในการใช้งานจริง โดยเฉพาะบริเวณที่รับภาระน้อยหรือไม่อยู่ในแนวของแรงวิกฤติ ซึ่งอาจหมายความว่า

การออกแบบมีการเผื่อความแข็งแรงที่มากเกินไป ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีขนาดและน้ำหนักที่มากขึ้นและอาจทำให้ต้นทุนในด้านของการผลิตวัสดุและกระบวนการผลิตที่สูงขึ้นเกินความจำเป็น แนวทางการพิจารณาโครงสร้างปีกนี้อาจจะออกแบบใหม่สำหรับการลดขนาดและน้ำหนักของวัสดุลง แต่ยังคงรักษาความปลอดภัยและประสิทธิภาพของโครงสร้างไว้ในระดับที่เหมาะสม หรืออาจจะปรับเปลี่ยนขนาดให้มีขนาดใหญ่และหนาในบริเวณที่มีการรับแรงสูง แต่บริเวณที่ไม่มีการรับแรงหรือการรับแรงน้อยอาจทำให้มีขนาดที่เล็กลงได้ อีกทั้งยังรวมถึงการจะผลิตและนำไปใช้งานจริงควรจะพิจารณาผลกระทบที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงที่มีปัจจัยด้าน ความชื้น อุณหภูมิ แสงยูวี (UV) การดูดซับน้ำ การสั่นของโครงสร้าง เป็นต้น



## บทที่ 9

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 9.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแฟลกซ์ร่วมกับเมทริกซ์เกรดชีวภาพแบบ SR33 และแกนเสริมแรงแบบ Lantor Soric XF เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับขนาดของแกนเสริมแรงที่มีความหนาแตกต่างกัน รวมถึงวิธีการช่วยเพิ่มคุณสมบัติที่ความต้านทานแรงดัดงอที่เป็นการทดสอบหลักของงานวิจัยนี้ การทดสอบแรงดัดงอทางกายภาพจะถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine; UTM) ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C393-00 และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการจำลองการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม ANSYS Workbench®

การพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาตินี้ ถูกปรับปรุง 3 รูปแบบคือ การลดอัตราการให้ความร้อนในกระบวนการบ่มเรซิน (Curing process) การใช้สารเติมแต่งที่เป็นขยะจากการเผาน้ำมันเตา และการใช้แกนรีไซเคิลเสริมแรงแบบ Lantor Soric XF ที่ได้มาจากการรีไซเคิลขวดพลาสติก PET ซึ่งล้าแล้วแต่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลต่อคอมโพสิตทั้งหมด รวมถึงกระบวนการขึ้นรูปที่ส่งผลดีต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคือกระบวนการ แวกค์ม อินฟิวชัน (Vacuum Infusion Process) ที่อาศัยความดันบรรยากาศในการกดทับให้แผ่นคอมโพสิตมีความหนาแน่นและติดกันแน่นเป็นอย่างดี

การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตผ่านโปรแกรม ANSYS Workbench® โดยออกแบบคุณสมบัติวัสดุคอมโพสิตด้วย โมดูล Materials Designer นำมาวิเคราะห์โครงสร้างในระดับจุลภาค ขนาดเส้นใย การใช้อัตราส่วนเมทริกซ์และเส้นใยเสริมแรง อีกทั้งโมดูล ACP ที่ใช้ในการกำหนดคุณลักษณะสำคัญของคอมโพสิตตั้งแต่ ขนาดทิศทาง ไปจนถึงลำดับชั้นการวางเส้นใยและแกนเสริมแรง รวมถึงโมดูล Static Structural ที่เป็นโมดูลสำคัญในการกำหนดขอบเขตของการทดสอบทั้งหมด การแสดงผลจากการวิเคราะห์ ความต้านทานแรงดัดงอ ระยะการโก่งตัว ความเค้นดัดงอ เป็นต้นและใช้เปรียบเทียบกับ การทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการซึ่งพบว่า ในตำแหน่งของระยะการโก่งตัวของโครงสร้างวัสดุเท่ากัน ผลลัพธ์จากการ

ทดสอบจริงและจากการจำลองนั้นให้ค่าที่ใกล้เคียงกันและมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 10% ทั้งหมด ได้แก่ แรงดัดงอ (Load) ความเค้นดัดงอ (Flexural Stress) รวมถึงความแข็งแกร่งด้านการดัดงอของโครงสร้าง (Flexural Stiffness) และค่าความเครียด (Strain) โดยผลลัพธ์ของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตที่มีขนาดของแกนเท่ากับ 7.5 mm ให้ค่าของความต้านทานแรงดัดงอสูงที่สุดเท่ากับ 579.92 N เมื่อเทียบกับขนาดแกนแบบอื่นๆ

การวิเคราะห์โครงสร้างวัสดุแบบแซนวิชคอมโพสิตดังกล่าวที่ถูกพิจารณาเป็นพื้นที่ผิวของโครงสร้างปีกของอากาศยานไร้คนขับพบว่าโครงสร้างที่ออกแบบไว้สามารถรองรับแรงยกที่มากกระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าความปลอดภัย FoS ตามทฤษฎีความเสียหายของ Hashin Criteria อยู่ในช่วงปลอดภัยและโครงสร้างยังไม่เข้าสู่ช่วงวิกฤติของการเสียหายภายใต้แรง จากผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตชนิดนี้เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานในโครงสร้างของอากาศยานไร้คนขับ เช่น โครงสร้างปีก โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีเพียงพอต่อการรับแรงและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ควรจะต้องพิจารณาปัจจัยในด้านน้ำหนักของโครงสร้างและการออกแบบเพื่อให้ค่าความปลอดภัยอยู่ในระดับที่เหมาะสม

## 9.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) การศึกษาผลของรูปร่างของแกนแบบ Lantor Soric XF ที่มีลักษณะคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb) อาจส่งผลให้ความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง และอาจทำให้ผลลัพธ์เข้าใกล้ความเป็นจริงมากขึ้น
- 2) การวิเคราะห์ผลลัพธ์จากจำลองผ่านโปรแกรมในส่วนของการแสดงผล Post-Processing อาจจะใช้โมดูลที่เหมาะสมกับการแสดงผลของคอมโพสิตโดยเฉพาะ ได้แก่ ACP-Post เพื่อให้การแสดงผลในแต่ละชั้นผิวของคอมโพสิตได้ละเอียดมากขึ้น
- 3) ความแม่นยำและความสม่ำเสมอของกระบวนการขึ้นรูปคอมโพสิตเป็นส่วนสำคัญที่จะต้องควบคุมให้เหมือนกันตลอดกระบวนการผลิตคอมโพสิต
- 4) การตรวจสอบชิ้นงานของโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิตเมื่อมีการใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมที่รวมถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากปัจจัยทางธรรมชาติ เช่น ความชื้น แสงแดด อุณหภูมิ เป็นต้น
- 5) การศึกษาศักยภาพของการย่อยสลายได้ทางธรรมชาติและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจเป็นแนวทางในการพัฒนาเพื่อให้ตอบสนองต่อภาคอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้น

## รายการอ้างอิง

- Abdellah, M. Y., Sadek, M. G., Alharthi, H., Abdel-Jaber, G. T., & Backar, A. H. (2023, 2023/11/01/). Characteristic properties of date-palm fibre/sheep wool reinforced polyester composites. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 8(4), 430-443. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.09.003>
- ARRIS. (2023). *ARRIS Unveils Structural Flax Fiber Composites*. <https://arriscomposites.com/news-structural-flax-fiber-advanced-composites/>
- Bekele, A. E., Lemu, H. G., & Jiru, M. G. (2023). Study of the Effects of Alkali Treatment and Fiber Orientation on Mechanical Properties of Enset/Sisal Polymer Hybrid Composite. *Journal of Composites Science*, 7(1).
- Bhuiyan, A. B. M. A. H., Hossain, M. F., Rana, M. S., & Ferdous, M. S. (2023, 2023/12/01/). Impact of fiber orientations, stacking sequences and ageing on mechanical properties of woven jute-kevlar hybrid composites. *Results in Materials*, 20, 100477. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100477>
- Carvalho, D., Ferreira, N., França, B., Marques, R., Silva, M., Silva, S., Silva, E., Macário, D., Barroso, L., Silva, C. J., & Oliveira, C. (2024, 2024/07/01/). Advancing sustainability in the automotive industry: Bioprepreps and fully bio-based composites. *Composites Part C: Open Access*, 14, 100459. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100459>
- Colamartino, I., Pinato, E., Cvasin, M., Tagliabue, M., Anghileri, M., & Boniardi, M. (2023, 2023/12/01/). Static, dynamic and impact properties of a high-performance flax-fiber composite. *Results in Materials*, 20, 100493. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100493>

- David Müzel, S., Bonhin, E. P., Guimarães, N. M., & Guidi, E. S. (2020). Application of the Finite Element Method in the Analysis of Composite Materials: A Review. *Polymers*, 12(4).
- Elfaleh, I., Abbassi, F., Habibi, M., Ahmad, F., Guedri, M., Nasri, M., & Garnier, C. (2023, 2023/09/01/). A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. *Results in Engineering*, 19, 101271. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>
- Hairi, S., Mohd Saleh, S., Hamdan, A., & Omar, Z. (2023). A Review on Composite Aerostructure Development for UAV Application. In (pp. 137-157). [https://doi.org/10.1007/978-981-99-1583-5\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1583-5_9)
- Hemp., A. f. E. F.-L. (2024). *Flax production: strong structure growth over the last 10 years*. <https://allianceflaxlinenhemp.eu/fr>
- Kamarudin, S. H., Mohd Basri, M. S., Rayung, M., Abu, F., Ahmad, S. b., Norizan, M. N., Osman, S., Sarifuddin, N., Desa, M. S., Abdullah, U. H., Mohamed Amin Tawakkal, I. S., & Abdullah, L. C. (2022). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications. *Polymers*, 14(17).
- Kazmi, S. M. R., Jayaraman, K., & Das, R. (2023, 2023/07/01/). Manufacturing of biodegradable Flax-PLA curvatures using a unique vacuum-temperature profile. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 6(3), 265-277. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iaiepr.2023.02.001>
- Khalid, M. Y., Al Rashid, A., Arif, Z. U., Ahmed, W., Arshad, H., & Zaidi, A. A. (2021, 2021/09/01/). Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications. *Results in Engineering*, 11, 100263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100263>

- Malalli, C. S., & Ramji, B. R. (2022, 2022/01/01/). Mechanical characterization of natural fiber reinforced polymer composites and their application in Prosthesis: A review. *Materials Today: Proceedings*, 62, 3435-3443.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.276>
- Market.us. (2024). *Global Unmanned Composites Market By Composite Material*.  
<https://market.us/report/unmanned-composites-market/>
- Moudood, A., Rahman, A., Khanlou, H. M., Hall, W., Öchsner, A., & Francucci, G. (2019, 2019/08/15/). Environmental effects on the durability and the mechanical performance of flax fiber/bio-epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 171, 284-293.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.032>
- Nzimande, M. C., Mtibe, A., Tichapondwa, S., & John, M. J. (2024). A Review of Weathering Studies in Plastics and Biocomposites—Effects on Mechanical Properties and Emissions of Volatile Organic Compounds (VOCs). *Polymers*, 16(8).
- Oun, A., Alajarmeh, O., Manalo, A., Abousnina, R., & Gerdes, A. (2024, 2024/03/22/). Durability of hybrid flax fibre-reinforced epoxy composites with graphene in hygrothermal environment. *Construction and Building Materials*, 420, 135584.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135584>
- Parodo, G., Sorrentino, L., Turchetta, S., & Moffa, G. (2024). Manufacturing of Sustainable Composite Materials: The Challenge of Flax Fiber and Polypropylene. *Materials*, 17(19).
- Phunpeng, V., Boransan, W., & Horpibulsuk, S. (2023, 2023/11/10/). Comprehensive analysis of in-plane tensile characteristics of hybrid composite using finite

element method. *Journal of Engineering Research*.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.11.008>

Phunpeng, V., Sumklang, S., & Kerdphol, T. (2023). Static and Modal Analysis of UAV Composite-Based Structures. In (pp. 181-188). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-37943-7\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-031-37943-7_24)

Pokharel, A., Falua, K. J., Babaei-Ghazvini, A., & Acharya, B. (2022). Biobased Polymer Composites: A Review. *Journal of Composites Science*, 6(9).

Prabhu, R., Mendonca, S., D'Souza, R., & Bhat, T. (2022, 08/27). Effect of Water Absorption on the Mechanical Properties of Alkaline Treated Bamboo and Flax Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Trends in Sciences*, 19, 5779. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.5779>

Rafiqah, S. A., Khalina, A., Harmaen, A. S., Tawakkal, I. A., Zaman, K., Asim, M., Nurrazi, M. N., & Lee, C. H. (2021). A Review on Properties and Application of Bio-Based Poly(Butylene Succinate). *Polymers*, 13(9).

Rahmani, H., Mahmoudi Najafi, S. H., & Ashori, A. (2014, 03/27). Mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminated composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33, 733-740. <https://doi.org/10.1177/0731684413518255>

Rais-Rohani, M., Quinn, G., Eamon, C., & Keesecker, A. (2004, 04/19). Finite Element Analysis and Sizing Optimization of an Advanced Design Concept for a Composite Sail Structure. <https://doi.org/10.2514/6.2004-1962>

Ramachandran, K., Gnanasagaran, C. L., & Vekariya, A. (2023, 2023/03/03/). Life cycle assessment of carbon fiber and bio-fiber composites prepared via vacuum bagging technique. *Journal of Manufacturing Processes*, 89, 124-131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.068>

Rayhan, S. B., & Rahman, M. M. (2020, 2020/01/01/). Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer. *Procedia Structural Integrity*, 28, 1892-1900.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012>

Rossitti, I., Bolis, A., Sambucci, M., Sarasini, F., Tirillò, J., & Valente, M. (2025). Cleavable Bio-Based Epoxy Matrix for More Eco-Sustainable Thermoset Composite Components. *Polymers*, 17(1).

Sarkar, F., Akonda, M., & Shah, D. U. (2020a). Mechanical Properties of Flax Tape-Reinforced Thermoset Composites. *Materials*, 13(23).

<https://doi.org/10.3390/ma13235485>

Sarkar, F., Akonda, M., & Shah, D. U. (2020b). Mechanical Properties of Flax Tape-Reinforced Thermoset Composites. *Materials*, 13(23).

Shahabaz, S. M., Mehrotra, P., Kalita, H., Sharma, S., Naik, N., Noronha, D. J., & Shetty, N. (2023). Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiC Nano-Fillers on the Mechanical Properties of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Hybrid Composites. *Journal of Composites Science*, 7(4).

Shahzad, A. (2012, 01/01). Effects of Water Absorption on Mechanical Properties of Hemp Fibre Composites. *Polymer Composites*, 33, 120-128.

<https://doi.org/10.1002/pc.21254>

Soric®, L. (2025a). Lantor Soric®; A unique flexible foam core for infusion and RTM processing. <https://www.lantorcomposites.com/textile-foam-cores/soric/>

Soric®, L. (2025b). Lantor Soric®; A unique flexible foam core for infusion and RTM processing. <https://www.lantorcomposites.com/textile-foam-cores/soric/>

- Spasenović, J., & Blagojevic, I. (2021, 01/01). Composite materials in automotive industry: A review. *Industrija*, 49, 57-68. <https://doi.org/10.5937/industrija49-34540>
- Valenzuela Expósito, J. J., Picazo Camilo, E., & Corpas Iglesias, F. A. (2024). Development of a Modular Sandwich Panel with a Composite Core of Recycled Material for Application in Sustainable Building. *Polymers*, 16(24).
- Vroman, I., & Tighzert, L. (2009). Biodegradable Polymers. *Materials*, 2(2), 307-344.
- Xiaolin Chen, Y. L. (2015). *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*.
- Yan, L., Chou, N., & Jayaraman, K. (2014, 2014/01/01/). Flax fibre and its composites – A review. *Composites Part B: Engineering*, 56, 296-317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.014>
- Yang, M., Su, J., Zheng, Y., Fang, C., Lei, W., & Li, L. (2023). Effect of Different Silane Coupling Agents on Properties of Waste Corrugated Paper Fiber/Polylactic Acid Composites. *Polymers*, 15(17).
- Ziemińska-Stolarska, A., Sobulska, M., Pietrzak, M., & Zbiciński, I. (2024). A Review of End-of-Life Scenarios for Fibre-Reinforced Polymer Materials. *Energies*, 17(15).
- Zulkarnain, A., Wibowo, H., Wirawan, W., & Devi Dwipayana, A. (2024, 07/14). A REVIEW OF THE ENVIRONMENTAL BENEFITS OF NATURAL FIBER COMPOSITES (NFCs): A STEP TOWARD SUSTAINABLE MANUFACTURING. *Community practitioner: the journal of the Community Practitioners' & Health Visitors' Association*, 21, 7. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12704388>



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกระบวนการผลิตคอมโพสิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตคอมโพสิต

ลำดับ	รายการ	รูปภาพ
1	เส้นใยแฟลกซ์แบบทิศทางเดียว ขนาด น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ 200 กรัมต่อ ตารางเมตร	
2	แกนแบบ Lantor Soric XF	
3	ไบโอ อีพอกซี เรซิน SR GreenPoxy 33 และ SD 4993 Hardener	
4	อีพอกซี เรซิน ER570	


ลำดับ	รายการ	รูปภาพ
5	แม่พิมพ์อลูมิเนียมสำหรับขึ้นรูป	
6	น้ำยาทำความสะอาดผิวแม่พิมพ์ อะซิโตน (Acetone)	
7	น้ำยาถอดแบบ ทากันติด (Polyvinyl Alcohol : PVA)	
8	แว็กซ์ถอดแบบ (Wax)	
9	ซีแลนท์เทป (Sealant tape)	

ลำดับ	รายการ	รูปภาพ
10	ผ้าลอกแบบ (Peel Ply)	
11	ตาข่ายนำเรซิน (Infusion mesh)	
12	แผ่นฟิล์มสุญญากาศ (Vacuum film)	
13	รีลีสฟิล์ม (Release film)	
14	ผ้าซับเรซิน (Breather fabric)	

ลำดับ	รายการ	รูปภาพ
15	ท่อยาง PVC	
16	ท่อเกลียวปลอยเรซิน (Spiral Tube)	
17	อินฟิวชั่นบล็อก (Infusion blog)	
18	วาล์วสุญญากาศ (Vacuum Valve)	
19	ข้อต่อ 3 ทาง	

ลำดับ	รายการ	รูปภาพ
20	คีมลีด	
21	แคลมป์ยึดจับ (Vacuum Line Clamp)	
22	แก้วกระดาษสำหรับผสมสาร	
23	แท่งแก้วคนสาร	
24	เทปกาวย่น	

ลำดับ	รายการ	รูปภาพ
25	แฟลชเทป (Flash Tape)	
26	เครื่องปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)	
27	หม้อดักเรซิน (Catch Pot)	
28	หัวเชื่อมต่อระบบสุญญากาศ (Vacuum Connector)	
29	เครื่องชั่งดิจิตอล	

ลำดับ	รายการ	รูปภาพ
30	ตู้อบลมร้อน (Hot Oven)	

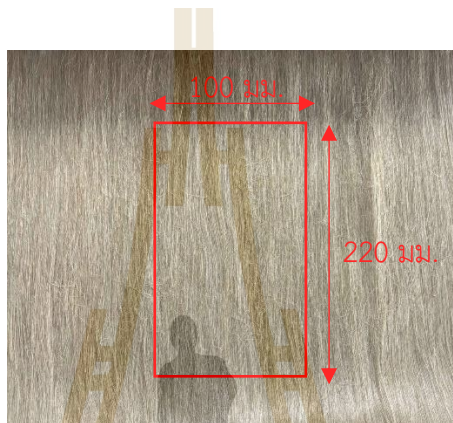
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคอมโพสิต

ลำดับ	รายการ	รูปภาพ
1	เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine ; UTM) ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LD100 ให้ขนาดโหลด (Load) ได้สูงสุด 100 kN	



ลำดับของกระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิต ด้วยวิธีการแบบแว็คคัม อินฟิวชัน (Vacuum Infusion Process) ในห้องปฏิบัติการ มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมเส้นใยที่จะใช้เป็นเส้นใยเสริมแรง ขนาด ยาว 220 มม. และกว้าง 100 มม. จำนวน ทั้งหมด 6 แผ่น ในการศึกษานี้คือ เส้นใยแฟล็กซ์ แบบทิศทางเดียว (Unidirectional)



2. ทำความสะอาดพื้นผิวของแม่พิมพ์ ด้วยน้ำยาทำความสะอาด อาซิโตน (Acetone) จากนั้น เคลือบผิวของแม่พิมพ์ด้วยน้ำยาถอดแบบ PVA หรือ Wax



อาซิโตน

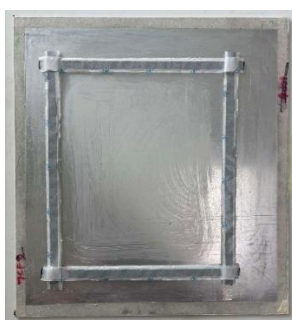


PAV

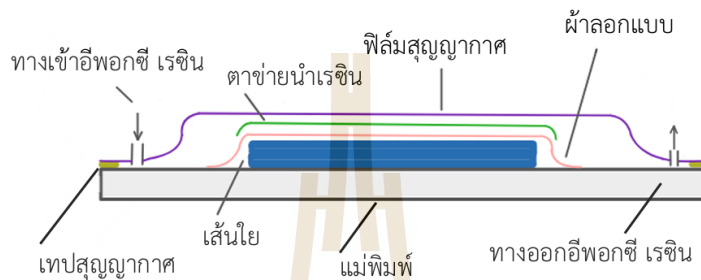


Wax

3. ติดซีแลนท์เทปหรือเทปสุญญากาศ สำหรับกำหนดขอบเขตพื้นที่ทำงานบนแม่พิมพ์

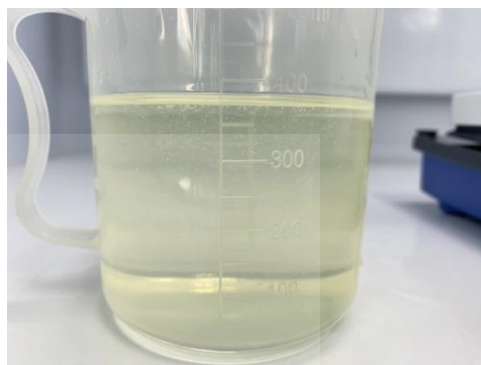


4. วางเส้นใยเสริมแรง รวมถึงแกนกลางสำหรับโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต ที่ละชั้นจนครบ จากนั้นวางด้วย ฝ้ายลอกแบบ (Peel Ply) ตาข่ายนำเรซิน (Infusion Mesh) และฟิล์มสุญญากาศ (Vacuum Bag) ตามลำดับ โดยมีช่องทางต่อกับท่อ ที่ทำไว้เพื่อเป็นทางไหลเข้า-ออก ของเรซิน



5. ท่อทางออกของเรซิน จะถูกต่อเข้ากับเครื่องปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) เพื่อดูดอากาศออกจากพื้นที่ของการขึ้นรูปชิ้นงาน เมื่อเรียบร้อยแล้ว ให้เริ่มเดินเครื่องปั๊มเพื่อตรวจสอบว่า ไม่มีรอยรั่วเกิดขึ้นในบริเวณของการขึ้นรูปชิ้นงาน

6. หลังจากที่ได้ตรวจสอบพื้นที่ของการขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว ให้ผสมเรซินกับสารทำแข็ง ด้วยอัตราส่วนตามที่ผู้ผลิตกำหนดกำหนด และคนผสมในเครื่องกวนสาร ด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที



7. เริ่มกระบวนการ แว็คคัม อินพีวชั่น โดยที่ปลายท่อทางเข้าของเรซินนั้น จุ่มอยู่ในแก้วที่ผสมไว้แล้ว เปิดเครื่องปั๊มสุญญากาศ เพื่อดูดอากาศออกและความดันบรรยากาศจะดันเรซินเข้าไปในพื้นที่ของการขึ้นรูปชิ้นงาน



8. หลังจากที่เราเรซินไหลเข้ามาในพื้นที่การขึ้นรูปชิ้นงานจนเต็ม ให้หนีบหรือปิดวาล์ว ทางเข้า-ออก ของเรซิน เพื่อควบคุมให้พื้นที่ของการขึ้นรูปชิ้นงานยังเป็นสุญญากาศอยู่ จากนั้นนำชิ้นงานเข้าสู่ตู้อบ เพื่อเริ่มกระบวนการบ่มเรซิน



9. เมื่อเสร็จสิ้นการบ่มเรซินตามที่กำหนดไว้แล้ว ปล่อยให้ทิ้งไว้ในอุณหภูมิทั่วไป ประมาณ 24 ชั่วโมง ก่อนที่จะแกะฟิล์มสุญญากาศออก และนำเข้าสู่กระบวนการตัดแต่ง เพื่อให้ได้ตัวอย่างของชิ้นงานตามมาตรฐานการทดสอบต่อไป





ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ระหว่างการศึกษา

### รายชื่อบทความที่เผยแพร่ระหว่างการศึกษา

- 1) กฤษณ คชราช, วีณา ฟั่นเพ็ง, กริตีวัฒน์ ไชยศิลป์ และ ธงชาติ เกิดผล. (2024). การเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุไฮบริดคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ด้วยกระบวนการขึ้นรูป. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย (ME-NETT) ครั้งที่ 38, 16-19 กรกฎาคม 2567, ปทุมธานี, ประเทศไทย
- 2) Kitsana Khodcharad, Kreetiwat Chaiyasin, Wipada Boransan, Watcharapong Patangtalo and Veena Phunpeng. (2024). EVALUATING THE IMPACT OF FURNACE CHARCOAL POWDER ADDITION ON THE FLEXURAL PROPERTIES OF NATURAL FIBER REINFORCED COMPOSITES. The 14th International Conference on GEOMATE 2024, 13-16 November 2024, Pattaya, Thailand.
- 3) Kitsana Khodcharad, Kreetiwat Chaiyasin, Wipada Boransan, Watcharapong Patangtalo and Veena Phunpeng. (2024). Evaluation of the Behavior of Sandwich Composite Structures Reinforced with Flax Fiber and Flexible Cores. The 14th TSME International Conference on Mechanical Engineering 2024, 10-13 December 2024, Pattaya, Thailand.
- 4) กฤษณ คชราช, วีณา ฟั่นเพ็ง, กริตีวัฒน์ ไชยศิลป์ และ วิภาดา โบราณสาร. (2025). การพัฒนาคอมโพสิตอย่างยั่งยืน: การศึกษาอีพ็อกซี-เรซิน เกรดชีวภาพร่วมกับชั้นแกนจากวัสดุรีไซเคิล. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย (ME-NETT) ครั้งที่ 39, 15-18 กรกฎาคม 2568, ขอนแก่น, ประเทศไทย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 38  
วันที่ 16 - 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2567 จังหวัดปทุมธานี

AMM-0037



**การเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุไฮบริดคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ด้วยกระบวนการขึ้นรูป**  
**Enhancing Mechanical Properties of Hybrid Composite Materials Reinforced with Natural and Synthetic Fibers through manufacturing Processes**

ภฤชน คชราช<sup>1</sup>, วิมา พันเพ็ญ<sup>1</sup>, กริณีวัฒน์ ไชยศิลป์<sup>2</sup> และ ธงชาติ เกิดผล<sup>3</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
111, ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

<sup>3</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50, ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร

ติดต่อ: Khodcharad.k@gmail.com

**บทคัดย่อ**

วัสดุคอมโพสิตมีแนวโน้มการนำไปใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในหลายอุตสาหกรรม การเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติในคอมโพสิตกำลังเป็นที่สนใจมากขึ้น เพื่อให้ได้ทางเลือกในการพัฒนาคอมโพสิตที่ยั่งยืนแทนการใช้งานเส้นใยสังเคราะห์เพียงอย่างเดียว เส้นใยพืช (เช่น เส้นใยลินิน เส้นใยไผ่ เส้นใยกล้วย และ เส้นใยกัญชง) เป็นหนึ่งในตัวเลือกจากธรรมชาติที่มีอยู่มากมาย ราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม การประยุกต์ใช้เส้นใยพืชในคอมโพสิตสำหรับใช้ในงานโครงสร้างกำลังถูกนำไปใช้ในหลากหลายด้าน เช่น โครงสร้างโต๊ะเก้าอี้ โครงสร้างอาคาร โครงสร้างวัสดุตกแต่ง โครงสร้างอุปกรณ์กีฬา โครงสร้างอากาศยานไร้คนขับ เป็นต้น ซึ่งการนำวัสดุเหล่านี้ไปใช้งานต้องการคอมโพสิตคุณภาพสูงที่มีกระบวนการผลิตที่เฉพาะเจาะจง งานวิจัยนี้นำเสนอการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุไฮบริดคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยลินินที่มีสัดส่วนเส้นใยเท่ากัน โดยใช้กระบวนการขึ้นรูปคือ วัคคัมอินฟิวชัน และปรับปรุงรูปแบบการให้อัตราความร้อนในขณะบ่มเรซิน โดยตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบแรงดัดงอ และเปรียบเทียบกับคุณสมบัติเชิงกลของไฮบริดคอมโพสิตที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปว่าคุณสมบัติค่าความเค้นและค่าโมดูลัสของไฮบริดคอมโพสิตที่ขึ้นหลังปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูป 54.64% และ 16.89% ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการใช้คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในงานโครงสร้างต่างๆ โดยเฉพาะในงานด้านโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับ

**คำหลัก:** ไฮบริดคอมโพสิต, เส้นใยลินิน, เส้นใยคาร์บอน, ความต้านทานแรงดัดงอ, วัคคัมอินฟิวชัน

**Abstract**

The use of composite materials is continuously increasing across various industries. Reinforcing these materials with natural fibers is gaining significant interest as an alternative to develop sustainable composites rather than relying on synthetic fibers. Plant fibers such as flax, bamboo, hemp, and jute are abundant natural options that are cost-effective and environmentally friendly. The application of plant fibers in composites for structural purposes is being extensively explored, including in the construction of furniture, buildings, decorative materials, sporting equipment, and unmanned aerial vehicles (UAVs), among others. Utilizing these materials requires high-quality composites with carefully controlled specialized manufacturing processes. This research presents the enhancement of the mechanical properties in hybrid composites reinforced with synthetic fibers, carbon fibers and flax fibers, maintaining equal fiber proportions. The manufacturing processes, namely vacuum infusion are employed and improve the heating rate while curing the resin. Mechanical property improvements are assessed through flexural strength tests and compared with the mechanical properties of unimproved hybrid composites. The results of flexural test indicated that strength and modulus improved by 54.64% and 16.89%, respectively. This provides guidelines for the suitable use of natural fiber-reinforced composites in various structural applications, particularly in unmanned aerial vehicle construction.

**Keywords:** Hybrid composite, Flax fiber, Carbon fiber, Flexural strength, Vacuum infusion

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 38  
วันที่ 16 - 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2567 จังหวัดปทุมธานี

AMM-0037



## 1 บทนำ

วัสดุคอมโพสิตประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถแยกออกด้วยการสังเกตด้วยตาเปล่า คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตจะมีคุณสมบัติร่วมกันจากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ วัสดุคอมโพสิตจะประกอบด้วยวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุส่วนเสริมที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักนั้น เรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcement) โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ ห่อหุ้มสารเสริมแรงและคงสภาพรูปร่างของตัววัสดุคอมโพสิตให้เป็นรูปร่างตามแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ ส่วนสารเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมคุณสมบัติให้วัสดุคอมโพสิตในด้านของการรับแรงกระทำ และทำให้วัสดุมีคุณสมบัติตามต้องการ [1, 2]

คอมโพสิตพอลิเมอร์เป็นหนึ่งในประเภทของวัสดุคอมโพสิตที่มีการใช้งานแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ (อากาศยาน ยานยนต์ กีฬา) [3] ซึ่งใช้งานร่วมกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ โดยปกติพอลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่สูงมากนัก จึงต้องเสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีความแข็งแรงที่สูงเพื่อให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีการรับแรงที่สูงมากขึ้น [4] พอลิเมอร์เมทริกซ์มี 2 ประเภทคือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซต (Thermoset) [5] ซึ่งมีความหนืด โครงสร้างโมเลกุลและความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกัน

เทอร์โมเซตพอลิเมอร์เมทริกซ์ (เช่น อีพอกซี เรซิน) เป็นเมทริกซ์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่แข็งแรงสูง เมทริกซ์ประเภทนี้เมื่อผ่านกระบวนการผลิตจะรักษารูปร่างของวัสดุและสภาพนั้นไว้ตลอด ไม่สามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ได้ เทอร์โมเซตเมทริกซ์เหมาะสำหรับการใช้งานสำหรับสภาพแวดล้อมที่ต้องการความทนทานสูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และสารกัดกร่อน และเป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้งานร่วมกับเส้นใยเสริมแรงประเภทต่างๆ ในการผลิตวัสดุคอมโพสิต [6, 7]

เส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยเสริมแรงประเภทหนึ่งที่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้เสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต มีความแข็งแรงจำเพาะสูง เหมาะสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมอากาศยาน ยานยนต์ กีฬา รวมถึงเฟอร์นิเจอร์ด้วย [8] การใช้งานเส้นใยคาร์บอนนิยมใช้งานร่วมกับเทอร์โมเซตพอลิเมอร์

เมทริกซ์ เช่น อีพอกซี เรซิน ความสำคัญในกระบวนการผลิตคือการวางแนวเส้นใยให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการรับแรงกระทำภายนอกตามทิศทางที่เหมาะสม [9]

เส้นใยลีนิน เป็นเส้นใยพืชเป็นหนึ่งในเส้นใยจากธรรมชาติที่นิยมนำมาใช้เสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต โดยเส้นใยลีนินมีความโดดเด่นในด้านความแข็งแรงจำเพาะที่ค่อนข้างสูง และเหมาะกับการใช้งานร่วมกับเมทริกซ์ไบโอ-อีพอกซีมากกว่าการใช้กับเมทริกซ์ทั่วไป [10] อีกทั้งเป็นเส้นใยที่สามารถหาได้ง่ายจากหลายถิ่น ราคาถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาก [11-15] เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยลีนินกับเส้นใยสังเคราะห์บางประเภท (อี-กลาส) มีความต้านทานแรงดึงที่ใกล้เคียงกันมากในความหนาแน่นที่เท่ากัน [16] แต่ความนำกัวจลของการใช้งานเส้นใยลีนินที่สามารถดูดซับความชื้นและความชื้นสัมพัทธ์ที่สามารถทำให้เส้นใยเกิดการขยายตัวและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตได้ Moudood, A., et al. [17] ศึกษาผลกระทบของการดูดซับน้ำของคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยลีนิน โดยการแช่น้ำไว้จนถึงจุดอิ่มตัวของเส้นใย เมื่อผ่านการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลพบว่าคุณสมบัติเชิงกลลดลงไปกว่า 64% เมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ การผลิตคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติจึงมีความจำเป็นอย่างมากในการควบคุมการดูดซับน้ำและความชื้นในระหว่างการทดสอบ Zhang et al. [21] ศึกษาการรับแรงดึงที่ได้ผลลัพท์ดีขึ้นเมื่อใช้โอบริคคอมโพ-สิตระหว่างเส้นใยแก้วและเส้นใยลีนินเปรียบเทียบกับคอมโพ-สิตที่ใช้เพียงเส้นใยลีนิน

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเป็นสิ่งสำคัญในการใช้งานทางวิศวกรรมเพื่อกำหนดขอบเขตของการใช้งานวัสดุและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นขณะการนำวัสดุไปใช้งาน การได้มาซึ่งค่าคุณสมบัติเชิงกลนี้จะได้มาจากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ (UTM) และมีการทดสอบหลากหลายวิธี เช่น การทดสอบแรงดึง (Tensile test) การทดสอบแรงดัดงอ (Bending test) การทดสอบแรงอัด (Compression test) เป็นต้น รวมถึงการกำหนดมาตรฐานการทดสอบเพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือ เช่น ASTM, ISO เป็นต้น [18]

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 38  
วันที่ 16 - 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2567 จังหวัดปทุมธานี

AMM-0037



การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและประสิทธิภาพสูง กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการต่างๆ เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญในการได้มาซึ่งวัสดุคอมโพสิตที่เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละแบบ โดยกระบวนการขึ้นรูปในแต่ละประเภทจะมีความเหมาะสมกับความต้องการในการนำคอมโพสิตไปใช้งานที่มีความเหมาะสมแตกต่างกันไป การขึ้นด้วยมือ (Hand lay-up) เป็นกระบวนการที่ง่ายและต้นทุนต่ำ เหมาะกับคอมโพสิตที่ไม่ต้องการรูปร่างที่ซับซ้อน เรียบง่าย และใช้ในการรับแรงกระทำที่ไม่สูงมาก กระบวนการแบริคคัมแบ็กกิ้ง (Vacuum bagging) เป็นกระบวนการที่ใช้ระบบสุญญากาศนำมาช่วยกดให้เมทริกซ์และเส้นใยอัดตัวกันได้ดีขึ้น ทำให้เมทริกซ์ที่เคลือบอยู่เกาะติดกันกับเส้นใยและอยู่ในสภาพนั้นจนกว่าเมทริกซ์จะแข็งตัว กระบวนการ แบริคคัมอินฟิวชัน (Vacuum infusion) เป็นอีกวิธีที่ได้รับความนิยมในการผลิตคอมโพสิต เมทริกซ์จะถูกดูดเข้าไปในระบบการผลิตจากการทำสุญญากาศ กระบวนการนี้เหมาะมากสำหรับการผลิตที่มีรูปร่างซับซ้อนและขนาดใหญ่ D. shah, et al. [19] อธิบายว่ากระบวนการผลิตด้วยแบริคคัม-อินฟิวชัน ทำให้คอมโพสิตมีประสิทธิภาพดี มีช่องว่างในเนื้อคอมโพสิตต่ำและมีความสมบูรณ์ทางกลที่สม่ำเสมอ รวมถึงการเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตสำหรับการผลิตอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งจะส่งผลอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวอากาศยานเอง แลนดิงเกียร์หรือชุดล้อของอากาศยานไร้คนขับ มีการรับแรงดัดและแรงกระแทกเมื่อเกิดการลงจอดของตัวอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งการเลือกวิธีการทดสอบเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติแรงดัดของชุดล้ออากาศยาน เป็นหนึ่งในส่วนสำคัญของการออกแบบ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ทางประสิทธิภาพที่สูงยิ่งขึ้น อีกทั้งในด้านเศรษฐกิจเองที่หันมานิยมใช้เส้นใยที่ได้จากธรรมชาติแทนการใช้เส้นใยสังเคราะห์เพียงอย่างเดียวนั้นทำให้ต้นทุนการผลิตของอากาศยานไร้คนขับลดลงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาก ซึ่งพบว่าการใช้เส้นใยลินินเป็นเส้นใยจากธรรมชาติที่ถูกนำมาใช้งานในด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ของยุโรปเป็นอันดับต้นๆ (71%) ของเส้นใยธรรมชาติทั้งหมด และอาจจะสามารถนำเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล หรือการนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบอื่นๆ ที่ส่งเสริมความยั่งยืนของการผลิตวัสดุอีกด้วย

การควบคุมสภาพแวดล้อมทั้งอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนขณะที่อยู่ระหว่างกระบวนการขึ้นรูปนั้น ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ Kim, H. B., et al. [20] ศึกษาการบ่มเรซินอย่างรวดเร็วพบว่าทำให้คอมโพสิตเสื่อมสภาพและมีค่าความต้านทานแรงดึงที่ต่ำ การควบคุมความดันระหว่างกระบวนการบ่ม ใช้วิธีการสุญญากาศจะช่วยทำให้ความดันบรรยากาศกดทับชิ้นงานให้แน่นสนิทกันและเรซินจะเสริมเข้ากับเส้นใยได้ดี อีกทั้งยังสามารถลดช่องว่างของโพรงอากาศที่อาจเกิดขึ้นในเนื้อของชิ้นงานได้ด้วย การเลือกใช้กระบวนการแบริคคัมแบ็กกิ้งและกระบวนการแบริคคัมอินฟิวชัน เป็นตัวอย่างกระบวนการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตที่เป็นที่นิยมและทำให้วัสดุคอมโพสิตมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีอีกด้วย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเพิ่มคุณสมบัติความต้านทานแรงดัดของวัสดุโอบริคคัมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยลินิน ที่ใช้งานร่วมกับเทอร์โมเซตพอลิเมอร์เมทริกซ์ ผ่านกระบวนการผลิตคอมโพสิตคือแบริคคัมอินฟิวชัน โดยควบคุมอัตราส่วนของเส้นใยต่อเมทริกซ์อุณหภูมิความดัน ระยะเวลาการบ่มเรซินเท่ากัน แต่จะเปลี่ยนแปลงอัตราการให้ความร้อนในการบ่มตัวของเมทริกซ์เพื่อตรวจสอบอัตราการให้ความร้อนในการบ่มตัวของอีพอกซีเรซิน 2 รูปแบบ เพื่อให้วัสดุโอบริคคัมโพสิตที่มีเส้นใยธรรมชาติที่มีราคาถูกกว่าเสริมแรงอยู่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นและสามารถนำไปทดแทนการใช้งานวัสดุคอมโพสิตที่เสริมด้วยเส้นใยสังเคราะห์เพียงอย่างเดียว

## 2 วัสดุและวิธีการ

### 2.1 เส้นใยเสริมแรงและเมทริกซ์

การเตรียมวัสดุคอมโพสิตสำหรับกระบวนการขึ้นรูปจะใช้เส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียว ขนาด 200 กรัมต่อตารางเมตร (200 g/m<sup>2</sup>) และเส้นใยลินินแบบทิศทางเดียว ขนาด 200 กรัมต่อตารางเมตร (200 g/m<sup>2</sup>) ซึ่งจะใช้งานร่วมกันกับอีพอกซี เรซิน ER-570 สำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบแบริคคัมอินฟิวชัน เนื่องจากมีเวลาการทำให้เรซินแข็งตัวนานมากกว่า อัตราส่วนของการผสมระหว่างเรซินและสารทำแข็งคือ 100:35 ตามลำดับ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 38  
วันที่ 16 - 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2567 จังหวัดปทุมธานี

AMM-0037

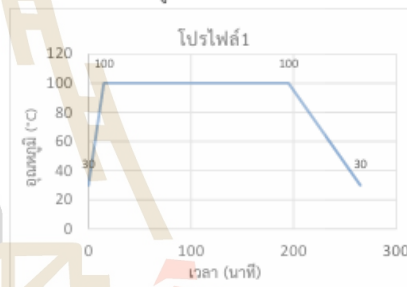


ตารางที่ 1 ข้อมูลส่วนประกอบของเรซิน ER-570

ข้อมูลสำคัญของเรซิน ER-570		
	เรซิน	ตัวทำแข็ง
อัตราส่วนผสม(โดยน้ำหนัก)	100	35
อัตราส่วนผสม(โดยปริมาตร)	5	2
ความถ่วงจำเพาะ @25°C	1.1-1.2	0.98-1.04
ความหนืด @25°C	1200-1500	50-150
เวลาใช้งานหลังผสม @25°C	180-250 นาที	
เวลาแกะแบบ @25°C	12 ชั่วโมง	
ข้อมูลสำคัญของเส้นใยลีนิน		
คุณสมบัติ	ปริมาณ	หน่วย
ความต้านทานแรงดึง	244±13	MPa
โมดูลัสของยัง	20±1	GPa
การยืดตัวเมื่อขาด	1.5±0.1	%
ความหนา 1 ชั้น	0.22±0.02	มิลลิเมตร

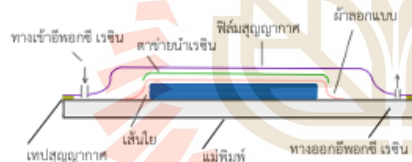


การขึ้นรูปคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนเพียงอย่างเดียว จะถูกควบคุมความดันขณะขึ้นรูปที่ -1 บาร์ และ บ่มเรซินที่ 100°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการให้ความร้อนจะขึ้นอยู่กับเตาอบที่จะทำความร้อนให้ถึงเป้าหมายด้วย อัตราความร้อนที่เร็วที่สุดเท่าที่เตาอบจะทำได้ ซึ่งจะอยู่ที่ 5°C/min. เพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่มีการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปด้วยการตั้งโปรไฟล์ของอัตราการให้ความร้อนขณะทำการบ่มเรซิน โดยกำหนดชื่อโปรไฟล์ของอัตราการให้ความร้อนรูปแบบนี้ว่า โปรไฟล์ 1



## 2.2 กระบวนการผลิตคอมโพสิต

คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและไฮบริดคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยลีนิน จะกำหนดขนาดในการขึ้นรูปคือ 200 x 150 mm<sup>2</sup> ที่ศทาง 0 องศา จำนวน 6 ชั้น ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแวก์คัมอินพีวชัน



รูปที่ 1 กระบวนการขึ้นรูปแวก์คัมอินพีวชัน

โดยใช้ส่วนผสมของเมทริกซ์ตามกำหนด (100:35) ซึ่งกำหนดปริมาณของเส้นใยทั้งสองประเภทเท่ากัน ไฮบริดคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยลีนินจะมีการวางสลับชั้นเส้นใยระหว่างเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยลีนิน (C/F), อย่างละ 3 ชั้น รวมทั้งหมด 6 ชั้น ที่ศทาง 0 องศาและขนาด 200 x 150 mm<sup>2</sup>

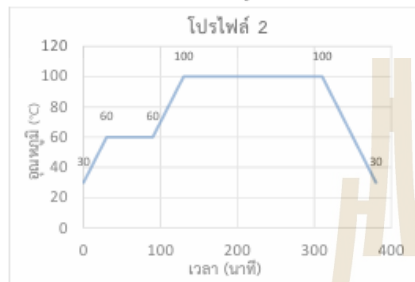
การเพิ่มคุณสมบัติของไฮบริดคอมโพสิตในกระบวนการแวก์คัมอินพีวชัน เมทริกซ์ที่ผสมกันระหว่างเรซินและสารทำแข็งแล้ว จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการกำจัดฟองอากาศ (Degassing) เพื่อกำจัดฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างการคนผสมของเมทริกซ์ ในกระบวนการบ่มเรซินจะถูกควบคุมความดันที่ -1 บาร์ และอุณหภูมิจะกำหนดเป็นโปรไฟล์ดังนี้ อุณหภูมิเริ่มต้น 30°C และเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราความร้อน 1°C/min. จนกระทั่งอุณหภูมิอยู่ที่ 60°C คงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 100°C ด้วยอัตราความร้อน 1°C/min. และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากกระบวนการบ่มเรซินเสร็จสิ้น จะลดอุณหภูมิของชิ้นงานอยู่ที่ 30°C ด้วยอัตราความร้อน -1°C/min. และปล่อยให้

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 38  
วันที่ 16 - 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2567 จังหวัดปทุมธานี

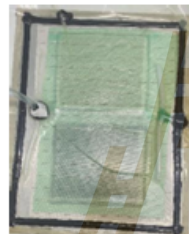
AMM-0037



ไว้อย่างน้อย 8 ชั่วโมงแล้วจึงนำออกจากตู้อบ โดยกำหนดชื่อ  
โปรไฟล์ของอัตราการให้ความร้อนรูปแบบนี้ว่า โปรไฟล์ 2



รูปที่ 4 อุณหภูมิในการบ่มเรซินหลังปรับอัตราความร้อน



รูปที่ 5 การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบของไฮบริดคอมโพสิต

### 2.3 วิธีการ

#### 2.3.1 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

การทดสอบความต้านทานแรงดึงจะเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึง ASTM D7264/D 7264M ซึ่งจะทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM) ขนาด 100 kN ขนาดชิ้นงานทดสอบ 200 x 15 mm ตามคำแนะนำของการทดสอบ โดยกำหนดขนาดความหนาของชิ้นงานทดสอบต่อระยะความกว้างของฐานรองรับ (Thickness to Span ratio) อยู่ที่ 1:32 และความเร็วขณะกดของการทดสอบ 2 mm/min ทำการทดสอบตัวอย่าง 5 ชิ้น/กระบวนการขึ้นรูปความต้านทานแรงดึงสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (2)$$

โดย  $\sigma$  คือค่าความต้านทานแรงดึง,  $F$  คือค่าแรงสูงสุดที่กระทำต่อชิ้นงาน,  $L$  คือค่าความกว้างของระยะฐานทดสอบ

(Support span),  $b$  คือค่าความกว้างของชิ้นงานทดสอบ และ  $h$  คือความหนาของชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

การทดสอบความต้านทานแรงดึง		
	คอมโพสิต	ไฮบริดคอมโพสิต
มาตรฐานควบคุม	ASTM D7264	ASTM D7264
จำนวนชิ้นงาน	5	
ขนาดชิ้นงาน (ยาวxกว้างxหนา)	250 x 15 x 1 mm	200 x 15 x 1.5 mm
ความเร็วหัวกด	2 mm/min	2 mm/min
Span	32 mm	50 mm
สัญลักษณ์ชิ้นงาน	CF	HY, HY+

หมายเหตุ : CF คือ คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ที่ใช้รูปแบบการบ่มด้วยโปรไฟล์ความร้อนที่ 1

HY คือ ไฮบริดคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยลินิน ที่ใช้รูปแบบการบ่มด้วยโปรไฟล์ความร้อนที่ 1

HY+ ไฮบริดคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยลินิน ที่ใช้รูปแบบการบ่มด้วยโปรไฟล์ความร้อนที่ 2

### 3 ผลลัพธ์และการอภิปราย

#### 3.1 อัตราการให้ความร้อนขณะบ่มเรซิน

การวิเคราะห์คุณสมบัติความต้านทานแรงดึงของวัสดุไฮบริดคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยลินิน หลังผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D7264/D 7264M ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM) พบว่าค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระทำจากภายนอกสำหรับไฮบริดคอมโพสิต หลังผ่านการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปมีค่าความเค้นสูงสุดที่เพิ่มสูงขึ้นจาก 132.4 MPa เป็น 291.9 MPa (+54.6%) ดังรูปที่ 8 ซึ่งพบว่าอัตราการให้ความร้อนที่ต่ำอย่างค่อยเป็นค่อยไปในขณะที่บ่มเรซินหลังจากการฉีดเรซินเข้าไปที่เส้นใยเสริมแรงทำให้ค่าคุณสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการให้ความร้อนที่สูงกว่า ซึ่งผลลัพธ์การปรับปรุงอัตราความร้อนของทั้งคอมโพสิตและไฮบริดคอมโพสิตมีแนวโน้มของความเค้นสูงสุดในแต่ละวัสดุที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสการดึงของไฮบริดคอมโพสิตพบว่า มีค่าโมดูลัสการ

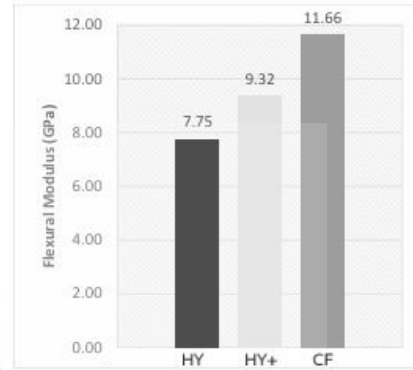
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 38  
วันที่ 16 - 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2567 จังหวัดปทุมธานี



**AMM-0037**

ติดตั้งที่สูงเพิ่มขึ้นจาก 7.7 GPa เป็น 9.3 GPa (+16.9%) ดังรูปที่ 9

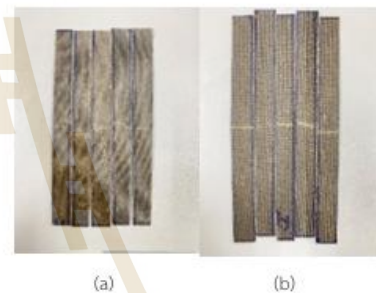
การให้อัตราความร้อนในระดับต่ำขณะบ่มเรซินทำให้คอมโพสิตมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เนื่องจากเรซินจะถูกทำให้ความหนืดลดลงและเข้ายึดเกาะกับเส้นใยรวมถึงลดช่องว่างระหว่างเรซินกับเส้นใยได้อีกด้วย ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับการศึกษาของ Kim, H. B., et al. [20] ที่พบว่า การบ่มเรซินที่รวดเร็วในเวลาเพียงไม่กี่นาทีด้วยลำอิเล็กตรอน ทำให้คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรงลดลง และเกิดการเสื่อมสภาพของกำลังรับแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต จึงต้องบ่มด้วยความร้อนภายใต้สุญญากาศก่อนทำการบ่มอย่างรวดเร็วอีกครั้งด้วยลำอิเล็กตรอน ซึ่งส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตดีขึ้นประมาณ 65%



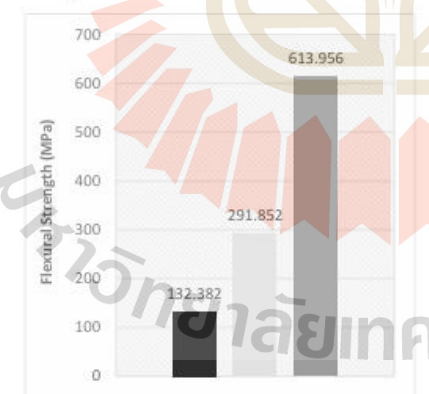
รูปที่ 8 ค่าโมดูลัสแรงดึงดองหลังการทดสอบ



รูปที่ 6 กราฟแสดงแรงกระทำและระยะยืดตัว



รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างชิ้นงานหลังจากการทดสอบ (a) HY, (b) HY+



รูปที่ 7 ค่าความเค้นดึงสูงสุดหลังการทดสอบ

**3.2 เปรียบเทียบคอมโพสิตและไฮบริดคอมโพสิต**

ไฮบริดคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนกับเส้นใยคาร์บอนหลังผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยอัตราให้ความร้อนโปรไฟล์ที่ 1 พบว่ามีค่าแรงกระทำภายนอกสูงสุดที่ 109.74 นิวตัน และมีระยะยืดตัวก่อนแตกหักอยู่ที่ 6.81 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับไฮบริดคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยอัตราให้ความร้อนโปรไฟล์ที่ 2 พบว่าค่าแรงกระทำภายนอกสูงสุดอยู่ที่ 144.19 นิวตัน และมีระยะยืดตัวก่อนแตกหักที่ 9.02 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาถึงความเค้นสูงสุดของไฮบริดคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยคาร์บอนจะมีค่าความเค้นสูงสุดอยู่ที่ 132.382 MPa ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าค่าความเค้นของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนประมาณ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 38  
วันที่ 16 - 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2567 จังหวัดปทุมธานี

### AMM-0037

4.63 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับไฮบริดคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยลินินและเส้นใยคาร์บอนและผ่านการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูป พบว่าค่าความเค้นสูงสุดของไฮบริดคอมโพสิตมีค่าสูงเกินกว่าไฮบริดคอมโพสิตที่ไม่ผ่านการปรับปรุงกระบวนการประมาณ 54.6% และเมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตพบว่าค่าความแข็งแรงน้อยกว่าคอมโพสิตที่เสริมด้วยเส้นใยคาร์บอนเหลือเพียง 2.1เท่า ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าความเค้นการดึง

การเปรียบเทียบ	ค่าความเค้นการดึง
ระหว่างไฮบริดคอมโพสิตก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูป	ดีขึ้น 54.64%
ระหว่างคอมโพสิตและไฮบริดคอมโพสิตก่อนการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูป	น้อยกว่า 4.63 เท่า
ระหว่างคอมโพสิตและไฮบริดคอมโพสิตหลังการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูป	น้อยกว่า 2.1 เท่า

#### 4 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการนำเส้นใยจากธรรมชาติที่มีราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าเส้นใยสังเคราะห์เพื่อทำไฮบริดคอมโพสิตที่ใช้ร่วมกับอีพอกซี เรซิน และตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบความต้านทานแรงดึง โดยศึกษาการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปด้วยการปรับรูปแบบการให้อุณหภูมิความร้อน เพื่อให้อีพอกซี เรซินมีความหนืดลดลงอย่างต่อเนื่องและเข้ากันได้กับเส้นใยแบบค่อยเป็นค่อยไป เพื่อป้องกันการทำให้ไฮบริดคอมโพสิตเสื่อมสภาพหากให้อุณหภูมิความร้อนที่สูงเกินไป หลังการตรวจสอบคุณสมบัติความต้านทานแรงดึงพบว่า ค่าความเค้นสูงสุดของไฮบริดคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น 54.64% เมื่อเปรียบเทียบกับไฮบริดคอมโพสิตที่ไม่ผ่านการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูป รวมถึงค่าโมดูลัสแรงดึงก็เพิ่มขึ้น 16.9% เช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสังเคราะห์ (เส้นใยคาร์บอน) พบว่ามีค่าความเค้นและค่าโมดูลัสแรงดึงที่น้อยกว่าเพียง 2.1 และ 1.25เท่า ตามลำดับ ซึ่งจาก



การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการใช้เส้นใยจากธรรมชาติและผ่านกระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสมทำให้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม และเป็นแนวทางที่จะนำเส้นใยจากธรรมชาติไปใช้เพื่อทดแทนการใช้งานเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์เพียงอย่างเดียวต่อไป

#### 5 เอกสารอ้างอิง

- [ 1 ] Hyer, M.W. (1998). *Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials*, The McGraw-Hill Companies, New York.
- [ 2 ] Kaw, A.K. (2006). *Mechanics of Composite Materials*, Taylor & Francis, New York.
- [ 3 ] Khalid, M.Y., Al Rashid, A., Arif, Z.U., Ahmed, W., Arshad, H. and Zaidi, A.A. (2021). Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications, *Results in Engineering*, vol. 11(1), September 2021, pp. 100263.
- [ 4 ] Liew, K.B., Goh, C.F., Asghar, S. and Syed, H.K. (2021). Overview of Mechanical and Physicochemical Properties of Polymer Matrix Composites, *Encyclopedia of Materials: Composites*, vol.1.(1), July 2021, pp. 565-576.
- [ 5 ] Ebeuwele, R.O. (2000). *Polymer Science and Technology*, CRC Press, Florida.
- [ 6 ] EL-Sonbati, A.Z. (2012). *Thermoplastic – Composite Materials*, InTech, Croatia.
- [ 7 ] Rajak, D.K., Pagar, D.D., Menezes, P.L. and Linul, E. (2019). Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications, *Polymers*, vol. 11(10), October 2019, pp. 1667
- [ 8 ] Ateeq, M. (2023). A state of art review on recycling and remanufacturing of the carbon fiber from carbon fiber polymer composite, *Composites Part C: Open Access*, vol.12(1), October 2023, pp. 100412.
- [ 9 ] Ming Ming, I.W., Azmi, A.I., Chuan, L.C. and Mansor, A.F. (2018). Experimental study and empirical analyses of abrasive waterjet machining for

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 38  
วันที่ 16 - 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2567 จังหวัดปทุมธานี

AMM-0037



- hybrid carbon/glass fiber-reinforced composites for improved surface quality, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 9 5(9), April 2018, pp. 3809-3822.
- [10] Sarkar, F., Akonda, M. and Shah, D.U. (2020). Mechanical Properties of Flax Tape-Reinforced Thermoset Composites, *Materials*, vol. 1 3 (23), December 2020, pp. 5485.
- [11] Banerjee, A., et al. (2023). Fabrication and characterization of weld attributes in hot gas welding of alkali treated hybrid flax fiber and pine cone fibers reinforced poly-lactic acid (PLA) based biodegradable polymer composites: studies on mechanical and morphological properties, *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 2 7 (1), November 2023, pp. 272-297.
- [12] Davies, P., et al. (2023). Recycling and ecotoxicity of flax/PLA composites: Influence of seawater aging, *Composites Part C: Open Access*, vol. 12(1), October 2023, pp. 100379.
- [13] Kandemir, A., Longana, M.L., Hamerton, I. and Eichhorn, S.J. (2022). Developing aligned discontinuous flax fibre composites: Sustainable matrix selection and repair performance of vitrimers, *Composites Part B: Engineering*, vol. 243(1), August 2022, pp. 110139.
- [14] Pantaloni, D., Rudolph, A.L., Shah, D.U., Baley, C. and Bourmaud, A. (2021). Interfacial and mechanical characterisation of biodegradable polymer-flax fibre composites, *Composites Science and Technology*, vol. 201(1), January, pp. 108529.
- [15] Dittember D.B. and GangaRao, H.V.S. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 43(8), August 2012, pp. 1419-1429.
- [16] Pil, L., Bensadoun, F., Pariset, J. and Verpoest, I. (2016). Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites?, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 83(1), April 2016, pp. 193-205.
- [17] Moudood, A., Rahman, A., Khanlou, H.M., Hall, W., Öchsner, A. and Francucci, G. (2019). Environmental effects on the durability and the mechanical performance of flax fiber/bio-epoxy composites, *Composites Part B: Engineering*, vol. 171(1), August 2019, pp. 284-293.
- [18] William, J., Callister, D., Rethwisch, D.G. (2018). *Materials science and engineering : an introduction*. Hoboken, Wiley, New Jersey.
- [19] Shah, D. U., Schubel, P. J., Clifford, M. J. and Licence, P. (2014). Mechanical Property Characterization of Aligned Plant Yarn Reinforced Thermoset Matrix Composites Manufactured via Vacuum Infusion, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 53(3), February 2014, pp. 239-253.
- [20] Kim, H. B., Oh, S.H., Jeong, Y. G., Kim, H. S., Park, B.G., and Park, J.S. (2023). Effects of heat treatment on the microstructure and flexural mechanical properties of carbon fiber reinforced composite cured by electron beam, *Materials Today Communications*, vol. 3 7 (1), December 2023, pp. 107181.
- [21] Zhang, Y., Li, Y., Ma, H., Yu, T. (2013). Tensile and interfacial properties of unidirectional flax/glass fiber reinforced hybrid composites, *Composites Science and Technology*, vol. 88(1), November 2013, pp.172-177

## EVALUATING THE IMPACT OF FURNACE CHARCOAL POWDER ADDITION ON THE FLEXURAL PROPERTIES OF NATURAL FIBER REINFORCED COMPOSITES

Kitsana Khodcharad<sup>1</sup>, Kreetiwat Chaiyasin<sup>2</sup>, Wipada Boransan<sup>3</sup>, Watcharapong Patangtalo<sup>1</sup> and Veena Phunpeng<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

<sup>2</sup>Mechatronic Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

<sup>3</sup>Center of Excellence in Innovation for Sustainable Infrastructure Development, Suranaree University of Technology, Thailand

### ABSTRACT

The increasing use of composite materials across various industries is driving interest in reinforcing them with natural fibers as a sustainable alternative to synthetic fibers. Plant fibers such as flax, bamboo, hemp, and jute are cost-effective and environmentally friendly options being explored for structural applications in furniture, buildings, decorative materials, sporting equipment, and unmanned aerial vehicles (UAVs). While natural fibers cannot completely replace synthetic ones, incorporating carbon powder (waste from furnaces) as an additive can enhance the flexural properties of composites. This study investigates the flexural properties of composites reinforced with flax fibers and examines the influence of additives by adding charcoal powder at 5%, 10%, and 15% by weight of the resin. The three-point bending test evaluation of flexural properties revealed that the amount of Furnace Carbon Black (FCB) filler significantly influences the mechanical properties of the flax fiber-reinforced composite. Adding 15% FCB exhibited the best mechanical properties when used in conjunction with flax fibers.

*Keywords: Flax fiber, Natural fiber-reinforced composite, Waste Furnace, Flexural properties*

### INTRODUCTION

The continuous rise in the deployment of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the commercial, military, and even personal drone sectors is readily apparent [1]. The predominant material used in drone manufacturing is composite materials, particularly those favored for their extraordinary mechanical properties. These properties make composites highly desirable in the drone industry, such as for landing gear systems, where they provide structural integrity and component durability [2].

The production of composites with synthetic fiber reinforcement, such as carbon and glass fibers, will create waste that is difficult to dispose of and may be toxic in the future and could pose toxicity risks to humans as well [3]. Natural fibers have gained popularity due to their environmental friendliness, cost-effectiveness, and suitability for applications such as food packaging [4]. In composite manufacturing, flax fibers, known for their high value and superior quality, have seen significant growth in use and performance improvement. However, their environmental sensitivity, such as high moisture absorption, can reduce their tensile strength properties. Chemical enhancements such as alkaline have been effective in increasing the durability and strain resistance of flax fibers [5, 6].

The interest in improving the properties of natural fiber reinforcements through composite

manufacturing processes has been widely studied. Various methods have been explored, including chemical treatments, surface coatings, and the use of particulate additives. The use of particle additives has become prevalent due to their ability to enhance specific properties and meet application requirements. Glass microspheres have been extensively researched and employed as additives in synthetic fibers, significantly improving fiber surface adhesion [7]. Immanuel [8] demonstrated the potential of using electronic waste, such as discarded CDs, as additives in composites reinforced with natural fibers like banana fibers. The study found that the mechanical properties of the composites improved when 10% CD powder by fiber weight was added, indicating that natural fibers and additives can effectively reinforce epoxy matrices. In some cases, natural additives such as finely ground tamarind seed powder can be used as fillers in natural fibers, enhancing their flexural and tensile properties [9]. Additives can be incorporated during the polymer matrix production process or added during matrix preparation before composite manufacturing. Researchers are focusing on developing composite materials using natural additives, and they have observed that composites with natural additives exhibit superior performance compared to those without any additives [10].

Natural fillers play a crucial role in utilizing renewable resources to enhance the mechanical

properties of fiber-reinforced composites. For instance, the successful addition of wood charcoal powder at 4% by weight has improved the tensile strength of composites [11]. The additions have significantly enhanced the flexural resistance of composites, making the developed materials more suitable for further applications [12, 13]. The addition of wood charcoal additives (5% wood charcoal) significantly improved the hardness and wear properties of the material [17]. Furthermore, the use of wood charcoal powder derived from jute as a filler in the aluminum composite matrix yielded satisfactory results, notably enhancing the tensile and flexural strengths of the matrix with a 1% addition [18].

This research presents an evaluation of the impact of using Carbon Black charcoal additives derived from furnace waste (FCB) residue in the preparation of epoxy matrices during the production of flax fiber-reinforced composites. The study's goal is to look at the mechanical properties, especially flexural resistance, to help figure out how to use additives made from industrial waste to make composites stronger so that they could be used in the future in some parts of unmanned aerial vehicles (UAVs).

## MATERIALS

### Fiber

A unidirectional flax fiber (Fig. 1) with a surface weight of 200 grams per square meter serves as the reinforcing fiber in the manufacturing of composite materials. The 6 layers of the unidirectional flax are laid up in the same direction at 0 degrees,  $[0^\circ]$ .



Fig.1 Flax fiber

### Matrix

The matrix used in the manufacturing process is epoxy resin ER550 (Fig. 2), with a hardener ratio of 100:35, which is the ratio used for the composite manufacturing process with furnace waste powder being used as part of the matrix.



Fig.2 Epoxy Resin ER550

## METHOD

### Composite Manufacturing

Vacuum bagging is the composite material forming process used in this study. The main advantage of using a vacuum system is that it helps the fibers to compress more effectively. The size of the specimen is determined according to the ASTM D7264 standard [14], and it is initially formed with dimensions of  $200 \times 150 \text{ mm}^2$  before being trimmed into 5 test specimens (Fig. 3).

The matrix for each test configuration is prepared with the addition of charcoal derived from furnace power, at concentrations of 5% wt, 10% wt, and 15% wt of the matrix weight, since most of the data used as references in the part related to the addition of additives to the matrix to be used as ingredients in making composite materials, the amount of additives is mostly not more than 20% in order to prevent the composite materials from being too brittle. In addition, the researcher has experimented by using FCB additives at the amount of 20% of the matrix weight, which found that the magnetic stirrer could not stir the resin and additives to be satisfactory due to the viscosity of the resin itself and the amount of additives that were too much. For that reason, research is set to analyze only 5-15% of the additives as specified. The matrix and additives are mixed together using a magnetic stirrer at a speed of 600 rpm for a total of 30 minutes. Afterward, the hardener is added at a ratio of 100:35 and the mixture is stirred briefly before being prepared for the forming process.

The mold is cleaned with acetone and coated with polyvinyl alcohol (PVA) or mold release wax. Then the flax fibers are laid and coated with a resin mixture of filler and hardener. The fibers are laid over and repeated until all 6 layers are completed (Fig. 4). The peel ply is placed on top of the last fiber layer, release film and breather resin absorbent cloth in order (Fig. 5). When the composite is fully prepared, the process is sealed with a vacuum film connected by a vacuum connector to a vacuum pump and the air is sucked out to create a vacuum system and to press the fibers

together tightly.

After manufacturing the composite using the vacuum bagging method (Fig. 6), the composite is placed in an oven for resin curing to achieve maximum performance [19]. The curing profile (Fig. 7) illustrates the process of curing at 100 °C for 3 hours, then cooling down to room temperature. The prepared composite materials are stored at a controlled temperature in a closed room to prevent water absorption, and they are taken out for flexural testing.

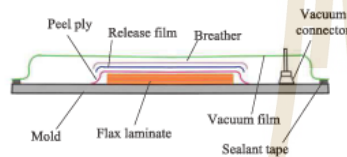


Fig.3 Vacuum bagging system

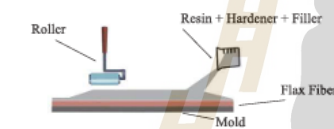


Fig.4 Composite Lay up

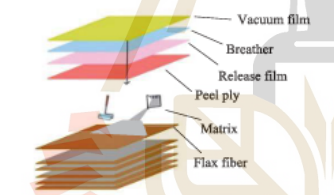


Fig.5 Composite manufacturing



Fig.6 Composite fully prepared

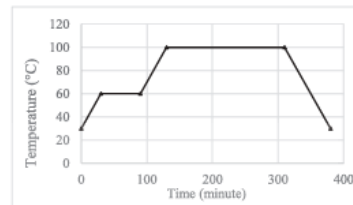


Fig.7 Temperature profile curing resin

**Flexural Testing**

The flexural testing of the composite materials follows the ASTM standard using a 3-point bend test. The specimen's tests were performed on a universal testing machine (UTM) with a 100 kN load cell capacity. Loading and environmental considerations were made in accordance with standard criteria for flexural bending (test conditions are at 25 °C with 50% humidity). 20 samples with a thickness of 4–6 mm, thickness-to-span ratio of 1:16, and dimensions of 150 × 15 mm<sup>2</sup> were evaluated in experiments at a continuous testing rate of 2 mm/min till breaking, and an average of 20 sample readings are obtained (see Table 1). The maximum load was used to calculate the flexural strength of the material refer to "Eq. (1)".

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \tag{1}$$

Where  $\sigma$  is the flexural strength,  $F$  is the maximum force applied to the specimen,  $L$  is the width of the support span,  $b$  is the width of the test specimen and  $h$  is the thickness of the test specimen.

Table 1 Dimension and additive added of specimen

Specimen	Filler addition	Dimension	Thickness
F0	0%	150 x 15 mm <sup>2</sup>	4.52 mm
F5	5%	150 x 15 mm <sup>2</sup>	5.23 mm
F10	10%	150 x 15 mm <sup>2</sup>	6.21 mm
F15	15%	150 x 15 mm <sup>2</sup>	6.98 mm
Testing rate of crosshead		2 mm/min	

**RESULTS AND DISCUSSION**

In the evaluation of the influence of FCB additives on the flexural properties using a UTM testing machine, it was found that the load performance of the test specimens increased with the amount of FCB additive at 10% and reached the highest at 15%. However, using FCB at 5% showed a decrease in the load performance of the composites, which may be due to poor bonding (Fig. 8) between the fibers and the FCB (Fig. 9).

The deflection figure shows the deflection range of the composites, observed to be between 6 and 8 mm. The values decreased at 5% and 15%, indicating increased brittleness of the composites. However, using FCB at 10% showed higher deflection values. Considering the load performance, using FCB in the

range of 10-15% may result in better load performance and suitable deflection compared to using 5% (Fig. 10).

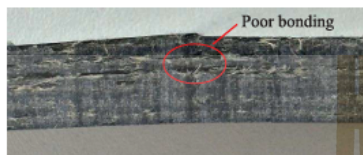


Fig.8 Poor bonding of composite

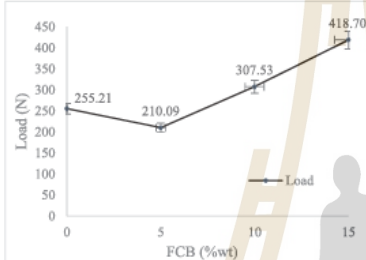


Fig.9 Load variation with percentage of FCB content

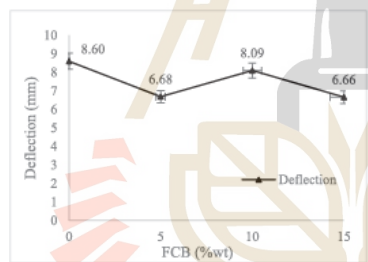


Fig.10 Deflection variation with percentage of FCB content

The flexural stress of the composites tests revealed that using FCB at 5% showed the lowest load value, consistent with the previously mentioned lowest flexural performance. This indicates that using FCB at 5% is not suitable as an additive concentration. It is recommended to use 10-15% for better and more consistent composite properties. The observed flexural strain values continuously decreased, indicating reduced deformability and increased brittleness of the composites (Fig. 11).

Using FCB at 5% and 15% resulted in a slight

increase in the flexural modulus, indicating that the composites distributed stress well and showed minimal deformation (Fig. 12).

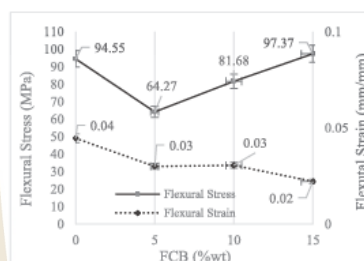


Fig.11 Flexural Stress variation with percentage of FCB content

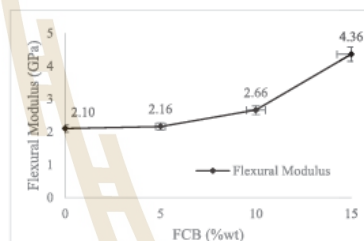


Fig.12 Flexural Modulus variation with percentage of FCB content

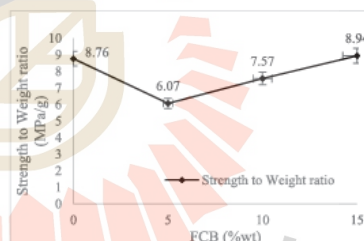


Fig.13 Strength to Weight ratio variation with percentage of FCB content

Fig. 13 shows the ratio of strength to weight for materials with various additive percentages. It is observed that the highest ratio is achieved with a 15% additive. Typically, the landing gear set of an unmanned aerial vehicle (UAV) made from

aluminum has a strength-to-weight ratio of 6.94 MPa/g [15]. This makes flax fiber-reinforced composites a more sustainable and environmentally friendly option for such applications.

The evaluation of FCB's influence revealed the highest load performance was observed at 15%, capable of supporting approximately 40 kilograms. This is sufficient for use in UAV landing gear, which must support an overall structural weight of about 5-10 kilograms. This makes it a viable alternative to aluminum, which is commonly used in such parts, and a more sustainable option.

#### CONCLUSION

The impact of using waste-derived additives such as FCB on the evaluation of the flexural strength of flax fiber-reinforced composites has shown that FCB significantly enhances the mechanical performance of the composites. The compatibility between natural fibers and this naturally derived filler promotes improved flexural properties. The use of 15% FCB was found to result in the best performance in terms of load-bearing capacity, deflection, stress, strain, and flexural modulus. This makes the composite an excellent candidate for use in unmanned aerial vehicle landing gear components as a sustainable and environmentally friendly alternative to aluminum.

The results of this study promote the utilization of industrial waste as additives in composite materials to enhance their properties. However, this indicates that the ductile nature of polymer changes into brittle with waste particulate addition [16]. The addition of fillers into the matrix has a positive effect on fiber adhesion and improves the flexural strength of the composite materials.

Eco-friendly composite materials represent a new approach to address the potential environmental impacts of these waste streams and provide a framework for the use of composites that promote the recycling of resources, which helps preserve value in the form of energy and materials.

#### REFERENCES

- [1] market.us., 2024, Global Drone Market By Type, <https://market.us/report/drone-market/>.
- [2] GlobeNewswire., 2022, Composite Market Size Reach Around US\$ 163.14 Bn by 2030, <https://www.globenewswire.com/newsrelease/2022/04/08/2419556/0/en/Composites-Market-Size-to-Reach-Around-US-163-14-Bn-by-2030.html>.
- [3] Zarafsh H., Environmental assessment of woven hemp fibre reinforced epoxy composites and potential applications in aerospace and electric scooter industries, *Results in Materials*, Vol. 20, 2023, pp. 1-14.
- [4] Wang J., Euring M., Ostendorf K., and Zhang K., Biobased materials for food packaging, *Journal of Bioresources and Bioproducts*, Vol. 7, Issue 1, 2021, pp. 1-13.
- [5] Elfalch I., A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials, *Results in Engineering*, Vol. 19, 2023, pp. 1-31.
- [6] Yan L., Chow N., and Jayaraman K., Flax fibre and its composites – A review, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 56, 2014, pp. 296-317.
- [7] Shaker K., Nawab Y., and Saouab A., Influence of silica fillers on failure modes of glass/vinyl ester composites under different mechanical loadings, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 218, 2019, pp. 1-10.
- [8] Immanuel J. D. R., Arun V. G. K., John R. A., and Vijay A. S., Characterization of epoxy resin based banana fiber reinforced composite with waste CD powder filler, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 90, 2023, pp. 19-23.
- [9] Selvaraj D. K., Silva F. J. G., Campilho R. D. S. G., A. Baptista, and Pinto G. F. L., Influence of the natural additive on natural fiber reinforced thermoplastic composite, *Procedia Manufacturing*, Vol. 38, 2019, pp. 1121-1129.
- [10] Naga V., Compressive & impact properties of sisal/glass fiber reinforced hybrid composites, *Int J Fiber Text Res*, Vol. 1, 2011, pp. 11-14.
- [11] Das S. C., On the use of wood charcoal filler to improve the properties of natural fiber reinforced polymer composites, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 44, 2021, pp. 926-929.
- [12] Hosseini A. and Raji A., Improved double impact and flexural performance of hybridized glass basalt fiber reinforced composite with graphene nanofiller for lighter aerostructures, *Polymer Testing*, Vol. 125, 2023, pp. 1-10.
- [13] Nagaraja S., Anand P. B., Shivakumar H. D., and Ammarullah M. I., Influence of fly ash filler on the mechanical properties and water absorption behaviour of epoxy polymer composites reinforced with pineapple leaf fibre for biomedical applications, *RSC Advances*, Vol. 14, No. 21, 2024, pp. 14680-14696.
- [14] ASTM, 2021 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials, West Conshohocken.
- [15] Wipada B., Thongchart K. and Veena P., The Effect of Glass Microspheres on The Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Composites, *The 36<sup>th</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2022, pp. 310-317.
- [16] Das O., Babu K., Shanmugam V., Sykam K., and Tebyetekerwa M., Natural and industrial wastes for sustainable and renewable polymer composites, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 158, 2022, pp. 1-22.

*GEOMATE – Pattaya, Thailand, 13-15 November 2024*

- [17] Mahmudul A., Mahadi H.P., Mir M.H., Ridwan A., Niamaul Q., Adib B.R. and Irfan A., Effect of jute stick charcoal powder on characterization of aluminum metal matrix composite, *Result in Engineering*, Vol. 22, 2024, pp. 1-8.
- [18] Francis O. E., Richard O.A., Benjamin U.O. and Salifu E., Experimental study on tribological (dry sliding wear) behaviour of polyester matrix hybrid composite reinforced with particulate wood charcoal and periwinkle shell, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, Vol. 33, 2021, pp. 318-331.
- [19] Kitsana K., Veena P., Kreetiwat C. and Thongchart K., Enhancing Mechanical Properties of Hybrid Composite Materials Reinforced with Natural and Synthetic Fibers through manufacturing Processes, *The 38<sup>th</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2022, pp. 121-122.

Copyright © Int. J. of GEOMATE All rights reserved, including making copies, unless permission is obtained from the copyright proprietors.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

AMM0030

## Evaluation of the Behavior of Sandwich Composite Structures Reinforced with Flax Fiber and Flexible Cores

Kitsana Khodcharad<sup>1,\*</sup>, Krectiwat Chaiyasin<sup>2</sup>, Wipada Boransan<sup>3</sup>,  
Watcharapong Patangtalo<sup>1</sup> and Veena Phunpeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

<sup>2</sup>Mechatronic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

<sup>3</sup>Center of Excellence in Innovation for Sustainable Infrastructure Development, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

Corresponding Author: khodcharad.k@gmail.com

**Abstract.** Sandwich composite structures are extensively utilized in diverse sectors due to their lightweight characteristics and superior strength in comparison to alternative materials, as well as their exceptional thermal and electrical insulation features. In order to meet the necessary thickness for structural purposes, it is necessary to have a core material placed between the composite face sheets. The core must efficiently support loads without substantially augmenting the total weight of the construction. The study employed a 2.5 mm thick recycled Lantor Soric core, which was combined with face sheets composed of flax fibers and an epoxy resin matrix (ER570) using the vacuum infusion technique. This technique guarantees a robust bond between the core and face sheets, eradicating any air pockets or empty spaces inside the structure. The objective of the study was to assess the performance of buildings constructed using these materials using a Universal Testing Machine (UTM) and according to ASTM C393/C393-M standards. The key variables evaluated encompassed the most suitable thickness of the core for practical uses, the stress exerted on the face sheets, the ability of the core to resist bending, and the strength of the core in resisting shear forces. The findings demonstrate that a composite sandwich structure, including a core thickness of 7.5 mm, had favorable outcomes in terms of its ability to bear loads (839.8 N), its deflection (8 mm), the stress on its face sheets (131.58 MPa), its flexural modulus (24.6988 GPa), and the shear strength of its core (3 MPa). These findings indicate that a core thickness of 7.5 mm yields optimal performance for this particular composite construction. This thickness not only ensures efficient functionality but also promotes sustainability by utilizing natural materials instead of manufactured alternatives.

**Keywords:** Flax fiber, Flexible core, Sandwich Structure, Natural Fiber Reinforced

## 1. Introduction

Sandwich composite materials are employed in structural and semi-structural applications across various industries and have seen a continuous increase in use due to their exceptional mechanical properties. The production of sandwich composite materials involves a range of forming processes tailored to the specific requirements of the application. The primary component of these materials is the face plates, with a core inserted between them. This core is crucial for increasing the material's thickness while maintaining a low overall weight. The incorporation of natural materials, such as reinforcing fibers, recycled core materials, or even natural core or matrix materials, is also gaining attention. Natural reinforcing fibers, including flax, bamboo, and hemp, serve as examples of the integration of natural fibers in composite materials and industrial components [1].

The recycled core material Lantor Soric, a highly flexible core utilized as an example in this study, is derived from recycled PET bottles, making it a more sustainable choice due to its use of materials from waste resources. Additionally, this core is designed to be compatible with flax fibers, which are natural plant fibers frequently used as reinforcements in composites. Flax fibers are valued for their relatively high specific strength, widespread availability, low cost, and environmental benefits [2, 3]. Their strength is comparable to that of some synthetic fibers [4-9]. Consequently, flax fibers will be employed in this study to enhance the environmental sustainability of the sandwich structure [10].

Current research focuses on the impact of core material thickness on the mechanical properties of sandwich structures. Variations in core thickness can significantly alter these properties. Studies such as those by Yash G.[11], demonstrate that increasing core thickness generally leads to enhanced flexural strength. Similarly, research by Qin Z. [12], indicates that greater core thickness results in increased axial compressive load capacity.

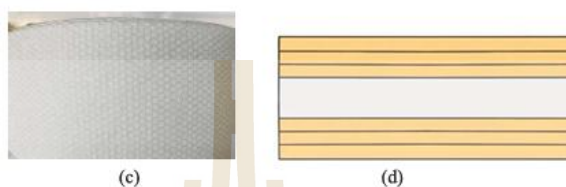
This study investigates the use of a 2.5 mm thick Lantor Soric in combination with a flax fiber-reinforced face sheet, co-molded using the Vacuum Infusion Process. The flexural strength of the resulting sandwich composite structure will be evaluated across various core thicknesses, with testing conducted using a Universal Testing Machine (UTM). The experimental results will be compared with theoretical calculations to assess specific properties, and the findings will be synthesized to draw comprehensive conclusions.

## 2. Methodology

### 2.1 Materials

The reinforcing fibers used are unidirectional flax fibers is shown in Figure 1(a), with a weight per unit area of 200 g/m<sup>2</sup> arranged in three layers on each surface sheet, all oriented uniformly at 0 degrees. These fibers are co-molded with an ER570 resin matrix is shown in Figure 1(b), utilizing a hardener at a ratio of 100:35, along with a Lantor Soric core is shown in Figure 1(c),

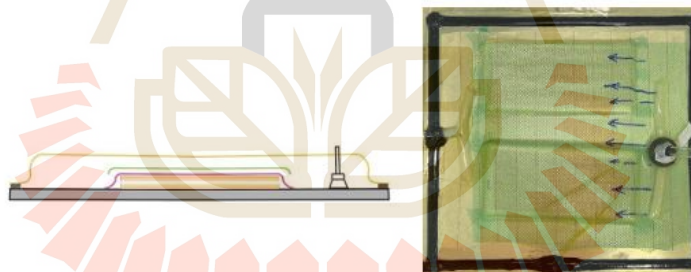




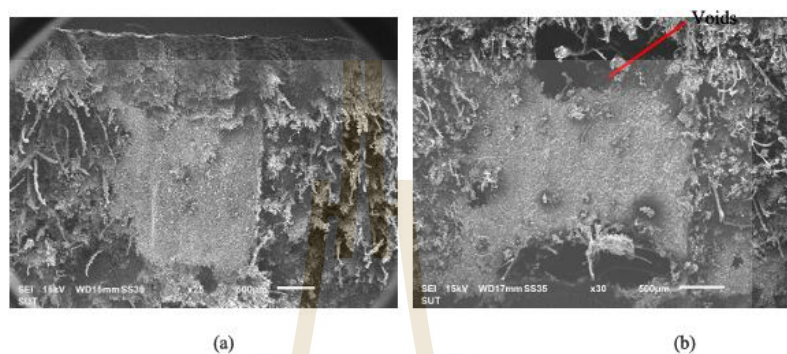
**Figure 1.** Flax fiber (a), matrix (b), laminar core (c) and stacking sequence (d)

### 2.2 Manufacturing

The sandwich composite materials are manufactured with the Vacuum Infusion Process. The fibers and core are arranged in the mold in the sequence of the face sheet followed by the core, and are then covered with a peel ply, infusion mesh, and vacuum film, respectively as shown in Figure 2. This method is used in the same way as for forming workpieces with 2-4 additional cores, that is, by placing the cores in an overlapping manner before placing them with fibers to form a surface sheet before entering the sequence of using vacuum to perform Vacuum Infusion. To achieve complete incorporation of the matrix, the resin and hardener are combined using a magnetic stirrer operating at a velocity of 600 rpm for a duration of 30 minutes. Subsequently, the blend is introduced into a resin chamber to eliminate any air bubbles prior to being sucked into the vacuum system located inside the mold for 15 minutes. The initial dimensions of the sandwich composites are  $210 \times 100 \text{ mm}^2$ , and it is then divided into test specimens with dimensions of  $200 \times 15 \text{ mm}^2$ . This combined molding technique ensures a strong bond between the core and face sheet (Vacuum Infusion Process in Figure 3a), superior to the bond that would be achieved if they were molded separately and then assembled later (Vacuum Bagging Process in Figure 3b) as shown in Figure 3. In all test specimens, the same forming procedure was specified, which is the Vacuum Infusion Process (Figure 3a).



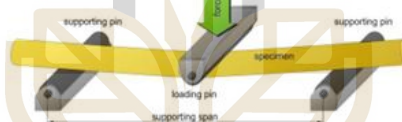
**Figure 2.** Sandwich composite Manufacturing



**Figure 3.** SEM compares simultaneous forming (a) and subsequent assembly (b)

### 2.3 Flexural Test

The flexural strength of the composite sandwich structure will be tested in accordance with the ASTM C393/C393M test standard[13]. This standard outlines the assessment of many characteristics, such as force, deflection, stress, flexural modulus, flexural rigidity and stiffness. The experiments will be carried out with a 100 kN Universal Testing Machine, model LD100. A total of 20 test specimens will be fabricated, with 5 specimens tested for each core thickness. The test crosshead speed will be set at 6 mm/min, and the span will be adjusted to 150 mm, as prescribed by the standard as show in Figure 4. The test data are presented in Table 1.



**Figure 4.** Example of placing test pieces in a UTM testing machine

**Table 1.** Specimen designations.

Sample	Core Layer	Total Core Thickness (mm)	Face sheet Thickness (mm)	Specimen Dimension (mm <sup>2</sup> )	Specimen Thickness (mm)	Crosshead Speed
C1	1	2.5 ± 0.2			5.2 ± 0.2	6 mm/min
C2	2	5 ± 0.2	1.36	150 x 15	7.7 ± 0.2	
C3	3	7.5 ± 0.2			10.2 ± 0.2	
C4	4	10 ± 0.2			12.7 ± 0.2	

### 2.4 Facing Stress

The Facing stress properties of the sandwich structures are calculated using the equations provided in the ASTM standard, as outlined (i.e., (1)).

$$\sigma = \frac{P_{\max} S}{2t(d+c)b} \quad (1)$$

where:

$\sigma$  is facing stress, MPa  
 $P_{\max}$  is maximum force prior to failure, N  
 $S$  is span length, mm  
 $t$  is facing thickness, mm  
 $d$  is sandwich thickness, mm  
 $c$  is core thickness, mm  
 $b$  is sandwich width, mm

### 2.5 Core Shear Ultimate Strength

The calculation to determine the core shear ultimate stress properties along the axis is provided in the test standard and is outlined (i.e., (2))

$$F_s^{\text{ult}} = \frac{P_{\max}}{(d+c)b} \quad (2)$$

where:

$F_s^{\text{ult}}$  is core shear ultimate strength, MPa  
 $P_{\max}$  is maximum force prior to failure, N  
 $d$  is sandwich thickness, mm  
 $c$  is core thickness, mm  
 $b$  is sandwich width, mm

## 3. Results and Discussion

### 3.1 Behavior under bending load

The test results for the composite sandwich structure specimens revealed that the specimen with 3 layers of core and a core thickness of 7.5 mm (specimen C3) exhibited the maximum force distribution as shown in Figure 5, with a recorded maximum force of 839.8 N. In comparison, specimens with 4 layers, 2 layers, and 1 layer of core experienced maximum forces of 742.418 N, 556.41 N, and 374.52 N, respectively. Additionally, when evaluating deflection, the composite sandwich structure with 3 layers of core exhibited the smallest deflection distance, approximately  $8 \pm 0.2$  mm. This indicates that the 3-layer core specimen demonstrated superior strength and stability relative to other core thicknesses.

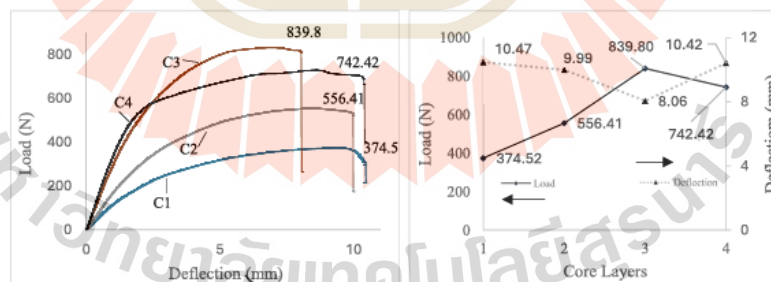


Figure 5. Force and deflection distribution

### 3.2 Facing Stress

The stress values at the face plate area were calculated based on the maximum force applied to each test specimen as shown in Figure 6. The maximum face plate stress of  $131.58 \pm 3$  MPa was observed in the specimen with 3 layers of core and a core thickness of 7.5 mm. For specimens with 4 layers, 2 layers, and 1 layer of core, the stress values were estimated to be  $76.6814 \pm 2$  MPa,  $120.318 \pm 2.5$  MPa, and  $119.83 \pm 2.5$  MPa, respectively. Notably, the composite sandwich structure with 4 layers of core and a core thickness of 10 mm exhibited the lowest stress resistance. This reduction in stress resistance may be attributed to the increased core thickness, which could have rendered the material more brittle compared to the other core configurations.

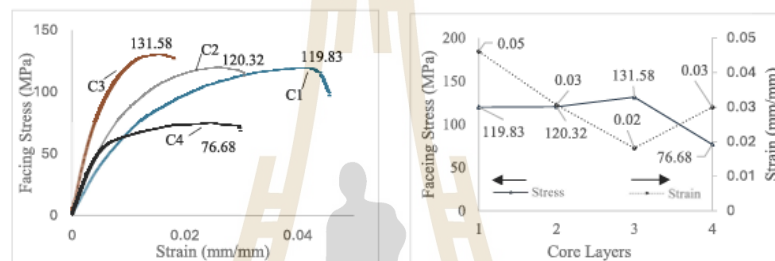


Figure 6. Facing stress and strain distribution

### 3.3 Modulus analysis

The calculation results as shown in Figure 7 for the flexural modulus of the composite sandwich structure indicated that the core with 3 layers and a thickness of 7.5 mm exhibited the highest flexural modulus, measuring 24.6988 GPa, compared to other core configurations. This suggests that the 7.5 mm. thick core can withstand greater forces and experiences less elongation, making it more suitable for use in force-bearing structures than the other cores.

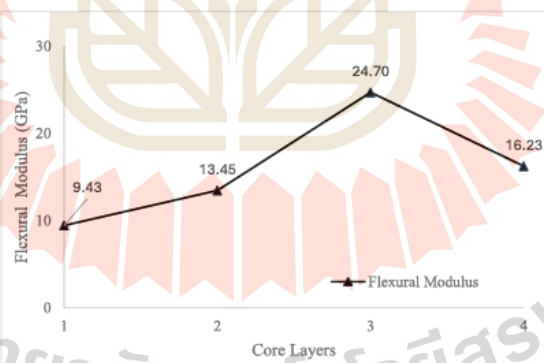


Figure 7. Modulus of flexural in different core size

### 3.4 Core Shear analysis

The shear strength within the core of the composite sandwich structure as shown in Figure 8 was found to be approximately 3 MPa for core thicknesses of 2.5 mm, 5 mm, and 7.5 mm. In contrast, the core with a thickness of 10 mm exhibited the lowest shear strength at 2.25 MPa. This finding is consistent with the manufacturer's specifications, which indicate that the shear strength of this type of core should be around 3.5 MPa.

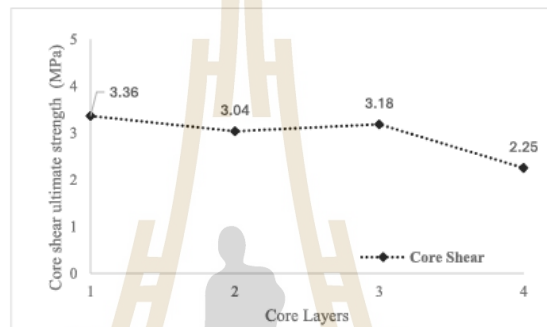


Figure 8. Core shear ultimate strength in different core size

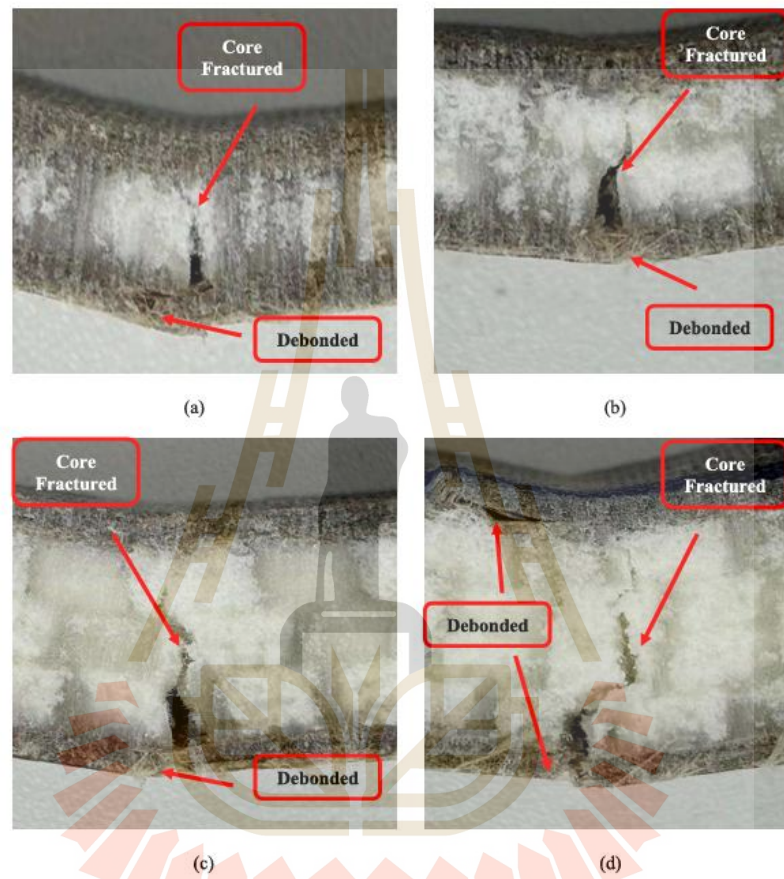
A summary table of the test results is presented in Table 2 below.

Table 2. Specimen designations.

Sample	Core Layer	Specimen Thickness (mm)	Load-Bearing (N)	Deflection (mm)	Facing Stress (MPa)	Facing Strain (mm/mm)	Flexural Modulus (GPa)	Core Shear Strength (MPa)
C1	1	5.2 ± 0.2	374.5	10.47	119.83	0.05	9.43	3.36
C2	2	7.7 ± 0.2	556.41	9.99	120.32	0.03	13.45	3.04
C3	3	10.2 ± 0.2	839.8	8.06	131.58	0.02	24.70	3.18
C4	4	12.7 ± 0.2	742.42	10.42	76.68	0.03	16.23	2.25

### 3.5 Failure of each specimen

Examples of failure in each type of test specimen are shown in Figure 9. In the 1-layer core (Figure 9a), 2-layer core (Figure 9b), and 3-layer core (Figure 9c) specimens, the bottom face plate is fractured and debonded, while the core is fractured. The top face, however, remains strongly bonded to the core. In contrast, the 4-layer core specimen (Figure 9d) shows failure with the bottom face plate fractured and debonded, the core fractured through to the opposite face plate, and additional debonding observed.



**Figure 9.** Failure in each type of test specimen, 1-layer core (a), 2-layer core (b), 3-layer core (c), 4-layer core (d).

#### 4. Conclusion

This study evaluates the appropriateness of utilizing Lantor Soric flexible cores in sandwich composite constructions to analyze load-bearing performance and other special characteristics. Testing shown that this particular sort of adaptable core is highly compatible with the integration of fiber flax faces utilizing the vacuum infusion procedure. This technique make the bond interphase between the fiber and core strong, preventing the production of any air pockets or empty spaces in the final result. The core with a thickness of 7.5 mm, consisting of three layers, had the highest load-bearing capability, enduring a maximum force of 838.9 N. Additionally, the highest values for stress resistance in the face sheets and maximum flexural modulus were also found in this three-layer core. Specifically, the facing stress was 131.58 MPa, and the flexural modulus was 24.6988 GPa. The core with this configuration also exhibited the minimal deflection. In conclusion, the use of Lantor Soric flexible core material as a thickness-enhancing core in composite materials demonstrates optimal performance in both load-bearing and deflection characteristics. For optimal outcomes, it is advised to utilize a core thickness of 7.5 mm.

#### 5. Reference

- [1] Fan, J., Nassiopoulou, E., Brighton, J., Larminat, A., and Njuguna, J. (2011). New structural biocomposites for car applications. *Society of Plastics Engineers-EUROTEC 2011 Conference Proceedings, Barcelona, Spain*.(p.14-15)
- [2] LANTOR, C. (2024). Lantor Soric®: A unique flexible foam core for infusion and RTM processing. <https://www.lantorcomposites.com/textile-foam-cores/soric/> (accessed).
- [3] Sarkar, F., Akonda, M., and Shah,D., U. (2020), Mechanical Properties of Flax Tape-Reinforced Thermoset Composites. *Materials* (Vol. 13(23)).
- [4] Banerjee, A., Jha, K., Petru, M., Kumar, R., Sharma, S., Saini, M., S. (2023). Fabrication and characterization of weld attributes in hot gas welding of alkali treated hybrid flax fiber and pine cone fibers reinforced poly-lactic acid (PLA) based biodegradable polymer composites: studies on mechanical and morphological properties. *Journal of Materials Research and Technology* (Vol. 27, p. 272).
- [5] Davies, P., Le, G., M., Niu , Z., Catarino, A., I., De, W., Y., Everaert, G., Park, C., H., Demeyer, E. (2023). Recycling and ecotoxicity of flax/PLA composites: Influence of seawater aging. *Composites Part C: Open Access* (Vol. 12, p. 100379).
- [6] Dittenber, D., B. and GangaRao, H., V., S. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (Vol. 43(8), p. 1419).
- [7] Kandemir, A., Longana, M., L., Hamerton, I., and Eichhorn, S. J. (2022). Developing aligned discontinuous flax fibre composites: Sustainable matrix selection and repair performance of vitrimers. *Composites Part B: Engineering*. (Vol. 243, p. 110139),.
- [8] Pantaloni, D., Rudolph, A., L., Shah, D. U., Baley, C., and Bourmaud, A. (2021). Interfacial and mechanical characterisation of biodegradable polymer-flax fibre composites. *Composites Science and Technology*. (Vol. 201, p. 108529).
- [9] Pil, L., Bensadoun, F., Pariset, J. and Verpoest, I. (2016). Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites?. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. (Vol. 83, p. 193).
- [10] Elfaleh, I., Elfaleh, I., Abbassi, F., Habibi, M. and Ahmad, F. (2023) A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. *Results in Engineering*. (vol. 19, p. 101271).
- [11] Gupta, Y., Jacob, V., V., A., and Mohanty, A. (2020). Effect of the core thickness on the flexural behaviour of polymer foam sandwich structures. *IOP SciNotes*. (vol. 1).
- [12] Qin, Z., Yu, L., Liu, X., Yan, S., Li, X. (2024). In-plane compressive responses and failure behaviors of composite sandwich plates with resin reinforced foam core. *Heliyon*. (vol. 10(5), p. 26679)
- [13] ASTM (2020). Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. *West Conshohocken*.

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 39  
วันที่ 15 - 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2568 จังหวัดขอนแก่น

AMM0027



การพัฒนาคอมโพสิตอย่างยั่งยืน: การศึกษาอิพ็อกซี-เรซิน เกรดชีวภาพร่วมกับชั้นแกนจากวัสดุรีไซเคิล

Advancing Sustainable Composites: A Study on Bio-Epoxy Resin with Recycled Waste Core Layers

กฤษณ ศุขราช<sup>1</sup>, วิภา พันเพ็ง<sup>1</sup>, กรติวัฒน์ ไชยศิลป์<sup>2</sup>, วิภาดา โบราณสาร<sup>3</sup> และวัชรพงษ์ ปะดังทะโล<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>3</sup>ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111, ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

\*ติดต่อ: khodcharad.k@gmail.com

#### บทคัดย่อ

การศึกษานี้เปรียบเทียบวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์จากเรซินสังเคราะห์และเมทริกซ์จากเรซินเกรดชีวภาพ โดยใช้งานร่วมกับชั้นแกนโฟมของ Lantor Soric ซึ่งผลิตจากพลาสติก PET รีไซเคิล โดยวางเรียงซ้อนกัน 1, 2, 3 และ 4 ชั้น เพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต ผ่านการทดสอบเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการดัดงอและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผ่านการดำเนินการด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนชั้นแกนจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของวัสดุ โดยผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจะอยู่ที่การใช้แกนทั้งหมด 4 ชั้น นอกจากนั้นเมทริกซ์แบบไบโอยังแสดงถึงคุณสมบัติการดัดงอที่ดีกว่าเมทริกซ์แบบสังเคราะห์ การวิเคราะห์ด้วย SEM ยังแสดงถึงการยึดเกาะระหว่างเรซินและตัวเสริมแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่พบการลอกชั้นของโครงสร้าง วัสดุที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด เช่น เส้นใยแฟล็กซ์ เมทริกซ์ไบโอเรซินและแกน Lantor Soric จาก PET รีไซเคิล ล้วนเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดการพึ่งพาทรัพยากรจากปิโตรเลียมและลดผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมทั้งนี้ แนวทางนี้สอดคล้องกับความพยายามในการใช้งานวัสดุอย่างยั่งยืนและส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียน โดยเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีสมรรถนะสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งตอบสนองทั้งเป้าหมายด้านประสิทธิภาพและเป้าหมายด้านความยั่งยืน

**คำหลัก:** เมทริกซ์เกรดชีวภาพ, โครงสร้างแบบแซนวิชคอมโพสิต, เส้นใยเสริมแรงจากธรรมชาติ, คุณสมบัติแรงดัดงอ, สัณฐานวิทยา

#### Abstract

This study compares composite materials using synthetic resin matrices and bio-resin matrices derived from plant sources, with foam core layers of Lantor Soric made from recycled PET plastic added in 1, 2, 3, and 4 layers. The bending behavior and morphology of the materials were evaluated using Scanning Electron Microscopy (SEM). Results show that increasing the number of foam core layers enhances the strength and flexibility of the composite materials, with the 4-layer foam core composite exhibiting the highest strength. Additionally, composites using bio-resin matrices demonstrate superior bending properties compared to those using synthetic resin matrices. SEM analysis reveals strong bonding between the resin and foam core, with no delamination, indicating a well-integrated structure and efficient resin distribution. The materials used, including flax fibers, bio-resin matrices, and the Lantor Soric core made from recycled PET, are all environmentally friendly, reducing reliance on petroleum-based resources and minimizing environmental impact. This approach aligns with global sustainability efforts by materials sustainably and supporting the circular economy, providing a promising alternative for producing high-performance, eco-friendly composite materials that meet both performance and sustainability goals.

**Keywords:** Bio-resin matrix, Sandwich composite, Natural reinforced composite, Flexural properties, Morphology

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 39  
วันที่ 15 - 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2568 จังหวัดขอนแก่น

AMM0027



### 1 บทนำ

วัสดุคอมโพสิตถือเป็นกลุ่มวัสดุที่มีการเติบโตและวิวัฒนาการอย่างรวดเร็ว วัสดุคอมโพสิตได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ ยานยนต์ กีฬา และการก่อสร้าง ซึ่งล้วนแต่ต้องการวัสดุที่มีคุณสมบัติเฉพาะ เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีคุณสมบัติที่เหนือกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุทั่วไป เช่น ความแข็งแรงเชิงกลที่ยอดเยี่ยม ความเบาเป็นพิเศษ และทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรง จึงทำให้วัสดุคอมโพสิตกลายเป็นตัวเลือกที่สำคัญสำหรับโครงสร้างที่ต้องการความสมดุลระหว่างน้ำหนักและความแข็งแรงที่เหมาะสมที่สุด [1,2] การใช้งานที่โดดเด่นได้แก่ ส่วนประกอบโครงสร้างที่ซับซ้อนของปีกและลำตัวเครื่องบิน ล้อและชุดล้อจอด แผงตัวถังรถยนต์ประหยัดพลังงาน และอุปกรณ์กีฬาสมรรถนะสูง เช่น ไมเทนนิสและจักรยานคาร์บอนไฟเบอร์ ตัวอย่างเหล่านี้เน้นย้ำถึงศักยภาพและบทบาทสำคัญของวัสดุคอมโพสิตในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ [3-5] แม้ว่าวัสดุคอมโพสิตสังเคราะห์ เช่น คาร์บอนไฟเบอร์ไฟเบอร์กลาส และเส้นใยเคฟลาร์ รวมถึงเมทริกซ์ที่ทำจากปิโตรเลียม จะเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาวัสดุสมัยใหม่ เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่โดดเด่น แต่การผลิตและการกำจัดเมื่อหมดอายุการใช้งานมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ซึ่งรวมถึงการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การสะสมของเสียที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และการปล่อยสารพิษกลับคืนสู่ระบบนิเวศ [6,7] ปัญหาเหล่านี้ทำให้ผู้วิจัยต้องสำรวจวัสดุทางเลือก เช่น เส้นใยเสริมแรงจากธรรมชาติ ซึ่งถือเป็นวัสดุทดแทนวัสดุสังเคราะห์ที่มีแนวโน้มดี [8] เส้นใยจากธรรมชาติมีข้อดีในด้านความยั่งยืน รวมถึงการใช้ทรัพยากรหมุนเวียน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการผลิต [9] ตัวอย่างที่โดดเด่นคือเส้นใยแฟลกซ์ ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลที่ยอดเยี่ยม เพิ่มความแข็งแรงของคอมโพสิต และสามารถทดแทนเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะเดียวกัน การพัฒนาไบโอเมทริกซ์หรือเมทริกซ์ที่ได้จากธรรมชาติก็มีความสำคัญเท่าเทียมกัน เมทริกซ์เหล่านี้มักสกัดมาจากพืช เช่น สารสกัดจากแป้งหรือไขมัน (Lipid extraction) [10,11] การวิจัยชี้ให้เห็นถึงความเข้ากันได้กับเส้นใยจากธรรมชาติ

เช่น เส้นใยแฟลกซ์ การผสมผสานนี้ให้ผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มดีในแง่ของคุณสมบัติเชิงกลและความยั่งยืน นอกจากนี้ วัสดุไบโอเมทริกซ์ยังสามารถตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ ก่อสร้าง และอุปกรณ์กีฬา ซึ่งต้องการความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพการทำงานกับความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อม แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของการนำวัสดุธรรมชาติมาใช้ในวัสดุคอมโพสิตสะท้อนให้เห็นถึงความมุ่งมั่นที่จะพัฒนาหลักการเศรษฐกิจหมุนเวียนและการออกแบบที่ยั่งยืน ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญสำหรับอนาคตของวัสดุคอมโพสิต [12,13]

แนวทางที่สำคัญอีกแนวหนึ่งในการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตคือการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานผ่านสารเติมแต่งอนุภาค ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความเข้ากันได้ระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยเสริมแรง นอกจากนี้ การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตยังเกี่ยวข้องกับการใช้แกนน้ำหนักเบาในวัสดุคอมโพสิตแบบแซวิช [14] การใส่แกนไว้ระหว่างชั้นผิวของแผ่นวัสดุคอมโพสิตจะเพิ่มความหนาและเสริมประสิทธิภาพในการรับน้ำหนัก เช่น แรงดัดและแรงเฉือน แกนเหล่านี้มีหลายประเภท ขึ้นอยู่กับข้อกำหนด รวมถึงแกนที่ทำจากไม้ธรรมชาติ โฟม หรือวัสดุสังเคราะห์ เช่น อะรามิด ที่น่าสังเกตคือแกนรูปร่างนี้ได้รับความนิยมนำมาใช้เนื่องจากโครงสร้างซึ่งกระจายแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นทางเลือกที่เบากว่าแกนรูปบล็อกแบบเดิม [15,16] ปัจจุบันแกนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น แกน Lantor Soric ที่ทำจากพลาสติก PET รีไซเคิลที่มีโครงสร้างรังผึ้งกำลังได้รับการพัฒนา แกนประเภทนี้มีข้อได้เปรียบที่โดดเด่นในด้านความยืดหยุ่นและความทนทาน นอกเหนือจากการบรรลุเป้าหมายด้านความยั่งยืนแล้ว แกนประเภทนี้ยังมีศักยภาพสูงในการใช้ร่วมกับวัสดุเมทริกซ์สังเคราะห์และไบโอเมทริกซ์ [17]

ในการวิจัยนี้ มุ่งเน้นศึกษาความเข้ากันได้ระหว่างแกน Lantor Soric กับเมทริกซ์สองประเภท ได้แก่ เมทริกซ์เรซินสังเคราะห์และเมทริกซ์ไบโอเรซิน ซึ่งได้รับการทดสอบโดยเน้นที่ความแข็งแรงเชิงกลตึง การรวมเส้นใยแฟลกซ์ในวัสดุคอมโพสิตช่วยปรับปรุงความแข็งแรงและความยั่งยืนในระยะยาวในด้านสิ่งแวดล้อม ผลลัพธ์ของการศึกษาจะให้ข้อมูลที่

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 39  
วันที่ 15 - 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2568 จังหวัดขอนแก่น

## AMM0027

ช่วยให้เข้าใจถึงศักยภาพของวัสดุคอมโพสิตใหม่และส่งเสริมการพัฒนาวัสดุที่ตอบสนองทั้งข้อกำหนดด้านประสิทธิภาพและความยั่งยืนในอุตสาหกรรม กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของแกน Lantor Soric ในแง่ของการยึดเกาะระหว่างแกนกับเมทริกซ์ ข้อมูล SEM จะช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของวัสดุและสนับสนุนการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตที่มีประสิทธิภาพสูง ทนทาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

### 2 วัสดุและวิธีการ

#### 2.1 วัสดุ

วัสดุคอมโพสิตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยเส้นใยแฟลกซ์จากพืช *Linum usita-tissimum* ซึ่งขึ้นชื่อในเรื่องความแข็งแรง น้ำหนักเบา และย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีการใช้เมทริกซ์สองประเภท ได้แก่ เมทริกซ์เรซินสังเคราะห์ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีย่อมและทนทานต่อสภาพแวดล้อม และเมทริกซ์เรซินชีวภาพจากพืชเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมความยั่งยืน วัสดุคอมโพสิตยังได้รับการเสริมแรงด้วยแกนโพรเซสซิล Lantor Soric ซึ่งทำจากพลาสติก PET ซึ่งช่วยเพิ่มความหนาและคุณสมบัติการตัดงอโดยไม่ทำให้มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แสดงไว้ในรูปที่ 1



เส้นใยแฟลกซ์



แกนแบบ Lantor Soric



เมทริกซ์สังเคราะห์



เมทริกซ์เกร็ดชีวภาพ

รูปที่ 1 ตัวอย่างวัสดุ



#### 2.2 วิธีการ

##### 2.2.1 การขึ้นรูป

การผลิตวัสดุคอมโพสิตในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการ Vacuum Infusion ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ระบบสุญญากาศในการกดส่วนประกอบเข้าด้วยกันในขณะที่ดีเมทริกซ์เข้าไปในเส้นใยเสริมแรงและแกนที่จัดเตรียมไว้ล่วงหน้า เส้นใยเสริมแรงจะถูกวางในทิศทางเดียวกันที่ 0 องศา โดยวางซ้อนกันเป็นจำนวน 3 ชั้น แกน Lantor Soric ซึ่งทำจากพลาสติก PET รีไซเคิลจะถูกสอดเข้าไปตรงกลางเพื่อเพิ่มความหนาและเพิ่มคุณสมบัติการตัดของวัสดุ นอกจากนี้ เส้นใยแฟลกซ์ 3 ชั้นจะถูกวางที่ด้านบนและด้านล่างเพื่อปรับปรุงความแข็งแรงและประสิทธิภาพในการรับน้ำหนัก ขนาดวัสดุก่อนการตัดแต่งคือ 220x100 mm<sup>2</sup> ซึ่งจะถูกตัดเป็นขนาดที่เหมาะสมตามมาตรฐานการทดสอบ หลังจากนั้น พื้นผิวจะถูกคลุมด้วยผ้าลอกแบบ เพื่อป้องกันไม่ให้เรซินเกาะติดกับพื้นผิว และปิดทับด้วยตาข่ายนำเรซินเพื่อให้แน่ใจว่าเรซินกระจายตัวสม่ำเสมอในระหว่างการฉีด เมทริกซ์จะถูกผสมกับสารทำให้แข็งในอัตราส่วนที่ถูกต้องตามข้อมูลทางเทคนิคก่อนจะเข้าสู่กระบวนการโลกาภิวัตน์เพื่อกำจัดอากาศที่ติดอยู่ในเมทริกซ์ออกไป เพื่อป้องกันฟองอากาศในโครงสร้างคอมโพสิต จากนั้นเมทริกซ์จะถูกดึงเข้าสู่ระบบสุญญากาศ โดยที่เส้นใยและแกนจะถูกจัดเรียงอย่างเรียบร้อย โดยกระบวนการแช่เมทริกซ์ใช้เวลาประมาณ 15 นาที หลังจากนั้น โครงสร้างทั้งหมดจะถูกวางในเตาอบประมาณ 6 ชั่วโมงเพื่อให้เรซินแข็งตัวและให้คุณสมบัติเชิงกลที่ดีมากขึ้น

##### 2.2.2 การทดสอบวัสดุ

วัสดุคอมโพสิตแบบแบนวิชหลังจากการขึ้นรูปและการบ่มจะถูกตัดแต่งให้ตรงตามขนาดมาตรฐานสำหรับการทดสอบการดึงงอ ชิ้นงานมีความยาว 200 มม. และความกว้าง 15 มม. โดยความหนาจะแตกต่างกันไปตามชั้นแกน การทดสอบการดึงงอเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 393/C 393M โดยมีช่วงรองรับน้ำหนัก 150 มม. และความเร็วหัวกด 2 มม./นาที ซึ่งดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ LLOYD LD100 (ความจุ 100 kN) ชิ้นงานแต่ละชิ้นจะได้รับการทดสอบความแม่นยำ 5 ครั้ง โดยทดสอบ 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มหนึ่งใช้เมทริกซ์เรซินสังเคราะห์และโครงสร้างแกน 4

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 39  
วันที่ 15 - 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2568 จังหวัดขอนแก่น

## AMM0027

แบบ (ชั้นงาน 20 ชั้น) และอีกกลุ่มหนึ่งใช้เมทริกซ์ไบโอเรซิน และโครงสร้างแกน 4 แบบ (ชั้นงาน 20 ชั้น) รวมเป็นชั้นงาน 40 ชั้น รายละเอียดเพิ่มเติมอยู่ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของชั้นงานทดสอบ

Matrix Type	Core layer	Name	Width (mm)	Thickness (mm)
Synthetic resin matrix	1 Core	S1C	15±0.2	5.02 ± 0.2
	2 Core	S2C		7.72 ± 0.2
	3 Core	S3C		10.33 ± 0.2
	4 Core	S4C		13.42 ± 0.2
Bio-resin matrix	1 Core	B1C	15±0.2	5.33 ± 0.2
	2 Core	B2C		7.70 ± 0.2
	3 Core	B3C		9.92 ± 0.2
	4 Core	B4C		12.21 ± 0.2

### 2.2.3 ความเค้นที่ผิวหน้าและมอดูลัส

ความเค้นที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะกระจุกตัวอยู่ที่ชั้นผิวของโครงสร้างมากกว่าแกน การคำนวณความเค้นนั้นใช้สมการที่คล้ายกับการคำนวณความเค้นดัดของคานาธรรมดา สมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงอยู่ในสมการ 1

$$\sigma = \frac{P_{max}S}{2t(d+c)b} \quad (1)$$

โดยที่:  $\sigma$  คือความเค้นที่ผิวหน้า (Pa),  $P_{max}$  คือแรงสูงสุดก่อนเกิดการแตกหัก (N),  $S$  คือความยาวช่วงระยะรองรับ (มม.),  $t$  คือความหนาของแผ่นผิวหน้า (มม.),  $d$  คือความหนาของโครงสร้างแกนวิช (มม.),  $c$  คือความหนาของแกน (มม.),  $b$  คือความกว้างของโครงสร้างแกนวิช (มม.)

รวมถึงวิธีการวิเคราะห์หาค่ามอดูลัสของโครงสร้าง จะถูกประเมินผ่านสมการที่ระบุไว้ในมาตรฐานของการทดสอบ รวมถึงเปรียบเทียบกับพฤติกรรมที่ในกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในวัสดุ

### 2.2.4 สันฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ถูกใช้เพื่อตรวจสอบพื้นผิวของรอยแตก โดยเน้นที่พฤติกรรมความ

ล้มเหลวของเส้นใยเสริมแรงและความเข้ากันได้ของส่วนต่อประสานระหว่างเมทริกซ์เรซินและเส้นใยแฟลกซ์ ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับ SEM ตัวอย่างที่ทดสอบจะถูกตัดให้มีขนาดที่เหมาะสม (< 5 มม.) เพื่อให้พอดีกับที่ยึดตัวอย่าง SEM พื้นผิวของรอยแตกจะได้รับการตรวจสอบโดยไม่ต้องขัดถูหรือทำให้เรียบเพิ่มเติมเพื่อรักษาลักษณะรอยแตกตามธรรมชาติ สำหรับตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้า จะมีการเคลือบชั้นทองบางๆ โดยใช้เครื่องเคลือบสเปคโตรเพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า และลดการสะสมของประจุ จากนั้นจึงติดตัวอย่างแต่ละชิ้นอย่างแน่นหนาบนโครงอลูมิเนียมด้วยเทปคาร์บอนนำไฟฟ้า ก่อนจะนำไปวางไว้ในเครื่อง SEM เพื่อถ่ายภาพและวิเคราะห์เพิ่มเติม

## 3 ผลลัพธ์

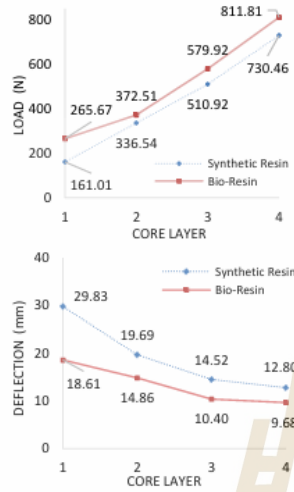
### 3.1 พฤติกรรมภายใต้โหลดดัดงอ

คุณสมบัติความต้านทานการดัดงอที่ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์แสดงให้เห็นว่าการตอบสนองของชั้นงานต่อแรงที่ใช้ส่งผลให้มีการรับน้ำหนักสูงสุดที่ชั้นงานที่มีชั้นแกนกลาง 4 ชั้นและความหนาของแกนกลาง 10 มม. การกระจายน้ำหนักสูงสุดวัดได้ที่ 811.81 นิวตัน สำหรับโครงสร้างที่ใช้เมทริกซ์ไบโอเรซิน สำหรับเมทริกซ์เรซินสังเคราะห์ การรับน้ำหนักสูงสุดเกิดขึ้นที่ชั้นงานที่มีชั้นแกนกลาง 4 ชั้นและความหนาของแกนกลาง 10 มม. ซึ่งให้ค่า 730.46 นิวตัน ผลลัพธ์เหล่านี้ซึ่งรวมถึงทั้งการรับน้ำหนักที่ใช้และการเคลื่อนที่ระหว่างการทดสอบ สรุปไว้ในรูปที่ 2 จากผลการทดสอบการดัด พบว่าความแข็งแรงในการรับน้ำหนักของโครงสร้างที่มีชั้นแกนกลาง 4 ชั้น มีประสิทธิภาพมากกว่าชั้นแกนกลางอื่นๆ และเมทริกซ์ไบโอเรซินให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมทริกซ์เรซินสังเคราะห์ในทุกชั้นแกนกลางที่ทดสอบ



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 39  
วันที่ 15 - 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2568 จังหวัดขอนแก่น

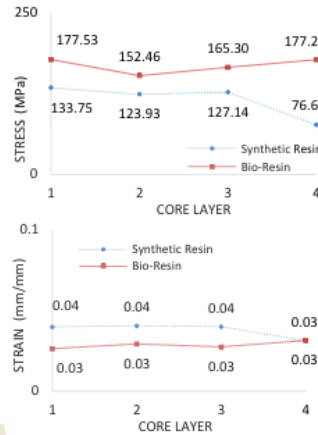
AMM0027



รูปที่ 2 แรงและระยะยัดในแต่ละชั้นแกน

3.2 ความแข็งแรงต่อการดัดงอ

ค่าความเค้นสำหรับชั้นงานถูกกำหนดตามสมการที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 393/C 393M ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความเค้นสูงสุดในชั้นงานที่มีเมทริกซ์ไบโอเรซินนั้น โดยทั่วไปจะสูงกว่าเมทริกซ์เรซินสังเคราะห์ ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่าในแง่ของความสามารถในการรับน้ำหนักและความต้านทานต่อความเค้น ความเค้นในชั้นงานที่มีเมทริกซ์ไบโอเรซินอยู่ในช่วง 152.46 MPa ถึง 177.53 MPa โดยชั้นงาน B1C และ B4C แสดงค่าความเค้นสูงสุดประมาณ 177 MPa ในทางตรงกันข้าม ชั้นงานที่มีเมทริกซ์เรซินสังเคราะห์มีค่าความเค้นที่ต่ำกว่า ซึ่งอยู่ในช่วง 76.68 MPa ถึง 133.75 MPa ความแตกต่างนี้บ่งชี้ว่าเมทริกซ์ไบโอเรซินไม่เพียงแต่มีคุณสมบัติในการรับน้ำหนักที่ดีกว่าเท่านั้น แต่ยังแสดงให้เห็นการกระจายความเค้นที่เหนือกว่า ส่งผลให้มีความแข็งแรงโดยรวมและความต้านทานต่อแรงที่เข้มข้น ความสามารถในการกระจายแรงกดของเมทริกซ์ไบโอเรซินที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะระหว่างชั้นแกนและชั้นผิว ทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในการรักษาความสมบูรณ์ของโครงสร้างภายใต้แรงกดเมื่อเปรียบเทียบกับเมทริกซ์เรซินสังเคราะห์ ข้อมูลทั้งหมดนี้สรุปไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความเค้นดัดงอและความเครียดดัดงอในแต่ละชั้นแกน

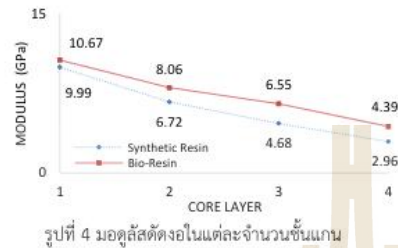
รวมไปถึงค่าของความเครียดที่พบว่า มีระยะที่ใกล้เคียงกันมาก จากคอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์ทั้งแบบสังเคราะห์และแบบเกรดชีวภาพ ซึ่งบ่งบอกว่าความยืดหยุ่นของชั้นงานทดสอบตัวอย่างนี้ อยู่ในระดับที่สามารถนำไปทดแทนกันได้ อีกทั้งยังเป็นแนวทางที่ดี ของการเป็นตัวเลือกใหม่สำหรับการพัฒนาคอมโพสิตให้เป็มีตรงต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น

3.3 การวิเคราะห์ค่ามอดูลัส

โมดูลัสการดัดงอที่ประเมินในโครงสร้างคอมโพสิตแบบแซนวิชที่ผ่านการทดสอบการดัดงอ แสดงให้เห็นว่าชั้นงานที่มีชั้นแกน 1 ชั้นและความหนาของแกน 2.5 มม. ให้โมดูลัสการดัดงอสูงสุดสำหรับชั้นงานที่ทำด้วยเมทริกซ์ไบโอเรซิน โดยมีค่าถึง 10.67 GPa ในขณะที่ชั้นงานที่มีชั้นแกน 1 ชั้นและความหนาของแกน 2.5 มม. ให้โมดูลัสการดัดงอสูงสุดสำหรับชั้นงานที่ทำด้วยเมทริกซ์เรซินสังเคราะห์ โดยมีค่า 9.99 GPa เมื่อเปรียบเทียบเมทริกซ์ทั้งสองประเภทในรูปที่ 4 เมทริกซ์ไบโอเรซินแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมที่ดีกว่า ส่งผลให้โมดูลัสการดัดงอสูงกว่าเมทริกซ์เรซินสังเคราะห์

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 39  
วันที่ 15 - 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2568 จังหวัดขอนแก่น

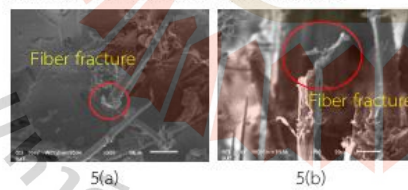
AMM0027



### 3.4 การเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของเรซินไบโออีพอกซีและเรซินอีพอกซีสังเคราะห์

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโครงสร้างแบบแซนวิชโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) เพื่อตรวจสอบพื้นที่ที่เสียหายระหว่างการทดสอบและประเมินความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยแฟล็กซ์และเมทริกซ์ทั้งสองประเภท การวิเคราะห์เผยให้เห็นว่าเส้นใยแฟล็กซ์ที่สร้างขึ้นด้วยเมทริกซ์ไบโอเรซินแสดงความเสียหายที่มีลักษณะเฉพาะคือเส้นใยดึงออกจากเมทริกซ์ การแตกหักนั้นมีหน้าตัดที่เรียบเนียน แสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะที่แข็งแรงระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ ซึ่งช่วยให้เส้นใยแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ดังที่แสดงในรูปที่ 5(a)

ในทางตรงกันข้าม เส้นใยแฟล็กซ์ที่สร้างขึ้นด้วยเมทริกซ์เรซินสังเคราะห์ ดังที่แสดงในรูปที่ 5(b) แสดงให้เห็นความเสียหายที่เส้นใยฉีกขาดและแตกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย การแตกหักแสดงให้เห็นขอบที่หยาบคล้ายกับการฉีกขาดและแยกออกจากเมทริกซ์ ซึ่งบ่งบอกถึงการยึดเกาะที่อ่อนแอ



รูปที่ 5 ภาพ SEM แสดงการแตกหักของเส้นใยเสริมแรง

### 4 สรุปผล

การศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพเชิงกลและความยั่งยืนของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมด้วยเรซินไบโออีพอกซีและแกนที่ทำจาก PET รีไซเคิล ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการ

เพิ่มจำนวนชั้นแกนโฝมจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงโครงสร้างและความยืดหยุ่นของคอมโพสิต โดยโครงสร้างแกนที่มี 4 ชั้นจะแสดงประสิทธิภาพเชิงกลสูงสุด นอกจากนี้ คอมโพสิตที่ใช้เมทริกซ์ไบโอเรซินยังมีประสิทธิภาพเหนือกว่าเมทริกซ์เรซินสังเคราะห์ในการทดสอบการตัดตง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของคอมโพสิตนี้ในฐานะทางเลือกที่ยั่งยืน

การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เผยให้เห็นการยึดเกาะที่แข็งแกร่งระหว่างเมทริกซ์เรซินและแกน โดยมีลักษณะการแยกชิ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งบ่งชี้ถึงการยึดเกาะและการรวมตัวของวัสดุที่มีประสิทธิภาพ คอมโพสิตไบโอเรซินแสดงให้เห็นถึงการแตกหักของเส้นใยที่เรียบเนียนกว่า ซึ่งบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ที่เพิ่มขึ้นระหว่างเรซินและเส้นใยธรรมชาติ ในขณะที่คอมโพสิตเรซินสังเคราะห์แสดงให้เห็นถึงการแตกตัวของเส้นใย ซึ่งบ่งชี้ถึงการยึดเกาะที่อ่อนแอกว่า

โดยรวมแล้ว การศึกษานี้สนับสนุนความเป็นไปได้ของคอมโพสิตที่ใช้ไบโอเรซินเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนและประสิทธิภาพสูงแทนคอมโพสิตที่ใช้ปิโตรเลียมแบบดั้งเดิม การนำวัสดุหมุนเวียน เช่น เส้นใยลินินและแกน PET รีไซเคิลมาใช้ ทำให้คอมโพสิตเหล่านี้ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่ยังคงคุณสมบัติเชิงกลที่ต้องการไว้ได้ การศึกษานี้สอดคล้องกับความพยายามระดับโลกในการพัฒนาวัสดุที่ยั่งยืน ส่งเสริมหลักการเศรษฐกิจหมุนเวียน และลดการพึ่งพาทรัพยากรที่ไม่หมุนเวียน และสำหรับแนวทางการวิจัยในอนาคตควรสำรวจการเพิ่มประสิทธิภาพเพิ่มเติมของประเภทของไบโอเรซินอื่นๆ และความทนทานในระยะยาวของคอมโพสิตเหล่านี้ในการใช้งานจริง

### 5 เอกสารอ้างอิง

- [1] Boransan, W., Kerdphol, T., Phunpeng, V.: Experimental Manufacturing Methods of Glass Fiber Composites Considering Flexural Behaviour. Spektrum Industri, 19, 87 (2021).
- [2] Phunpeng, V., Boransan, W., Kerdphol, T.: Applying Glass Fiber-Reinforced Composites with Microsphere Particles to UAV Components. SpringerLink, 1, 145–150 (2023).

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 39  
วันที่ 15 - 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2568 จังหวัดขอนแก่น

AMM0027



- [3] He, Q., Zhang, H., Li, J., Duan, H.: Performance evaluation of polyurethane/epoxy resin modified asphalt as adhesive layer material for steel-UHPC composite bridge deck pavements. *Construction and Building Materials*, 291, 1–12 (2021).
- [4] Back, J. H. et al.: Resistance to cleavage of core-shell rubber/epoxy composite foam adhesive under impact wedge-peel condition for automobile structural adhesive. *Poly-mers*, 11, 1–11 (2019).
- [5] Back, J. H. et al.: Morphological study and mechanical property of epoxy-foam adhesives based on epoxy composites for automotive applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 87, 124–129 (2018).
- [6] Koronis, G., Silva, A., Ong, M.: Comparison of Structural Performance and Environmental Impact of Epoxy Composites Modified by Glass and Flax Fabrics. *Journal of Composites Science*, 6, 1–16 (2022).
- [7] Maiti, S. et al.: Sustainable Fiber-Reinforced Composites: A Review. *Advanced Sustainable Systems*, 6, 1–33 (2022).
- [8] Thyavihalli Girijappa, Y. G. et al.: Natural Fibers as Sustainable and Renewable Resource for Development of Eco-Friendly Composites: A Comprehensive Review. *Frontiers in Materials*, 6, 1–14 (2019).
- [9] Faheed, N. K.: Advantages of natural fiber composites for biomedical applications: a review of recent advances. *Emergent Materials*, 7, 63–75 (2024).
- [10] Rad, E. R., Vahabi, H., de Anda, A. R., Saeb, M. R., Thomas, S.: Bio-epoxy resins with inherent flame retardancy. *Progress in Organic Coatings*, 135, 608–612 (2019).
- [11] Elyse, A. B., Santosh, K. Y., Giuseppe R. P., Joseph F. S.: Recent advances in bio-based epoxy resins and bio-based epoxy curing agents. *Journal of Applied Polymer Science*, 133, 1–19 (2016).
- [12] Yorseng, K., Rangappa, S. M., Pulikkalparambil, H., Siengchin, S., Parameswaranpillai, J. Accelerated weathering studies of kenaf/sisal fiber fabric reinforced fully biobased hybrid bioepoxy composites for semi-structural applications: Morphology, thermo-mechanical, water absorption behavior and surface hydrophobicity. *Construction and Building Materials*, 235, 1–14 (2020).
- [13] Moudood, A. et al.: Environmental effects on the durability and the mechanical performance of flax fiber/bio-epoxy composites. *Composites Part B*, 171, 284–293 (2019).
- [14] Phunpeng, V., Boransan, W., Horphibulsuk, S.: Comprehensive analysis of in-plane tensile characteristics of hybrid composite using finite element method. *Journal of Engineering Research*, (2024).
- [15] Sun, Z., Shi, S., Guo, X., Hu, X., Chen, H.: On compressive properties of composite sandwich structures with grid reinforced honeycomb core. *Composites Part B*, 94, 245–252 (2016).
- [16] Khan, T. et al.: A review on recent advances in sandwich structures based on polyurethane foam cores. *Polymer Composites*, 41, 2355–2400 (2020).
- [17] Gürgen, S.: An investigation on composite laminates including shear thickening fluid under stab condition. *Journal of Composite Materials*, 53, 1111–1122 (2019).

## ประวัติผู้เขียน

นายภุชงค์ คชราช เกิดเมื่อวันที่ 21 สิงหาคม พ.ศ.2543 จบการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนร้อยเอ็ดวิทยาลัย อ.เมืองร้อยเอ็ด จ.ร้อยเอ็ด และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตในหลักสูตรวิศวกรรมอากาศยาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา พ.ศ. 2565 เกียรตินิยมอันดับสอง จากนั้นในปีการศึกษา พ.ศ.2566 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาทุนผู้มีผลการเรียนดีเด่น จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นระยะเวลา 2 ปี ในระหว่างการศึกษานี้ได้รับมอบหมายให้เป็นผู้ช่วยสอน เช่น การเขียนแบบวิศวกรรม ทักษะพื้นฐานวิศวกรรมเครื่องกล การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยวิธีคลื่นเสียงความถี่สูง ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1 และ 2 เซรามิกส์และวัสดุคอมโพสิต เป็นต้น

ทั้งนี้ผู้วิจัยได้สะสมความรู้จากประสบการณ์การทำงานในห้องปฏิบัติการวัสดุคอมโพสิต การสอนและการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษามาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย และมีโอกาสได้ทำวิจัยในด้านวัสดุคอมโพสิตจนได้รับการเผยแพร่ผลงาน ในงานประชุมวิชาการระดับชาติ 2 ฉบับ และ ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 2 ฉบับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี