

การวิเคราะห์พฤติกรรมแรงดึงในแนวระนาบของวัสดุไฮบริดคอมโพสิตด้วย
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



นางสาววิภาดา โบราณสาร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF IN-PLANE TENSILE
CHARACTERISTICS OF HYBRID COMPOSITE USING FINITE ELEMENT
METHOD



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การวิเคราะห์พฤติกรรมแรงดึงในแนวระนาบของวัสดุไฮบริดคอมโพสิตด้วย
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



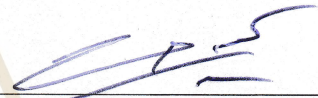
(อ. ดร.รชชาติ เกิดผล)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.วีณา พันเพ็ง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.ชโยธร ธรรมแท้)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ณัฐดนัย พรรณเจริญวงษ์)

กรรมการ

(อ. ดร.วัชรพงษ์ ปะดั่งทะเล)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วิภาดา โบราณสาร : การวิเคราะห์พฤติกรรมแรงดึงในแนวระนาบของวัสดุไฮบริด
คอมโพสิตด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (COMPREHENSIVE ANALYSIS OF IN-PLANE
TENSILE CHARACTERISTICS OF HYBRID COMPOSITE USING FINITE ELEMENT
METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิณา พันเพ็ง , 91 หน้า.

คำสำคัญ : ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์/วัสดุคอมโพสิต/แรงดึง

ในช่วงไม่กี่ปีมานี้ อุตสาหกรรมมีความต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ความหนาแน่นต่ำ และราคาถูก โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยานที่มีการแข่งขันในตลาดสูง ผู้ประกอบการจึงมองหาหนทางที่จะช่วยลดต้นทุนและค่าใช้จ่าย โดยมุ่งไปที่การพัฒนาวัสดุให้คุณสมบัติที่ดีขึ้นตรงตามความต้องการ วัสดุประเภทพลาสติกถือเป็นหนึ่งในวัสดุทางเลือกที่วิศวกรนำมาใช้ในการผลิตโดยเน้นไปที่วัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite Materials) แต่อย่างไรก็ตาม การสร้างและทดสอบวัสดุคอมโพสิตเพื่อให้ทราบคุณสมบัตินั้นมีปัจจัยต่าง ๆ มากมายที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิต ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering) มาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์วัสดุคอมโพสิตด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการผลิตวัสดุไฮบริดคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยธรรมชาติเพื่อศึกษาคุณสมบัติการรับแรงดึง ในการศึกษาพบว่าการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต การปรับเปลี่ยนเส้นใยเสริมแรง การปรับเปลี่ยนการจัดวางและความแตกต่างของทิศทางการวางเส้นใยล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตทั้งสิ้น ในการศึกษาการปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดวางของวัสดุคอมโพสิตแสดงให้เห็นถึงรูปแบบการจัดวาง $[C/F/C]_{25}-[0/90/0]_{25}$ มีค่าความเครียดที่รับได้สูงสุดคือ 3319.50 MPa ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตรับแรงดึงได้ดีกว่ารูปแบบอื่น ๆ การสร้างแบบจำลองคอมโพสิตด้วยโปรแกรม Ansys สามารถทำให้ทราบ Elastic Properties ของวัสดุคอมโพสิตโดยพบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณทางทฤษฎี และในการผลิตวัสดุคอมโพสิตเพื่อทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของวัสดุควบลู่ไปกับการวิเคราะห์ด้วย FEM นั้นมีแนวโน้มของค่าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา วิภาดา โบราณสาร

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา วิณา พันเพ็ง

WIPADA BORANSAN : COMPREHENSIVE ANALYSIS OF IN-PLANE TENSILE CHARACTERISTICS OF HYBRID COMPOSITE USING FINITE ELEMENT METHOD
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. VEENA PHUNPENG, D.Eng., 91 PP.

Keyword: Finite Element Method /Composite material/Tensile

In recent years, the industry has demanded high-strength material, low-density, and low cost, especially in the highly competitive automotive and aerospace industries. Entrepreneurs are looking for ways to reduce costs and expenses. which aims to develop the material to have better properties that meet the requirements. Plastics are one of the alternative materials engineers use in manufacturing with a focus on composite materials. Manufacturing and testing composites to know their properties, there are many different factors that affect the properties of composites. Therefore, at present there is the application of Computer Aided Engineering is used in the design and analysis of composite materials using the Finite Element Method (FEM). The purpose of this study is to determine the tensile properties of carbon and natural fiber reinforced hybrid composites. The study discovered that manufacturing process, type of fiber reinforcement, Stacking Sequence, and ply orientation significantly influence the properties of composite materials. In a study of modified stacking sequences of composite materials, a $[C/F/C]_{2s}-[0/90/0]_{2s}$ stacking sequence was demonstrated. The maximum tensile strength of composites was 3319.50 MPa, resulting in higher tensile strength than other stacking sequences. The elastic properties of composites were examined utilizing Ansys composite modeling, which discovered that the obtained values are close to the theoretical calculation results. And in the manufacture of composite materials to test the tensile properties of the material coupled with the FEM analysis, there is a trend towards the same values.

School of Mechanical Engineering
Academic year 2022

Student's Signature Wipada Boransan
Advisor's Signature Asst. Prof. Veena Phunpeng

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จด้วยดีอันเนื่องมาจากการสนับสนุนและให้ความช่วยเหลือ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิณา ฟันเพ็ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ให้แนวทาง ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และให้วิธีการแก้ปัญหาด้วยความเมตตากรุณาอย่างดียิ่ง ตลอดจนความช่วยเหลือในการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธงชาติ เกิดผล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชโลธร ธรรมแท้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐดนัย พรรณเจริญวงศ์ และอาจารย์ ดร.วัชรพงษ์ ปะตังทะโล ที่ตรวจทานและให้คำแนะนำในการแก้ไขเพื่อให้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการจัดเตรียมเอกสารสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดู อบรม ให้คำแนะนำ และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาตลอด และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิภาดา โบราณสาร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	4
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 วัสดุคอมโพสิต	6
2.1.1 เมทริกซ์ (Matrix).....	6
2.1.2 ตัวเสริมแรง (Reinforcement).....	7
2.1.3 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต	7
2.2 การผลิตวัสดุคอมโพสิต	8
2.2.1 กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือ (Hand lay-up).....	9
2.2.2 กระบวนการแว็คคัมแบ็กกิ้ง (Vacuum bagging).....	9
2.3 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต	10
2.3.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)	10
2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	11
2.4.1 Ansys Material Designer (MD).....	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2	Ansys Composite PrepPost (ACP).....	13
2.4.3	Ansys static structural.....	14
3	วิธีดำเนินงานวิจัย	17
3.1	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	17
3.1.1	การศึกษาค้นคว้าและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
3.1.2	ผลิตวัสดุไฮบริดคอมโพสิต	18
3.1.2.1	ผลิตและสร้างแบบจำลองวัสดุไฮบริดคอมโพสิต	21
3.1.3	สร้างแบบจำลองวัสดุไฮบริดคอมโพสิต	23
3.1.3.1	การสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล Material designers.....	23
3.1.3.2	การสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล ACP	26
3.1.3.3	การสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล Static structure	28
4	ทฤษฎีการคำนวณคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต	29
4.1	การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตทางทฤษฎี.....	30
4.1.1	Rule of mixture	31
4.1.2	Chamis model.....	31
4.1.3	Halpin-Tsai	32
4.1.4	Nielsen model.....	33
4.2	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตทางทฤษฎี.....	34
4.2.1	Longitudinal modulus	34
4.2.2	Transvers modulus.....	36
4.2.3	Shear modulus.....	37
4.2.2	Poisson's ratio.....	39
4.3	สรุปผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตทางทฤษฎี	41
5	การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต.....	42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1	ระเบียบวิธีวิจัยการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต.....	44
5.1.1	วัสดุ.....	44
5.1.2	การเตรียมวัสดุคอมโพสิต.....	44
5.1.3	การทดสอบวัสดุคอมโพสิต.....	46
5.2	ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต.....	46
5.3	สรุปผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต.....	51
6	การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางทฤษฎีและไฟไนต์เอลิเมนต์.....	52
6.1	ระเบียบวิธีวิจัยการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางทฤษฎีและไฟไนต์เอลิเมนต์.....	53
6.1.1	การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตทางทฤษฎี.....	53
6.1.2	การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์.....	53
6.2	ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางทฤษฎีและไฟไนต์เอลิเมนต์.....	54
6.2.1	Longitudinal modulus.....	54
6.2.2	Transvers modulus.....	56
6.2.3	Shear modulus.....	57
6.2.4	Poisson's ratio.....	59
6.3	สรุปผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางทฤษฎีและไฟไนต์เอลิเมนต์.....	61
7	การวิเคราะห์แรงดึงของวัสดุคอมโพสิต.....	62
7.1	ระเบียบการวิจัยการวิเคราะห์แรงดึงของวัสดุคอมโพสิต.....	63
7.1.1	การผลิตวัสดุคอมโพสิต.....	63
7.1.2	การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Ansys Workbench.....	65
7.2	ผลการวิจัยการวิเคราะห์แรงดึงของวัสดุคอมโพสิต.....	66
7.1.2	การเปรียบเทียบผลการแบบจำลองด้วยโปรแกรม Ansys.....	66
8	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	72
8.1	สรุปผลการวิจัย.....	72
8.2	ข้อเสนอแนะ.....	73

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล MATERIAL DESIGNERS.....	82
ภาคผนวก ข. รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	89
ประวัติผู้เขียน.....	90



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	อุปกรณ์ที่ใช้ในผลิตวัสดุไฮบริดคอมโพสิต	18
2	คุณสมบัติของวัสดุ	30
3	ตัวอย่างชิ้นงานสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกล	45
4	คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิต	54
5	รูปแบบการศึกษาแรงดึง	64



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	รูปทรง RVE พร้อมบล็อกเมช.....	3
2.1	ลักษณะและการเรียงตัวของส่วนเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต.....	7
2.2	ประเภทของวัสดุคอมโพสิต.....	8
2.3	กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือ.....	9
2.4	กระบวนการเว็ดคัมแบ็กกิ้ง.....	9
2.5	ตัวอย่างการทดสอบ.....	11
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเครียด.....	11
2.7	ตัวอย่างการทดสอบภายใต้แรงกระทำที่กำหนด.....	12
2.8	ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม MD.....	12
2.9	ประเภทของ RVE.....	13
2.10	ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล ACP.....	14
2.11	ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล Ansys static structural.....	13
3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบขึ้นงาน.....	23
3.2	โมดูล Material Designer.....	23
3.3	การเลือกใช้ Orthotropic elasticity.....	24
3.4	คุณสมบัติของวัสดุ.....	24
3.5	การออกแบบวัสดุ.....	24
3.6	การออกแบบ RVE type.....	25
3.7	การตั้งค่าในการสร้างวัสดุคอมโพสิต.....	25
3.8	ตรวจสอบผลลัพธ์.....	25
3.9	การเชื่อม Material.....	26
3.10	ขึ้นงานคอมโพสิต.....	26
3.11	การสร้าง mesh.....	27
3.12	การออกแบบการจัดวางชั้นวัสดุคอมโพสิต.....	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13	ทิศทางของชั้นวัสดุคอมโพสิต28
3.14	การสร้างแบบจำลองในโมดูล Static structure28
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal modulus และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวชิ้นงาน35
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal modulus และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียวชิ้นงาน35
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง Transvers modulus และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวชิ้นงาน36
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง Transvers modulus และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียวชิ้นงาน37
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวชิ้นงาน38
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียวชิ้นงาน39
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่าง Poisson's ratio และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวชิ้นงาน44
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง Poisson's ratio และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียวชิ้นงาน44
5.1	ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาขณะอบชิ้นงาน.....44
5.2	ลามีเนตคอมโพสิต45
5.3	แซนด์วิชคอมโพสิต45
5.4	ชิ้นงานทดสอบแรงดัดงอแบบสามจุด46
5.5	ความสัมพันธ์ของ Flexural stress และ Flexural strain ของลามีเนตคอมโพสิต47
5.6	ความสัมพันธ์ของ Flexural stress และ Flexural strain ของแซนด์วิชคอมโพสิต47
5.7	ความสัมพันธ์ของ Deflection และ Load ของลามีเนตคอมโพสิต48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 ความสัมพันธ์ของ Deflection และ Load ของแกนดัดวัสดุคอมโพสิต	49
5.9 Flexural stress ของวัสดุคอมโพสิต	50
5.10 Deflection ของวัสดุคอมโพสิต.....	50
6.1 รูปทรง RVE	54
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal modulus และ Fiber volume fraction (เส้นใยคาร์บอน).....	55
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal modulus และ Fiber volume fraction (เส้นใยลินิน).....	56
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Transvers modulus และ Fiber volume fraction (เส้นใยคาร์บอน).....	57
6.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Transvers modulus และ Fiber volume fraction (เส้นใยลินิน).....	57
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus และ Fiber volume fraction (เส้นใยคาร์บอน).....	58
6.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus และ Fiber volume fraction (เส้นใยลินิน).....	58
6.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Poisson's ratio และ Fiber volume fraction (เส้นใยคาร์บอน).....	59
6.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Poisson's ratio และ Fiber volume fraction (เส้นใยลินิน).....	60
7.1 รูปแบบการจัดวางของวัสดุคอมโพสิต.....	63
7.2 อุดหนุนการอบวัสดุ	64
7.3 ความสัมพันธ์ Number of element และ Stress.....	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของวัสดุคอมโพสิตที่มี รูปแบบการจัดวาง [F/C/F] _{2S}	67
7.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของวัสดุคอมโพสิตที่มี รูปแบบการจัดวาง [C/F/C] _{2S}	69
7.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของวัสดุคอมโพสิตที่มี รูปแบบการจัดวาง [C/C/F] _{2S}	67



บทที่ 1

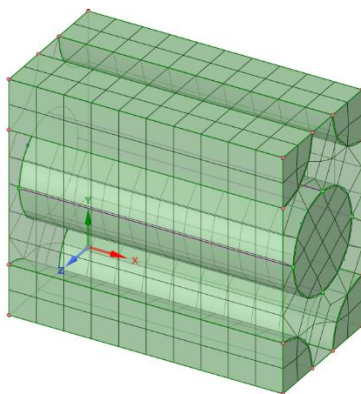
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

การวิจัยและพัฒนาวัสดุคอมโพสิตกำลังดำเนินไปในระดับที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับทศวรรษที่ผ่านมา ความต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบาในการผลิตโครงสร้างในอุตสาหกรรมด้านอากาศยานและยานยนต์ทำให้วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยถูกใช้เป็นตัวเลือกหลักในการผลิต วัสดุคอมโพสิตที่ผลิตจากเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตส่วนประกอบและโครงสร้างต่าง ๆ ของอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) โดยเฉพาะในพื้นที่ผิวดำ ตัว ปีก และใบพัด อากาศยานไร้คนขับถูกใช้ในงานที่หลากหลายไม่ว่าจะเป็นการถ่ายภาพหรือวิดีโอมุมสูง การสำรวจทางการเกษตรตลอดไปจนถึงในด้านทางการแพทย์ คอมโพสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ใช้ในการผลิตจึงจำเป็นต้องมีความแข็งแรงสูง ทนแรงกระแทกที่ยืดหยุ่น และคุณสมบัติของโมดูลัสจำเพาะที่ดี อย่างไรก็ตาม เส้นใยคาร์บอนที่นิยมใช้นั้นทนต่อความเสียหายได้ไม่ดีเมื่อถูกแรงกระทำ อีกทั้งยังมีราคาแพงอีกด้วย

การปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การปรับเปลี่ยนการจัดวางและความหนาของชั้น การปรับเปลี่ยนความแตกต่างของมุมระหว่างชั้น รวมไปถึงการผลิตไฮบริดคอมโพสิต (Awad et al., 2012), (Belgacem et al., 2018), (Satasinska et al., 2021) ไฮบริดคอมโพสิตโดยทั่วไปทำได้โดยการรวมเส้นใยสองประเภท (หรือมากกว่า) เข้าด้วยกันเพื่อเสริมความแข็งแรงและแข็งแกร่งของเมทริกซ์ มีคำจำกัดความหลายประการของไฮบริดคอมโพสิตที่กล่าวไว้ในนักวิจัยหลายคน Lica et al. ให้คำจำกัดความว่าไฮบริดคอมโพสิตเป็นวัสดุที่มีวัสดุเสริมแรงต่างชนิดกันถูกรวมอยู่ในส่วนผสมของเมทริกซ์ (Thwe & Liao, 2003) ในทางกลับกัน Fu et al. กล่าวว่าไฮบริดคอมโพสิตเป็นวัสดุที่มีเส้นใยเสริมแรงรวมกันสองประเภทหรือมากกว่าและมีสารเติมแต่งผสมอยู่ในเมทริกซ์ (Fu et al., 2002), (Abedom et al, 2021) งานวิจัยในปัจจุบันมีความสนใจที่จะนำเส้นใยจากธรรมชาติมาใช้ในการผลิตไฮบริดคอมโพสิตเพื่อทดแทนวัสดุหรือพอลิเมอร์ที่ใช้เส้นใยสังเคราะห์เนื่องด้วยมีต้นทุนต่ำ น้ำหนักเบา เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ และความสามารถในการรีไซเคิล อย่างไรก็ตาม เส้นใยธรรมชาติมีข้อเสียบางประการ เช่น สมบัติเชิงกลต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุคอมโพสิตที่ผลิตจากเส้นใยแก้วหรือเส้นใยคาร์บอน นอกจากนี้ การดูดซับน้ำของเส้นใยธรรมชาตินั้นสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์อย่างมาก (Hadi et al., 2021)

การผลิตและการทดสอบสมบัติทางกลของคอมโพสิตในอดีตนั้น จะสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก การผลิตคอมโพสิตซ้ำ ๆ เพื่อนำมาทดสอบนั้นยังมีปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อ เช่น คุณภาพของคอมโพสิต เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศในวัสดุ อุณหภูมิการบ่มที่ไม่สม่ำเสมอ และทักษะในการผลิต (Mahato et al., 2019), (Krzyzak et al., 2016) แต่ปัจจุบันได้มีการประยุกต์เทคโนโลยีการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Aided Engineering) เข้ามาช่วยในการออกแบบและการวิเคราะห์คอมโพสิต ซึ่งมีความสะดวก รวดเร็ว และประหยัดต้นทุนได้มากกว่า โดยการสร้างแบบจำลองคอมโพสิตด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างแบบผสมได้จนถึงระดับจุลภาค ซึ่งเป็นการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันช่วยหลีกเลี่ยงข้อเสียของการแบกรับค่าใช้จ่ายจากการทดลอง Dixit et al. รายงานถึงการวิเคราะห์แบบจำลองหน่วยเซลล์ (unit cell) ของวัสดุคอมโพสิต เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของคอมโพสิตสำหรับการวิเคราะห์แบบหลายสเกล (Multiscale Analysis) พบว่าข้อมูลจากการวิเคราะห์หน่วยเซลล์จะสูงกว่าข้อมูลการทดลองจริง เนื่องจากการบิดเบี้ยวของเนื้อผ้าระหว่างการผลิตและการสูญเสียคุณสมบัติระหว่างกระบวนการทอ (Dixit et al., 2013) แนวทางที่ถูกต้องแม่นยำคือการวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ซึ่งเป็นแนวทางที่ใช้ในการออกแบบวัสดุในโปรแกรม Ansys Material Designer (MD) ที่ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยการสร้างโมเดลวัตถุปริมาตรตัวแทน (Representative volume element: RVE) กำหนดองค์ประกอบปริมาตรที่เล็กที่สุดของวัสดุด้วยการแสดงทางสถิติที่แม่นยำของคุณสมบัติวัสดุทั่วไปที่ใช้ในแบบจำลองระดับจุลภาค (S.H. Chen, X.M. Feng, 2008), (Shi et al., 2012) มีการรายงานถึงประสิทธิภาพการเชื่อมสภาพของคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเมื่อได้รับแรงกระทำ โดยการสร้างโมเดล RVE เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ความเสียหายที่จำเป็นในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกล โมเดล RVE สามารถทำนายผลผลกระทบการแยกตัวของเมทริกซ์และการแตกตัวของเมทริกซ์ต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต เช่น Transvers modulus, Poisson's ratio และ Shear modulus (Naghdasab et al., 2018) จากการทบทวนวรรณกรรมยังไม่มีกรายงานถึงการศึกษาพฤติกรรมแรงดึงโดยใช้ไฮบริดคอมโพสิตจากเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยธรรมชาติแบบทอธรรมดาที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน UAV พร้อมทั้งการตรวจสอบเชิงตัวเลขในระดับไมโครสเกลด้วยการทำให้เป็นเส้นใยและเมทริกซ์เป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 1.1 รูปทรง RVE พร้อมบล็อกเมช

Uzay et al. ทำการศึกษาพฤติกรรมการแรงดึงและแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตเมื่อวัสดุคอมโพสิตถูกบ่มด้วยความร้อน วัสดุคอมโพสิตถูกขึ้นรูปด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว ทำการขึ้นรูปแตกต่างกัน 3 แบบ คือ 1. เส้นใยคาร์บอน 2.เส้นใยแก้ว และ 3. เส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้ว หรือวัสดุไฮบริดคอมโพสิต ตามลำดับ วิธีแบริคคุมแบ็กกิ้ง (Vacuum Bagging) ถูกนำมาใช้ในการผลิตลามิเนตคอมโพสิต หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการบ่มที่อุณหภูมิ 25, 62.5 และ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปีและการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานลามิเนตคอมโพสิต หลังการบ่มได้รับการตรวจสอบโดยการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปีและการทดสอบแรงดึงตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าหลังการบ่มมีผลดีต่อความสามารถในการดูดซับพลังงานและคุณสมบัติการรับแรงดึงของลามิเนตคอมโพสิต (Uzay et al., 2017)

Panneerdhassa et al. ศึกษาเกี่ยวกับแรงดึง แรงกดอัด แรงดัดโค้ง และพลังงานการกระแทกในวัสดุพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยบวบและถั่วลิสงแบบผสมอีพ็อกซี โดยที่การเสริมแรงด้วยเส้นใยบวบและถั่วลิสงนั้นจะใช้วิธีการยึดเกาะเนื้อพื้นด้วยอีพ็อกซีเรซิน ซึ่งวิธีการนี้ได้รับการพัฒนากระบวนการทำโดยใช้วิธีการวางด้วยมือ ซึ่งเป็นวิธีการที่คงรักษาสภาพของเส้นใยบวบและถั่วลิสง โดยอัตราการแตกหักของเส้นใยจะอยู่ที่ปริมาตร 10% 20% 30% 40% และ 50% ต่ออัตราส่วนน้ำหนักเส้นใย (Panneerdhassa et al., 2014)

Boopalan et al. ได้ทำการศึกษากการตรวจสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของปอกระเจาดิบและเส้นใยกล้วยเสริมวัสดุผสมอีพ็อกซีเรซินแบบวัสดุไฮบริดคอมโพสิต เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล ปอกระเจาและเส้นใยกล้วยถูกนำมาขึ้นรูปในสัดส่วนน้ำหนักที่แตกต่างกัน 5 แบบ คือ 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 ตามลำดับ ไฮบริดคอมโพสิตถูกขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคการวางด้วยมือ จากนั้นนำวัสดุไฮบริดคอมโพสิตที่ได้ไปทดสอบแรงดึง แรงดัด แรง

กระแทก ทดสอบทางความร้อนและการดูดซึมน้ำ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงเส้นใยกล้วยในปอกระเจาและอีพ็อกซีที่สัดส่วน 50% ช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางความร้อน แล้วยังช่วยลดความชื้นจากสมบัติการดูดซึมน้ำของตัวมันเองด้วย (Boopalan et al., 2013)

Saiaf Bin Rayhan et al. ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุด้วยวิธีการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยการคำนวณ Ansys Material Designer ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินคุณสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตแบบทิศทางเดียว และเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ในรูปแบบการจำลองและการทดสอบจริง ผลลัพธ์ทำให้สามารถกล่าวได้ว่า Ansys Material Designer เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตแบบทิศทางเดียว เนื่องจากเป็นวิธีการที่ค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด (Rayhan & Rahman, 2020)

จากเหตุผลที่กล่าวมา งานวิจัยนี้ทำการตรวจสอบวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยธรรมชาติเพื่อทำความเข้าใจผลกระทบของตำแหน่งและลำดับการวางของชั้นเส้นใยสานต่อคุณสมบัติการรับแรงดึง ตัวอย่างคอมโพสิตสำหรับการศึกษานี้จะถูกผลิตด้วยวิธีเรซิ่นแค้มแบ็กกิ้ง โดยการจัดเรียงชั้นของเส้นใยธรรมชาติจะแตกต่างกันไปในสองด้านคือลำดับการวางเส้นใย และมุมระหว่างชั้น คุณสมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิตจะถูกทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal testing machine (UTM) และตรวจสอบโดยใช้โปรแกรม Ansys workbench

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลด้านการรับแรงดึงในแนวระนาบของวัสดุไฮบริดคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยลินิน (Flax fiber) และอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin)
2. เพื่อจำลองการทดสอบเชิงกลด้านการรับแรงดึงในแนวระนาบของวัสดุไฮบริดคอมโพสิตด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Ansys workbench
3. เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลด้านการรับแรงดึงในแนวระนาบของวัสดุไฮบริดคอมโพสิตการจำลองผ่านโปรแกรม Ansys workbench และจากการทดสอบจริง
4. เพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของวัสดุไฮบริดคอมโพสิตให้ดีขึ้นโดยการปรับเปลี่ยนการวางและการปรับเปลี่ยนความแตกต่างของมุมระหว่างชั้น

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. วัสดุไฮบริดคอมโพสิตถูกผลิตด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวน้ำหนัก 200 g
2. วัสดุไฮบริดคอมโพสิตถูกผลิตด้วยเส้นใยลินินแบบทิศทางเดียวน้ำหนัก 200 g

3. กำหนดมุมหรือทิศทางระหว่างชั้นของเส้นใยสานแตกต่างกัน 6 ประเภท คือ $[90^\circ/0^\circ/0^\circ]_2$, $[0^\circ/45^\circ/0^\circ]_2$, $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]_2$, $[0^\circ/45^\circ/90^\circ]_2$, $[0^\circ/90^\circ/90^\circ]_2$ และ $[90^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$
4. รูปแบบการจัดวางทำแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ $[C/F/C/C/F/C]$ $[F/C/F/F/C/F]$ และ $[C/C/F/FC/C]$ โดยที่ C คือเส้นใยคาร์บอนและ F คือเส้นใยลินิน
5. วัสดุไฮบริดคอมโพสิตจะถูกขึ้นรูปด้วยวิธีแวก์คัมแบ็กกิ้ง
6. คุณสมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิตจะถูกทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM 3039
7. จำลองการทดสอบเชิงกลด้านการรับแรงดึงในแนวระนาบของวัสดุไฮบริดคอมโพสิตด้วยโปรแกรม ANSYS workbench

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วัสดุไฮบริดจากเส้นใยคาร์บอนและลินิน
2. สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิตด้วยโปรแกรม Ansys workbench เป็นการลดค่าใช้จ่าย และเวลาในการทดสอบ
3. เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป จะได้ประโยชน์จากองค์ความรู้ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งสามารถสร้างงานวิจัยพัฒนาบัณฑิต และบุคลากรให้มีความรู้ความสามารถในการวิจัยเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิต
4. นอกจากนี้องค์ความรู้ที่ได้สามารถนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ โดยใช้วัสดุและสารตั้งต้นราคาถูกลงที่มีในประเทศในอุตสาหกรรมพลาสติก และวัสดุจากธรรมชาติ

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่รู้จักกันดีในการใช้งานขั้นสูงเป็นเวลาหลายปี เป็นวัสดุอเนกประสงค์และง่ายต่อการขึ้นรูป อย่างไรก็ตาม มีบางแง่มุมในด้านของพอลิเมอร์ที่ต้องพิจารณาให้ดี เนื่องจากพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวมีความแข็งแรงต่ำและไม่สามารถตอบสนองความต้องการในการใช้งานได้ ดังนั้น วัสดุคอมโพสิตจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงคุณสมบัติ และการผลิตขึ้นรูปง่าย ในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคอมโพสิต

2.1 วัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตหมายถึง การนำวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดที่มีพื้นฐานสมบัติเชิงฟิสิกส์และเคมีแตกต่างกันมาผสมกันทำให้เกิดวัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติดีขึ้น โดยยังคงสามารถแยกประเภทของวัสดุในเนื้อวัสดุคอมโพสิตได้อย่างชัดเจน ซึ่งวัสดุคอมโพสิตจะประกอบด้วย 2 เฟสหลักคือ ตัวเสริมแรง (Reinforcement) และเมทริกซ์ (Matrix)

2.1.1 เมทริกซ์ (Matrix)

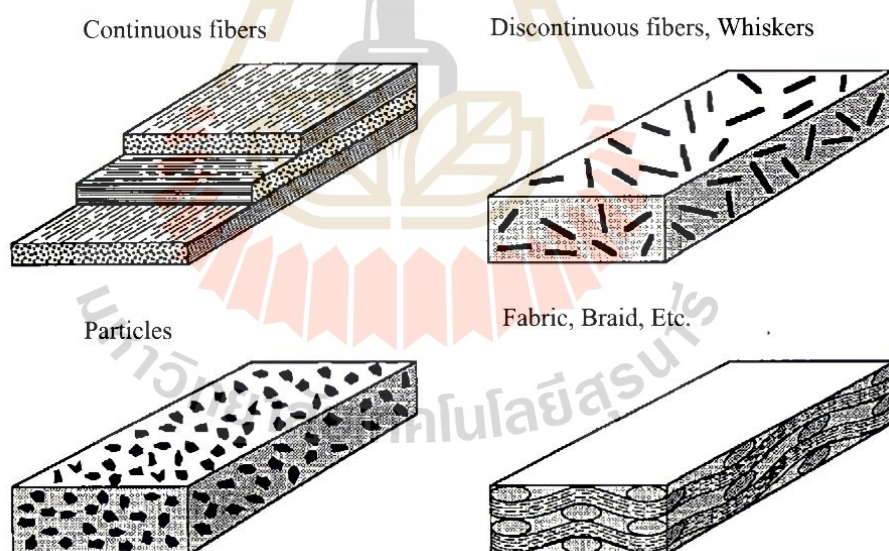
เมทริกซ์ช่วยในการยึดวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกัน เพื่อไม่ให้วัสดุเสริมแรงเคลื่อนที่ และมีการจัดเรียงตัวตามการจัดวาง บทบาทของเมทริกซ์ในคอมโพสิตคือช่วยในการรักษารูปร่างและขนาด รักษาการกระจายตัวของวัสดุเสริมแรงทำให้วัสดุทนต่อการเสียดสีภายใต้อุณหภูมิสูงหรือเมื่อมีแรงกระทำ และยังมิบทบาทเล็กน้อยในด้านความสามารถในการรับแรงดึงของโครงสร้างคอมโพสิต ในปัจจุบันเมทริกซ์ที่นิยมใช้ส่วนมากได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิกเป็นต้น สำหรับพอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นเมทริกซ์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซต (Thermoset)

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เป็นพลาสติกเมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวลง ทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่างและจะแข็งตัวเมื่อได้รับความเย็น เมื่อได้รับความร้อนสามารถหลอมละลายใหม่ได้โดยที่คุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นโมเลกุลสายโซ่ตรงยาว มีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่โมเลกุลน้อย ตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีน

เทอร์โมเซต (Thermoset) เป็นพลาสติกเมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวลงและคงรูปเมื่อได้รับความเย็น เมื่อได้รับความร้อนไม่สามารถหลอมละลายใหม่ได้ เนื่องจากมีโครงสร้างมักเป็นโมเลกุลที่เชื่อมโยงกันเป็นร่างแหจับกันแน่น มีการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลแข็งแรงมาก ตัวอย่างเทอร์โมเซตที่นิยมใช้งาน เช่น อีพ็อกซีเรซิน และพอลิยูรีเทน

2.1.2 ตัวเสริมแรง (Reinforcement)

เป็นส่วนที่ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มสูงขึ้น ทำหน้าที่ในการรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิตที่ส่งผ่านมาจากเมทริกซ์ โดยส่วนใหญ่วัสดุเสริมแรงมีความแข็งสูงกว่าเมทริกซ์ แต่อาจมีข้อยกเว้น เช่น กรณีใช้โลหะอ่อนเป็นวัสดุเสริมแรงในเมทริกซ์เซรามิก และการใช้ยางเสริมแรงเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่เปราะ ซึ่งกรณียกเว้นดังกล่าวมีเงื่อนไขที่วัสดุเสริมแรงต้องมีขนาดน้อยหนึ่งด้านน้อยกว่า 500 ไมครอน (ทวิชัย, 2559) เพื่อให้ได้วัสดุคอมโพสิตประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ลักษณะและรูปร่างของวัสดุเสริมแรงยังเป็นปัจจัยสำคัญต่อการกำหนดประสิทธิภาพการเสริมแรงหรือกล่าวได้ว่า สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตนั้นขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดวัสดุเสริมแรง ลักษณะและรูปร่างของวัสดุเสริมแรงมีหลายแบบ เช่น เส้นใย อนุภาคขนาดเล็ก แผ่น และผืนผ้า เป็นต้น ดังรูปตัวอย่างที่ 2.1

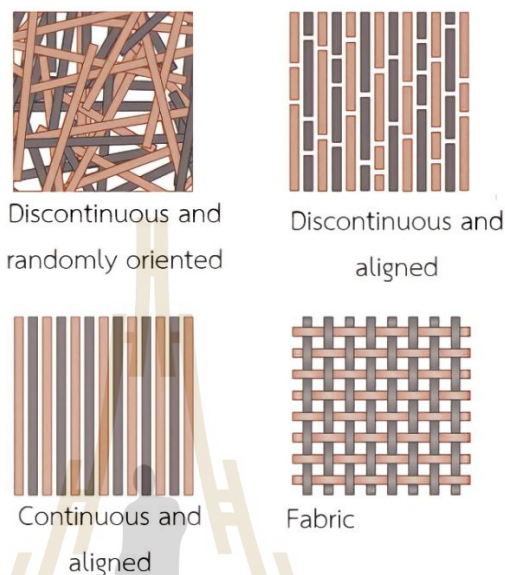


รูปที่ 2.1 ลักษณะและการเรียงตัวของส่วนเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต

2.1.3 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต

การจำแนกประเภทของวัสดุคอมโพสิตขึ้นอยู่กับลักษณะและการจัดเรียงตัวของตัวเสริมแรง โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น (Discontinuous or short fiber system) ซึ่งประกอบไปด้วยการจัดเรียงเส้นใยแบบทิศทางเดียว

(Unidirectional) และการจัดเรียงแบบสุ่ม (Random) และวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยยาว (or long fiber system) ซึ่งประกอบไปด้วยการจัดเรียงเส้นใยแบบทิศทางเดียว (Unidirectional) และผ้าสาน (Fabric) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต

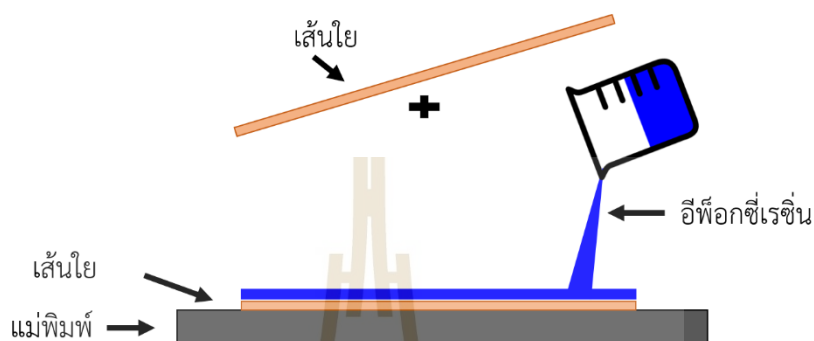
มีหลากหลายวิธีในการผลิตวัสดุคอมโพสิต วิธีการบางอย่างช่วยให้สามารถผลิตได้เป็นจำนวนมากในระยะเวลาอันสั้น ในขณะที่บางวิธีใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ วิศวกรต้องตัดสินใจอย่างชาญฉลาดในการพิจารณาว่ากระบวนการผลิตวัสดุคอมโพสิตใดจะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด วิธีการผลิตขั้นพื้นฐานที่สุดสำหรับวัสดุคอมโพสิตคือการขึ้นรูปด้วยมือ (Hand lay-up) ซึ่งโดยทั่วไปจะประกอบด้วย การวางชั้นของเส้นใยด้วยมือบนโมลด์หรือแม่พิมพ์ และแต่ละชั้นของเส้นใยจะถูกเคลือบด้วยอีพ็อกซีเรซิน แต่ผู้ผลิตส่วนใหญ่ในปัจจุบันใช้วิธีเรี๊ควิคัมแบ็กกิ้งที่จะใส่แรงดันช่วยในการกดอัดวัสดุคอมโพสิตเพื่อไล่อากาศออกจากชิ้นงาน

2.2 การผลิตวัสดุคอมโพสิต

การผลิตวัสดุคอมโพสิตสามารถทำได้หลากหลายกระบวนการ แต่ละกระบวนการล้วนแล้วแต่เป็นการพัฒนาเพื่อตอบสนองความต้องการในการออกแบบและผลิตชิ้นส่วนให้ได้รูปร่างและคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยกระบวนการที่จะกล่าวในบทนี้จะ เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในภาคการศึกษาและการทำวิจัย

2.2.1 กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือ (Hand lay-up)

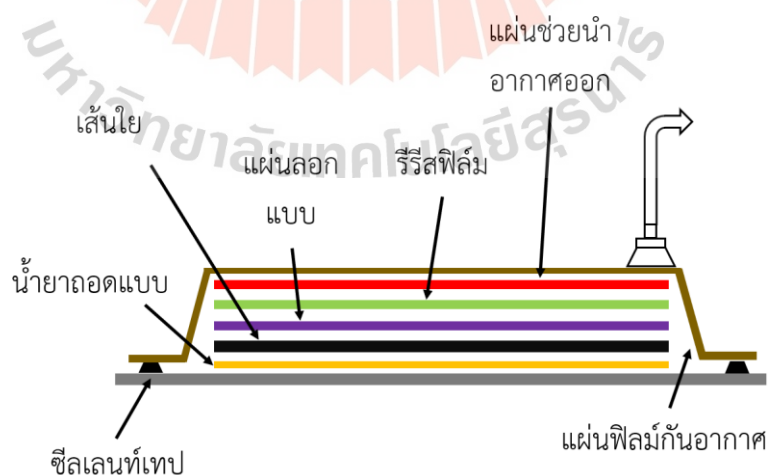
สามารถทำได้ง่ายแต่ค่อนข้างช้า อีกทั้งยังใช้แรงงานในการผลิตมาก ด้วยการทาสารช่วยในการถอดแบบลงบนแม่พิมพ์เพื่อป้องกันการติดกันระหว่างผิวหน้าของแม่พิมพ์และอีพ็อกซีเรซิน จากนั้นวางเส้นใยลงบนแม่พิมพ์และทาทับด้วยอีพ็อกซีเรซิน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือ

2.2.2 กระบวนการแว็คคัมแบ็กกิ้ง (Vacuum bagging)

เป็นกระบวนการที่ทำถัดจากการขึ้นรูปด้วยมือ โดยหลังจากวางเส้นใยลงบนแม่พิมพ์ และทาทับด้วยอีพ็อกซีเรซิน จะใช้การดูดสุญญากาศเพื่อทำให้เส้นใยและอีพ็อกซีเรซินแนบกันสนิท วิธีนี้จะช่วยแก้ปัญหาเรื่องโพรงอากาศหรือช่องว่างในชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการแว็คคัมแบ็กกิ้ง

ในการศึกษานี้จะใช้กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือควบคู่ไปกับกระบวนการแว็คคัมแบ็กกิ้งเพื่อให้วัสดุคอมโพสิตมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่สามารถควบคุมอัตราส่วนการผสมของเส้นใยและเมทริกซ์ได้ ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.3 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต

คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของวัสดุเมื่อมีแรงจากภายนอกกระทำต่อวัสดุ คุณสมบัติทางกลได้แก่ ความแข็งแรง ความแข็ง ความสามารถในการยืดตัว ความยืดหยุ่น และความเหนียว เป็นต้น ในงานวิศวกรรมคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) มีความสำคัญมาก เพราะจะเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงความสามารถที่จะรับหรือทนทานต่อแรงกระทำในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งในการนำวัสดุต่าง ๆ ไปใช้งานจำเป็นที่จะต้องทราบถึงคุณสมบัติเชิงกลเหล่านี้เพื่อที่จะนำข้อมูลไปใช้ประกอบการออกแบบ และคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภท

2.3.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

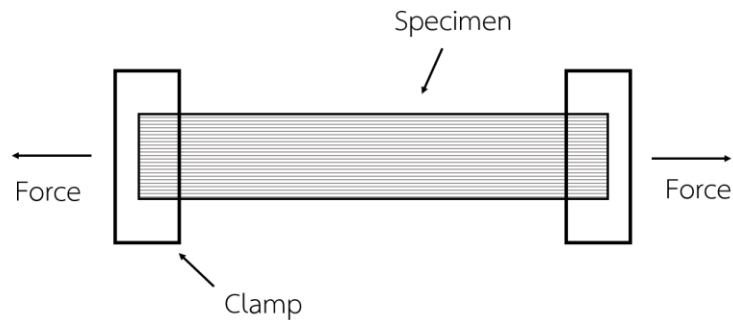
การวัดการยืดตัวจากแรงดึงและการวัดค่าโมดูลัสแรงดึงเป็นหนึ่งในตัวบ่งชี้ที่สำคัญที่สุดของความแข็งแรงในวัสดุ การทดสอบแรงดึงคือการวัดความสามารถของวัสดุในการทนต่อแรงที่มีแนวโน้มที่จะดึงออกจากกัน และเพื่อกำหนดว่าวัสดุจะยืดออกได้มากน้อยเพียงใดก่อนแตกหัก โดยอาศัยเทอม 2 เทอมสัมพันธ์กัน คือ ความเค้น (stress: σ) และความเครียด (strain: ϵ) ความเค้นคือ แรงที่ใช้ในการดึงหรือยืดตัวอย่าง (F) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด (A) ดังสมการที่ 1

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

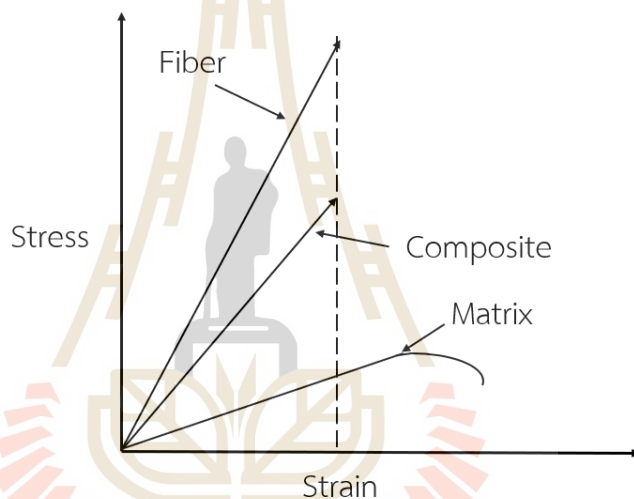
ความเครียด (ϵ) คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปของตัวอย่าง (ΔL) เมื่อได้รับแรงดึงต่อความยาวเริ่มต้น (L) ดังสมการที่ 2

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างการทดสอบแรงดึง โดยปลายของตัวอย่างถูกยึดด้วยที่จับและจะถูกดึงให้ยืดออกด้วยแรงที่รู้ขนาดแน่นอนจากนั้นจึงนำข้อมูลไปพล็อตกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain curve) สำหรับคอมโพสิตกราฟที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 2.6 นอกจากความเค้นและความเครียดแล้วยังมีเทอมที่แสดงสมบัติเชิงกลประเภทอื่นอีกเช่น Modulus หรือ Stiffness ซึ่งแสดงโดยค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียด (หรือความชันในช่วงแรกของเส้นกราฟ) และความเหนียว (Toughness) ซึ่งแสดงความต้านทานต่อการขาด (สุวรรณประทีป, 2547)



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการทดสอบ

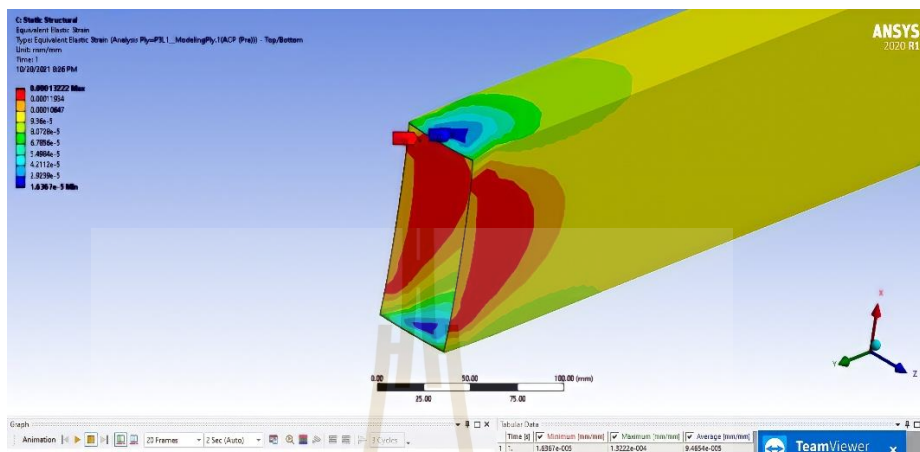


รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเครียด

2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัย สามารถสร้างแบบจำลองได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว และเป็นเหมือนโครงสร้างจริง ส่งผลให้การคำนวณแม่นยำมากขึ้น สามารถทดลองซ้ำได้ไม่จำกัดจำนวนครั้ง สามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ได้สะดวกเป็นไปตามคุณสมบัติที่แท้จริงของวัสดุที่ต้องการศึกษา กำหนดทิศทาง และปริมาณแรงที่กระทำต่อวัสดุได้ ซึ่งสามารถศึกษาพฤติกรรมของวัสดุที่สถานะทางกายภาพแตกต่างกัน ทั้งของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ประเมินผลลัพธ์ที่ได้หลายรูปแบบเช่น ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) การเคลื่อนขยับ (Displacement) การถ่ายเทความร้อน กลศาสตร์ของไหล (Fluid mechanic) เป็นต้น นอกจากนี้ยังช่วยลดเวลาในการสร้างแบบจำลองต้นแบบ เวลาในการทดสอบ และค่าใช้จ่ายในงานวิจัย ข้อดีดังกล่าวทำให้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีที่นิยมใช้จนถึง

ปัจจุบัน โดยศึกษารูปแบบความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเมื่อมีแรงกระทำขณะใช้งาน (รูปที่ 2.7) ทำให้ผู้วิจัยทราบพฤติกรรมเชิงกลต่อการตอบสนองของวัสดุ และสามารถพัฒนาการออกแบบให้มีความสอดคล้องกับสภาวะจริงเพิ่มขึ้น (เดชะอำไพ, 2550)

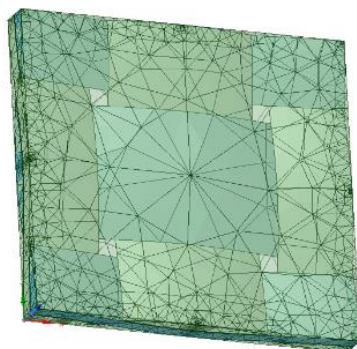


รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการทดสอบภายใต้แรงกระทำที่กำหนด

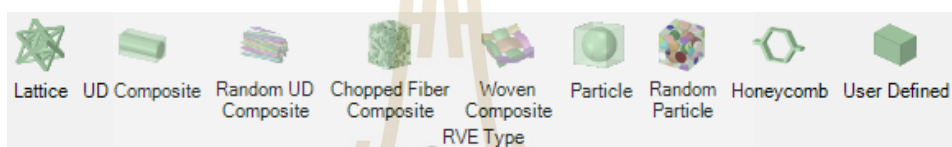
โปรแกรม Ansys เป็นโปรแกรมที่นำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรม โดยโปรแกรมมีความแม่นยำในการประมวลผล และมีเทคโนโลยีการวิเคราะห์ที่ทรงประสิทธิภาพ สามารถวิเคราะห์ได้ทุกศาสตร์ทางด้านวิศวกรรม ทั้งด้านกลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics) ด้านกลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) ด้านอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) รวมถึงด้านที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) นอกจากนี้โปรแกรม Ansys ยังสามารถวิเคราะห์ทุกศาสตร์ร่วมกันได้ โดยไม่มีข้อจำกัด ทำให้เป็นโปรแกรมที่นิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังถูกนำมาใช้ในหลักสูตรการเรียนการสอนและงานวิจัย

2.4.1 Ansys Material Designer (MD)

Ansys Material Designer (MD) เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุคอมโพสิต ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและทำให้คุณสมบัติของวัสดุเป็นเนื้อเดียวกัน เริ่มต้นด้วยการสร้างแบบจำลอง Representative volume element (RVE) ของวัสดุคอมโพสิต (รูปที่ 2.8) โดยกำหนดคุณสมบัติของวัสดุและ RVE ของโครงสร้างจุลภาค RVE ถูกกำหนดให้เป็นองค์ประกอบปริมาตรที่เล็กที่สุดของวัสดุด้วยการแสดงทางสถิติที่แม่นยำของคุณสมบัติวัสดุทั่วไปที่ใช้ในแบบจำลองระดับมหภาค โครงสร้างจุลภาคที่สามารถกำหนดใน Ansys Material Designer เช่น Unidirectional (UD) fiber, Woven fiber, Chopped fiber, random fiber, random UD fibers (รูปที่ 2.9)



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล MD



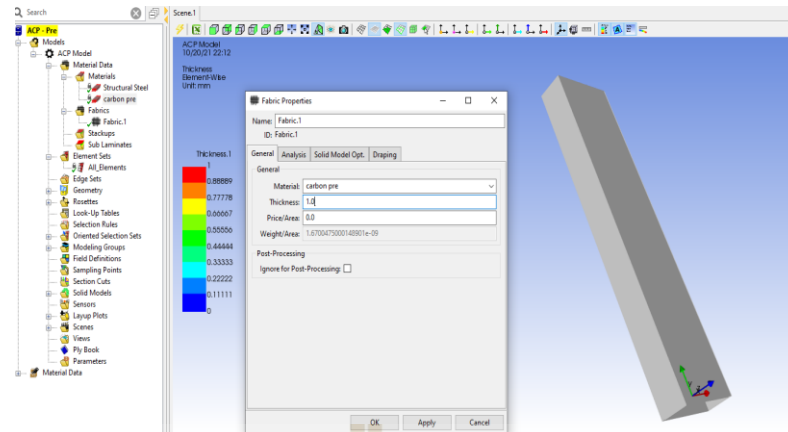
รูปที่ 2.9 ประเภทของ RVE

2.4.2 Ansys Composite PrepPost (ACP)

Ansys Composite PrepPost (Ansys ACP หรือ ACP) มีฟังก์ชันที่จำเป็นทั้งหมดสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างลามิเนตคอมโพสิต สามารถกำหนดวัสดุที่ใช้ในแต่ละชั้น และลำดับการเรียงซ้อนของผ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งสามารถกำหนดทิศทางการวางผ้าได้อย่างแม่นยำบนโครงสร้าง โดยใช้เครื่องมือที่ยืดหยุ่นตามค่าจำกัดความของระบบพิกัด (รูปที่ 2.10)

โมดูลนี้มีตัวเลือกเกณฑ์การวิเคราะห์ความล้มเหลวที่ล้ำสมัยมากมาย พร้อมด้วยความสามารถหลังการประมวลผลเพื่อให้สามารถตรวจสอบพฤติกรรมของวัสดุในเชิงลึกได้ ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โครงสร้างสามารถดูข้อมูลโดยรวมของวัสดุหรือดูรายละเอียดจนถึงระดับชั้น ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้สามารถระบุสาเหตุที่โครงสร้างล้มเหลวได้อย่างแม่นยำ การออกแบบซ้ำ ๆ สามารถทำได้โดยง่าย โดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตหรือความผันแปรของวัสดุ

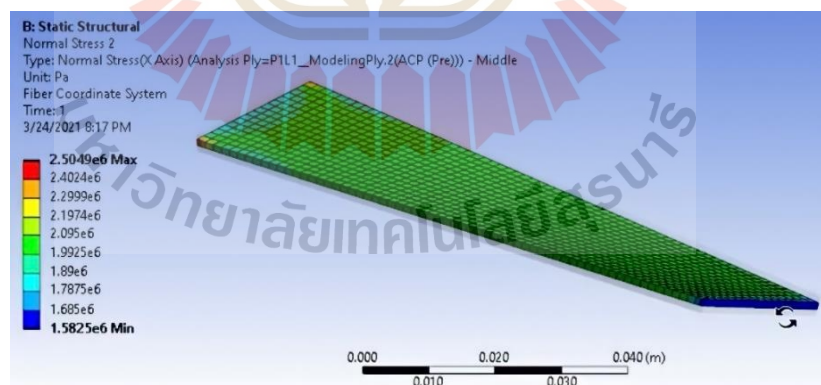
โมดูล ACP ใน Ansys Workbench สามารถแบ่งออกได้ 2 ส่วนคือ Pre และ Post ในส่วนของ ACP Pre สามารถรวมคุณสมบัติของวัสดุ แบบจำลองเรขาคณิต โครงข่ายของแบบจำลอง และแก้ไขการจัดวางแบบคอมโพสิต ตลอดจนการวางแนวชั้นที่กำหนดไว้ได้ ขึ้นอยู่กับการวิเคราะห์ที่ต้องการ โมดูล ACP Post ควรทำหลังจากกำหนดค่าโมเดลใน ACP Pre เนื่องจากข้อมูลผลลัพธ์จาก ACP Pre จะถูกถ่ายโอนไปยัง ACP Post ด้วย โมดูล ACP Post สามารถวิเคราะห์การกระจัด ความเค้น ความเครียด ความล้มเหลว ฯลฯ ในแบบจำลองทั้งหมดหรือแยกแต่ละชั้น



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล ACP

2.4.3 Ansys static structural

การวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิตสามารถกำหนดการเคลื่อนที่ ความเค้น ความเครียด และแรงในโครงสร้าง โดยเงื่อนไขการตอบสนองจะถือว่าคงที่ กล่าวคือโหลดและการตอบสนองของโครงสร้างจะถือว่าเปลี่ยนแปลงช้าตามเวลา โหลดโครงสร้างแบบคงที่สามารถทำได้โดยใช้ตัวแก้ปัญหา Ansys, Samcef หรือ ABAQUS ประเภทของการโหลดที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์แบบสถิต ได้แก่ แรงกระทำภายนอก แรงดัน และการกระจัด ตัวอย่างเช่น ปฏิกริยาบนเก้าอี้เมื่อมีคนนั่งบนเก้าอี้ พฤติกรรมการรับแรงดึงของวัสดุ (รูปที่ 2.11) พฤติกรรมการรับแรงกดของวัสดุ เป็นต้น



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล Ansys static structural

Mohan Kumar S และคณะได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลของวัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบฝืนผ้าหรือที่เรียกว่า Glass fiber reinforced polymer composites (GFRP) และใช้โพรีเอสเตอร์เรซินเป็นเมทริกซ์ ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการวางด้วยมือ (Hand lay-up) ที่อุณหภูมิห้อง

จำนวน 9 ชั้น โดยมีเปอร์เซ็นต์ของเส้นใยเสริมแรงที่แตกต่างกันคือ 60 65 และ 70 เปอร์เซ็นต์ของเมทริกซ์ เมื่อนำไปทดสอบแรงดึงพบว่าที่ 70 เปอร์เซ็นต์มีค่าการต้านทานแรงดึงสูงที่สุดคือ 306 MPa รองลงมาคือที่ 65 เปอร์เซ็นต์คือ 304 MPa และสุดท้ายที่ 60 เปอร์เซ็นต์เท่ากับ 287 MPa ในการทดสอบแรงกระแทกและแรงดัดแบบ 3 จุด ค่าที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบแรงดึงคือที่ 70 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความแข็งแรงมากที่สุดและที่ 60 เปอร์เซ็นต์มีค่าความแข็งแรงน้อยที่สุด ทำให้สามารถสรุปได้ค่าความแข็งแรงของวัสดุขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของเส้นใยเสริมแรงต่อเมทริกซ์ด้วย (Mohan Kumar et al., 2017) และมีการศึกษาเปรียบเทียบการทดสอบการดัดโค้งแบบ 3 จุด และ 4 จุดต่อพฤติกรรมของวัสดุแกนดิวคอมโพสิตที่ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีวิธีการบรรจุสุญญากาศ (Vacuum bagging) ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ใยแก้วผ้าแบบสานขนาด 280 g/m² มีแกนกลางเป็นโฟมโพลียูรีเทน (PUF) และโฟมโพลีไอโซไซยานูเรต (PIR) มีอัตราส่วนของเส้นใยเสริมแรงต่อแกนกลาง 3:1 และ 4:1 ของน้ำหนัก ผลการทดสอบแรงดัดแบบ 3 จุด และ 4 จุดพบว่า ค่า bending stress และ normal stress ของวัสดุแกนดิวคอมโพสิตที่มีแกนกลางเป็นโฟมโพลียูรีเทน (PUF) และโฟมโพลีไอโซไซยานูเรต (PIR) มีค่าใกล้เคียงกันของทั้งสองอัตราส่วน นั่นคือในการทดสอบสองแบบวัสดุมีพฤติกรรมทางกลไม่แตกต่างกัน (I.S. et al., 2018)

Hossein Rahmani และคณะ ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและอีพอกซีเรซิน ภายใต้การเปลี่ยนแปลงทิศทางการวางของผ้า 7 แบบ จำนวนชั้น 2 แบบ คือ 3 และ 5 ชั้น สุดท้ายคือปริมาณเส้นใย 2 แบบ คือ 40 wt% และ 60 wt% คอมโพสิตถูกผลิตด้วยวิธีการวางด้วยมือ และนำไปทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลโดยทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ทดสอบแรงดัดงอตามมาตรฐาน ASTM D790 และแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลพบว่าคอมโพสิตที่มีเส้นใย 60 wt% มีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุคอมโพสิตที่ทำด้วย 40 wt% คุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตที่ผลิต 5 ชั้นจะมากกว่า 3 และวัสดุคอมโพสิตที่ทำมุมชั้น [0°/-35°/0°/35°/0°] แสดงคุณสมบัติทางกลสูงสุด (Rahmani H. et al., 2014)

Sojan Andrews Zachariah และคณะทำการผลิตวัสดุไฮบริดคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิตร่วมกับเส้นใยคาร์บอน ในการเสริมพฤติกรรมคาร์บอนโหลดตามขวางแบบสถิตและไดนามิก คอมโพสิตถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยกระบวนการแวคคัมอินฟิวชัน (Vacuum Infusion) ทำการทดสอบการดัดงอและการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปีเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมคาร์บอนโหลดตามขวางแบบสถิตและไดนามิกของไฮบริดคอมโพสิตตามลำดับ โดยทำการศึกษาผลกระทบของตำแหน่งและลำดับการเรียงซ้อนของชั้นอะรามิตที่ต่อการกระแทกด้วยความเร็วต่ำและการโหลดดัดตามขวางแบบสถิต ผลการวิจัยพบว่าตำแหน่งและลำดับการเรียงซ้อนของผ้าอะรามิตใน CFRP เคลือบลามิเนตมีบทบาทสำคัญในการรับแรงกระแทกโดยมีคุณสมบัติการดัดงอลดลง คอมโพสิตที่มีผ้าอะรามิตสองชั้นที่การ

วางแนว $[0^\circ/90^\circ]$ และ $[\pm 45^\circ]$ แต่ละชั้นบนพื้นผิวด้านนอกแสดงพฤติกรรมการกระแทกที่ดีขึ้นในแง่ของความทนแรงกระแทกโดยเฉลี่ยและพลังงานที่ดูดซับ (Zachariah S.A. et al., 2022)

Al-Hajaj, และคณะทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางกล ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการดูดซึมน้ำของวัสดุไฮบริดคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและลินิน ทำการผลิตคอมโพสิตด้วยวิธีการวางมือ เส้นใยเสริมแรงมีสองแบบคือ แบบ A ใช้เส้นใยเสริมแรงทิศทางเดียว (unidirectional) และแบบ B ใช้เส้นใยเสริมแรงสาน (woven) พบว่าคุณสมบัติทางกลสูงกว่าสำหรับประเภท A เทียบกับ B และการดูดซึมน้ำน้อยกว่าสำหรับคอมโพสิตแบบ A กับ B ในเปอร์เซ็นต์โดยรวมโดยน้ำหนัก 4.84 เทียบกับ 8.32% (Al-Hajaj Z. et al., 2018)

Bourchak ผลิตคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและอีพอกซีเรซินด้วยวิธี VARIM และนำไปทดสอบแรงดึงโดยใช้เครื่องทดสอบเนกประสงค์ คอมโพสิตถูกผลิตขึ้นสองแบบ แบบที่หนึ่งมีลำดับการเรียงชั้นแบบ cross-ply $[+90_4^\circ/-90_4^\circ]$ และแบบที่สองมีลำดับการเรียงชั้น $[+67.54^\circ/-67.54^\circ]$ ประเมินคุณสมบัติแรงดึงของคอมโพสิตโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สามมิติ ได้แก่ การวิเคราะห์แบบเมช (mesh analysis) กฎของการผสม (10% Hart-Smith rule) และ classical laminating theory (CLT) ผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง ผลการทดลองมีข้อมูลกระจายระจายน้อยมาก ผลการวิจัยพบว่า การวิเคราะห์แบบเมช ทำงานได้ดีกว่าในการประมาณค่าความสัมพันธ์ที่เหมาะสมในการรับแรงดึงของคอมโพสิตแบบ cross-ply ในขณะที่สำหรับคอมโพสิตแบบลำดับการเรียงชั้นวิธี CLT ไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง (Bourchak M. et al., 2015)

Kamble ทำการศึกษาการออกแบบโมโนค็อก (Monocoque) ด้วยวัสดุคอมโพสิตที่มีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบาสำหรับการแข่งรถในระดับนักเรียนนักศึกษาต่าง ๆ โดยการศึกษาจะทำการออกแบบวัสดุคอมโพสิตด้วย ANSYS Material Designer (MD) ซึ่งใช้สำหรับค้นหาคุณสมบัติโดยรวมของวัสดุ หลักการคือการป้อนคุณสมบัติไอโซทรอปิกของส่วนผสมแต่ละอย่าง (ในกรณีนี้คือคุณสมบัติของอีพอกซีเรซินและคุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอน) จากนั้นจึงกำหนดข้อมูลเรขาคณิตของเนื้อผ้าใน MD โมโนค็อกได้รับการออกแบบมาเพื่อให้ผ่านการทดสอบโหลดสถิตบังคับที่กำหนดโดยสูตร 3 ของสหพันธ์รถยนต์นานาชาติ (FIA) ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างโมโนค็อก แบบแซนด์วิชที่มีความหนาของแกนสม่ำเสมอช่วยลดน้ำหนักได้ประมาณ 31.3% เมื่อเทียบกับโครงเหล็ก นอกจากนี้การปรับความหนาของแกนให้เหมาะสมทำให้น้ำหนักของโมโนค็อก ลดลง 22.5% เมื่อเทียบกับโมโนค็อกที่มีความหนาของแกนสม่ำเสมอ ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโครงเหล็กคอมโพสิตโมโนค็อก ได้รับประโยชน์จากน้ำหนักที่ต่ำกว่าและความแข็งแรงของแรงบิดที่สูงขึ้น (Kamble M. et al., 2019)

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการผลิตและศึกษาคุณสมบัติเชิงกลด้านการดึงในแนวระนาบวัสดุไฮบริดคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยลินิน (Flax fiber) และอีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin) โดยใช้กระบวนการผลิต vacuum bagging การศึกษาจะดำเนินการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจัดวางของเส้นใยและการปรับเปลี่ยนความแตกต่างของมุมระหว่างชั้น จากนั้นจะทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้านการดึงในแนวระนาบตามมาตรฐาน ASTM 3039-D2 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) การศึกษาจะดำเนินการควบคู่ไปกับการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างไฮบริดคอมโพสิตด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS Material Designer, Composite Prep Post (ACP) ในการออกแบบไฮบริดคอมโพสิต และ ANSYS Static Structure ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลด้านการดึงในแนวระนาบ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบจริงและจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ขั้นตอนการศึกษาสามารถแบ่งหัวข้อการศึกษาได้ดังนี้

3.1.1 การศึกษาค้นคว้าและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาวิธีการ กระบวนการ และค้นคว้าหาความรู้จากเอกสารงานวิจัย หนังสือวารสารวิชาการ และบทความต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

- ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิต
- ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอน และเส้นใยลินิน รวมไปถึงรูปแบบการสาน และการวางขายในตลาด
- ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการผลิตวัสดุคอมโพสิตด้วยวิธีแวกคัมแบ็กกิ้ง
- ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการรับแรงดึงในแนวระนาบของวัสดุคอมโพสิตรวมถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อวัสดุคอมโพสิต
- ศึกษาหลักการและทฤษฎีในการหาค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต

- ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับใช้งานโปรแกรม Ansys workbench โมดูล ACP, Material Designer และ Static Structure

- ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองวัสดุไฮบริดคอมโพสิตด้วยโปรแกรม Ansys workbench โมดูล ACP, Material Designer และ Static Structure







3.1.2 ผลิตวัสดุไฮบริดคอมโพสิต





ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้ทำการผลิตวัสดุไฮบริดคอมโพสิตด้วยวิธีแวกคัมแบ็กกิ้ง โดยมีวัสดุและอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในผลิตวัสดุไฮบริดคอมโพสิต

ลำดับ	รายการ	รูปภาพ
1	เส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียว น้ำหนัก 200 กรัม (g)	
2	เส้นใยลินินแบบทิศทางเดียวน้ำหนัก 200 กรัม (g)	
3	อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin)	
4	น้ำยาถอดแบบทากันติด (Polyvinyl Alcohol)	

ลำดับ	รายการ	รูปภาพ
5	แว๊ก (Wax)	
6	อะซิโตน (Acetone)	
7	อลูมิเนียมมอด (Aluminum mold)	
8	ซีแลนท์เทป (Sealant tape)	
9	ลูกกลิ้งอลูมิเนียม (Aluminium roller)	
10	วางผ้าลอกแบบ (Peel ply)	

ลำดับ	รายการ	รูปภาพ
11	วางพลาสติกลอกแบบ (Release film)	
12	วางผ้าซับเรซิน (Breather fabrics)	
13	ฟิล์มสุญญากาศ (Vacuum bagging film)	
14	หัวสุญญากาศ (Vacuum Head)	
15	ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)	
16	ตู้อบลมร้อน (Hot oven)	

ลำดับ	รายการ	รูปภาพ
17	เทปกาวย่น	
18	แก้วผสมสาร	
19	ไม้คนสาร	
20	ตราชั่ง	

3.1.2.1 ผลิตและสร้างแบบจำลองวัสดุไฮบริดคอมโพสิต

ในการขึ้นรูปวัสดุไฮบริดคอมโพสิตด้วยวิธีเรีคคัมแบ็กกิ้งมีวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปดังต่อไปนี้

1. จัดเตรียมเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยลินินในทิศทาง $[0]^{\circ}$, $[-45]^{\circ}$, $[+45]^{\circ}$ และ $[90]^{\circ}$

2. จัดเตรียมและทำความสะอาดโมลต์ด้วยการใช้อะซิโตนเช็ดทำความสะอาด เพื่อกำจัดคราบสิ่งสกปรก

3. ทาแว็กซ์บนโมลต์โดยการลงซ้ำ 2 ครั้ง แต่แต่ละครั้งจะทิ้งไว้ประมาณ 5 min เพื่อช่วยในการลอกชิ้นงานออกจากโมลต์ได้ง่ายขึ้น

4. ผสมอีพ็อกซีเรซินโดยอัตราการผสมระหว่างน้ำยาพาร์ท A และน้ำยาพาร์ท B จะอยู่ที่ 100:35 เมื่อผสมเสร็จแล้วต้องคนให้เข้ากัน

5. ไล่ฟองอากาศออกจากอีพ็อกซีเรซินที่เกิดจากขั้นตอนการคนผสมด้วยการนำเข้าถึงสุญญากาศเป็นเวลา 5 นาที

6. วางเส้นใยลงบนโมลต์ในทิศทางที่ต้องการ จากนั้นเทอีพ็อกซีเรซินลงบนเส้นใยที่เตรียมไว้ แล้วเกลี่ยให้ผิวสม่ำเสมอขึ้น ชั่วคราววางเส้นใยครบทุกชั้น

7. วางผ้าลอกแบบ (Peel ply) โดยจะวางทับเส้นใยซึ่งผ้าลอกแบบจะช่วยให้ดูดซับอีพ็อกซีเรซินส่วนเกินและเมื่อขึ้นรูปเสร็จสิ้นชิ้นงานจะสามารถลอกออกได้ง่าย

8. วางพลาสติกลอกแบบ (Release film) โดยจะวางทับผ้าลอกแบบ ตัวพลาสติกลอกแบบมีลักษณะเป็นรูช่วยให้จำกัดช่องทางการไหลของอากาศและอีพ็อกซีเรซิน

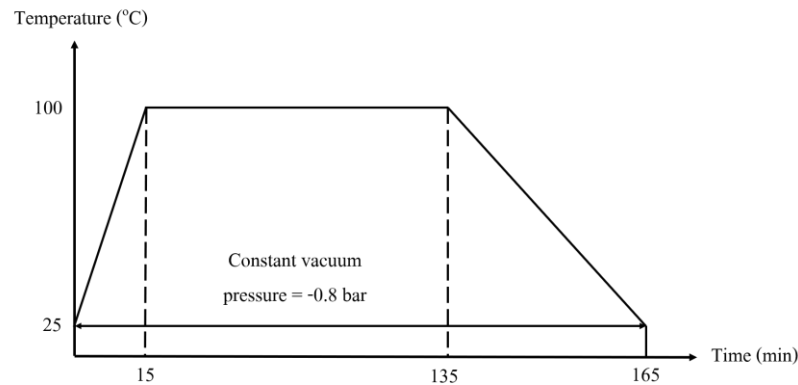
9. วางผ้าซับเรซิน (Breather fabrics) โดยจะวางทับพลาสติกลอกแบบ จะช่วยให้ดูดซับอีพ็อกซีเรซินส่วนเกินที่ไหลผ่านช่องของพลาสติกลอกแบบ

10. ห่อหุ้มโมลต์ด้วยฟิล์มสุญญากาศ (Vacuum bagging film) และใช้ซีแลนท์เทปติดระหว่างฟิล์มสุญญากาศเพื่อป้องกันอากาศรั่วไหล

11. การติดตั้งปั๊มสุญญากาศ ในขั้นตอนนี้ต้องระวังไม่ให้มีรอยรั่วของอากาศเกิดขึ้น สามารถเช็คได้ด้วยการแว็กซ์อากาศทิ้งไว้สักครู่แล้วหยุด รอประมาณ 10 min หากเกจวัดความดันไม่ขยับแสดงว่าไม่มีอากาศไหลเข้าสู่ระบบ

12. แร้งชิ้นงานทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง และความดัน -0.8 MPa เป็นเวลา 2 hr เพื่อให้อีพ็อกซีเรซินซึมเข้าเส้นใยได้ทั้งหมด

13. อบชิ้นงานภายใต้อุณหภูมิ 100 °C และความดัน -0.8 MPa เป็นระยะเวลา 2 hr ดังรูปที่ 3.1



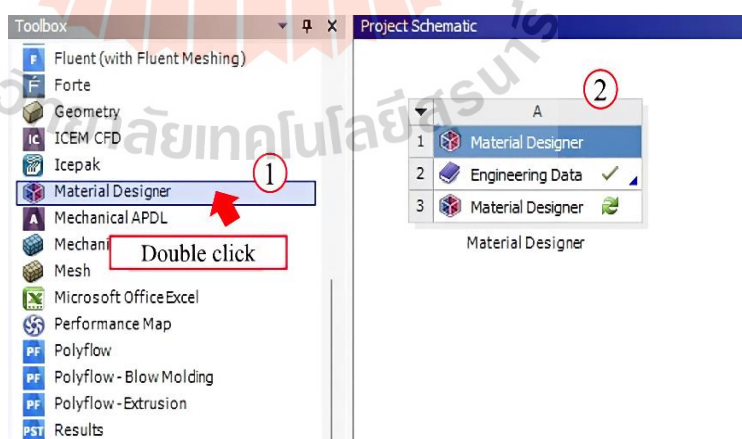
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการอบชิ้นงาน

3.1.3 สร้างแบบจำลองวัสดุไฮบริดคอมโพสิต

สร้างและวิเคราะห์แบบจำลองไฮบริดคอมโพสิต สร้างแบบจำลองคอมโพสิต เริ่มต้นด้วยการสร้างโมเดลวัตถุปริมาตรตัวแทน (RVE) ในโมดูล Ansys Material Designer โดย RVE กำหนดองค์ประกอบปริมาตรที่เล็กที่สุดของวัสดุด้วยการแสดงทางสถิติที่แม่นยำของคุณสมบัติวัสดุทั่วไปที่ใช้ในแบบจำลองระดับมหภาค และทำการออกแบบไฮบริดคอมโพสิตด้วยโมดูล Ansys Composite Prep Post (ACP) จำลองการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วย Ansys Static Structure

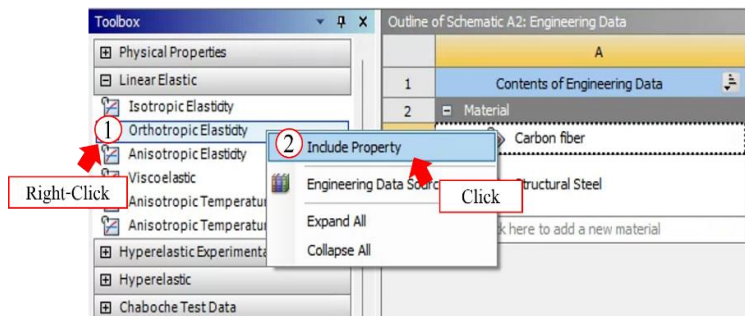
3.1.3.1 การสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล Material designers

1. คลิกเลือก Material designers



รูปที่ 3.2 โมดูล Material Designer

2. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

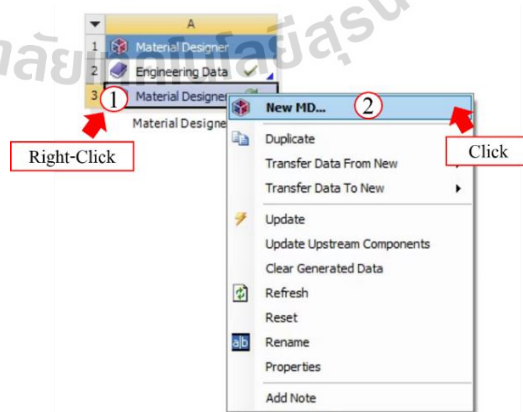


รูปที่ 3.3 การเลือกใช้ Orthotropic Elasticity

Properties of Outline Row 3: Carbon fiber			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Orthotropic Elasticity		
4	Young's Modulus X direction	2.32E+05	MPa
5	Young's Modulus Y direction	15000	MPa
6	Young's Modulus Z direction	15000	MPa
7	Poisson's Ratio XY	0.279	
8	Poisson's Ratio YZ	0.49	
9	Poisson's Ratio XZ	0.49	
10	Shear Modulus XY	24000	MPa
11	Shear Modulus YZ	5034	MPa
12	Shear Modulus XZ	5034	MPa

รูปที่ 3.3 คุณสมบัติของวัสดุ

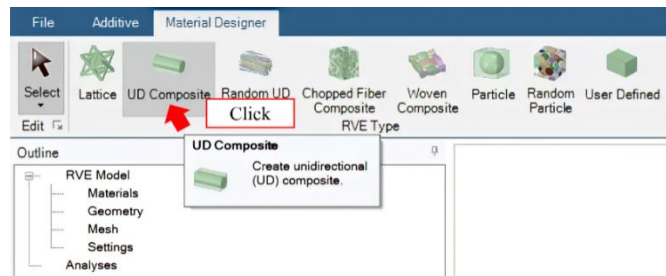
3. การออกแบบวัสดุ (Design material) โดยคลิกขวาที่ Material designer แล้วเลือก new MD... เพื่อเข้าสู่โหมดการสร้างและออกแบบ



รูปที่ 3.4 การออกแบบวัสดุ

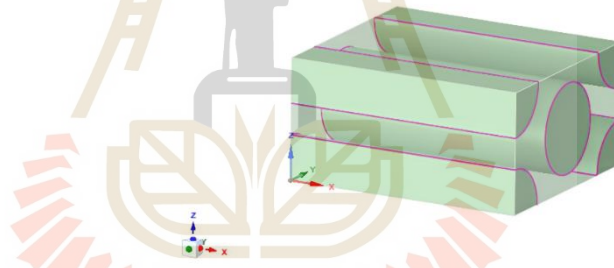
4. คลิก UD composite ที่แถบ RVE type เพื่อกำหนดรูปแบบของวัสดุ

คอมโพสิต



รูปที่ 3.5 การออกแบบ RVE type

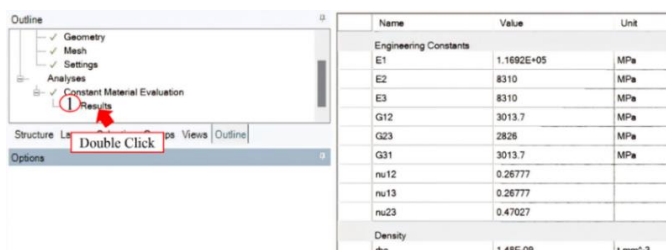
5. ตั้งค่าข้อกำหนดในการสร้างวัสดุคอมโพสิต โดยเริ่มที่เลือกประเภท Geometry จากนั้นกำหนด Fiber volume fraction สุดท้ายคือการตั้งค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย



รูปที่ 3.6 การตั้งค่าในการสร้างวัสดุคอมโพสิต

6. ตั้งค่า Mesh size เท่ากับ 0.5 mm จากนั้นคลิกเครื่องหมายถูกเพื่อทำการวิเคราะห์

7. ตรวจสอบผลลัพธ์โดยคลิก results



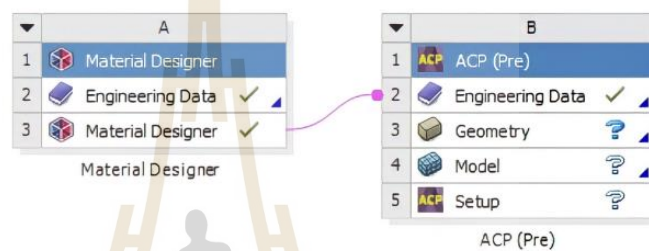
รูปที่ 3.7 ตรวจสอบผลลัพธ์

วัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการจำลองด้วยโมดูล Material designer จะทำให้ทราบ Young's modulus, Poisson's ratio และ Shear modulus ของวัสดุคอมโพสิตทั้ง 3 ทิศทาง (x, y, z) ซึ่งวัสดุคอมโพสิตที่จำลองด้วยโมดูล Material designer จะถูกนำเข้าโมดูล ACP เพื่อออกแบบการจัดวางและการปรับเปลี่ยนความแตกต่างของมุมระหว่างชั้นวัสดุคอมโพสิต

3.1.3.2 การสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล ACP

1. คลิกเลือก ACP
2. เชื่อม Result ที่ได้จาก Material designer เข้ากับ Engineering data

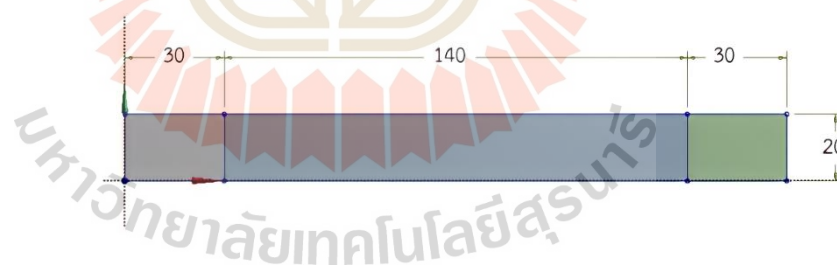
ของโมดูล ACP



รูปที่ 3.8 การเชื่อม Material

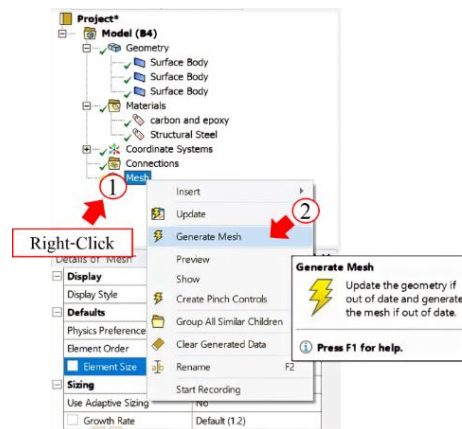
3. ออกแบบชิ้นงานคอมโพสิตด้วยคำสั่ง Geometry โดยชิ้นงานมีขนาด

200x20 mm



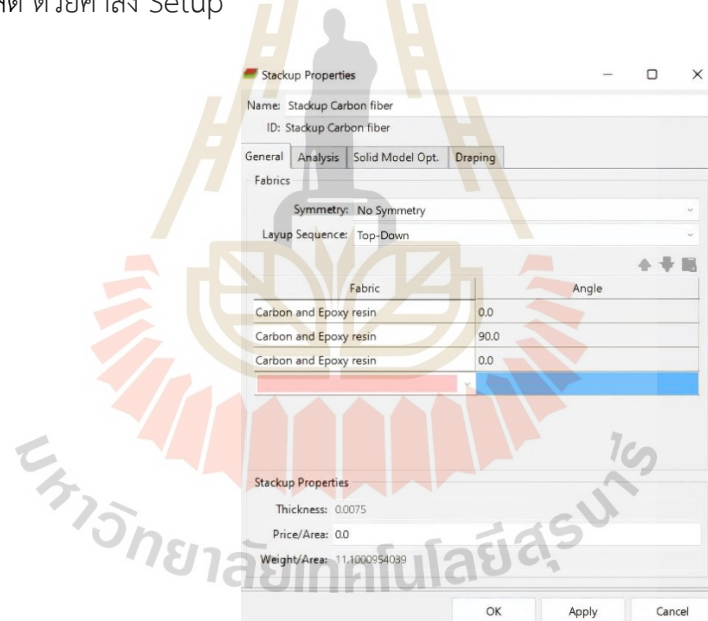
รูปที่ 3.9 ชิ้นงานคอมโพสิต

4. ดับเบิ้ลคลิกคำสั่ง Model จากนั้นคลิกขวาที่ Mesh แล้วกด Generate



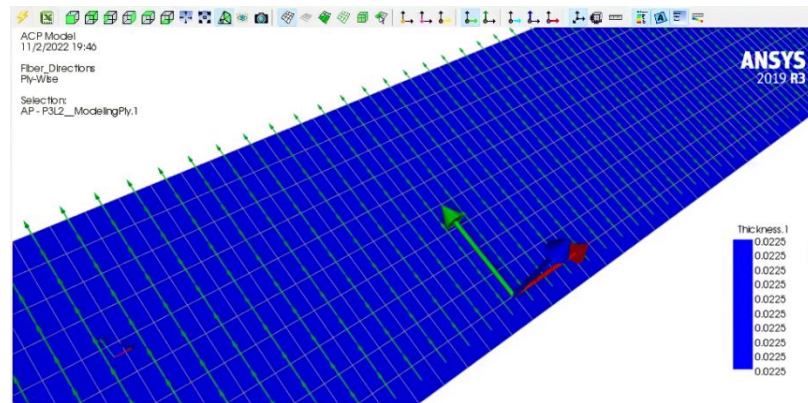
รูปที่ 3.10 การสร้าง mesh

5. ออกแบบการจัดวางและการปรับเปลี่ยนความแตกต่างของมุมระหว่างชั้นวัสดุคอมโพสิต ด้วยคำสั่ง Setup



รูปที่ 3.11 การออกแบบการจัดวางชั้นวัสดุคอมโพสิต

6. ที่คำสั่ง Layup Plots คลิกขวาเพิ่มคำสั่ง Apply เพื่อสร้างแบบจำลองคอมโพสิต จากหนึ่งคลิก Show fiber direction ที่แถบด้านบน (เส้นสีเขียวแสดงถึงทิศทางของเส้นใยโดยเทียบกับแกน x)



รูปที่ 3.12 ทิศทางของชั้นวัสดุคอมโพสิต

ในการศึกษามีรูปแบบการจัดวางของชั้นคอมโพสิต 24 รูปแบบ ดังนั้นในการวิเคราะห์จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล ACP ใหม่ทั้งหมด จึงสามารถวิเคราะห์ได้ทั้ง 24 รูปแบบ

3.1.3.3 การสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล Static structure

การตั้งค่าในโมดูล Static structure นั้นทำโดยการให้แรงที่ปลายของชิ้นงานทั้งสองสี่พื้นผิว (รูปที่ 3.14) และอีกด้านพื้นผิวทั้งสองจะถูกล็อกอยู่กับที่



รูปที่ 3.13 การสร้างแบบจำลองในโมดูล Static structure

บทที่ 4

ทฤษฎีการคำนวณคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใย (FRP) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถปรับปรุงอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักให้สูงขึ้น การนำความร้อนที่ต่ำ และความหนาแน่นที่ต่ำ (Zhou et al., 2018) เห็นได้ชัดว่าเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว และเส้นใยเคฟลาร์ ถูกนำมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในเมทริกซ์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกล (Boransan et al., 2021), (Saensuriwong et al., 2021) งานวิจัยหลายชิ้นมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตโดยคำนึงถึงต้นทุนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของวัสดุคอมโพสิต (Helaili et al., 2021) วัสดุเมทริกซ์ในพอลิเมอร์คอมโพสิตทั่วไปอาจเป็นอีพ็อกซีเรซิน ไวนิลเอสเทอร์ และโพลีเอสเตอร์ เส้นใยส่วนใหญ่มักถูกเติมลงในวัสดุเมทริกซ์ในพอลิเมอร์คอมโพสิตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล ดังนั้นการใช้งานของ FRP จึงเป็นที่ต้องการอย่างมากในอุตสาหกรรมต่าง ๆ รวมถึงอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมไฟฟ้า อุตสาหกรรมกีฬา และอุตสาหกรรมการบิน

วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบทิศทางเดียวมีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบาซึ่งสอดคล้องกับการวางแนวเส้นใย คุณสมบัติคอมโพสิตทิศทางเดียวขึ้นอยู่กับทิศทางที่เรียกว่าคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก คุณสมบัติการเสริมแรงช่วยเพิ่มความแข็งแรงของคอมโพสิตในทิศทางตามแนวเส้นใยได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเสริมแรงด้วยเส้นใยได้รับการสนับสนุนโดยเมทริกซ์ซึ่งนำไปสู่ความสามารถในทิศทางตามขวาง (He et al., 2021) Yoney et al. ได้ตรวจสอบคุณสมบัติการดัดงอของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบทิศทางเดียวภายใต้การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การเสริมแรงด้วยเส้นใยของวัสดุคอมโพสิตที่ 5%, 15% และ 25% เทคนิคการวางด้วยมือถูกใช้สำหรับการผลิตวัสดุคอมโพสิต พบว่าโมดูลัสที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยแฟล็กซ์เศษส่วน (Yukseloglu & Yoney, 2016)

คุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตสามารถพิจารณาได้จากเทคนิคต่าง ๆ เช่น การทดลองทฤษฎี และวิธีการคำนวณ (Vignoli et al., 2019) กลุ่มวิจัยต่าง ๆ ได้พัฒนาวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของคอมโพสิตโดยพิจารณาจากทฤษฎีบท Rule of Mixture (ROM), Chamis, Nielsen และ Halpin-Tsai (Falcó et al., 2018) ในงานวิจัยของ Jweeg และคณะทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตเชิงทดลองควบคู่ไปกับเชิงทฤษฎีด้วยทฤษฎีบท Rule of Mixture ของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยเสริมแรงหลากหลายลักษณะ เช่น เส้นใยสั้น เส้นใย-

ผ้าสาน เส้นใยยาว เป็นต้น ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงมีข้อตกลงที่ตีระหว่งการศึกษาเชิงทดลองและเชิงทฤษฎีสำหรับวัสดุคอมโพสิตประเภทต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นโมดูลัสความยืดหยุ่นที่ดีที่สุดสำหรับคอมโพสิตเสริมแรงคือประเภทเส้นใยเดี่ยวในทิศทางตามแนวเส้นใยและประเภทเส้นใยเสริมแรงแบบผ้าสานสำหรับทิศทางแนวขวางเส้นใย (Jweeg et al., 2012)

วัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้คือการศึกษาคุณสมบัติการยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิต โดยทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเชิงทดลองควบคุมไปกับการศึกษาจากทฤษฎีบท Rule of Mixture (ROM), Chamis, Nielsen และ Halpin-Tsai

4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตทางทฤษฎี

การวิเคราะห์จะนำเอาสมการทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ มาประเมินเพื่อค่า elastic properties ของวัสดุคอมโพสิต เช่น Shear modulus, Young's modulus และ Poisson's ratio ในทิศทางตามแนวเส้นใยและแนวขวางเส้นใย ซึ่งโมเดลต่าง ๆ ที่ใช้ในการประเมิน elastic properties ของวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ Rule of mixture, Halpin-Tsai และ Chamis คุณสมบัติของวัสดุถูกอ้างอิงจากงานวิจัย (Younes et al., 2555) ดังที่แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติของวัสดุ	เส้นใยคาร์บอน	เส้นใยแก้ว	อีพ็อกซีเรซิน
Longitudinal modulus, E_{11} (GPa)	232	73.1	5.35
Transverse modulus, E_{22} (GPa)	15		5.35
Transverse modulus, E_{33} (GPa)	15		5.35
Longitudinal shear modulus, G_{12} , (GPa)	24	29.95	1.976
Transverse shear modulus, G_{23} (GPa)	5.034		1.976
Transverse shear modulus, G_{13} (GPa)	24		1.976
Major Poisson's ratio, ν_{12}	0.279	0.22	0.354
Minor Poisson's ratio, ν_{23}	0.49		0.354
Minor Poisson's ratio, ν_{13}	0.279		0.354

4.1.1 Rule of mixture

Rule of mixture หรือ ROM นิยมใช้สำหรับคำนวณเพื่อหาค่า elastic properties ของวัสดุคอมโพสิต โดยใช้คุณสมบัติของเมทริกซ์และเส้นใย การวางแนวของเส้นใย และ fiber volume fraction

คุณสมบัติตามแนวเส้นใย:

$$E_1 = V_1 E_{11,f} + V_m E_m \quad (4.1)$$

$$V_1 = V_1 V_{11,f} + V_m V_m \quad (4.2)$$

คุณสมบัติตามแนวขวางเส้นใย:

$$E_{22} = \frac{E_{22,f} E_m}{E_m V_f + E_{22,f} V_m} \quad (4.3)$$

โมดูลัสของแรงเฉือน:

$$G_{12} = \frac{G_{12,f} G_m}{G_m V_f + G_{12,f} V_m} \quad (4.4)$$

4.1.2 Chamis model

โมเดล Chamis เป็นแบบจำลองกึ่งการทดลองที่นำเชื่อถือและใช้มากที่สุด ซึ่งดัดแปลงมาจากโมเดล ROM โดยเกี่ยวข้องกับรากที่สองของเศษส่วน fiber volume fraction

คุณสมบัติตามแนวเส้นใย:

$$E_1 = V_1 E_{11,f} + V_m E_m \quad (4.1)$$

$$V_1 = V_1 V_{11,f} + V_m V_m \quad (4.2)$$

คุณสมบัติตามแนวขวางเส้นใย:

$$E_{22} = \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f \left(1 - \left(\frac{E_m}{E_{22,f}} \right) \right)}} \quad (4.5)$$

โมดูลัสของแรงเฉือน:

$$G_{12} = \frac{G_{12,f} G_m}{G_m V_f + G_{12,f} V_m} \quad (4.6)$$

4.1.3 Halpin-Tsai

การคำนวณเพื่อหาค่าโมดูลัสและอัตราส่วนของปัวซองตามแนวเส้นใยในโมเดลของ Halpin-Tsai จะใช้สมการเดียวกันกับโมเดล ROM อย่างไรก็ตาม โมดูลัสตามแนวขวางเส้นใยมีการพัฒนาสมการที่ใช้ในการคำนวณโดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

คุณสมบัติตามแนวเส้นใย:

$$E_1 = V_1 E_{11,f} + V_m E_m \quad (4.1)$$

$$V_1 = V_1 V_{11,f} + V_m V_m \quad (4.2)$$

คุณสมบัติตามแนวขวางเส้นใย:

$$E_2 = E_m \left(\frac{1 + \zeta \eta V_f}{1 + \eta V_f} \right) \quad (4.7)$$

กำหนดให้ $\zeta = 1$ เพื่อหาค่า η ได้จากสมการ

$$\eta = \left(\frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \zeta} \right) \quad (4.8)$$

โมดูลัสของแรงเฉือน:

$$G_2 = G_m \left(\frac{1 + \zeta \eta V_f}{1 + \eta V_f} \right) \quad (4.9)$$

กำหนดให้ $\zeta=1$ เพื่อหาค่า η ได้จากสมการ

$$\eta = \left(\frac{\frac{G_f}{G_m} - 1}{\frac{G_f}{G_m} + \zeta} \right) \quad (4.10)$$

4.1.4 Nielsen model

แบบจำลอง Nielsen ดัดแปลงจากสมการ Halpin-Tsai โดยการรวม maximum packing fraction ϕ_{\max} (maximum packing fraction = 0.785)

คุณสมบัติตามแนวเส้นใย:

$$E_1 = V_1 E_{11,f} + V_m E_m \quad (4.1)$$

$$V_1 = V_1 V_{11,f} + V_m V_m \quad (4.2)$$

คุณสมบัติตามแนวขวางเส้นใย:

$$E_{22} = E_m \left(\frac{1 + \zeta \eta V_f}{1 - \psi \eta V_f} \right) \quad (4.11)$$

หาค่า η ได้จากสมการ 4.12

$$\eta = \left(\frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \zeta} \right) \quad (4.12)$$

โมดูลัสของแรงเฉือน:

$$E_{22} = E_m \left(\frac{1 + \zeta \eta V_f}{1 - \psi \eta V_f} \right) \quad (4.13)$$

หาค่า η ได้จากสมการที่ 4.14

$$\eta = \left(\frac{\frac{G_f}{G_m} - 1}{\frac{G_f}{G_m} + \zeta} \right) \quad (4.14)$$

และหาค่า ψ ได้จากสมการที่ 4.15

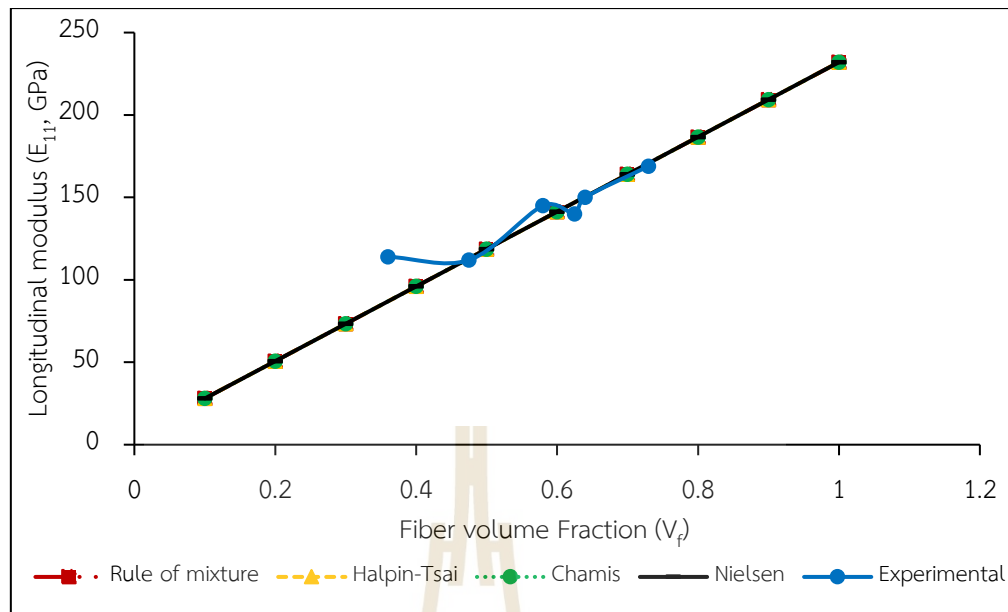
$$\psi = 1 + \frac{(1 - \nu_{\max})}{\nu_{\max}^2} V_f \quad (4.15)$$

กำหนดให้ E_f และ E_m เป็นค่า Young's modulus ของเส้นใยและเมทริกซ์ G_f และ G_m เป็นค่า Shear modulus ของเส้นใยและเมทริกซ์ ในส่วน ν_f และ ν_m เป็นค่า Poisson's ratio ของเส้นใยและเมทริกซ์ ตามลำดับ

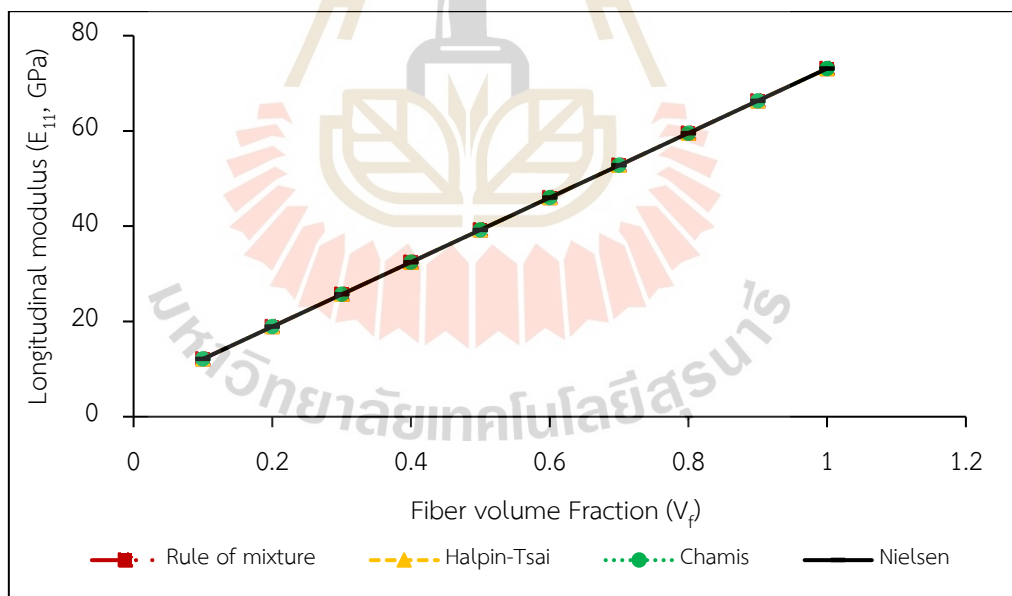
4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตทางทฤษฎี

4.2.1 Longitudinal modulus

การวิเคราะห์ทางทฤษฎีแสดงให้เห็นว่า Longitudinal modulus ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวและวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในขณะที่เพิ่ม Fiber volume fraction ดังที่เห็นในรูปที่ 4.1 และ 4.2 Longitudinal modulus ของวัสดุทั้งสองจะขึ้นอยู่กับค่า E_{11} ของเส้นใยเป็นหลัก ด้วยที่เส้นใยคาร์บอนมีคุณสมบัติเด่นในเรื่องการรับแรงในแนวแกนได้ดี จึงมี Longitudinal modulus ที่สูงกว่า (สังเกตจากค่า E_{11} ที่สูงกว่าเส้นใยแก้ว) ผลลัพธ์ของแนวทางเชิงทฤษฎีของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวคล้ายกับการวิเคราะห์ด้วยการทดสอบจริง แต่เนื่องด้วยในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเป็นการวิเคราะห์โดยไม่มีปัจจัยอื่นมาเกี่ยวข้องส่งผลให้ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าที่สูงกว่าการทดสอบจริง



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal modulus และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียว



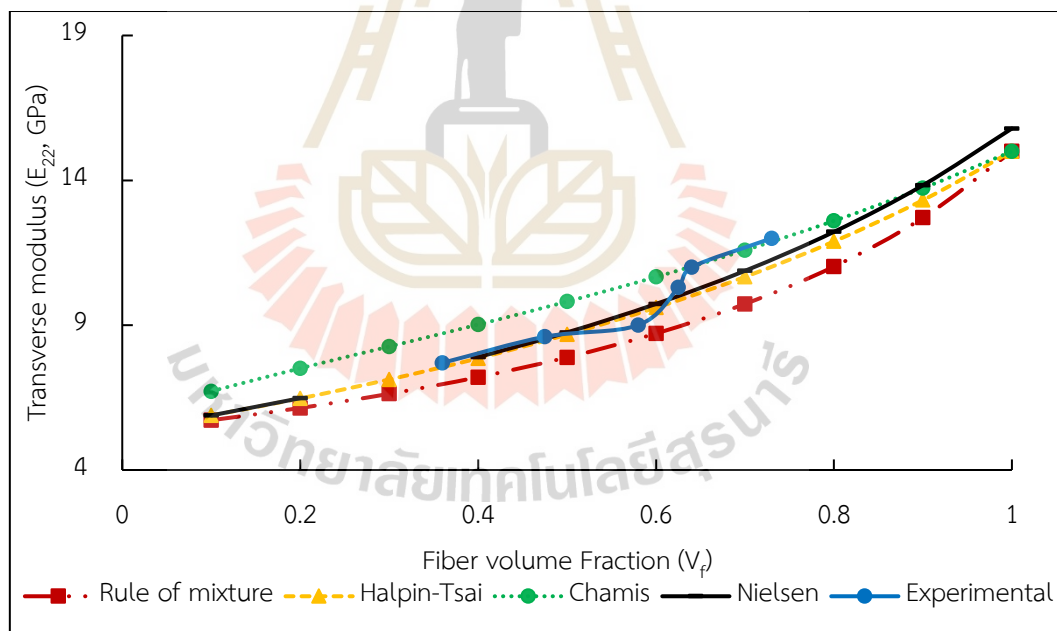
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal modulus และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียว

วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวที่มี Fiber volume fraction เท่ากับ 0.1 มีค่า Longitudinal modulus เท่ากับ 28 GPa และที่ Fiber volume fraction เท่ากับ

1 มีค่า 232 GPa ในส่วนของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียวมีค่า Longitudinal modulus เท่ากับ 12.125 GPa ที่ Fiber volume fraction เท่ากับ 0.1 และเพิ่มขึ้นเป็น 73.10 GPa โดยการเพิ่ม Fiber volume fraction เป็น 1 สามารถสังเกตได้ว่ารูปแบบสมการที่ใช้ในการคำนวณหา Longitudinal modulus ของโมเดล ROM, Chamis, Halpin-Tsai และ Nielsen เหมือนกัน ส่งผลให้ค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน

4.2.2 Transvers modulus

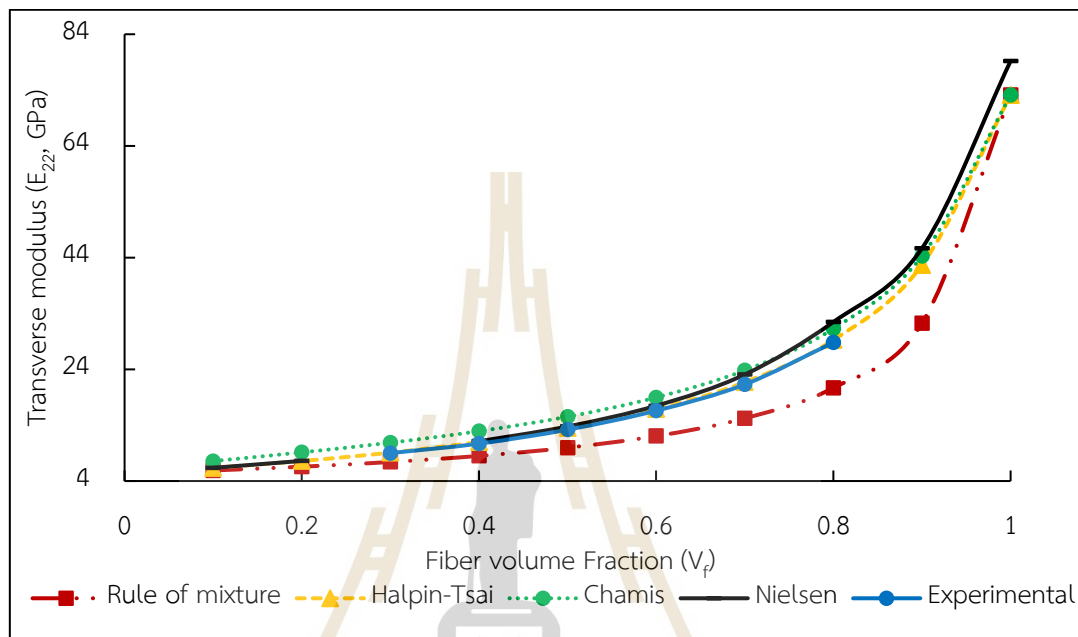
การวิเคราะห์ทางทฤษฎีมักจะเพิ่มขึ้นเมื่อ Fiber volume fraction เพิ่มขึ้น แนวการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเป็นไปตามแนวโน้มที่เป็นอิสระเกี่ยวกับ Transvers modulus ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวและวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทาง Transvers modulus ของวัสดุทั้งสองนั้นขึ้นอยู่กับค่า E_m ของเมทริกซ์และ E_{22} ของเส้นใยเป็นหลักค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียวจึงมีค่าที่สูงกว่าวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวเนื่องจากเส้นใยแก้วรับแรงในทิศทางขวางเส้นใยได้ดีกว่า การวิเคราะห์ทางทฤษฎีด้วยโมเดล ROM ให้ค่า Transvers modulus ต่ำที่สุดในขณะที่โมเดล Chamis ให้ค่า Transvers modulus สูงสุด



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Transvers modulus และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียว

การวิเคราะห์ด้วยโมเดล ROM แสดงค่า Transvers modulus ต่ำสุดของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียวที่ Fiber volume fraction เป็น 0.1 โดยมีค่า Transvers modulus เท่ากับ 2.180 GPa ซึ่งค่าสูงสุดที่กำหนดโดยโมเดล Nielsen คือ 29.950 GPa

การวิเคราะห์การทดสอบจริงนั้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกับโมเดล Halpin-Tsai มากกว่าโมเดลอื่น ๆ วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวแสดงค่า Transvers modulus สูงสุดโดยใช้โมเดล Nielsen ที่ Fiber volume fraction เท่ากับ 1 คือ 15.789 GPa Transvers modulus ต่ำสุดคำนวณโดยใช้โมเดล ROM ที่ 5.718 GPa



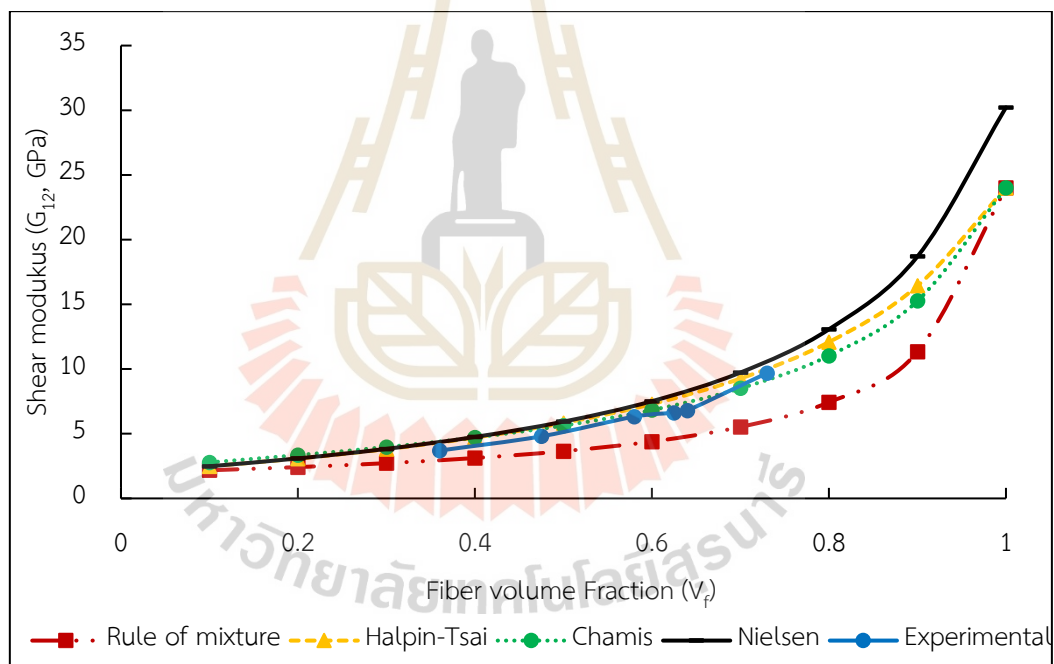
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Transvers modulus และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียว

4.2.3 Shear modulus

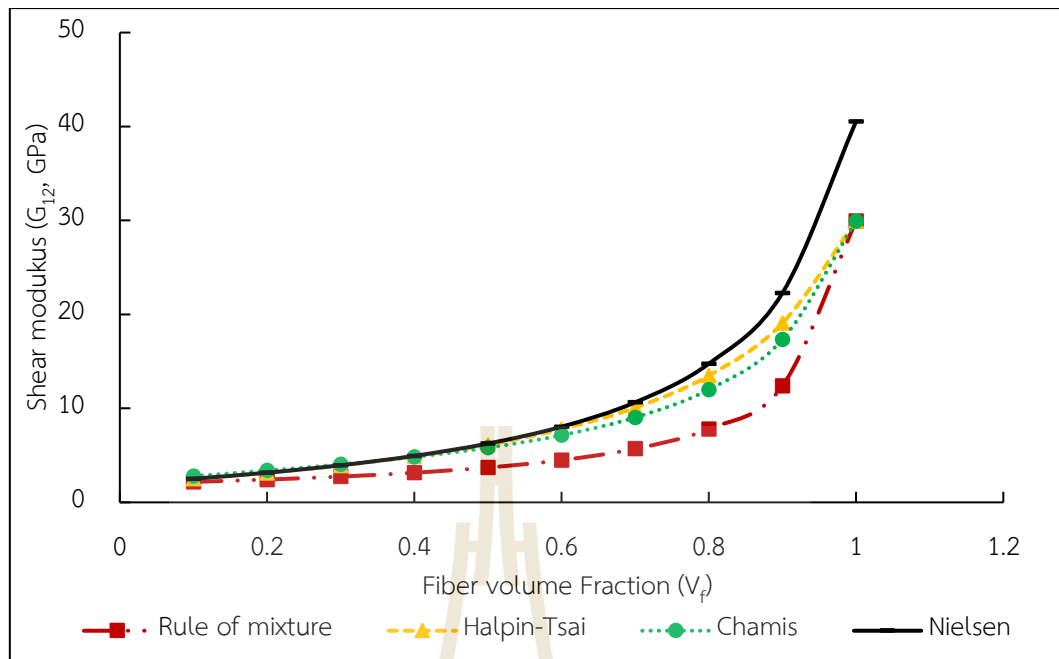
Shear modulus และ Fiber volume fraction ไม่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นดังที่เห็นในรูปที่ 4.5 Fiber volume fraction ที่เพิ่มขึ้นนั้นแปรผันตรงทำให้ Shear modulus ที่มีประสิทธิภาพ การวิเคราะห์ Shear modulus ของวัสดุคอมโพสิตนั้นใช้สมการในการคำนวณคล้ายกับ Transvers modulus พฤติกรรมของเส้นกราฟจึงเป็นไปในทิศทางเดียวกัน Shear modulus ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวและวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทาง Shear modulus ของวัสดุทั้งสองนั้นขึ้นอยู่กับค่า G_m ของเมทริกซ์และ G_{22} ของเส้นใยเป็นค่าหลักที่ได้จากการวิเคราะห์ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียวจึงมีค่าที่สูงกว่าวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวเนื่องจากเส้นใยแก้วรับแรงในทิศทางขวางเส้นใยได้ดีกว่า

โมเดล Nielson ถูกใช้ในการคำนวณ Shear modulus และพบว่า Shear modulus ที่ได้มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับโมเดลอื่น ๆ สำหรับวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียว ซึ่งคำนวณได้เท่ากับ 30.220 GPa (Fiber volume fraction เท่ากับ 1) โมเดล ROM ถูกใช้ในการคำนวณ Shear modulus และพบว่า Shear modulus ที่ได้มีค่าต่ำสุด 2.176 GPa แบบจำลอง Nielson ใช้ในการคำนวณ Shear modulus พบว่า Shear modulus สูงสุดสำหรับวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียวซึ่งคำนวณได้เป็น 40.552 GPa (Fiber volume fraction เท่ากับ 1) โมเดล ROM ใช้เพื่อวิเคราะห์ Shear modulus ต่ำสุด 5.896 GPa (Fiber volume fraction เท่ากับ 0.1)

รูปแบบการวิเคราะห์ทางทฤษฎีทั้งสี่ค่อนข้างมีแนวโน้มคล้ายกันและเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5% เช่นเดียวกับค่าความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเทียบกับการทดสอบจริงที่มีเปอร์เซ็นต์น้อยกว่า 5%



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียว

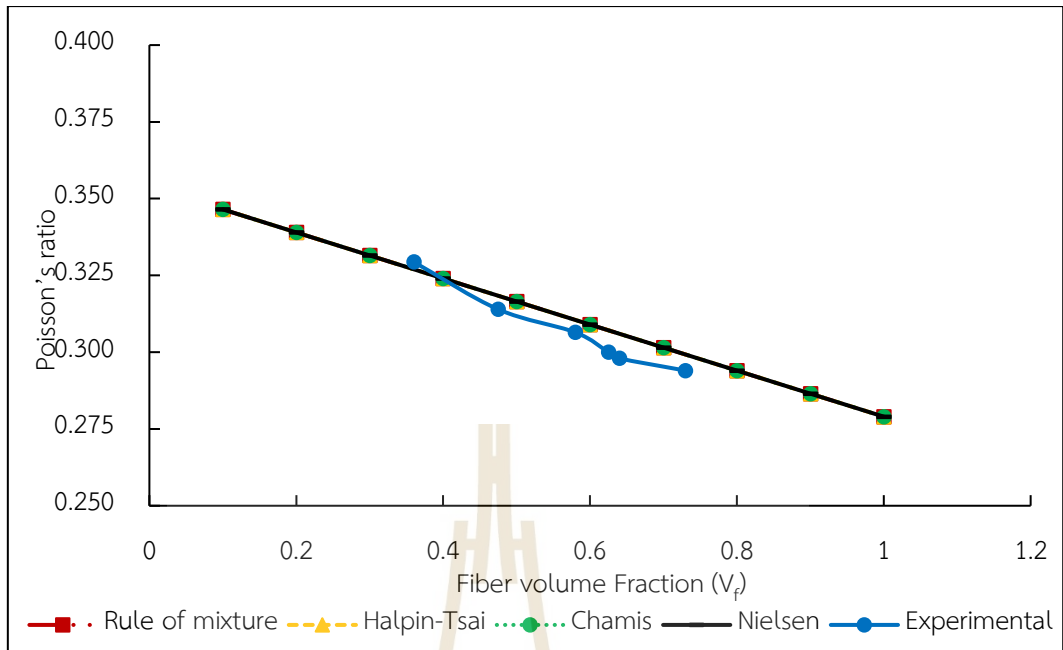


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียว

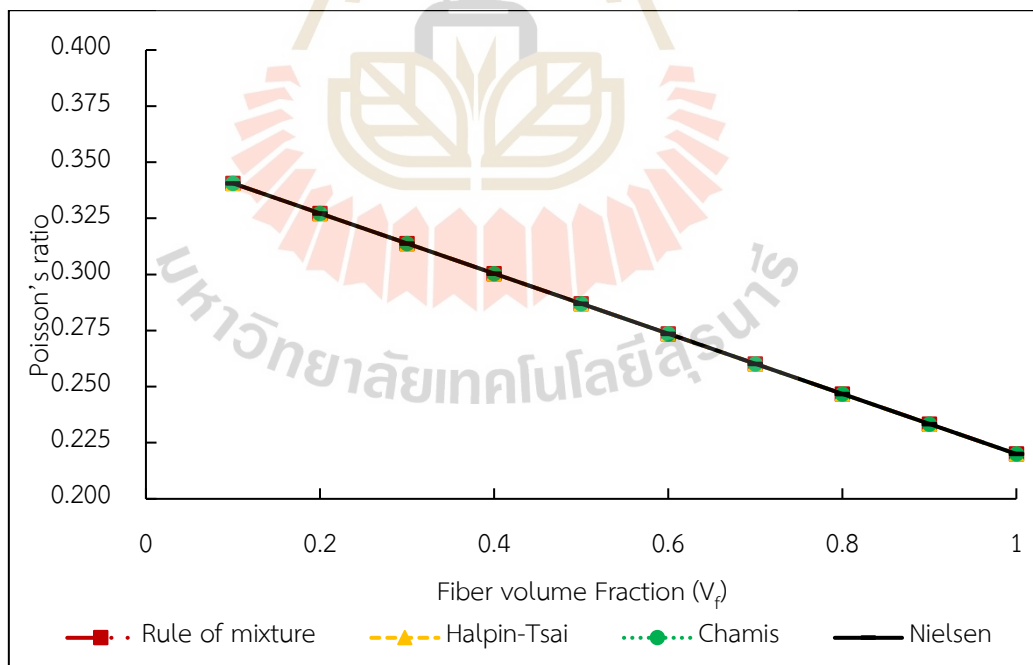
4.2.2 Poisson's ratio

Poisson's ratio ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวเท่ากับ 0.346 ที่ Fiber volume fraction เท่ากับ 0.1 แต่โดยการเพิ่ม Fiber volume fraction ที่ 1 จะลดลงเหลือ 0.279 และที่ Fiber volume fraction เท่ากับ 0.1 วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียวแสดง Poisson's ratio ที่ 0.341 และ 0.220 เมื่อ Fiber volume fraction เท่ากับ 1 ตามลำดับ

การวิเคราะห์ทางทฤษฎีแสดงให้เห็นว่า Poisson's ratio ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวและวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อค่า Fiber volume fraction เพิ่มขึ้น (ดังที่เห็นในรูปที่ 4.7 และ 4.8) ผลลัพธ์ของแนวทางเชิงทฤษฎีของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวคล้ายกับการวิเคราะห์ด้วยการทดสอบจริง แต่เนื่องด้วยในการทดสอบจริงมีปัจจัยหลายอย่างมากเกี่ยวข้อง เช่น ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ ความคลาดเคลื่อนของผู้ทดสอบ เป็นต้น ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบจริงจึงมีค่าที่ต่ำกว่าและมีลักษณะลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือกล่าวคือข้อมูลที่ได้มีความกว้าง



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Poisson's ratio และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียว



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Poisson's ratio และ Fiber volume fraction ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียว

4.3 สรุปผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตทางทฤษฎี

การศึกษาในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบทิศทางเดียวและวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบทิศทางเดียว Fiber volume fraction ที่แตกต่างกันถูกใช้เพื่อระบุผลกระทบของปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบจริง การวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการวิเคราะห์ทางทฤษฎีทั้งหมดแสดงข้อตกลงที่ดีมากสำหรับ Longitudinal modulus (E_{11}) , Transvers modulus (E_{22}) , Shear modulus และ Poisson's ratio (ν_{12}) อย่างไรก็ตาม โมเดล Chamis และโมเดล Halpin-Tsai ถือได้ว่าเป็นแบบจำลองที่สมบูรณ์ที่สุด ซึ่งสามารถให้ค่าประมาณที่แม่นยำมากสำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติทั้ง 4 การวิเคราะห์ทางทฤษฎีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการทดสอบจริง แต่ด้วยการทดสอบจริงมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อคุณสมบัติทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อน

บทที่ 5

การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต

ลามิเนตคอมโพสิตและแซนด์วิชคอมโพสิตมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอากาศยาน ขนส่ง และยานยนต์ เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่าวัสดุอื่นๆ (เช่น น้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ และอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง) (Aneta et al., 2016) โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตเป็นส่วนสำคัญในการส่งเสริมคุณสมบัติเชิงกลที่ดี ในการผลิตวัสดุคอมโพสิตนั้นจึงควรคำนึงถึงประเภทวัสดุและกระบวนการที่เลือกใช้ในการผลิต ประเภทของวัสดุที่ใช้ (เช่น พอลิเมอร์เมทริกซ์และเส้นใยเสริมแรง) จะให้คุณสมบัติที่สำคัญเมื่อวัสดุคอมโพสิตถูกประดิษฐ์ขึ้นภายใต้กระบวนการผลิตที่ดี คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตไม่ได้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่เลือกใช้เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตด้วย ลามิเนตคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนั้นจะประกอบด้วยเส้นใยชั้นบาง ๆ ที่ฝังอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ในส่วนโครงสร้างของแซนด์วิชคอมโพสิตประกอบด้วยเส้นใยบางหลายชั้นและวัสดุแกนกลาง (Core) จำพวกโฟมที่ผลิตจาก PVC อยู่ตรงกลางระหว่างชั้นของเส้นใย การเพิ่มวัสดุแกนกลางมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตในด้านความแข็งแรง ลดความหนาแน่น และความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Dweib et al., 2004), (Li et al., 2017)

เส้นใยเสริมแรงมีหลายประเภทที่ใช้ในโครงสร้างแซนด์วิชคอมโพสิต (เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นใยเคฟลาร์) (Zangana et al., 2020), (Gustin et al., 2005) หน้าที่หลักของเส้นใยคือการเสริมแรงของวัสดุเพื่อให้คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตดีขึ้น สามารถรับแรงกระทำได้ดี ถึงแม้ว่าวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนจะมีจุดเด่นในเรื่องความแข็งแรงสูง แต่วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วก็ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากต้นทุนต่ำและความทนทานต่อการเสียดสีสูง (Sathishkumar et al., 2014) ในอุตสาหกรรมยานยนต์และการอากาศยานมักใช้อีพ็อกซีเรซินเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ สิ่งนี้ให้คุณสมบัติเชิงกลและทางความร้อนที่ดีขึ้น (Huang et al., 2002) อีกแนวทางในการปรับปรุงความแข็งแรงต่อน้ำหนักของวัสดุคอมโพสิตที่ดีขึ้นคือการใช้ วัสดุแกนกลางที่มีน้ำหนักเบา (เช่น PVC foam, Aluminum, Aramid และแกนน้ำหนักรเบาของ Balsa เป็นต้น) วัสดุแกนกลางแกนโฟมโพลีไวนิลคลอไรด์หรือ PVC foam ถูกใช้ในชั้นส่วนของอากาศยาน เช่น ปีก ประตูห้องส้วม ช่องเก็บของ และพื้น เป็นต้น เนื่องจาก PVC foam มีอัตราส่วนน้ำหนักที่มีประสิทธิภาพสูง มีความต้านทานแรงกระแทกที่ดี ใช้เป็นฉนวนกันเสียงและฉนวนกันความร้อน (CASTANIE et al., 2020)

แม้ว่าจะมีเทคนิคมากมายในกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกล แต่กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือ นั้นเกิดขึ้นจากการสิ้นเปลืองต้นทุนและต้องใช้อุปกรณ์เทคโนโลยีขั้นสูงน้อยลง ในการแข่งขันอากาศยานไร้คนขับของนักศึกษาและงานอดิเรก กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือถือว่าเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดในเรื่องของต้นทุนและเวลา สิ่งนี้ทำได้โดยการวางเส้นใยเสริมแรงบนแม่พิมพ์แล้วใช้อีพ็อกซีเรซินทาทับลงบนเส้นใย (Tamilarasana et al., 2015) ตัวอย่างการใช้กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือในระดับนักศึกษานั้นคือการประดิษฐ์ลำตัวแบบโมโนค็อกและกึ่งโมโนค็อกของรถ Formular และการประดิษฐ์ลำตัวของอากาศยานไร้คนขับ เป็นต้น (Joham et al., 2020) เมื่อไม่นานมานี้มีการศึกษาการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วโดยมีโพลีเอสเตอร์เรซินเป็นเมทริกซ์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ การศึกษาพบว่าวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วมีความต้านทานแรงดึงสูงสุด 78.83 MPa และความเค้นดัดที่ 119.23 MPa (EL-Wazery et al., 2017) อีกหนึ่งกระบวนการผลิตที่นิยมใช้ซึ่งถูกพัฒนามาจากกระบวนการขึ้นรูปด้วยมือคือกระบวนการแวก์คัมแบ็กกิ้ง เป็นกระบวนการที่จะใช้สูญญากาศช่วยทำให้เมทริกซ์แทรกซึมเข้าไปในทั่วทั้งเส้นใย กระบวนการนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีรูปทรงซับซ้อนและขนาดใหญ่ เช่น ใบกังหันลม มีการศึกษาคุณสมบัติการรับแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วโดยใช้กระบวนการแวก์คัมแบ็กกิ้ง พบว่าความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้นตามค่าความดันที่ใช้ในระหว่างการผลิต นอกจากนี้ยังได้ศึกษาวิธีการผลิตแบบเดียวกัน แต่วัสดุคอมโพสิตได้รับการบ่มที่อุณหภูมิต่างกันเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงโดยใช้เตาอบลมร้อน ความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการบ่มเพิ่มขึ้น (Naghdinasab et al., 2018) คุณสมบัติแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิการบ่มในระหว่างกระบวนการผลิต โดยปกติวัสดุคอมโพสิตจะบ่มที่อุณหภูมิห้องเพื่อง่ายต่อการผลิต อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้นมีส่วนทำให้คุณสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการบ่มวัสดุคอมโพสิตที่อุณหภูมิห้อง (Li X., Wang J., Li J., 2020)

ในบทนี้มุ่งเน้นไปที่เปรียบเทียบกระบวนการผลิตและคุณสมบัติเชิงกลของลามิเนตคอมโพสิตและแซนด์วิชคอมโพสิตโดยใช้เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอนและแกนโฟมพีวีซี กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือและกระบวนการแวก์คัมแบ็กกิ้งที่อุณหภูมิห้องจะดำเนินการศึกษา และการเปรียบเทียบกระบวนการกระบวนการแวก์คัมแบ็กกิ้งระหว่างอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิการบ่มที่สภาวะ 80 °C นอกจากนี้ยังมีการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเมื่อปรับเปลี่ยนชนิดของเส้นใยเสริมแรง แรงดัดงอของชิ้นงานทดสอบที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยกระบวนการต่าง ๆ จะถูกตรวจสอบโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM)

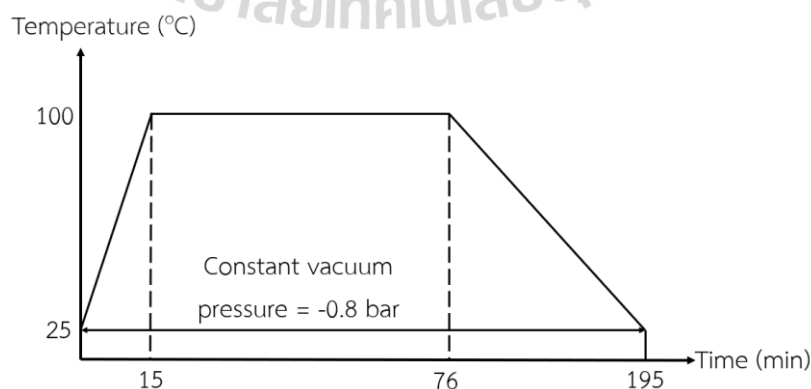
5.1 ระเบียบวิธีวิจัยการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต

5.1.1 วัสดุ

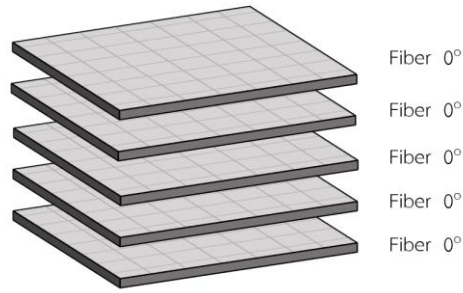
วัสดุคอมโพสิตผลิตจากเส้นใยเสริมแรงที่ต่างกันสองประเภทคือ เส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน โดยมีเมทริกซ์เป็นอีพ็อกซีเรซิน (ER550) ใช้อัตราส่วนการผสมระหว่างอีพ็อกซีเรซินและตัวเร่งเรซินอยู่ที่ 100:35 โฟมโพลีไวนิลคลอไรด์หรือ PVC foam ถูกใช้เป็นวัสดุแกนกลางแกนสำหรับแซนด์วิชคอมโพสิต

5.1.2 การเตรียมวัสดุคอมโพสิต

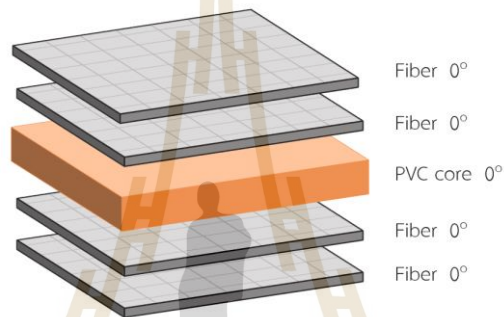
กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือเริ่มต้นด้วยการใช้ Acetone ทำความสะอาด Aluminum mold เพื่อป้องกันไม่ให้มีสิ่งสกปรกเจือปนในชิ้นงาน จากนั้นทาน้ำยาถอดแบบ (PVA) ลงบน Aluminum mold เพื่อป้องกันชิ้นงานติดกับ mold ขั้นตอนต่อไปคือการนำเส้นใยที่มีขนาด $20 \times 20 \text{ cm}^2$ ในทิศทาง 0° ลงบนแผ่น Aluminum mold นำอีพ็อกซีเรซินเทลงบนชั้นเส้นใยแล้วเกลี่ยอีพ็อกซีเรซินให้กระจายตัวครอบคลุมทั่วทั้งเส้นใยและทำซ้ำจนครบทั้ง 5 ชั้น จากนั้นใช้กระบวนการแวคคัมแบ็กกิ้งช่วยกดให้อีพ็อกซีเรซินแทรกซึมไปทั่วเส้นใยและช่วยดึงอากาศออกจากชิ้นงานที่เกิดจากกระบวนการทำด้วยมือ โดยใช้แผ่นลอกแบบ (Peel ply) คลุมชิ้นงานทั้งหมด จำกัดทิศทางการไหลของเรซินและอากาศโดยใช้แผ่นรีลีสฟิล์ม (Release film) ตามด้วยการวางแผ่นฟิล์มกันอากาศ (Bagging Film) และแผ่นช่วยนำอากาศออก (Breather Fabrics) ทำการปิดขอบแผ่นฟิล์มลงบนขอบแม่แบบด้วยซีลแลนท์เทป (Sealant Tape) และใช้เครื่องปั๊มแวคคัมดูดอากาศออกจากชิ้นงานที่แรงดัน -0.8 bar สุดท้ายทำการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 hr (รูปที่ 5.1) การเตรียมลามิเนตคอมโพสิตและแซนด์วิชคอมโพสิตจะใช้กระบวนการเดียวกันโดยชั้นของลามิเนตคอมโพสิตจะประกอบด้วย [F/F/F/F/F] และแซนด์วิชคอมโพสิตประกอบด้วย [F/F/Core/F/F] ดังรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาขณะอบชิ้นงาน



รูปที่ 5.2 ลามิเนตคอมโพสิต



รูปที่ 5.3 แซนด์วิชคอมโพสิต

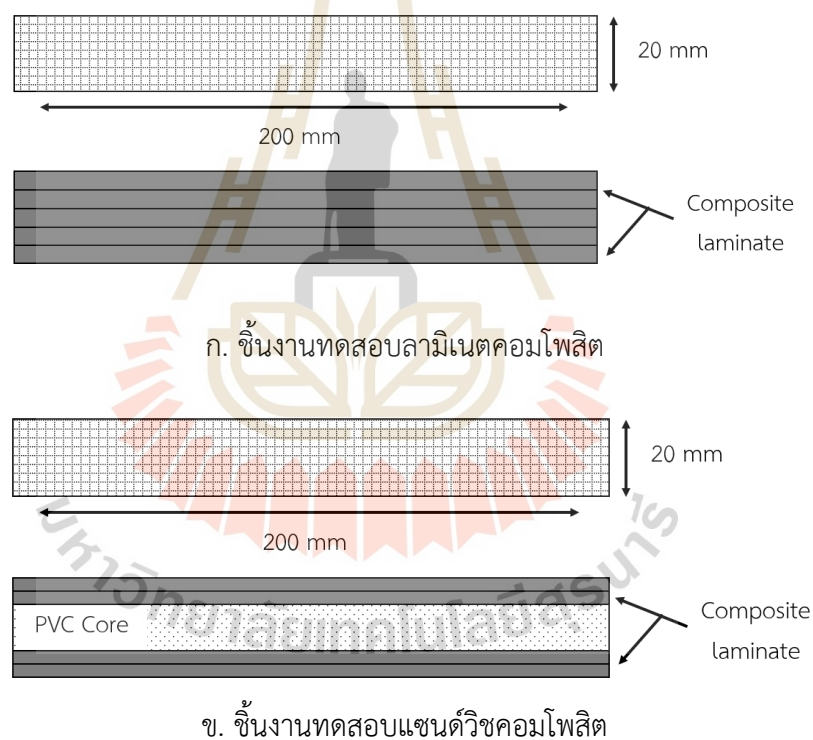
ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างชิ้นงานสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกล

กระบวนการขึ้นรูป	ชิ้นงานทดสอบ	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (bar)	โครงสร้าง
การขึ้นรูปด้วยมือ	HLT25	25	-	ลามิเนต
	HST25	25	-	แซนด์วิช
การขึ้นรูปด้วยมือและแว็คคัมแบ็กกิ้งที่อุณหภูมิห้อง	VLT25	25	-0.8	ลามิเนต
	VST25	25	-0.8	แซนด์วิช
การขึ้นรูปด้วยมือและแว็คคัมแบ็กกิ้งที่อุณหภูมิสูง	VLT80	80	-0.8	ลามิเนต
	VST80	80	-0.8	แซนด์วิช

อักษรตัวแรกของสัญลักษณ์แต่ละชั้นแสดงถึงกระบวนการขึ้นรูป เช่น 'H' หมายถึงการขึ้นรูปด้วยมือ (Hand lay-up) 'V' หมายถึงแว็คคัมแบ็กกิ้ง (Vacuum bagging) ตัวอักษรถัดไปแสดงถึงโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตแสดงถึงเช่น 'L' หมายถึงลามิเนตคอมโพสิต (Laminate composite) 'S' หมายถึงแซนด์วิชคอมโพสิต (Sandwich composite) และตัวอักษรสุดท้ายตามด้วยตัวเลข เช่น 'T25' แสดงถึงอุณหภูมิในการอบขึ้นงาน เช่น 'T25' หมายถึงขึ้นงานถูกรอบที่อุณหภูมิ 25 °C

5.1.3 การทดสอบวัสดุคอมโพสิต

ชิ้นงานมีขนาด $200 \times 20 \times 2 \text{ mm}^3$ (รูปที่ 5.4) ซึ่งถูกจัดทำขึ้นตามมาตรฐาน ASTM D790-02 [24] สำหรับการทดสอบแรงดัดงอแบบสามจุดด้วยเครื่อง UTM ภายใต้ความเร็วการเคลื่อนที่ของคานทดสอบ 1.2 mm/min ความกว้างของฐานทดสอบที่ 1 ถึงฐานทดสอบที่ 2 เท่ากับ 100 mm โดยทำการทดสอบชิ้นงานจำนวน 5 ครั้ง/ชิ้นงานทดสอบ

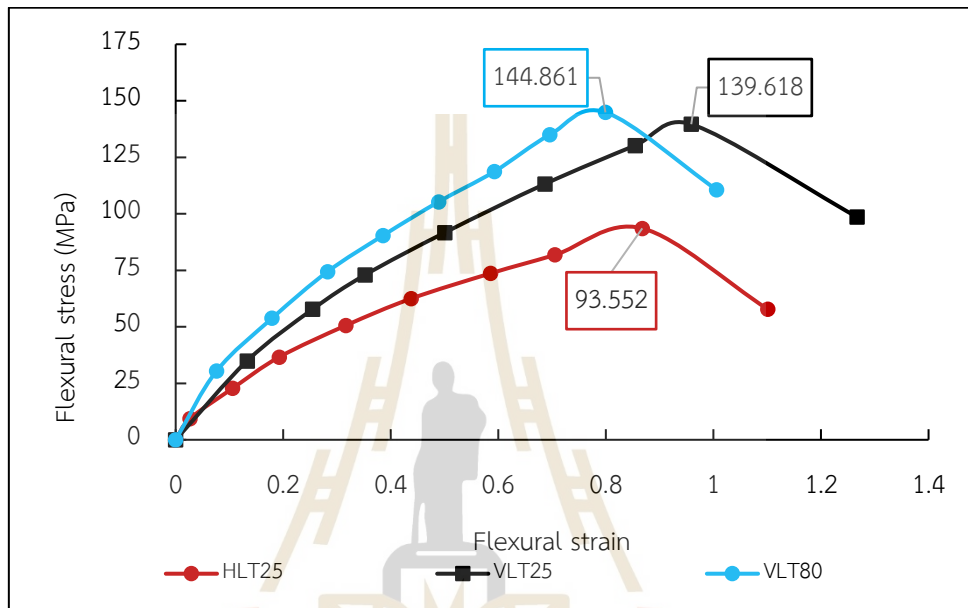


รูปที่ 5.4 ชิ้นงานทดสอบแรงดัดงอแบบสามจุด

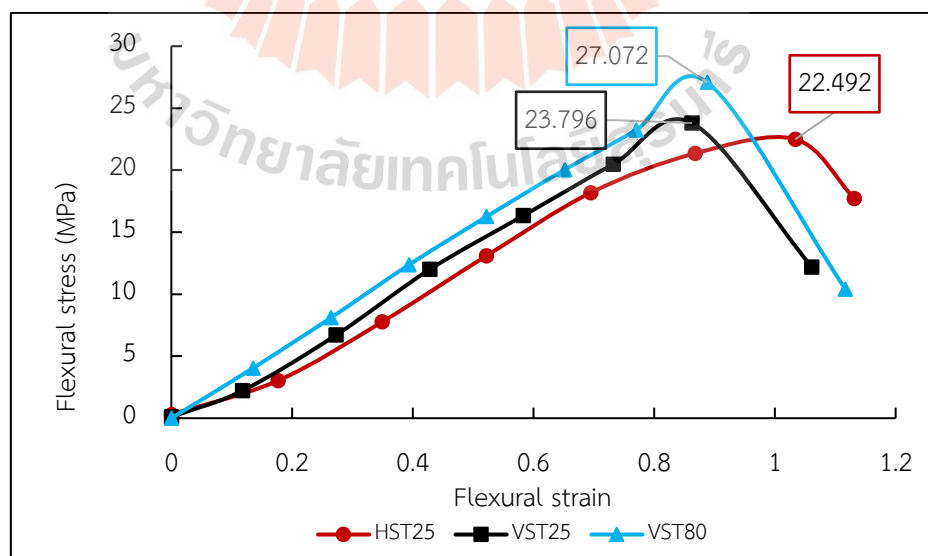
5.2 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต

ในการทดสอบวัสดุคอมโพสิตเพื่อดูแนวโน้มของความสัมพันธ์ของ Flexural stress และ Flexural strain ของลามิเนตคอมโพสิตภายใต้โหมดการรับแรงดัดแบบสามจุดแสดงให้เห็นถึงค่า Flexural stress ที่แตกต่างกันเมื่อปรับเปลี่ยนกระบวนการขึ้นรูป (ดังรูปที่ 5.5) Flexural stress ของลามิเนตคอมโพสิตที่ทำการขึ้นรูปด้วย

กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือที่ค่าต่ำที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 93.552 MPa ถัดมาคือลามิเนตคอมโพสิตที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเวิร์คคัมแบ็กกิ้งที่อุณหภูมิห้อง 139.618 MPa และสุดท้ายคือการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเวิร์คคัมแบ็กกิ้งอุณหภูมิ 80 °C แสดงว่า Flexural stress ที่มากที่สุดคือ 144.861 MPa กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือเป็นกระบวนการที่ไม่มีแรงดันเข้ามาช่วยในการแทรกซึมของอีพ็อกซีเรซินให้ครอบคลุมทั่วทั้งเส้นใย อีกทั้งยังทำให้เกิดฟองอากาศเป็นจำนวนมากในระหว่างการผลิต ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตสามารถมีค่า Flexural stress ต่ำที่สุด

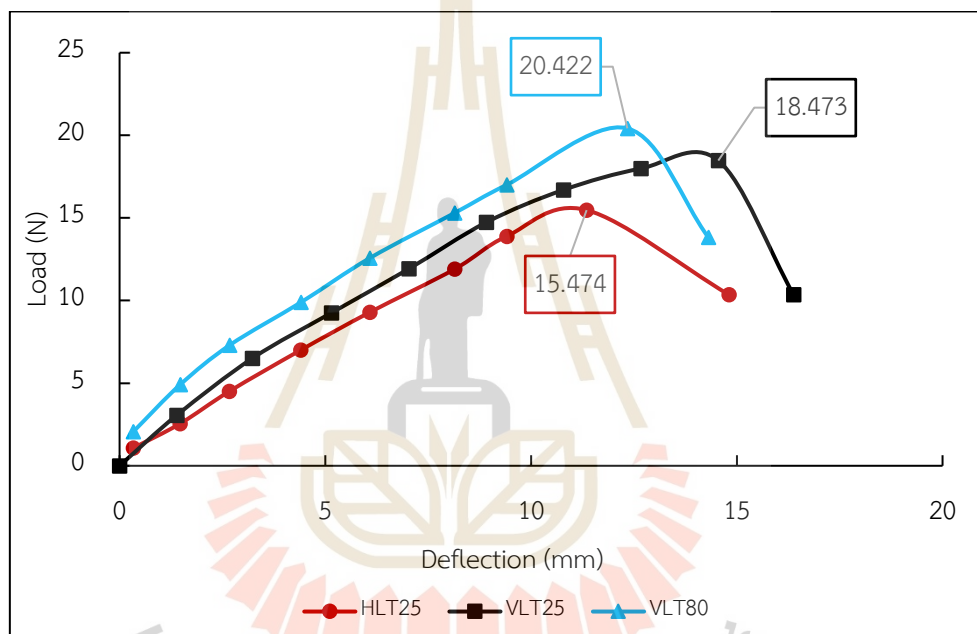


รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของ Flexural stress และ Flexural strain ของลามิเนตคอมโพสิต



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของ Flexural stress และ Flexural strain ของเส้นคาร์บอนคอมโพสิต

ความสัมพันธ์ระหว่าง Flexural stress และ Flexural strain ของแซนด์วิชคอมโพสิต (รูปที่ 5.6) แสดงค่าแนวโน้มเหมือนกับลามิเนตคอมโพสิตคือการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปด้วยมือที่ค่าต่ำที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 22.492 MPa ถัดมาคือการขึ้นรูปด้วยกระบวนการแว็คคัมแบ็กกิ้งที่อุณหภูมิห้อง 23.795 MPa และสุดท้ายคือการขึ้นรูปด้วยกระบวนการแว็คคัมแบ็กกิ้งที่อุณหภูมิ 80 °C แสดงว่า Flexural stress ที่มากที่สุดคือ 27.072 MPa Flexural stress ของแซนด์วิชคอมโพสิตมีค่าต่ำกว่าลามิเนตคอมโพสิตเนื่องจากวัสดุทั้งสองค่าความหนาที่แตกต่างกัน ความหนาของวัสดุทั้งสองแสดงถึงพื้นที่หน้าตัดในการรับแรงที่แตกต่างกัน แซนด์วิชคอมโพสิตมีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าลามิเนตคอมโพสิตจึงส่งผลให้มีค่า Flexural stress ต่ำกว่านั่นเอง

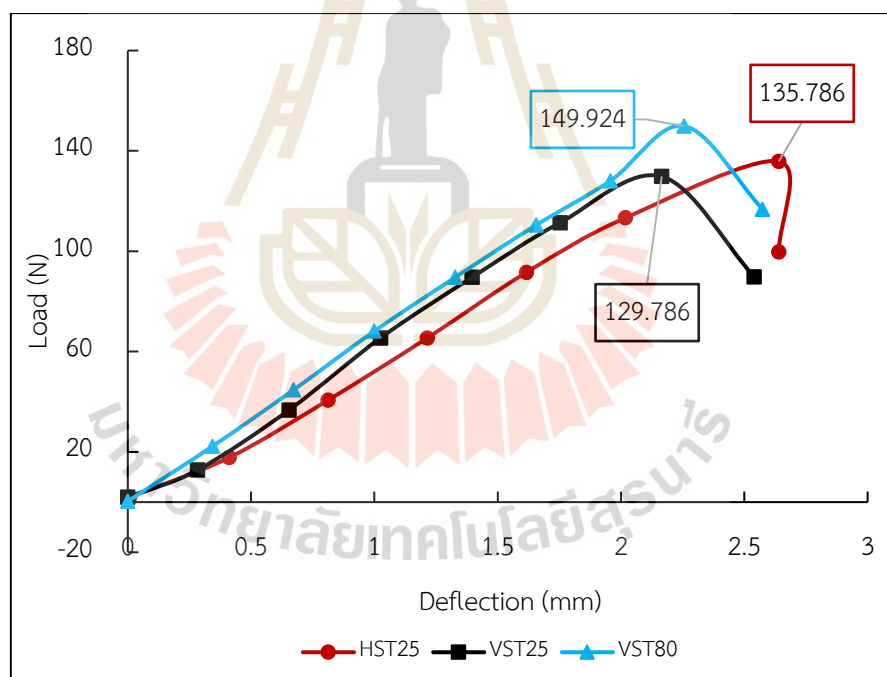


รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของ Deflection และ Load ของลามิเนตคอมโพสิต

อุณหภูมิในการขึ้นรูปของวัสดุคอมโพสิตและอุณหภูมิในการบ่มวัสดุคอมโพสิตส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุ จากรูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของ Deflection และ Load ของลามิเนตคอมโพสิต ค่า Load ของลามิเนตคอมโพสิตที่ใช้กระบวนการแว็คคัมแบ็กกิ้งที่อุณหภูมิ 80 °C มีค่าสูงที่สุดคือ 20.422 N กระบวนการแว็คคัมแบ็กกิ้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นการให้ความร้อนกับวัสดุคอมโพสิตพร้อมทั้งใช้ความดันในการกดอ็อกซีเรชั่นให้แทรกซึมไปทั้งเส้นใย การอบวัสดุคอมโพสิตด้วยอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิต การขึ้นรูปด้วยกระบวนการแว็คคัมแบ็กกิ้งที่อุณหภูมิห้องนั้นแสดงค่า Load ที่สูงกว่ากระบวนการขึ้นรูปด้วยมือ เนื่องจากมีการใช้แรงดันในการดัดพองอากาศออกจากชิ้นงานและกดอ็อกซีเรชั่นไปพร้อม ๆ กัน ค่า Load จึงมีค่าเท่ากับ

18.473 N ในส่วนของชิ้นงานทดสอบที่ใช้กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือ นั้นแสดงค่าที่ต่ำที่สุด อาจเกิดจากการที่อีพ็อกซีเรซินไม่ได้ครอบคลุมทั้งเส้นใย และยังเกิดฟองอากาศในระหว่างการผลิตอีกด้วย ฟองอากาศที่มากส่งผลให้ Load ที่วัสดุรับได้ลดน้อยลง การปรับเปลี่ยนกระบวนการขึ้นรูปของวัสดุคอมโพสิตนั้นยังไม่เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของระยะโก่งตัวหรือ Deflection เนื่องจากค่าที่ได้ของวัสดุมีค่าแทบจะไม่ต่างกันมากนัก แต่สามารถสังเกตได้ว่าการที่ใช้ความดันในการกดช่วยให้วัสดุมีค่า Deflection เพิ่มขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติของอีพ็อกซีเรซินที่สามารถยึดตัวได้ดีกว่าเส้นใยแก้ว

แซนดวิชคอมโพสิตสามารถรับแรงได้สูงกว่าลามิเนตคอมโพสิตเนื่องจากมีการนำ PVC core เข้ามาช่วยในการรับแรงกระทำ ค่า Load ของแซนดวิชคอมโพสิตที่ใช้กระบวนการขึ้นรูปเว็คคัมแบ็กก็งสูงถึง 149.924 N ซึ่งต่างจากค่าของลามิเนตคอมโพสิตที่ใช้กระบวนการขึ้นรูปเดียวกันถึง 129.502 N Load ที่กระทำกับแซนดวิชคอมโพสิตสูงกว่าลามิเนตคอมโพสิตนอกจากเกิดจากคุณสมบัติของเส้นใยและ PVC core แล้วยังเกิดจากที่วัสดุคอมโพสิตมีความหนาที่เพิ่มขึ้นด้วย

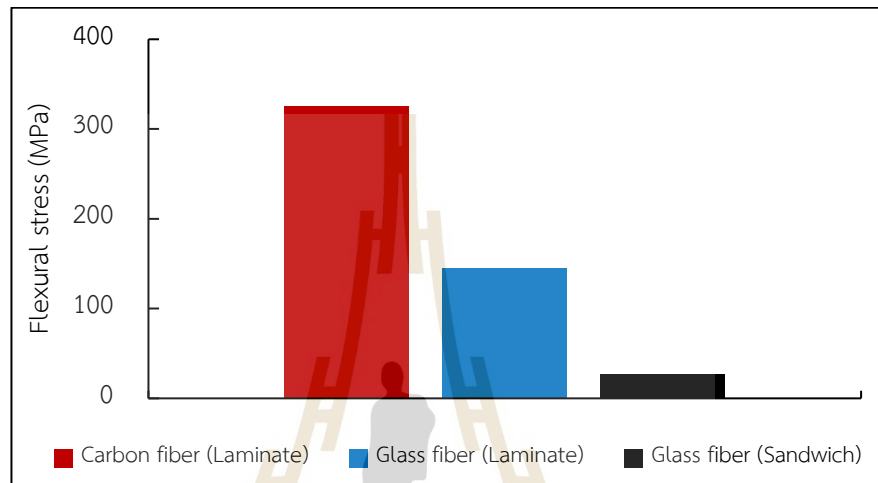


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ของ Deflection และ Load ของแซนดวิชคอมโพสิต

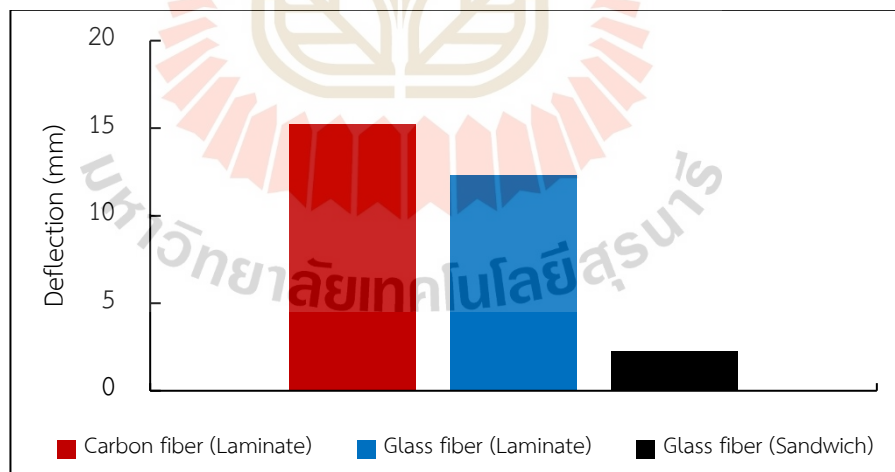
นอกจากการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตภายใต้กระบวนการขึ้นรูปที่เปลี่ยนแปลงไป ยังมีการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเมื่อทำการปรับเปลี่ยนเส้นใยเสริมแรง ในการศึกษาทำให้ทราบถึงการใช้เส้นใยคาร์บอนในการเสริมแรงมีค่า Flexural stress สูงถึง 325.23 MPa ซึ่งมากกว่าลามิเนตคอมโพสิตที่มีเส้นใยแก้วเป็นเส้นใยเสริมแรงถึง 180.369 N และ

มากกว่าแซนด์วิชคอมโพสิตที่มีเส้นใยแก้วเป็นเส้นใยเสริมแรงเท่ากับ 298.158 N โดย Flexural stress ของวัสดุคอมโพสิตที่นำมาเปรียบเทียบกันนั้นเป็นการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเว็คคัมแบ็กกิ้ง

ในส่วนของ Deflection ของวัสดุนั้นแสดงให้เห็นถึงการเพิ่ม PVC core ให้กับวัสดุคอมโพสิต ส่งผลเสียต่อค่า Deflection การใช้เส้นใยในการขึ้นรูปจะทำให้วัสดุมีค่า Deflection ที่ดี นั้นหมายถึง ค่า Deflection ของวัสดุคอมโพสิตเป็นผลมาจากคุณสมบัติของเส้นใยเป็นหลัก



รูปที่ 5.9 Flexural stress ของวัสดุคอมโพสิต



รูปที่ 5.10 Deflection ของวัสดุคอมโพสิต

5.3 สรุปผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต

จากการศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการผลิตและคุณสมบัติเชิงกลของลามิเนตคอมโพสิตและแซนดวิชคอมโพสิตโดยใช้เส้นใยแก้ว พบว่ากระบวนการผลิตส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต กระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกันส่งผลให้เกิด Flexural stress, Load และ Deflection ในการศึกษาครั้งนี้ ลามิเนตคอมโพสิตและแซนดวิชคอมโพสิตภายใต้กระบวนการแฉีกคัมแบ็กที่ 80°C มีคุณสมบัติที่โดดเด่น PVC core ช่วยให้คอมโพสิตสามารถรับน้ำหนักได้สูงขึ้น ในขณะที่ลามิเนตคอมโพสิตเสริมด้วยเส้นใยให้ความแข็งแรงรับแรงดัดงอมากกว่าวัสดุคอมโพสิตแบบแซนดวิชคอมโพสิต เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กที่ต้องรับน้ำหนัก กระบวนการแฉีกคัมแบ็กส่งผลต่อพื้นที่หน้าตัดขึ้นเส้นใยถูกบีบอัดระหว่างกระบวนการ อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิการบ่มที่อุณหภูมิห้องแสดงพฤติกรรมเปราะของลามิเนตและแซนดวิชคอมโพสิต ความสามารถของวัสดุ เกิด Flexural stress, Load และ Deflection ค่อนข้างขึ้นอยู่กับการเคลือบและการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ นอกจากนี้การปรับเปลี่ยนเส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยเสริมแรงยังแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติเชิงกลที่โดดเด่นกว่าการใช้เส้นใยแก้วเป็นเส้นใยเสริมแรงทั้งในส่วนลามิเนตคอมโพสิตและแซนดวิชคอมโพสิต



บทที่ 6

การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางทฤษฎีและไฟไนต์เอลิเมนต์

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยมีการเติบโตเป็นอย่างมาก เนื่องจากความสามารถในการแทนที่วัสดุอื่นได้โดยมีคุณสมบัติความหนาแน่นที่ต่ำกว่า ความแข็งแรงที่ดีกว่า การนำความร้อนต่ำ ทนการกัดกร่อนสูงและทนต่อการสึกหรอ วัสดุคอมโพสิตเป็นการรวมความเหนียวของพลาสติกเข้ากับความแข็งแรงของเส้นใยเสริมแรง ส่งผลให้สามารถใช้งานในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย (Dweib et al., 2004), (Li et al., 2020)

คุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตสามารถพิจารณาได้จากเทคนิคต่าง ๆ เช่น การทดลองทฤษฎี และวิธีการคำนวณ (Boransan et al., 2021) การศึกษาคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตด้วยการทดลองมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลกระทบบ เช่น กระบวนการขึ้นรูป ทักษะการผลิต และเครื่องมือการผลิต เป็นต้น ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยกล้วยและเส้นใยแก้วเป็นวัสดุเสริมแรง พบว่าวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยมีค่าการต้านทานแรงดึงที่ต่ำกว่า การเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วกล่าวคือวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยเสริมแรงเป็นวัสดุธรรมชาติจะให้ค่าการต้านทานแรงดึงที่ต่ำกว่าวัสดุเสริมแรงที่สังเคราะห์ขึ้น (Brancati et al., 2019) และ Wong et al. ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเสริมแรงต่างกันสองประเภท พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยเสริมแรงแบบสานธรรมดา (Plain Weave) มีความต้านทานแรงดึง การดัดงอ และแรงเฉือนสูงกว่าวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยเสริมแรงแบบทิศทางเดียว (Unidirectional) นอกจากนี้คุณสมบัติเชิงกลที่ยืดหยุ่นของเส้นใยเสริมแล้ว อีพ็อกซีเรซินมักใช้เป็นเมทริกซ์ เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ ข้อดีของวัสดุนี้มีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักต่ำ โมดูลัสสูง ความคืบต่ำ และคุณสมบัติทางความร้อนที่ดีเยี่ยม (Ming Ming et al., 2018)

กลุ่มวิจัยต่าง ๆ ได้พัฒนาวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของคอมโพสิตโดยพิจารณาจากทฤษฎีบท Rule of Mixture (ROM), Chamis, Nielsen และ Halpin-Tsai (Kim H.G and Kwac L.K., 2009), (Hadi et al., 2021) ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาการคำนวณด้วยการจำลองได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในสาขาวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมต่าง ๆ สามารถจำลองคุณสมบัติยืดหยุ่นได้โดยใช้วิธี Finite Element (FEM) [10] ตัวแทนปริมาณองค์ประกอบ (RVE) ถูกจำลองโดย ANSYS® Material Designer (MD) ซึ่ง FEM ถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างในการศึกษาคุณสมบัติการยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตภายใต้ volume fraction ต่าง ๆ ผลลัพธ์ FEM

ถูกนำมาเปรียบเทียบกับแนวทางเชิงทฤษฎี เช่น Rule of Mixture (ROM), Chamis, Nielsen และ Halpin-Tsai การตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตพบว่า FEM สามารถลดความซับซ้อนและปรับปรุงความแม่นยำในการวิเคราะห์วัสดุคอมโพสิตได้ (Sudheer et al., 2015), (Vignoli et al., 2019)

วัตถุประสงค์หลักของบทนี้คือการศึกษาค่า Elastic properties ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซินและวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยลินิน/อีพ็อกซีเรซิน ด้วย Finite Element Method (FEM) ควบคู่ไปกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี FEM ดำเนินการโดย ANSYS® Workbench 20214 ภายใต้การปรับเปลี่ยน fiber volume fraction ตั้งแต่ 0.1-1

6.1 ระเบียบวิธีวิจัยการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางทฤษฎีและไฟไนต์เอลิเมนต์

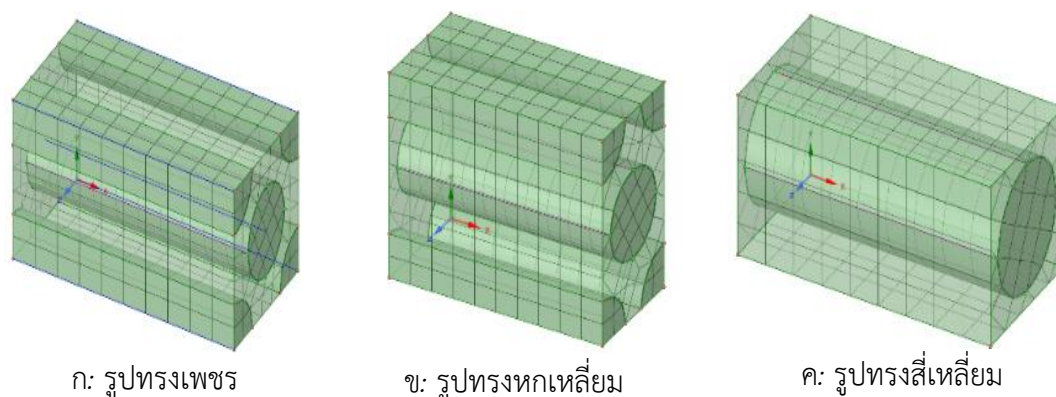
6.1.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตทางทฤษฎี

การวิเคราะห์จะนำเอาสมการทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ มาประเมินเพื่อค่า elastic properties ของวัสดุคอมโพสิต เช่น Shear modulus, Young's modulus และ Poisson's ratio ในทิศทางตามแนวเส้นใยและแนวขวางเส้นใย ซึ่งโมเดลต่าง ๆ ที่ใช้ในการประเมิน elastic properties ของวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ Rule of mixture, Halpin-Tsai และ Chamis (บทที่ 4)

6.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

Material Designer Ansys ถูกนำมาใช้สำหรับการดำเนินการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตแบบทิศทางเดียวที่เสริมแรงด้วยเส้นใยโดยมีอีพ็อกซีเรซินเป็นเมทริกซ์ ซึ่งใช้เทคนิคการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันของ RVE ทั้งสามรูปแบบคือ รูปทรงสี่เหลี่ยม (Square shape) รูปทรงเพชร (Diamond shape) และรูปทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal shape) โดยกำหนดให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 ไมโครเมตร วัสดุคอมโพสิตถูกพิจารณาในกรณีที่ไม่มีช่องว่างเกิดขึ้นระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยเสริมแรง และพันธะระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยเสริมแรงเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ไม่มีข้อผิดพลาด

ในการคำนวณคุณสมบัติของวัสดุนั้น จำเป็นต้องมีค่าคุณสมบัติยืดหยุ่นของเส้นใยเสริมแรงและเมทริกซ์ โดยสันนิษฐานว่าเส้นใยเป็นวัสดุออร์โธโทรปิก (Orthotropic) และเมทริกซ์เป็นวัสดุไอโซโทรปิก (Isotropic) คุณสมบัติของวัสดุถูกอ้างอิงจากงานวิจัย (Younes et al., 2555) ดังที่แสดงในตารางที่ 6.1



ก: รูปทรงเพชร

ข: รูปทรงหกเหลี่ยม

ค: รูปทรงสี่เหลี่ยม

รูปที่ 6.1 รูปทรง RVE

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิต

คุณสมบัติของวัสดุ	วัสดุ		
	เส้นใยคาร์บอน	เส้นใยลินิน	อีพ็อกซีเรซิน
Longitudinal modulus, E_{11} (GPa)	232	54.1	5.35
Transverse modulus, E_{22} (GPa)	15	7.0	5.35
Transverse modulus, E_{33} (GPa)	15	7.0	5.35
Longitudinal shear modulus, G_{12} , (GPa)	24	3.0	1.976
Transverse shear modulus, G_{23} (GPa)	5.034	2.0	1.976
Transverse shear modulus, G_{13} (GPa)	24	3.0	1.976
Major Poisson's ratio, ν_{12}	0.279	0.3	0.354
Minor Poisson's ratio, ν_{23}	0.49	0.75	0.354
Minor Poisson's ratio, ν_{13}	0.279	0.3	0.354

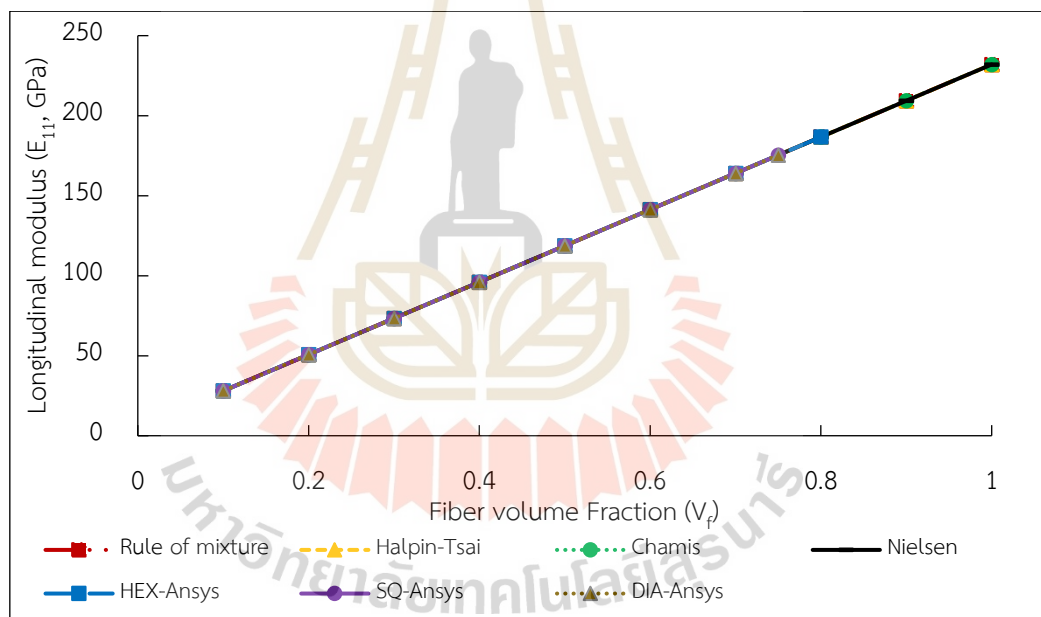
6.2 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางทฤษฎีและไฟไนต์เอลิเมนต์

6.2.1 Longitudinal modulus

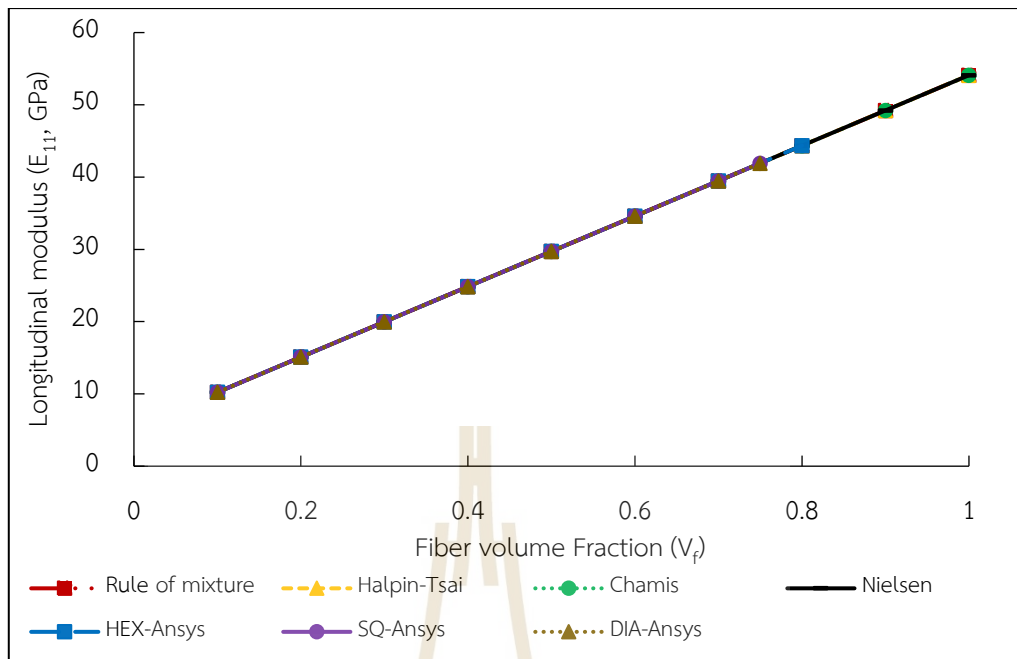
การวิเคราะห์ทางทฤษฎีแสดงให้เห็นว่า Longitudinal modulus ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน และวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยลินิน/อีพ็อกซีเรซินเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในขณะที่ Fiber volume fraction ดังที่เห็นในรูปที่ 6.2 และ 6.3 ผลลัพธ์

ของการวิเคราะห์ทางทฤษฎีแสดงแนวโน้มเหมือนกับการวิเคราะห์ด้วย FEM เป็นอย่างมาก สามารถดูได้จากค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่น้อยกว่า 2% ผลการวิเคราะห์ด้วย FEM ของ RVE ทั้งสามรูปแบบมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่น้อยกว่า 1% และการใช้ RVE รูปทรงหกเหลี่ยมมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซินที่ใช้ Fiber volume fraction เท่ากับ 1 มีค่า Longitudinal modulus เพิ่มขึ้นจาก Fiber volume fraction เท่ากับ 0.1 เท่ากับ 28 GPa เป็น 232 GPa ตามลำดับ เช่นเดียวกับ Longitudinal modulus ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยลินิน/อีพ็อกซีเรซินมีค่าอยู่ที่ 10.2 GPa ตาม Fiber volume fraction เป็น 0.1 และเพิ่มขึ้นเป็น 54 GPa โดยการเพิ่ม Fiber volume fraction เท่ากับ 1 สามารถสังเกตได้ว่า Longitudinal modulus ที่วิเคราะห์ด้วยโมเดล ROM, Chamis, Halpin-Tsai และ Nielsen มีผลลัพธ์ที่คาดหวังเหมือนกันกับ FEM ทั้งหมด



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal modulus และ Fiber volume fraction (เส้นใยคาร์บอน)

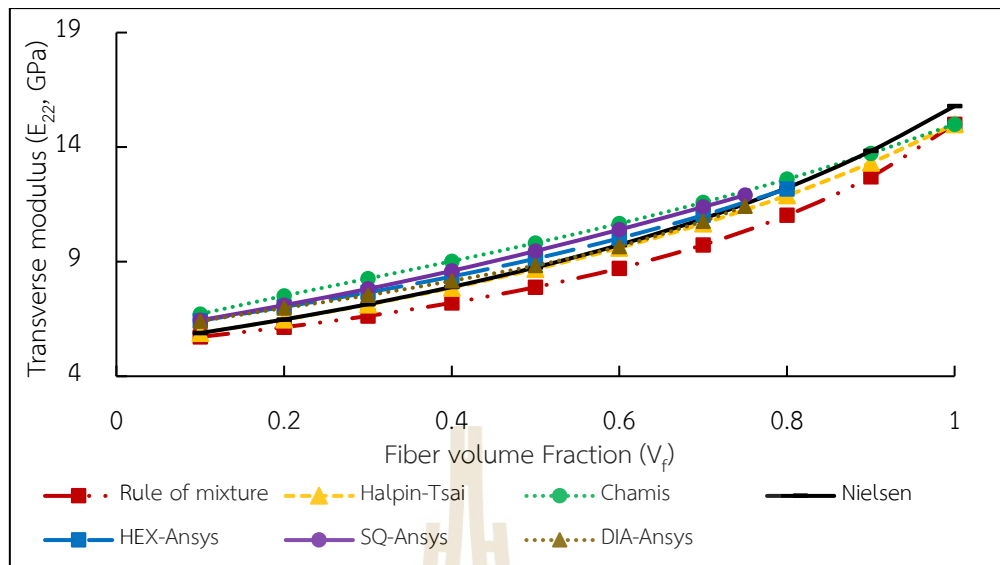


รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Longitudinal modulus และ Fiber volume fraction (เส้นใยลินิน)

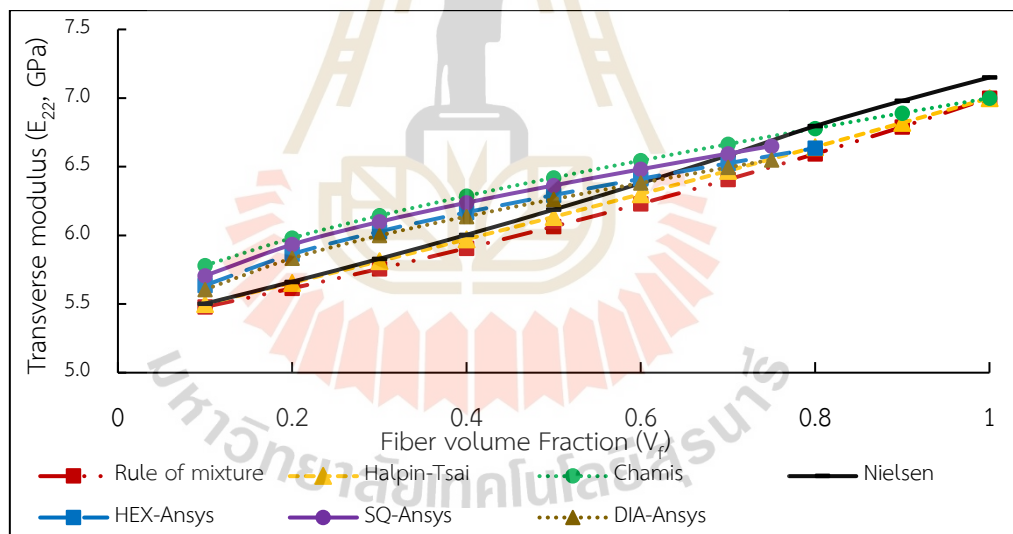
6.2.2 Transvers modulus

การวิเคราะห์ด้วย FEM และการวิเคราะห์ทฤษฎีมักจะเพิ่มขึ้นเมื่อ Fiber volume fraction เพิ่มขึ้น Transvers modulus ของวัสดุคอมโพสิตถูกควบคุมด้วยอิทธิพลของคุณสมบัติอีพ็อกซีเรซินเป็นหลัก ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน และวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยลินิน/อีพ็อกซีเรซินจึงมีค่าต่างกันไม่มาก ผลการวิเคราะห์ด้วย FEM การใช้ RVE รูปทรงสี่เหลี่ยมมีค่าความคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี การใช้โมเดล ROM สามารถวิเคราะห์ค่า Transvers modulus ต่ำที่สุด (เทียบกับทฤษฎีอื่น ๆ) ในขณะที่โมเดล Chamis ให้ค่าสูงสุด

การใช้โมเดล ROM แสดงค่า Transvers modulus ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยลินิน/อีพ็อกซีเรซินที่ Fiber volume fraction มีค่าเป็น 0.1 เท่ากับ 5.5 GPa ค่าสูงสุดของ Transvers modulus ที่สามารถวิเคราะห์ได้กำหนดโดยรุ่น Chamis คือ 7.15 GPa จากแบบจำลองการวิเคราะห์ด้วย FEM ทั้งสามรูปแบบแนวโน้มในผลการวิเคราะห์ด้วยรูปทรงสี่เหลี่ยมจะใกล้เคียงที่สุดกับแบบโมเดล Chamis (รูปที่ 6.4) Transvers modulus วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซินถูกประมาณโดยใช้โมเดล Chamis ที่ Fiber volume fraction มีค่าเป็น 0.1 เท่ากับ 15.789 GPa และที่ Fiber volume fraction มีค่าเป็น 0.1 ที่ 5.718 GPa



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Transvers modulus และ Fiber volume fraction (เส้นใยคาร์บอน)

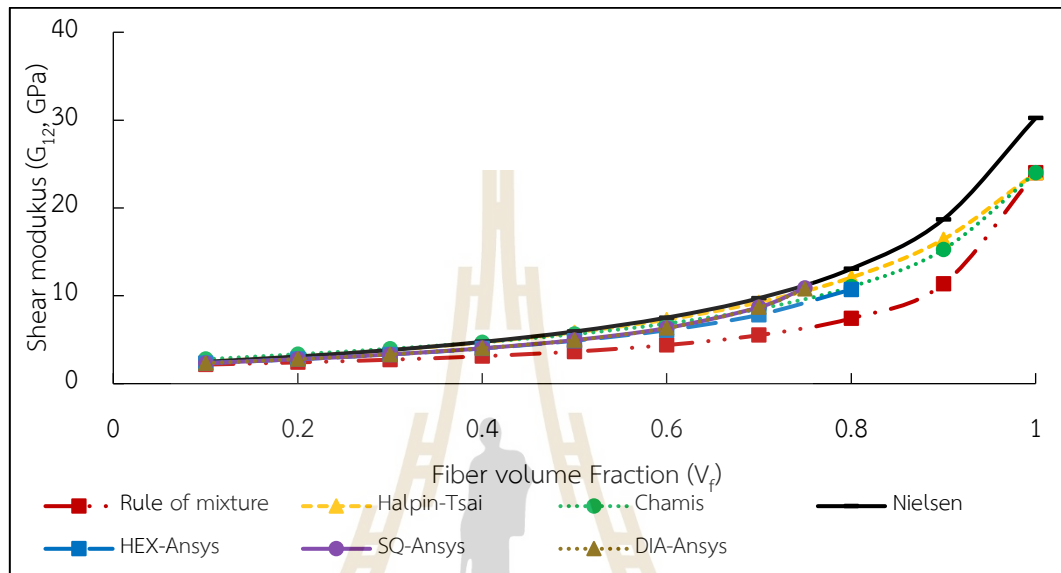


รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Transvers modulus และ Fiber volume fraction (เส้นใยคิโนน)

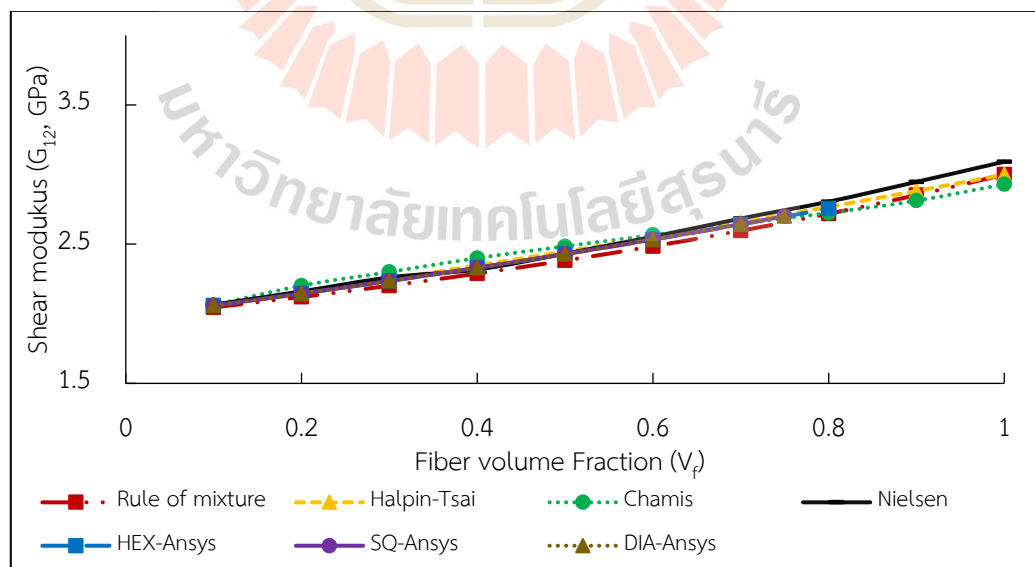
6.2.3 Shear modulus

Shear modulus และ Fiber volume fraction ไม่มีได้แสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ดังที่เห็นในรูปที่ 6.6 Fiber volume fraction แบบแปรผันตรงกับ Shear modulus ทำให้ Shear modulus เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โมเดล Nielson, Halpin-Tsai และ Chamis ของการวิเคราะห์ทาง

ทฤษฎีมีแนวโน้มของกราฟที่ใกล้เคียงกันในผลการวิเคราะห์ด้วย FEM ของ RVE ทั้งสามรูปแบบ อย่างไรก็ตาม โมเดล Nielson ถูกใช้ในการคำนวณ Shear modulus สูงสุดสำหรับวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน ซึ่งคำนวณได้เท่ากับ 30.220 GPa (Fiber volume fraction = 1) โมเดล ROM แสดงค่า Shear modulus ต่ำสุด 2.176 GPa



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus และ Fiber volume fraction (เส้นใยคาร์บอน)

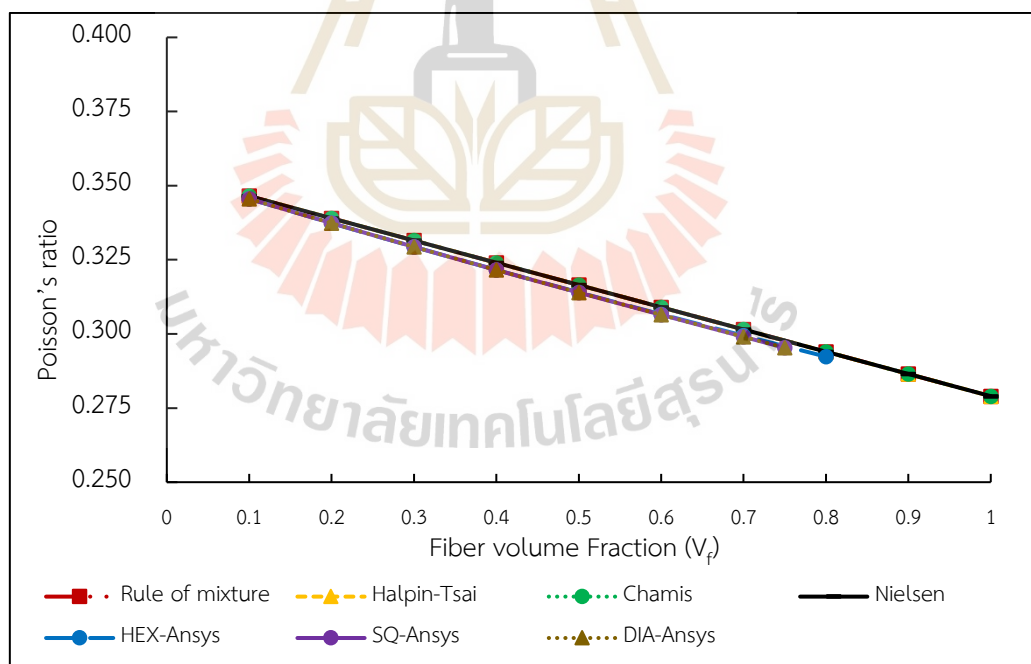


รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus และ Fiber volume fraction (เส้นใยคีลีน)

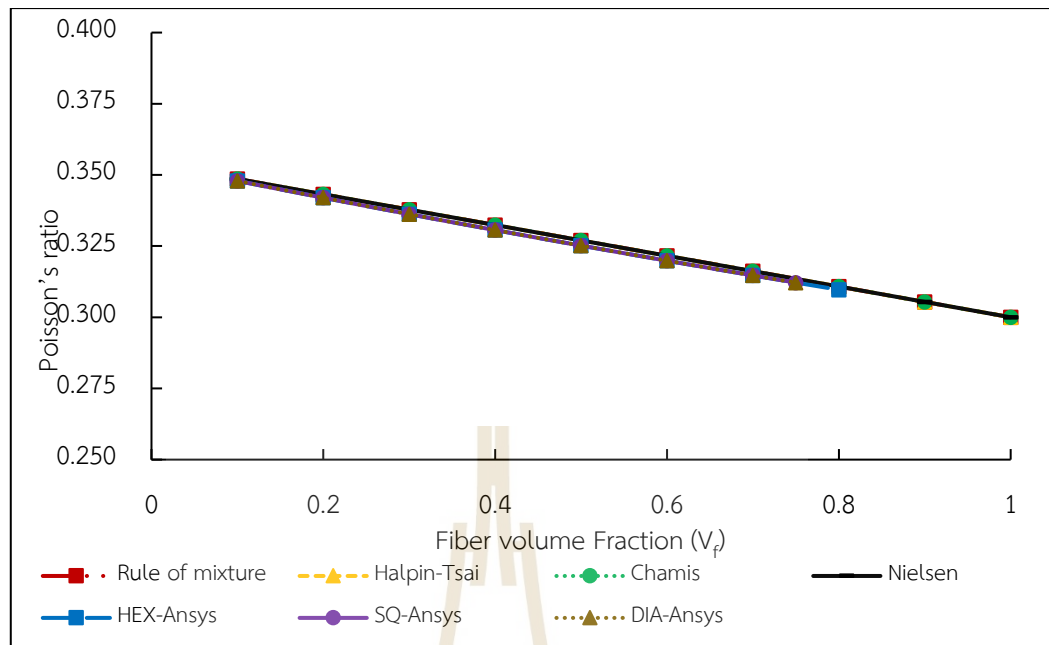
แบบจำลองการวิเคราะห์ FEM ทั้งสามแบบมีแนวโน้มในผลลัพธ์การวิเคราะห์ที่คล้ายกับวิธีทางทฤษฎี (รูปที่ 6.6) รูปแบบของแบบจำลองการวิเคราะห์ FEM ทั้งสามแบบค่อนข้างคล้ายกันมีเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนน้อยกว่า 2% ในส่วนของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยลินิน/อีพ็อกซีเรซิน (รูปที่ 6.7) พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5% เมื่อเทียบผลการวิเคราะห์ด้วย FEM และการวิเคราะห์ทางทฤษฎี โมเดล Nielson สามารถคำนวณ Shear modulus ได้สูงกว่าโมเดลอื่น ๆ ซึ่งคำนวณได้เป็น 3.094 GPa (Fiber volume fraction = 1) และโมเดล ROM สามารถคำนวณ Shear modulus ได้ต่ำกว่าโมเดลอื่น ๆ ซึ่งคำนวณได้เป็น 2.145 GPa (Fiber volume fraction = 0.1)

6.2.4 Poisson's ratio

แบบจำลองการวิเคราะห์ FEM ทั้งสามแบบแสดงแนวโน้มในผลลัพธ์การวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับวิธีทางทฤษฎี (รูปที่ 6.8 และ 6.9) ผลลัพธ์ของวิธีการทางทฤษฎีแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของ Poisson's ratio อย่างต่อเนื่องในวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซินและวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยลินิน/อีพ็อกซีเรซินในขณะที่ Fiber volume fraction ลดลง



รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Poisson's ratio และ Fiber volume fraction (เส้นใยคาร์บอน)



รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Poisson's ratio และ Fiber volume fraction (เส้นใยลินิน)

ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ทางทฤษฎีแสดงแนวโน้มเหมือนกับการวิเคราะห์ด้วย FEM เป็นอย่างมาก สามารถดูได้จากค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่น้อยกว่า 2% ผลการวิเคราะห์ด้วย FEM ของ RVE ทั้งสามรูปแบบมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่น้อยกว่า 1% และการใช้ RVE รูปทรงสี่เหลี่ยมมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี Poisson's ratio ของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซินเท่ากับ 0.346 ที่ (Fiber volume fraction = 0.1) แต่โดยการเพิ่ม Fiber volume fraction ที่ 1 จะลดลงเหลือ 0.279 เช่นเดียวกับวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยลินิน/อีพ็อกซีเรซินที่แสดง Poisson's ratio เท่า 0.346 และ 0.349 ของการลดลงของ Fiber volume fraction จาก 1 เป็น 0.1 ตามลำดับ

6.3 สรุปผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางทฤษฎีและไฟไนต์เอลิเมนต์

บทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติการยืดหยุ่นของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน/อีพ็อกซีเรซิน และวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยลินิน/อีพ็อกซีเรซิน ความแข็งของวัสดุคำนวณโดยใช้โครงสร้างของ RVE ที่แตกต่างกันสามรูปแบบ Fiber volume fraction ที่แตกต่างกันถูกใช้เพื่อระบุผลกระทบของปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ที่จำลอง RVE ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีทางทฤษฎี ควรสังเกตว่ากรณีศึกษาวิจัยครอบคลุมวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ANSYS® Material Designer มอบโซลูชันที่แข็งแกร่งในการคำนวณความแข็งแรงแบบทิศทางเดียวของวัสดุคอมโพสิต การวิเคราะห์ FEM มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะทำนายคุณสมบัติที่เป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุคอมโพสิตแบบทิศทางเดียว การวิเคราะห์เทคนิค RVE เช่น รูปแบบเพชร รูปแบบหกเหลี่ยม และรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้ผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกันกับวิธีการทางทฤษฎี การวิเคราะห์ FEM ด้วย RVE สี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความสอดคล้องกับแบบจำลอง Halpin-Tsai มากกว่าเพชรและรูปทรงหกเหลี่ยม อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ RVE ทั้งสามรายการภายใต้การเปลี่ยนแปลงในส่วนของคุณสมบัติเส้นใยมักจะใกล้เคียงกับแบบจำลอง Halpin-Tsai ทั้ง FEM และการวิเคราะห์ทางทฤษฎีทำให้เห็นผลชัดเจนมาก การปรับปรุง Longitudinal modulus, Transvers modulus และ Shear modulus สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของ Fiber volume fraction ในขณะที่ Poisson's ration ลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ Fiber volume fraction



บทที่ 7

การวิเคราะห์แรงดึงของวัสดุคอมโพสิต

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา การใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความสามารถในการแทนที่วัสดุอื่น ๆ ด้วยที่มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่า ความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูง และการนำความร้อนต่ำ วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยมักทำจากพอลิเมอร์เมทริกซ์เสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นหรือเส้นใยสาน พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่นิยมใช้ได้แก่อีพ็อกซี ไวนิลเอสเตอร์ และโพลีเอสเตอร์ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นและราคาวัสดุต่ำ เส้นใยแก้ว เส้นใยอะรามิด และเส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยเสริมแรงที่ใช้กันทั่วไปในวัสดุคอมโพสิต เส้นใยส่วนใหญ่ถูกเติมลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของความแข็งแรง โมดูลัส และทนต่อแรงกระแทก เส้นใยเสริมแรงแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน มีความเหมาะสมในการทำงานที่หลากหลาย เส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยที่ยาวและบาง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-10 ไมโครเมตร พันธะอะตอมของคาร์บอนเกือบหรือขนาดไปกับแกนตามความยาวของเส้นใยทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงมากเมื่อเทียบกับขนาดเส้นใย (sohna et al., 2000)

วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนมีคุณสมบัติเฉพาะคือมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูงกว่าวัสดุที่เป็นโลหะ จึงถูกใช้ในการผลิตลำตัวของโบอิง 787 ดรีมไลเนอร์ (Boeing 787 Dreamliner) และ แอร์บัส เอ350 (Airbus A350) แทนวัสดุอลูมิเนียม ส่งผลให้เครื่องบินมีน้ำหนักที่เบาลงและมีประโยชน์เพิ่มเติมในการบำรุงรักษาที่น้อยลง เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนมีความทนทานต่อความล้าที่เหนือกว่า อุตสาหกรรมการกีฬาใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยในการผลิตอุปกรณ์มากมาย ได้แก่ คันเบ็ด ไม้แร็กเกต และเฟรมจักรยาน เฟรมจักรยานที่ผลิตจากเส้นใยคาร์บอนมีน้ำหนักน้อยกว่าที่ผลิตจากอลูมิเนียมหรือเหล็กกล้า และยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า

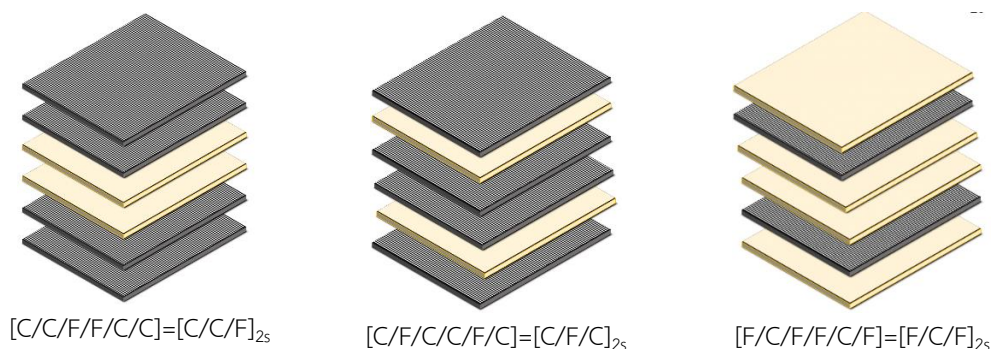
การวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์ (FEA) เป็นเครื่องมือทางวิศวกรรมที่สำคัญที่ใช้ในการช่วยในการประมาณและตรวจสอบการตอบสนองภายใต้สภาวะการโหลดภายนอกและภายในที่หลากหลาย Singh et al. ทำการทดลองโดยเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ของเส้นใยเทียบกับน้ำหนักของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งแสดงให้เห็นความแตกต่างของความต้านทานแรงดึงและแรงดัดของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยและไม่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใย ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น 14.5% และการดัดงออยู่ที่ 123.65% เมื่อเพิ่มน้ำหนักเส้นใย 20% ในอีพ็อกซีบริสุทธิ์ เนื่องจากแรงดัดสูง ความแข็ง

ของคอมโพสิตจึงดีขึ้นอย่างมาก สังเกตพบความเค้นสูงสุดสำหรับแรงดึงและแรงดัดอยู่ที่กึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบที่เกิดการแตกหัก และได้รับการพิสูจน์โดยผลการวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์ Dyson Bruno et al. วิเคราะห์พอลิโพรพิลีนเสริมใยแก้วและอีพ็อกซีเสริมใยเคนาฟโดยใช้ FEA กับเปอร์เซ็นต์ของเส้นใยเทียบกับน้ำหนักต่างๆ พฤติกรรมแรงดึงสำหรับการวางแนวชั้นต่างๆ แสดงให้เห็นว่าความเค้นค่อย ๆ ลดลง ณ จุดหนึ่งจนถึงระดับวิกฤต จากผลลัพธ์ เป็นที่ชัดเจนว่าแผ่นลามิเนตของคอมโพสิตอีพ็อกซีเสริมใยแก้วน้ำหนักเบาที่มีความต้านทานแรงดึงที่ดีที่สัดส่วนปริมาตรไฟเบอร์ 60% Velmurugan et al. ดำเนินการวิเคราะห์คุณสมบัติแรงดึงของอีพ็อกซีคอมโพสิตเสริมใยปาล์มไมรา การจำลองดำเนินการโดยใช้ FEA ภายใต้การปรับเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ของเส้นใยเทียบกับน้ำหนักและความยาวไฟเบอร์ที่แตกต่างกัน และผ่านการตรวจสอบกับผลการทดลองและพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่า ในบทนี้จะทำการศึกษากการตรวจสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตด้วยโปรแกรม Ansys

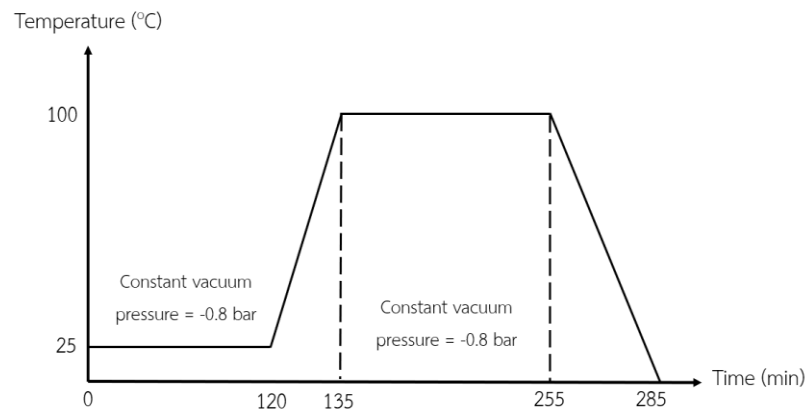
7.1 ระเบียบการวิจัยการวิเคราะห์แรงดึงของวัสดุคอมโพสิต

7.1.1 การผลิตวัสดุคอมโพสิต

กระบวนการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตทำคล้ายกับการศึกษาในบทที่ 5 คือการใช้กระบวนการเว็คคัมแบ็กกิ้ง อีพ็อกซีเรซินถูกเทลงบนชั้นเส้นใยที่ถูกจัดวางตามรูปที่ 7.1 แล้วเกลี่ยอีพ็อกซีเรซินให้กระจายตัวครอบคลุมทั่วทั้งเส้นใยและทำซ้ำจนครบทุกชั้น จากนั้นใช้แรงดันช่วยกดให้อีพ็อกซีเรซินแทรกซึมไปทั่วเส้นใย โดยใช้แผ่นลอกแบบคลุมชิ้นงาน ควบคุมทิศทางไหลของเรซินและอากาศโดยใช้แผ่นรีริสฟิล์ม ตามด้วยการวางแผ่นฟิล์มกันอากาศ และแผ่นช่วยนำอากาศออก ทำการปิดขอบแผ่นฟิล์มลงบนขอบแม่แบบด้วยซิลิโคนเทป และใช้เครื่องปั๊มเว็คคัมดูดอากาศออกจากชิ้นงานที่แรงดัน -0.8 bar ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 hr. ก่อนที่จะทำการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 hr (รูปที่ 7.2) กระบวนการขึ้นรูปจะถูกทำซ้ำจนกว่าจะครบตามตารางที่ 7.1



รูปที่ 7.1 รูปแบบการจัดวางของวัสดุคอมโพสิต



รูปที่ 7.2 อุณหภูมิการอบวัสดุ

ตารางที่ 7.1 รูปแบบการศึกษาแรงดึง

อุณหภูมิการอบ (°C)	รูปแบบการจัดวาง	ทิศทางของมุมในการวาง
100	[C/F/C/C/F/C]	[90/0/0] _{2s}
		[90/0/90] _{2s}
		[0/90/0] _{2s}
		[0/90/90] _{2s}
		[0/45/0] _{2s}
		[0/45/90] _{2s}
		[0/-45/0] _{2s}
		[0/-45/90] _{2s}
100	[F/C/F/F/C/F]	[90/0/0] _{2s}
		[90/0/90] _{2s}
		[0/90/0] _{2s}
		[0/90/90] _{2s}
		[0/45/0] _{2s}
		[0/45/90] _{2s}
		[0/-45/0] _{2s}
		[0/-45/90] _{2s}
	[C/C/F/F/C/C]	[90/0/0] _{2s}

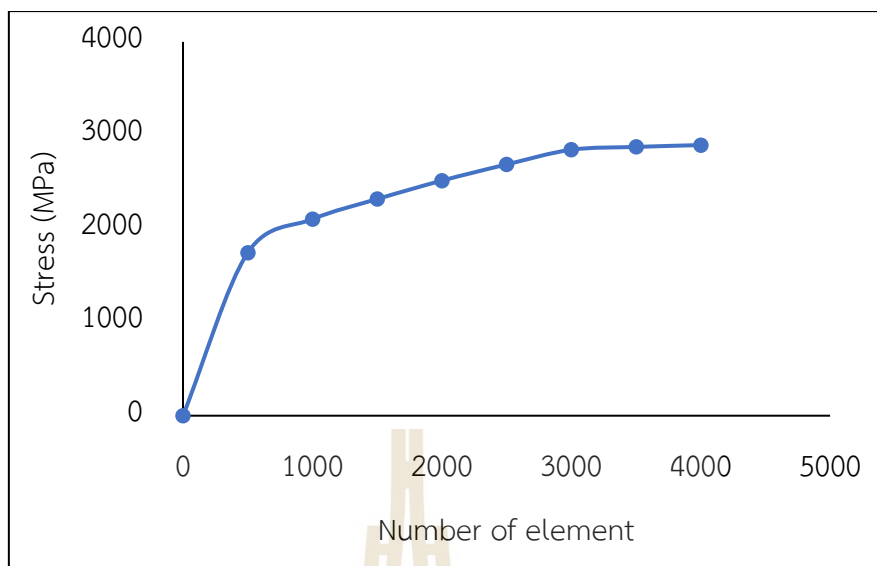
อุณหภูมิการบ่ม (°C)	รูปแบบการจัดวาง	ทิศทางของมุมในการวาง
100		[90/0/90] _{2s}
		[0/90/0] _{2s}
		[0/90/90] _{2s}
		[0/45/0] _{2s}
		[0/45/90] _{2s}
		[0/-45/0] _{2s}
		[0/-45/90] _{2s}

ชิ้นงานมีขนาด $200 \times 20 \times 2 \text{ mm}^3$ (รูปที่ 3) ซึ่งถูกจัดทำขึ้นตามมาตรฐาน ASTM D3039 สำหรับการทดสอบแรงดึงเครื่องทดสอบแรงดึง ภายใต้ความเร็วการเคลื่อนที่ของคานทดสอบ 5 mm/min และความกว้างของฐานทดสอบ 140 mm โดยทำการทดสอบชิ้นงานจำนวน 5 ครั้ง/ตัวอย่างทดสอบ

7.1.2 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Ansys Workbench

การสร้างแบบจำลองวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยดำเนินการใน Ansys Workbench 19.3 การสร้างแบบจำลองวัสดุคอมโพสิตดำเนินการในโมดูล Composite Prep Post (ACP) ซึ่งสามารถออกแบบและสร้างแบบจำลองโครงสร้างคอมโพสิตประเภทต่าง ๆ ด้วยคุณสมบัติที่ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันจากการวิเคราะห์ระดับจุลภาคที่กำหนดให้กับชั้นของวัสดุคอมโพสิตในแต่ละชั้น ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.2 การสร้างแบบจำลองอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D3039 โดยกำหนดความหนาของชั้นวัสดุคอมโพสิตแต่ละชั้นเท่ากับ 0.25 mm และใช้ขนาดของเมชเท่ากับ 1 mm จากนั้นรูปแบบจำลองที่เป็น solid model จะถูกส่งไปยังโมดูล static structure เพื่อจำลองการทดสอบแรงดึง การจำลองการรับแรงดึงจะถูกวิเคราะห์ภายใต้จำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองทั้งหมดมีเอลิเมนต์ 3,675 เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นจำนวนเอลิเมนต์ที่ค่า stress คงที่ดังที่แสดงในรูปที่ 7.3

แบบจำลองของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยกำหนดให้รับแรงภายใต้โหลดคงที่ รูปทรงของแบบจำลองเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความยาว $20 \times 200 \text{ mm}$ และระยะขอบมีขนาด 30 mm จากปลายแต่ละด้านสำหรับการยึดจับ กำหนดให้มีขอบเขตและเงื่อนไขการรับน้ำหนักคล้ายกับการทดสอบแรงดึงจริง จับยึดด้านล่างของชิ้นงานทดสอบคงที่ในทุกทิศทาง ในขณะที่จับด้านบนยึดแน่นในทุกทิศทางแต่ไม่มีข้อจำกัดในทิศทางตามยาว



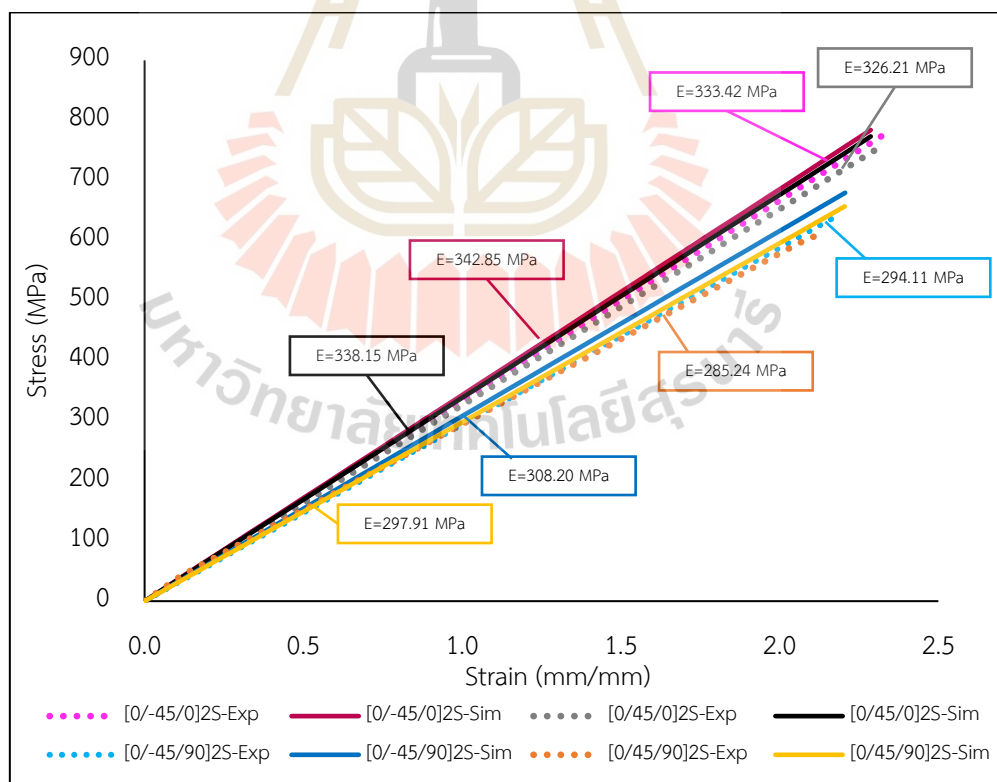
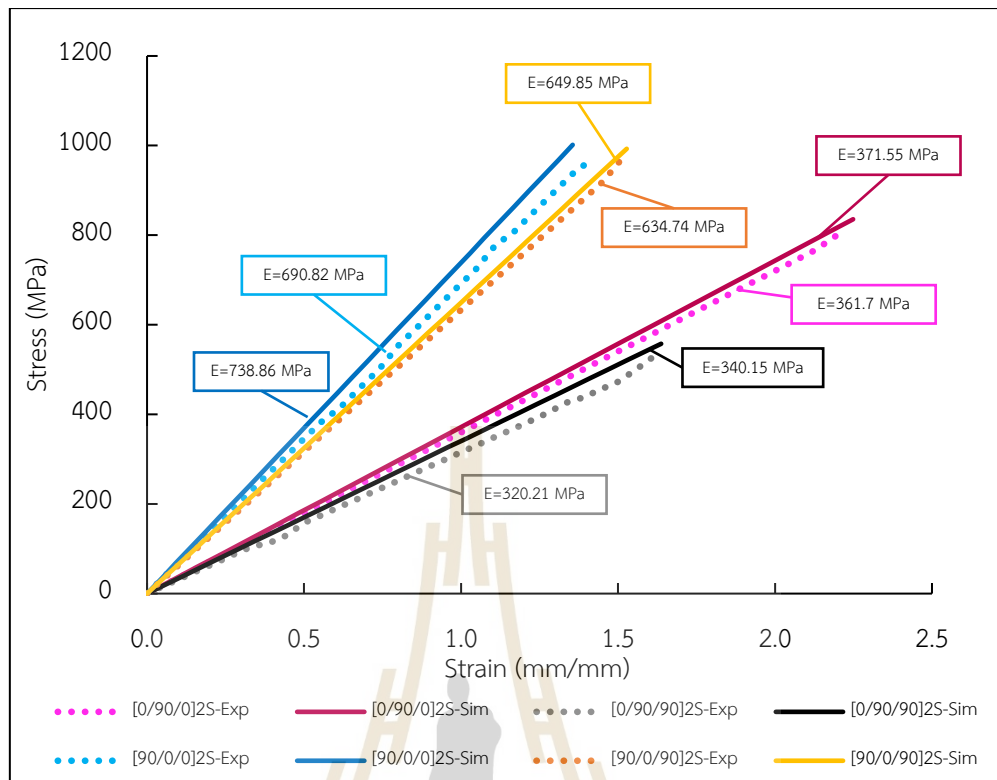
รูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์ number of element และ Stress

7.2 ผลการวิจัยการวิเคราะห์แรงดึงของวัสดุคอมโพสิต

7.1.2 การเปรียบเทียบผลการแบบจำลองด้วยโปรแกรม Ansys Workbench

ผลลัพธ์การศึกษาแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการรับแรงของวัสดุคอมโพสิตที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนทิศทางการวางเส้นใย ในการศึกษาครั้งนี้เลือกที่จะทำการปรับเปลี่ยนทิศทางการวางของเส้นใย 4 คือ 0° , 90° , 45° และ -45° เนื่องจากทั้ง 4 ทิศทางถูกนำมาใช้งานมากที่สุดและยังมีค่าคุณสมบัติการรับแรงที่ดี การนับทิศทางของเส้นใยนั้นอ้างอิงจากแกนของม้วนเส้นใยหรืออ้างอิงจากแกน x

การจัดวางวัสดุคอมโพสิตในรูปแบบ $[F/C/F]_{2s}$ โดยมีชั้นนอกเป็นเส้นใยลินินในทิศทาง 0° และ 90° ซึ่งมีเส้นใยคาร์บอนในทิศทาง 0° มีค่า Stress ที่ดีเมื่อเทียบกับการวัสดุคอมโพสิตในรูปแบบชั้นนอกเป็นเส้นใยลินินในทิศทาง 0° และ 90° ซึ่งมีเส้นใยคาร์บอนในทิศทาง 90° และ 45° การศึกษาพฤติกรรมของวัสดุคอมโพสิตในรูปแบบ $[F/C/F]_{2s}-[0^\circ/45^\circ/0^\circ]_{2s}$ และ $[F/C/F]_{2s}-[0^\circ/45^\circ/0^\circ]_{2s}$ แสดงให้เห็นถึงการวางเส้นใยคาร์บอนในทิศทาง 45° หรือ -45° แสดงพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกันมาก อาจจะกล่าวได้ว่าการปรับเปลี่ยนทิศทางในวางเส้นใยในแนวแกนบวกและลบแทบจะไม่มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยเสริมแรงแบบทิศทางเดียวเช่นเดียวกับรูปแบบการจัดวาง $[F/C/F]_{2s}-[0^\circ/45^\circ/90^\circ]_{2s}$ และ $[F/C/F]_{2s}-[0^\circ/45^\circ/90^\circ]_{2s}$ การเลือกใช้เส้นใยลินินในทิศทาง 45° และ -45° แสดงพฤติกรรมการรับแรงดึงได้ดีกว่า 90° แต่ก็ยังน้อยกว่า 0° จากการศึกษาแบบการจัดวาง $[F/C/F]_{2s}$ พบว่ารูปแบบการจัดวาง $[F/C/F]_{2s}-[90^\circ/0^\circ/90^\circ]_{2s}$ มีค่า stress ที่รับได้สูงที่สุดคือ 992.77 MPa และรูปแบบการจัดวาง $[F/C/F]_{2s}-[0^\circ/90^\circ/90^\circ]_{2s}$ มีค่า stress ที่รับได้น้อยที่สุดคือ 557.59 MPa



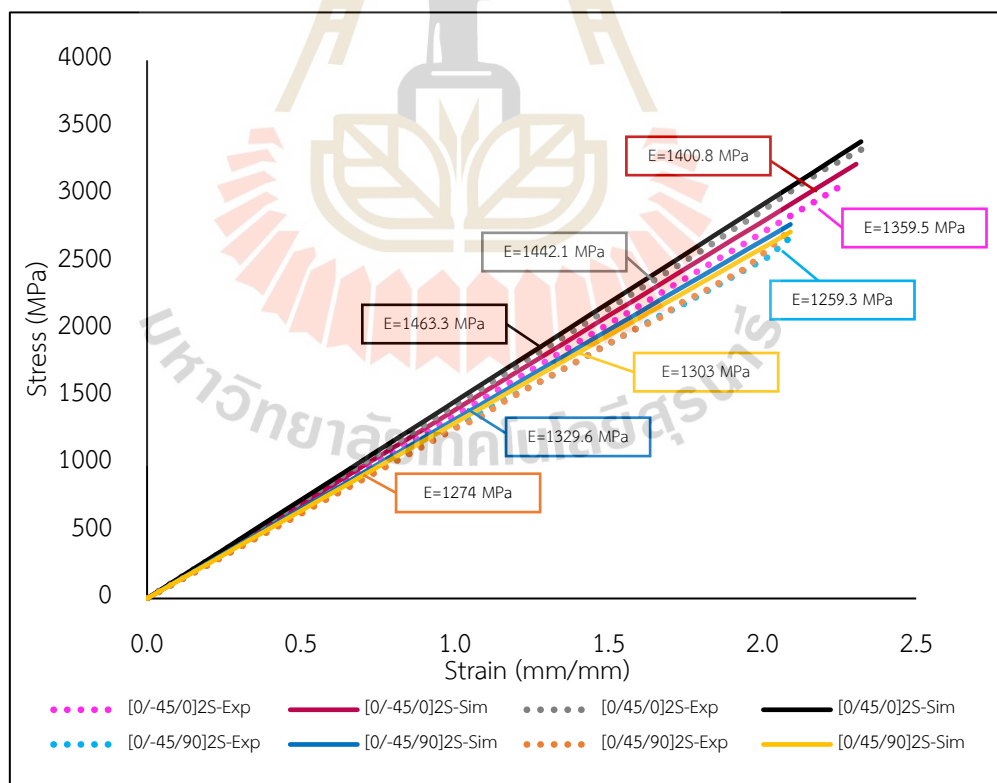
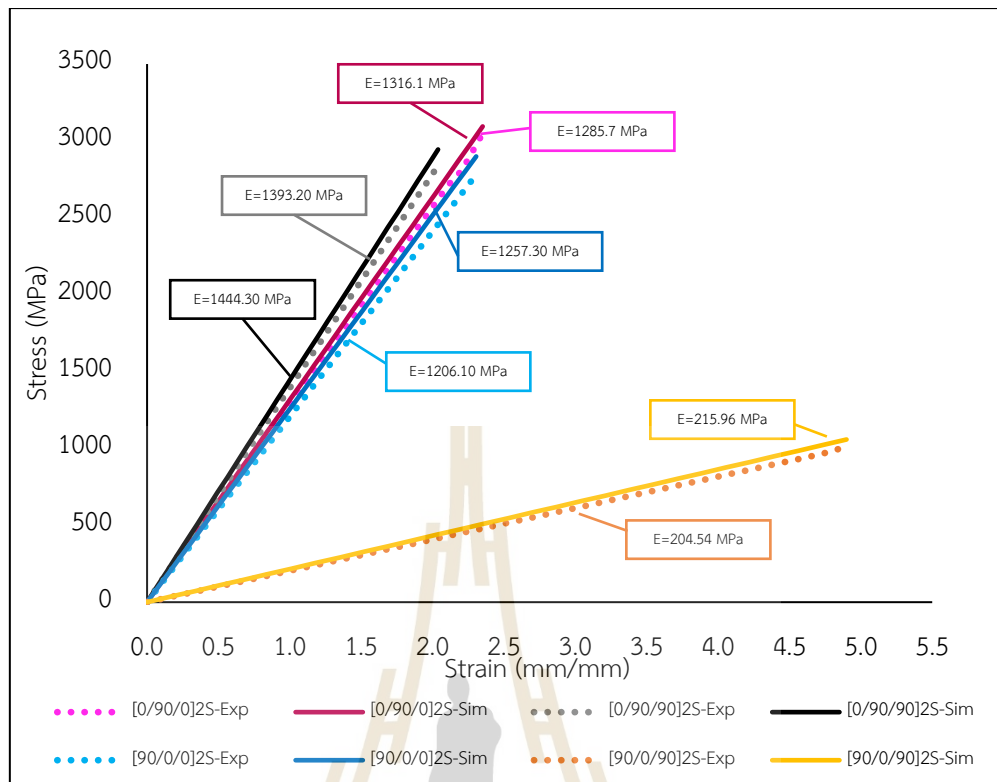
รูปที่ 7.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของวัสดุคอมโพสิตที่มีรูปแบบการจัดวาง $[F/C/F]_{2s}$

การปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดวางของวัสดุคอมโพสิตส่งผลต่อค่า modulus ของวัสดุ รูปแบบการจัดวาง $[F/C/F]_{2s}$ - $[90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}]_{2s}$ และ $[F/C/F]_{2s}$ - $[90^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}]_{2s}$ แสดงให้เห็นถึง modulus ที่เด่นกว่า รูปแบบอื่น ๆ โดยรูปแบบ $[F/C/F]_{2s}$ - $[90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}]_{2s}$ มีค่า 738.86 MPa – 690.82 MPa และ $[F/C/F]_{2s}$ - $[90^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}]_{2s}$ มีค่า 649.85 MPa – 634.74 MPa การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Ansys นั้นสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดสอบที่แรงกระทำสูงสุดของวัสดุส่งผลให้ค่า Stress ที่วัสดุรับได้เป็นดังรูปที่ 7.4 ค่าที่ได้มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่า Stress เช่นเดียวกับผลจากการทดสอบจริง แต่พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของวัสดุคอมโพสิตที่มีรูปแบบการจัดวาง $[F/C/F]_{2s}$ มีค่ามากกว่า 10% อาจเป็นผลมาจากคุณสมบัติของเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยลินินที่ไม่สามารถควบคุมได้ และการใช้เส้นใยลินินการผสมวัสดุที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีค่าความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

การศึกษาการปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดวางโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยชั้นนอกและใช้เส้นใยคาร์บอนทั้งหมด 4 ชั้น $[C/F/C]_{2s}$ แสดงพฤติกรรมมารับ Stress สูงสุดที่เพิ่มขึ้นกว่ารูปแบบการจัดวางวัสดุคอมโพสิตในรูปแบบ $[F/C/F]_{2s}$ นั้นหมายถึงการใช้จำนวนชั้นเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้นส่งผลให้คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตก็เพิ่มขึ้น

การที่วัสดุคอมโพสิตรับแรงได้ดีขึ้นเป็นผลมาจากคุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอนที่ดี เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีคุณสมบัติทางการรับแรงตามแนวเส้นใยได้ดีกว่าเส้นใยลินิน และการจัดวางทิศทางของเส้นใยที่ 0° เป็นการส่งเสริมให้วัสดุคอมโพสิตมีพฤติกรรมมารับแรงในแนวเส้นใยได้ดีนั่นเอง การจัดวางรูปแบบ $[C/F/C]_{2s}$ - $[0/90/0]_{2s}$, $[C/F/C]_{2s}$ - $[0/45/0]_{2s}$ และ $[C/F/C]_{2s}$ - $[0/-45/0]_{2s}$ เป็นการวางเส้นใยคาร์บอนในทิศทาง 0° ไว้ชั้นนอกของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งล้วนแล้วแต่มีพฤติกรรมมารับแรงได้มากกว่าการเลือกใช้เส้นใยคาร์บอนในทิศทางอื่น ๆ ที่ชั้นนอก หรืออาจจะกล่าวได้ว่าวางคุณสมบัติการรับแรงที่ดีที่สุดของวัสดุคอมโพสิตขึ้นอยู่กับทิศทางการวางเส้นใยของสัณฐานนั่นเอง จากการศึกษาในรูปแบบการจัดวาง $[C/F/C]_{2s}$ พบว่ารูปแบบการจัดวาง $[C/F/C]_{2s}$ - $[0/90/0]_{2s}$ มีค่า stress ที่รับได้สูงสุดที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Ansys Workbench คือ 3094.13 MPa โดยมีค่าที่สูงกว่าการทดสอบจริงคือ 2941.82 MPa ในส่วนของรูปแบบการจัดวาง $[C/F/C]_{2s}$ - $[0/90/90]_{2s}$ มีค่า stress ที่รับได้สูงสุดน้อยกว่ารูปแบบอื่น โดยการจำลองด้วยโปรแกรม Ansys Workbench แสดงค่า 1058.12 MPa โดยมีค่าที่สูงกว่าการทดสอบจริงคือ 982.19 MPa

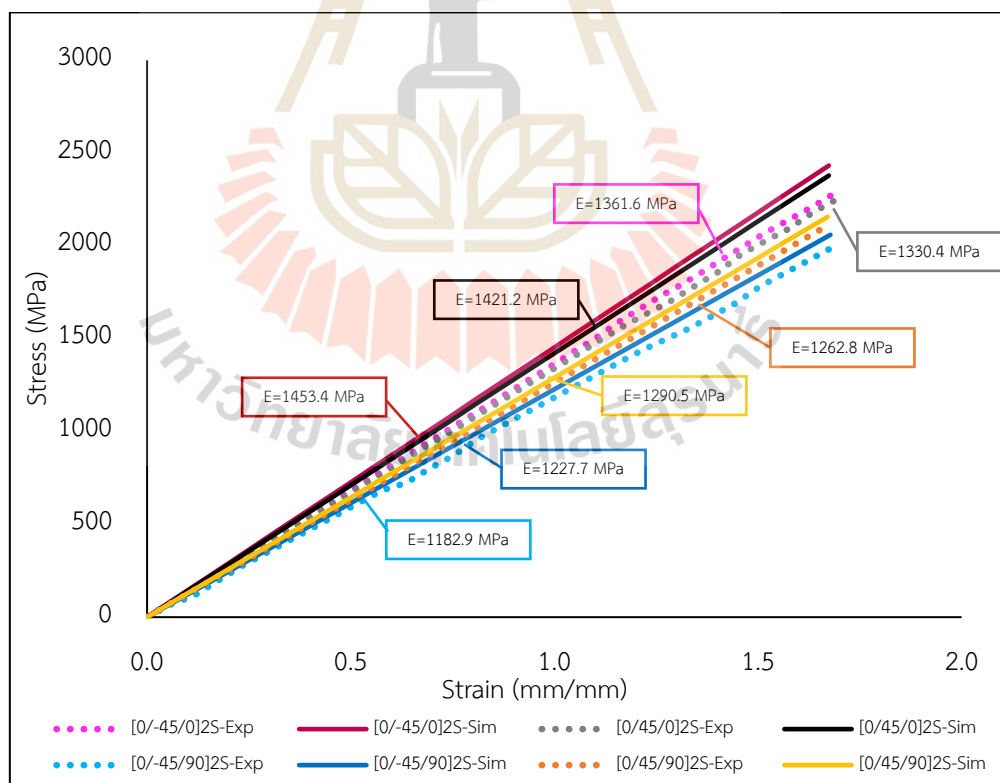
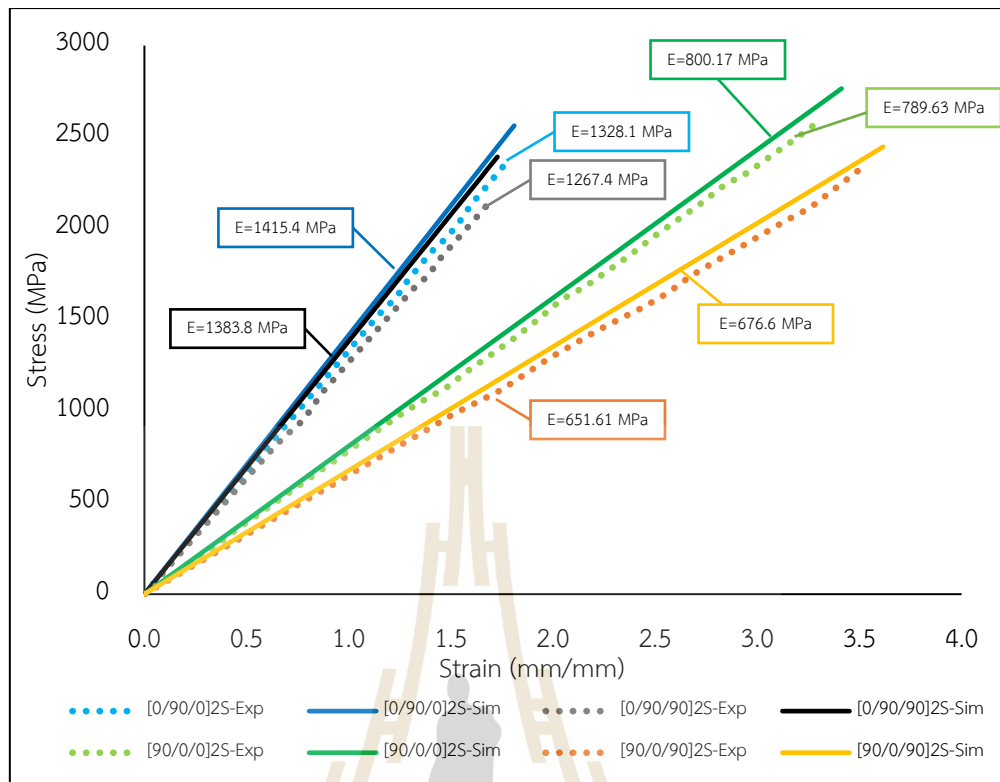
จากรูปที่ 7.5 แสดงให้เห็นค่าที่ได้มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่า Stress เช่นเดียวกับผลจากการทดสอบจริง แต่พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของวัสดุคอมโพสิตที่มีรูปแบบการจัดวาง $[C/C/F]_{2s}$ มีค่ามากกว่า 5% การปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดวางโดยใช้เส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยชั้นนอก และใช้เส้นใยคาร์บอนทั้งหมด 4 ชั้น $[C/F/C]_{2s}$ แสดงพฤติกรรมมารับ Stress สูงสุดที่เพิ่มขึ้นกว่าการจัดวางวัสดุคอมโพสิตในรูปแบบ $[F/C/F]_{2s}$ นั้นหมายถึงการใช้จำนวนชั้นเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้นคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตก็เพิ่มขึ้น



รูปที่ 7.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของวัสดุคอมโพสิตที่มีรูปแบบการจัดวาง $[C/F/C]_{2S}$

การศึกษาการปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดวางของวัสดุคอมโพสิตทั้งสามรูปแบบแสดงให้เห็นพฤติกรรมก่อนการแตกหักจากความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain คือไม่มีช่วง Plastic deformation เกิดขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain นั้นแสดงพฤติกรรมเป็นเส้นตรง และไม่มีการยืดตัวก่อนที่วัสดุจะเกิดการแตกหัก นั้นหมายถึงวัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุเปราะ ผลลัพธ์การศึกษานั้นแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยคาร์บอนทิศทาง 0° ไว้ชั้นนอกของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งล้าแล้วแต่มีพฤติกรรมการรับแรงได้มากขึ้นเมื่อเลือกใช้เส้นใยคาร์บอนในทิศทางอื่น ๆ ที่ชั้นนอก สังเกตได้จากรูปที่ 7.6 การวางเส้นใยคาร์บอนทิศทาง 0° ไว้ชั้นในของวัสดุคอมโพสิตมีพฤติกรรมการรับแรงที่สูงกว่าการวางเส้นใยคาร์บอนทิศทาง 0° ไว้ชั้นนอก เลือกจัดวางรูปแบบ $[C/C/F]_{2s}$ และ $[C/F/C]_{2s}$ แสดงค่าพฤติกรรมการรับแรงดึงได้ดีกว่า $[C/C/F]_{2s}$ จากการศึกษา รูปแบบการจัดวาง $[C/C/F]_{2s}$ พบว่ารูปแบบการจัดวาง $[C/F/C]_{2s}$ - $[90/0/0]_{2s}$ มีค่า stress ที่รับได้สูงสุดที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Ansys Workbench คือ 2765.30 MPa โดยมีค่าที่สูงกว่าการทดสอบจริงคือ 2645.91 MPa ในส่วนของรูปแบบการจัดวาง $[C/C/F]_{2s}$ - $[0/90/90]_{2s}$ มีค่า stress ที่รับได้สูงสุดน้อยกว่ารูปแบบอื่น โดยจำลองด้วยโปรแกรม Ansys Workbench แสดงค่า 2110.11 MPa โดยมีค่าที่สูงกว่าการทดสอบจริงคือ 2089.12 MPa ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์จากการทดสอบจริงและการสร้างแบบจำลองมีแนวโน้มของวัสดุที่ใกล้เคียงกัน แต่ด้วยการทดสอบจริงมีปัจจัยหลากหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อ ค่าที่ได้จึงต่ำกว่าผลการสร้างแบบจำลอง

ผลลัพธ์ของการจำลองด้วยโปรแกรม Ansys พฤติกรรมของวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยคาร์บอนทิศทาง 0° ไว้ชั้นนอกของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งล้าแล้วแต่มีพฤติกรรมการรับแรงได้มากขึ้นเมื่อเลือกใช้เส้นใยคาร์บอนในทิศทางอื่น ๆ ที่ชั้นนอก ค่าที่ได้มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่า Stress เช่นเดียวกับผลจากการทดสอบจริง แต่พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของวัสดุคอมโพสิตที่มีรูปแบบการจัดวาง $[C/C/F]_{2s}$ มีค่ามากกว่า 6%



รูปที่ 7.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของวัสดุคอมโพสิตที่มีรูปแบบการจัดวาง [C/C/F]2S

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการตรวจสอบวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยธรรมชาติ เพื่อทำความเข้าใจผลกระทบของตำแหน่งและลำดับการวางของชั้นเส้นใยสานต่อคุณสมบัติการรับแรงดึง ตัวอย่างคอมโพสิตสำหรับการศึกษานี้จะถูกผลิตด้วยวิธีแวก์คัมแบ็กกิ้ง โดยการจัดเรียงชั้นของเส้นใยธรรมชาติจะแตกต่างกันไปในสองด้านคือลำดับการจัดวางเส้นใย และมุมระหว่างชั้น คุณสมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิตจะถูกทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal testing machine (UTM) และตรวจสอบโดยใช้โปรแกรม Ansys workbench งานวิจัยมีรายละเอียดโดยสรุปดังนี้

คุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตนั้นมีหลายปัจจัยที่เข้ามาเกี่ยวข้องหรือส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ ปัจจัยที่ส่งผลต่อวัสดุได้แก่ ประเภทของเส้นใย กระบวนการขึ้นรูป อุณหภูมิในการอบ แรงดันระหว่างกระบวนการขึ้นรูป อัตราส่วนของเส้นใยและเมทริกซ์ เป็นต้น

กระบวนการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตที่ส่งผลให้มีคุณสมบัติทางกลที่ดีคือการใช้กระบวนการแวก์คัมแบ็กกิ้งซึ่งใช้ประโยชน์จากแรงดันในการกดให้อีพ็อกซีเรซินแทรกซึมไปทั่วเส้นใย ซึ่งดีกว่ากระบวนการขึ้นรูปด้วยมือเนื่องจากการขึ้นรูปด้วยมือเกิดฟองอากาศในเส้นใยเป็นจำนวนมาก ความสามารถในการรับแรงจึงน้อยลง การใช้เส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตนั้นช่วยให้วัสดุรับแรงได้ดีกว่าการใช้เส้นใยแก้ว อีกทั้งยังเพิ่มความสามารถในการรับแรงได้ด้วยการใช้ PVC core

การปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดวางและทิศทางการวางของเส้นใยนั้นส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตทั้งสิ้น การเลือกใช้เส้นคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คุณสมบัติดีขึ้น และการวางเส้นใยคาร์บอนที่ชั้นนอกของวัสดุคอมโพสิตในทิศทาง 0° จะทำให้วัสดุคอมโพสิตมีคุณสมบัติที่ดีกว่าทิศทางอื่น ๆ รูปแบบการจัดวาง $[C/F/C]_{2s}-[0/90/0]_{2s}$ แสดงถึงพฤติกรรมการรับแรงที่ดีที่สุดในการศึกษาคือค่า Stress เท่ากับ 3319.50 MPa

การสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล Material designer ในโปรแกรม Ansys นั้นสามารถใช้ในการวิเคราะห์ Elastic Properties ของวัสดุได้ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องไปกับ Elastic Properties ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีด้วยโมเดล Chamis และโมเดล Halpin-Tsai

การสร้างแบบจำลองวัสดุคอมโพสิตเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติการรับแรงดึงนั้นสามารถทำได้ โดยการนำวัสดุที่จำลองด้วยโมดูล Material designer เข้าโมเดล ACP เพื่อกำหนดรูปแบบการจัดวาง และกำหนดทิศทางของวัสดุคอมโพสิต และวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงดึงด้วยโมดูล Static structure พฤติกรรมการรับแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตนั้นสามารถวิเคราะห์รูปแบบการจัดวางที่มีเส้นใยคาร์บอน 4 ชั้น ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่ารูปแบบการจัดวางที่มีเส้นใยคาร์บอน 2 ชั้น

8.2 ข้อเสนอแนะ

1. การวิเคราะห์คุณสมบัติการรับแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตสามารถเปรียบเทียบความถูกต้องได้อีกรูปแบบคือการคำนวณทางทฤษฎี
2. การผลิตวัสดุคอมโพสิตในการศึกษาค่อนข้างใช้เวลานาน
3. เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์สามารถปรับเปลี่ยนกระบวนการขึ้นรูปที่ดีขึ้นได้



รายการอ้างอิง

- A.Krzyzak, M.Mazur, M.Gajewski, K.Drozd, A.Komorek, P. P. (2016). Sandwich Structured Composites for Aeronautics: Methods of Manufacturing Affecting Some Mechanical Properties. *International Journal Of Aerospace Engineering*, 2016(1), 1–10.
- Al-Hajaj Z., Zdero R., B. H. (2018). Mechanical, Morphological, and Water Absorption Properties of a New Hybrid Composite Material made from 4 Harness Satin Woven Carbon Fibres and Flax Fibres in an Epoxy Matrix. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 115(1), 46–56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.09.015>
- Aneta K., Michat M., Mateusz G., Kazimierz D., Andrzej K., and P. P. (2016). Sandwich Structured Composites for Aeronautics: Methods of Manufacturing Affecting Some Mechanical Properties. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2016(1), 1–10. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1155/2016/7816912>
- Awad, Z. K., Aravinthan, T., & Manalo, A. (2012). Geometry effect on the behaviour of single and glue-laminated glass fibre reinforced polymer composite sandwich beams loaded in four-point bending. In *Materials and Design* (Vol. 39, pp. 93–103). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.02.023>
- Belgacem, L., Ouinas, D., Viña Olay, J. A., & Amado, A. A. (2018). Experimental investigation of notch effect and ply number on mechanical behavior of interply hybrid laminates (glass/carbon/epoxy). In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 145, pp. 189–196). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.03.026>
- Boopalan, M., Niranjanaa, M., & Umapathy, M. J. (2013). Study on the mechanical properties and thermal properties of jute and banana fiber reinforced epoxy hybrid composites. In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 51, pp. 54–57). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.02.033>
- Boransan, W., Kerdphol, T., & Phunpeng, V. (2021). Experimental Manufacturing Methods of Glass Fiber Composites Considering Flexural Behaviour. *Spektrum Industri*, 19(2), 87. <https://doi.org/10.12928/si.v19i2.21658>

- Bourchak M., nHarasani W. (2015). Analytical and experimental investigation of tensile properties of cross-ply and angle-ply GFRP composite laminates.pdf. *Science and Engineering of Composite Materials*, 22(3), 297–301. <https://doi.org/10.1515/secm-2013-0105>
- Brancati, R., Di Massa, G., & Pagano, S. (2019). Investigation on the mechanical properties of MRE compounds. In *Machines* (Vol. 7, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/machines7020036>
- CASTANIE, B., BOUVET, C., & Ginot, M. (2020). Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. In *Composites Part C: Open Access* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100004>
- Dixit, A., Mali, H. S., & Misra, R. K. (2013). Unit cell model of woven fabric textile composite for multiscale analysis. In *Procedia Engineering* (Vol. 68, pp. 352–358). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.191>
- Dweib M.A, Hu B., O'Donnell A., Shenton H.W., W. R. P. (2004). All natural composite sandwich beams for structural applications. *Composite Structures*, 63(1), 147–157. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00143-0](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00143-0)
- EL-Wazery, M. S., EL-Elamy, M. I., & Zoalfakar, S. H. (2017). Mechanical properties of glass fiber reinforced polyester composites. In *International Journal of Applied Science and Engineering* (Vol. 14, Issue 3, pp. 121–131).
- F. Abedom , S. Sakthivel, D. Asfaw, B. Melese, E. Solomon, S. S. K. (2021). Development of Natural Fiber Hybrid Composites Using SugarcaneBagasseandBambooCharcoal for AutomotiveThermal Insulation Materials. *Advances in Materials Science and Engineering Industries*, 2021(1), 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2021/2508840>
- Falcó, O., Ávila, R. L., Tijs, B., & Lopes, C. S. (2018). Modelling and simulation methodology for unidirectional composite laminates in a Virtual Test Lab framework. *Composite Structures*, 190(February), 137–159. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.016>
- Fu, S. Y., Xu, G., & Mai, Y. W. (2002). On the elastic modulus of hybrid particle/short-fiber/polymer composites. In *Composites Part B:Engineering* (Vol. 33, Issue 4, pp. 291–299). [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(02\)00013-6](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(02)00013-6)

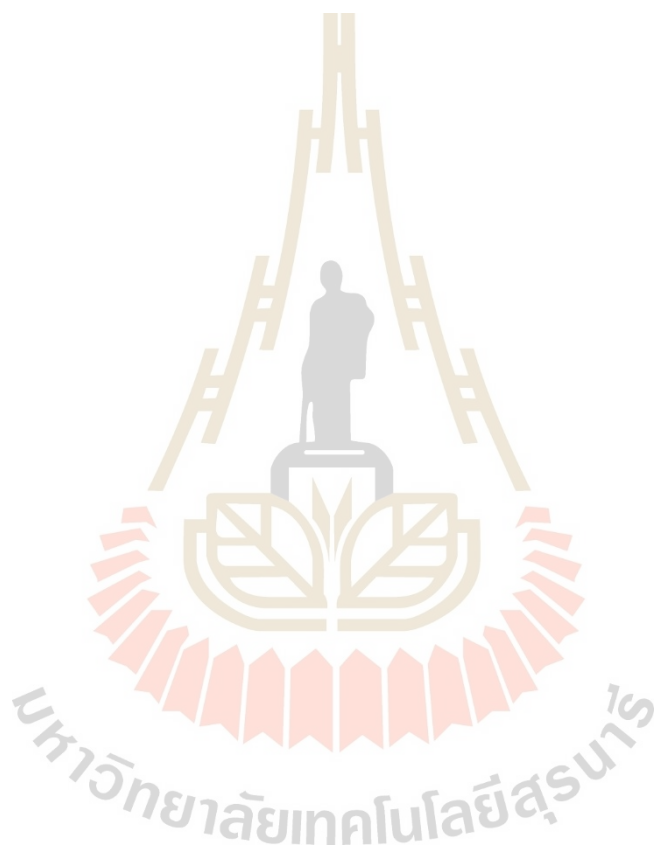
- Gustin, J., Joneson, A., Mahinfalah, M., & Stone, J. (2005). Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites. In *Composite Structures* (Vol. 69, Issue 4, pp. 396–406). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.07.020>
- Hadi, A. E., Hamdan, M. H. M., Siregar, J. P., Junid, R., Tezara, C., Irawan, A. P., Fitriyana, D. F., & Rihayat, T. (2021). Application of micromechanical modelling for the evaluation of elastic moduli of hybrid woven jute–ramie reinforced unsaturated polyester composites. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 15). <https://doi.org/10.3390/polym13152572>
- He, K., Chen, Y., Li, Z., & Yuan, B. (2021). Experimental study on mechanical properties of sandwich tempered glass unidirectional composite laminate. *Composite Structures*, 255(June 2020), 112980. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112980>
- Helaili, S., Chafra, M., & Chevalier, Y. (2021). Natural fiber alfa/epoxy randomly reinforced composite mechanical properties identification. *Structures*, 34(August), 542–549. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.095>
- Huang, Y. K., Frings, P. H., & Hennes, E. (2002). Mechanical properties of Zylon/epoxy composite. In *Composites Part B:Engineering* (Vol. 33, Issue 2, pp. 109–115). [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(01\)00064-6](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(01)00064-6)
- I.S., V., Chatterjee R., R. M., & PadmanabhanK., S. E. and. (2018). A Comparative Study Of The Three Point And Four Point Bending Behaviour Of Rigid Foam Core Glass/Epoxy Face Sheet Sandwich Compo ites. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 5, Issue 5, pp. 12083–12090). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.184>
- Joham A.M., Alejandro C.C., J. S. P. (2020). In-flight and wireless damage detection in a UAV composite wing using fiber optic sensors and strain field pattern recognition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 136(2), 1–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.106526>
- Jweeg, M. J., Hammood, A. S., & Al-Waily, M. (2012). Experimental and theoretical studies of mechanical properties for reinforcement fiber types of composite materials. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 12(4), 62–75.
- Kamble M., Shakfeh T., Moheimani R., D. H. (2019). Optimization of a Composite

- Monocoque Chassis for Structural Performance- A Comprehensive Approach. *J Fail. Anal. and Preven.*, 19(1), 1252–1263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11668-019-00711-0>
- Kim H.G and Kwac L.K. (2009). Evaluation of elastic modulus for unidirectionally aligned short fiber composites. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23(1), 54–63. <https://doi.org/10.1007/s12206-008-0810-1>
- Li, B., Yang, L., Wang, C. quan, Zhang, Q. pei, Liu, Q. cheng, Li, Y. ding, & Xiao, R. (2017). Adsorption of Cd(II) from aqueous solutions by rape straw biochar derived from different modification processes. In *Chemosphere* (Vol. 175, pp. 332–340). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.061>
- Li X., Wang J., Li J., D. A. (2020). Cure-induced temperature gradient in laminated composite plate: Numerical simulation and experimental measurement. *Composite Structures*, 253(1), 1–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112822>
- Mahato, K. K., Dutta, K., & Chandra Ray, B. (2019). Assessment of mechanical, thermal and morphological behavior of nano-Al₂O₃ embedded glass fiber/epoxy composites at in-situ elevated temperatures. In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 166, pp. 688–700). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.009>
- Ming Ming, I. W., Azmi, A. I., Chuan, L. C., & Mansor, A. F. (2018). Experimental study and empirical analyses of abrasive waterjet machining for hybrid carbon/glass fiber-reinforced composites for improved surface quality. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Vol. 95, Issues 9–12, pp. 3809–3822). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1465-9>
- Mohan Kumar S, Raghavendra Ravikiran K, G. H. K. (2017). Development of E-Glass Woven Fabric / Polyester Resin Polymer Matrix Composite and Study of Mechanical Properties. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 13367–13374. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.329>
- Nagh dinasab, M., Farrokhabadi, A., & Madadi, H. (2018). A numerical method to evaluate the material properties degradation in composite RVEs due to fiber-matrix debonding and induced matrix cracking. In *Finite Elements in Analysis and Design* (Vol. 146, pp. 84–95). <https://doi.org/10.1016/j.finel.2018.04.008>

- Panneerdhass, R., Gnanavelbabu, A., & Rajkumar, K. (2014). Mechanical properties of luffa fiber and ground nut reinforced epoxy polymer hybrid composites. In *Procedia Engineering* (Vol. 97, pp. 2042–2051). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.447>
- Rahmani H., Heydar Mahmoudi Najafi S., A. A. (2014). Mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminated composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(8), 733–740. <https://doi.org/10.1177/0731684413518255>
- Rayhan, S. Bin, & Rahman, M. M. (2020). Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using ansys material designer. In *Procedia Structural Integrity* (Vol. 28, pp. 1892–1900). <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012>
- S.H. Chen, X.M. Feng, S. I. (2008). Numerical estimation of REV and permeability tensor for fractured rock masses by composite element method. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, 32(12), 1459–1477. <https://doi.org/10.1002/nag.679>
- Saensuriwong, K., Kerdphol, T., & Phunpeng, V. (2021). Laboratory Study of Polypropylene-based Honeycomb Core for Sandwich Composites. *Spektrum Industri*, 19(2), 97. <https://doi.org/10.12928/si.v19i2.21659>
- Satasinska, K., Celinski, M., Mizera, K., Barczewski, M., Kozikowski, P., Leszczynski, M. K., & Domanska, A. (2021). Moisture Resistance, Thermal Stability and Fire Behavior of Unsaturated Polyester Resin Modified with L-histidinium Dihydrogen Phosphate-Phosphoric Acid. In *Molecules (Basel, Switzerland)* (Vol. 26, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/molecules26040932>
- Sathishkumar TP., Satheeshkumar S., N. J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. *Journal of Reinforced Plastics*, 33(13), 1258–1275. <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>
- Shi, Y., Swait, T., & Soutis, C. (2012). Modelling damage evolution in composite laminates subjected to low velocity impact. In *Composite Structures* (Vol. 94, Issue 9, pp. 2902–2913). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.03.039>
- Sudheer, M., K.R., P., & Somayaji, S. (2015). Analytical and Numerical Validation of Epoxy/Glass Structural Composites for Elastic Models. *American Journal of Materials Science*, 5(3C), 162–168. <https://doi.org/10.5923/c.materials.201502.32>
- Tamilarasana U., Karunamoorthy L., P. K. (2015). Mechanical Properties Evaluation of

- the Carbon Fibre Reinforced Aluminium Sandwich Composites. *Materials Research*, 18(5), 1029–1037. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.017215>
- Thwe, M. M., & Liao, K. (2003). Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. In *Composites Science and Technology* (Vol. 63, Issues 3–4, pp. 375–387). [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00225-7)
- Uzay C., Boztepe M.H., Bayramoglu M., G. N. (2017). Effect of Post-Curing Heat Treatment Process on Mechanical Properties of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites. *Materials Testing* (59, No. 4, 59(4), 336–372. <https://doi.org/https://doi.org/10.3139/120.111001>.
- Vignoli, L. L., Savi, M. A., Pacheco, P. M. C. L., & Kalamkarov, A. L. (2019). Comparative analysis of micromechanical models for the elastic composite laminae. *Composites Part B: Engineering*, 174(March), 106961. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106961>
- Yukseloglu, S. M., & Yoney, H. (2016). The mechanical properties of flax fibre reinforced composites. *RILEM Bookseries*, 12, 255–266. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1_19
- Zachariah S.A., Shenoy B.S., Jayan J., D. P. K. (2022). Experimental investigation on dynamic and static transverse behaviour of thin woven Carbon/Aramid hybrid laminates. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 34(4), 273–281. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.09.015>
- Zangana S., Epaarachchi J., Ferdous W., L. J. (2020). A novel hybridised composite sandwich core with Glass, Kevlar and Zylon.pdf. *International Journal of Impact Engineering* 137, 137(1), 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103430>
- Zhou, G., Wang, W., & Peng, M. (2018). Functionalized aramid nanofibers prepared by polymerization induced self-assembly for simultaneously reinforcing and toughening of epoxy and carbon fiber/epoxy multiscale composite. *Composites Science and Technology*, 168(August), 312–319. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.10.013>
- เดชะอำไพ, ป. (2550). ไฟไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทวีชัย, อ. (2559). คอมพิวเตอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น. ไรต์ ออล ดิจิตอลพริ้นท์.
สุวรรณประทีป, จ. (2547). การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี.



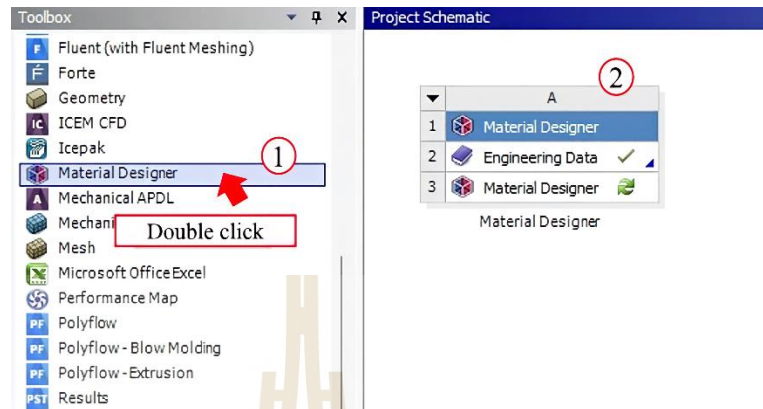
ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล Material designers

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

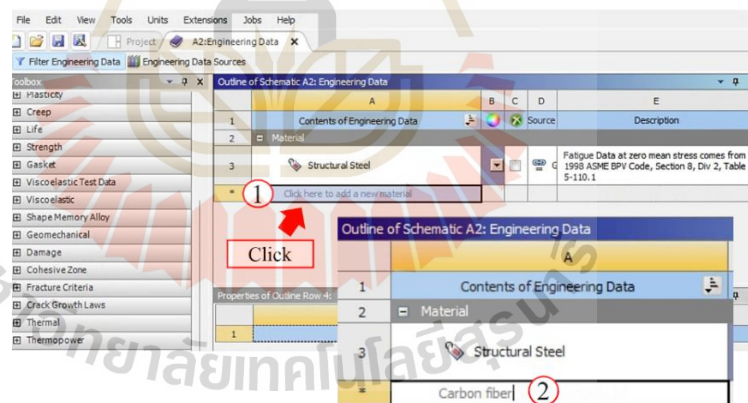
ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วยโมดูล Material designers

1. คลิกเลือก Material designers

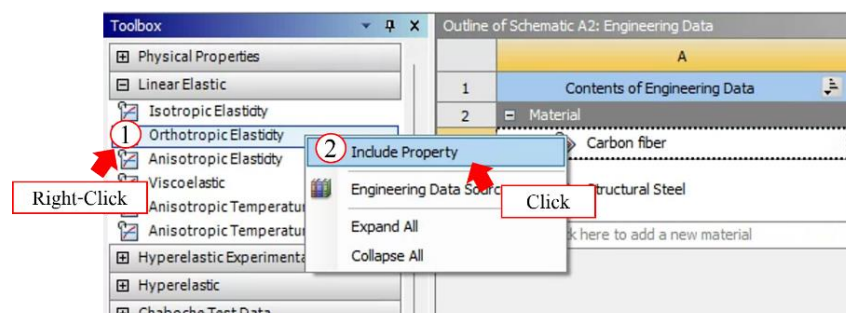


2. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

- 2.1 ดับเบิลคลิก Engineering Data เพื่อเข้าสู่โหมด Material library
- 2.2 ทำการสร้างวัสดุใหม่สำหรับเส้นใยเสริมแรง
- 2.3 คลิก Add a new material เพื่อทำการสร้างวัสดุชนิดใหม่พร้อมทั้งตั้งชื่อเป็น Carbon



- 2.4 คลิกขวาที่ Orthotropic Elasticity และเลือก Include property เพื่อทำการเพิ่มคุณสมบัติความยืดหยุ่น



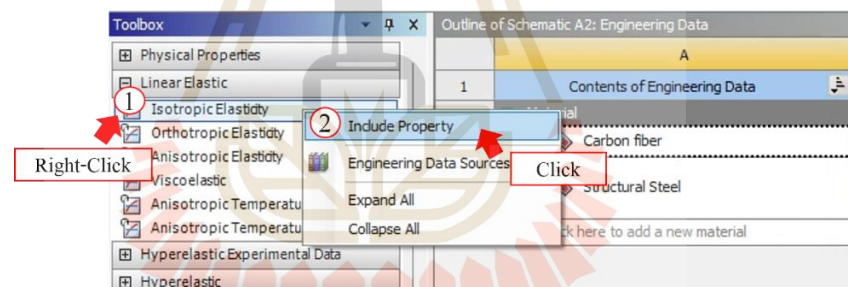
2.5 เพิ่มคุณสมบัติความยืดหยุ่นของคาร์บอนดังต่อไปนี้

Properties of Outline Row 3: Carbon fiber			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Orthotropic Elasticity		
4	Young's Modulus X direction	2.32E+05	MPa
5	Young's Modulus Y direction	15000	MPa
6	Young's Modulus Z direction	15000	MPa
7	Poisson's Ratio XY	0.279	
8	Poisson's Ratio YZ	0.49	
9	Poisson's Ratio XZ	0.49	
10	Shear Modulus XY	24000	MPa
11	Shear Modulus YZ	5034	MPa
12	Shear Modulus XZ	5034	MPa

2.6 สร้างวัสดุใหม่สำหรับเมทริกซ์

2.7 คลิก Add a new material เพื่อทำการสร้างวัสดุเมทริกซ์พร้อมทั้งตั้งชื่อเป็น Epoxy

2.8 คลิกขวาที่ Isotropic Elasticity และเลือก Include property เพิ่มทำการเพิ่มคุณสมบัติความยืดหยุ่น

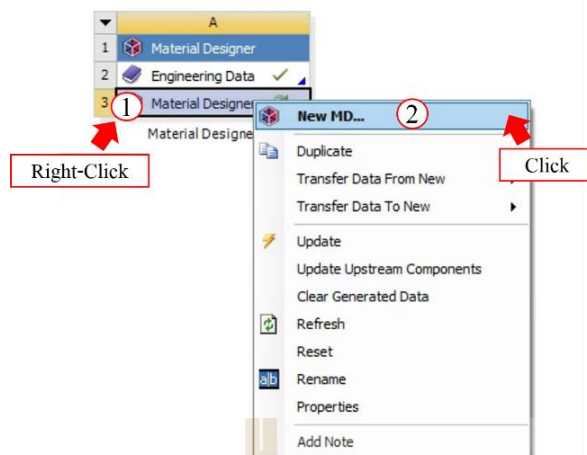


2.9 เพิ่มคุณสมบัติความยืดหยุ่นของอีพ็อกซีเรซินดังต่อไปนี้

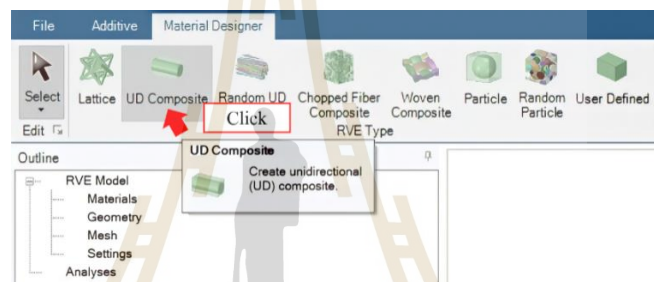
Properties of Outline Row 4: Epoxy resin			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Modulus...	
5	Young's Modulus	5350	MPa
6	Poisson's Ratio	0.345	
7	Bulk Modulus	5.7527E+09	Pa
8	Shear Modulus	1.9888E+09	Pa

3. การออกแบบวัสดุ (Design material)

3.1 คลิกขวาที่ Material designer แล้วเลือก new MD... เพื่อเข้าสู่โหมดการสร้างและออกแบบ



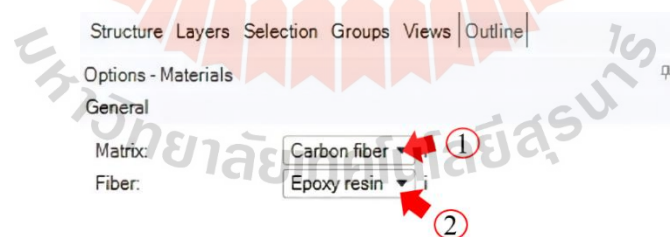
3.2 คลิก UD composite ที่แถบ RVE type กำหนดรูปแบบของวัสดุคอมโพสิต



3.3 คลิก Constituent Materials ที่แถบด้านบน

3.3.1 กำหนดวัสดุคอปอกซีให้กับเมทริกซ์

3.3.2 กำหนดวัสดุคาร์บอนให้กับไฟเบอร์



3.4 คลิก Geometry ในแถบเครื่องมือด้านซ้าย

3.5 ตั้งค่าประเภท Geometry เป็น Hexagonal shape

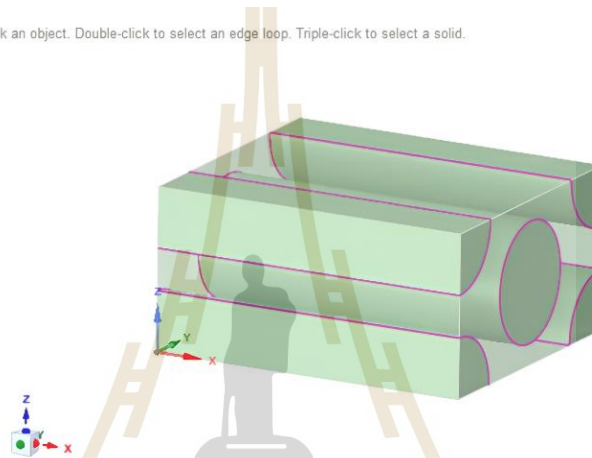
3.6 ตั้งค่า Fiber Volume Fraction เป็น 0.1

3.7 ตั้งค่าเส้นผ่านศูนย์กลางไฟเบอร์เป็น 5 ไมโครเมตร



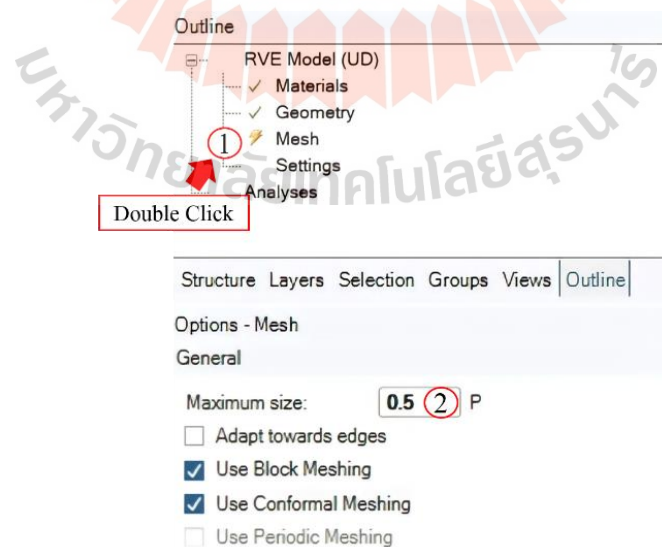
3.8 คลิก (✓) เพื่อสร้าง RVE

Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.

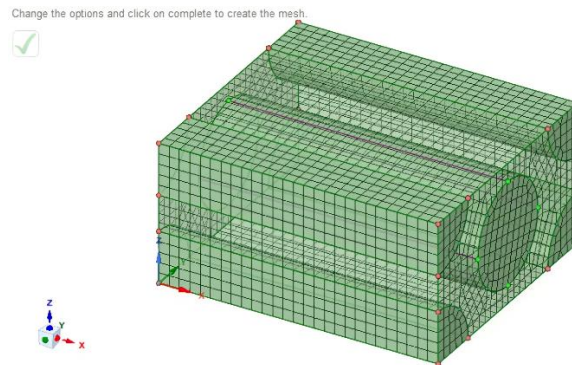


3.9 คลิก mesh ในแถบเครื่องมือด้านซ้าย

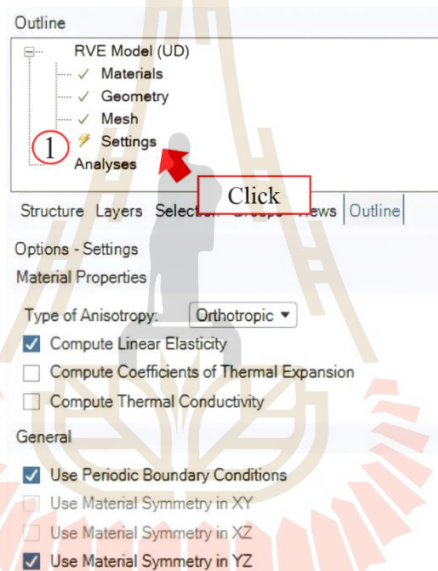
3.9.1 ตั้งค่า Maximum size เป็น 0.5



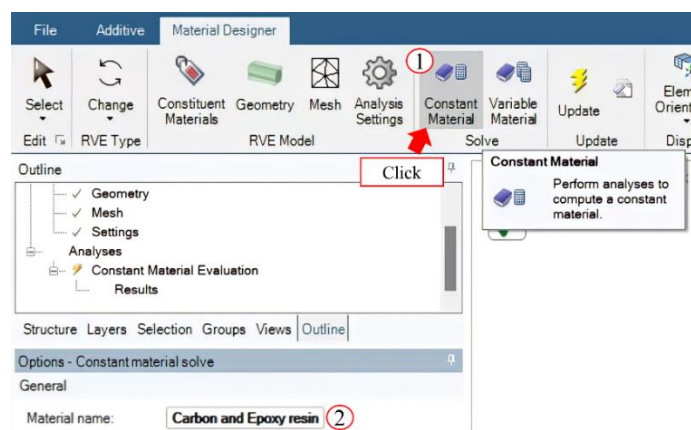
3.10 คลิก (✓) เพื่อสร้าง mesh



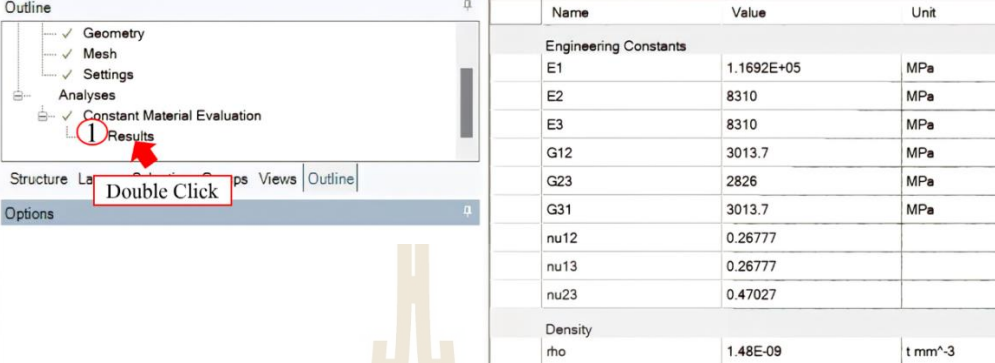
3.11 คลิก Analysis Settings ในแถบเครื่องมือด้านซ้าย จากนั้นตั้งค่าให้เป็นดังภาพที่แสดง



3.12 คลิก Constant Material ในแถบเครื่องมือด้านซ้าย และตั้งชื่อวัสดุเป็น Epoxy Carbon UD



- 3.13 ตรวจสอบผลลัพธ์โดยคลิก results ในมุมมองผลลัพธ์จะแสดงคุณสมบัติของวัสดุที่คำนวณได้ เช่น Young's Modulus, Poisson's Ratio และ Shear Modulus



The screenshot shows a software interface with an 'Outline' panel on the left and a table of 'Engineering Constants' on the right. The 'Results' item in the Outline panel is highlighted with a red circle and a red arrow pointing to it. A red box labeled 'Double Click' is positioned over the 'Results' item. The table on the right lists various material properties and their values.

Name	Value	Unit
Engineering Constants		
E1	1.1692E+05	MPa
E2	8310	MPa
E3	8310	MPa
G12	3013.7	MPa
G23	2826	MPa
G31	3013.7	MPa
nu12	0.26777	
nu13	0.26777	
nu23	0.47027	
Density		
rho	1.48E-09	t mm ⁻³



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Wipada Boransan, Thongchart Kerdpool, and Veena Pumping. (2021). **Experimental Manufacturing Methods of Glass Fiber Composites Considering Flexural Behaviour**. The 2nd SUT International Virtual Conference on Science and Technology (IVCST), 6th August 2021, Nakhon Ratchasima, Thailand.

Boransan, W., Kerdphol, T., & Phunpeng, V. (2021). **Experimental Manufacturing Methods of Glass Fiber Composites Considering Flexural Behaviour**. Spektrum Industri, 19(2), 97.

Veena Phunpeng, Wipada Boransan and Thongchart Kerdphol. (2021). **Applying Glass Fiber Reinforced Composites with Microsphere Particles to UAV Components**. International Symposium on Sustainable Aviation (ISSA), 25 – 27 November 2021, Bangkok, Thailand. [Pending]

วิภาดา โบราณสาร, ธงชาติ เกิดผล และวีณา ฟันเพ็ง. (2022). **ผลกระทบของไมโครสเฟียร์แก้วต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเสริมแรงด้วยใยแก้ว**. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องแห่งประเทศไทย ครั้งที่36, 19-22 กรกฎาคม 2565, ประจวบคีรีขันธ์, ประเทศไทย.

Wipada Boransan, Thongchart Kerdpool, and Veena Pumping. (2022). **Structural Investigation and Simulation of Elastic Properties for Unidirectional Composite Materials**. The 12th International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 2022), 13 - 16 December 2022, Phuket, Thailand.

ประวัติผู้เขียน

นางสาววิภาดา โบราณสาร เกิดเมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ.2540 จบการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสีคิ้ว"สวัสดีผดุงวิทยา" อ.สีคิ้ว จ.นครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตในหลักสูตรวิศวกรรมอากาศยาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2562

ในปี พ.ศ.2563 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก เป็นระยะเวลา 2 ปี ในระหว่างการศึกษาได้รับมอบหมายให้เป็นผู้ช่วยสอน รายวิชา 525341 ปฏิบัติการพื้นฐานทางวิศวกรรมเครื่องกล 537342 ปฏิบัติการวิศวกรรมอากาศยาน 1 537343 ปฏิบัติการวิศวกรรมอากาศยาน 2 558201 กลศาสตร์ของแข็ง 551261 กระบวนการผลิตและวัสดุในงานวิศวกรรม และ 551263 ระบบทางความร้อนและของไหล ทั้งนี้ผู้วิจัยได้สะสมความรู้จากประสบการณ์การทำงานในห้องปฏิบัติการวัสดุคอมโพสิต การสอน และการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษามาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย และมีโอกาสได้ทำวิจัยในด้านวัสดุคอมโพสิตจนได้รับการเผยแพร่ผลงานดังต่อไปนี้

1. Wipada Boransan, Thongchart Kerdpool, and Veena Pumping. (2021). **Experimental Manufacturing Methods of Glass Fiber Composites Considering Flexural Behaviour**. The 2nd SUT International Virtual Conference on Science and Technology (IVCST), 6th August 2021, Nakhon Ratchasima, Thailand.
2. Boransan, W., Kerdphol, T., & Phunpeng, V. (2021). **Experimental Manufacturing Methods of Glass Fiber Composites Considering Flexural Behaviour**. Spektrum Industri, 19(2), 97.
3. Veena Phunpeng, Wipada Boransan and Thongchart Kerdphol. (2021). **Applying Glass Fiber Reinforced Composites with Microsphere Particles to UAV Components**. International Symposium on Sustainable Aviation (ISSA), 25 – 27 November 2021, Bangkok, Thailand. [Pending]

4. วิภาดา โบราณสาร, ธงชาติ เกิดผล และวีณา ฟั่นเพ็ง. (2022). ผลกระทบของไมโครสเฟียร์แก้วต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเสริมแรงด้วยใยแก้ว. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36, 19-22 กรกฎาคม 2565, ประจวบคีรีขันธ์, ประเทศไทย.
5. Wipada Boransan, Thongchart Kerdpool, and Veena Pumping. (2022). **Structural Investigation and Simulation of Elastic Properties for Unidirectional Composite Materials.** The 12th International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 2022), 13 - 16 December 2022, Phuket, Thailand.

