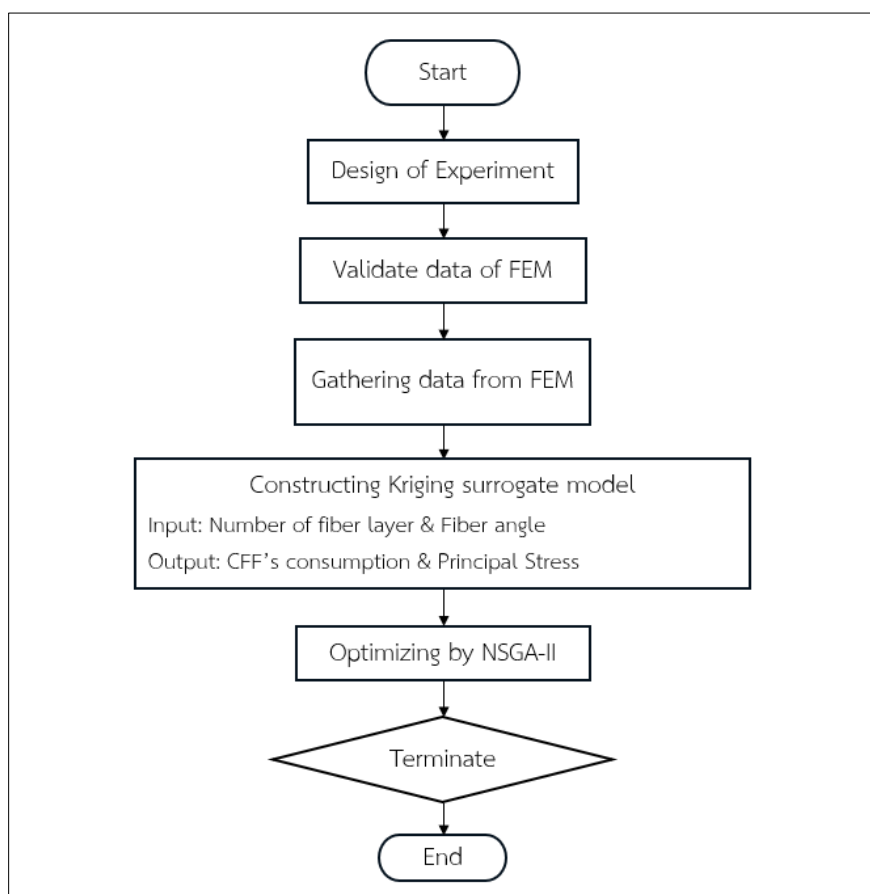


บทที่ 5

การดำเนินการวิจัยส่วนที่ 2

การดำเนินการวิจัยในส่วนที่ 2 จะทำการนำผลที่ได้จากการทดสอบของการดำเนินวิจัยส่วนที่ 1 มาใช้ในการวิเคราะห์ และใช้เป็นผลในการเทียบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ หลังจากตรวจสอบความถูกต้องของการทดสอบความแข็งแรงดึงด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จะใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในการทดสอบและออกแบบการพิมพ์ชิ้นส่วนกล่องด้านแรงบิด และทำการพิมพ์กล่องด้านแรงบิดที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดไปใช้งานจริงกับแท่นทดสอบแรงขับ

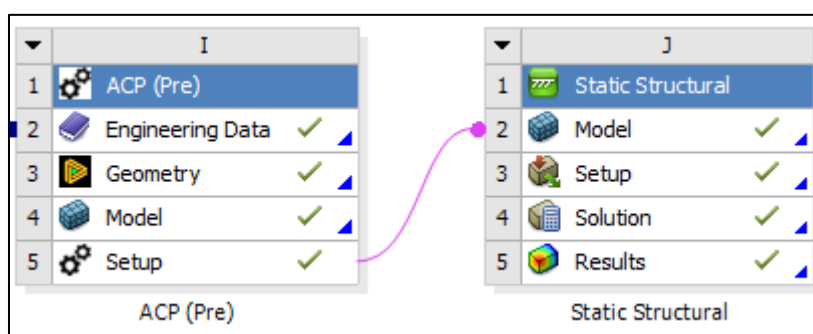
5.1 กรอบแนวคิดของการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 5.1 กรอบแนวคิดของการดำเนินการวิจัยในส่วนที่ 2

5.2 การเปรียบเทียบการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดยในลำดับแรกของการดำเนินการทดลองในส่วนที่ 2 คือการทดสอบวัดผลจากการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองจากการดำเนินการในส่วนที่ 1 เพื่อเทียบผลการตั้งค่าคุณสมบัติของการพิมพ์ จำนวนชั้นของการพิมพ์เส้นใย การวางองศาของวัสดุคอมโพสิตด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ว่ามีการตั้งค่าแม่นยำตรงเมื่อเทียบกับผลการทดลองหรือไม่ โดยการตั้งค่าดังกล่าวจะถูกตั้งจากโมดูล ANSYS ACP (Pre) และการตั้งค่าการทดสอบความแข็งแรงจะถูกตั้งค่าในโมดูล Static Structural แสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ภาพแสดงโมดูลของซอฟต์แวร์แอนซิสได้แก่ ACP (Pre) และ Static Structural เรียงจากซ้ายไปขวาตามลำดับ

จากรูปที่ 5.2 โมดูล ANSYS ACP (Pre) มีรายละเอียดดังนี้

- 1) Engineering data คือฐานข้อมูลของวัสดุที่จะใช้ในโปรแกรมจำลอง
- 2) Geometry คือส่วนที่กำหนดรูปร่าง/รูปทรงของชิ้นงาน
- 3) Model คือส่วนที่ใช้ตั้งค่าวัสดุที่ใช้ รวมถึงการตั้งค่า Mesh.
- 4) Setup คือส่วนที่ใช้ในการกำหนดการวางเส้นใยของวัสดุคอมโพสิต

จากรูปที่ 5.2 โมดูล ANSYS Static Structural มีรายละเอียดดังนี้

- 5) Model คือส่วนที่ใช้ตั้งค่าวัสดุที่ใช้ รวมถึงการตั้งค่า Mesh.
- 6) Setup คือการตั้งค่าการใส่ภาระงาน และการทดสอบ
- 7) Solution คือการตั้งค่าปัญหาที่ใช้ในการทดสอบ
- 8) Results คือส่วนแสดงผลลัพธ์คำตอบจากการทดสอบ

5.2.1 การตั้งค่าคุณสมบัติวัสดุในซอฟต์แวร์แอนซิส

ซอฟต์แวร์แอนซิสมีค่าคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุสำหรับใช้งานที่หลากหลาย ในขณะเดียวกันผู้ใช้ก็สามารถนำค่าข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุใหม่เข้าสู่ซอฟต์แวร์ได้ โดยการกำหนดค่าของวัสดุในส่วนนี้ จะนำค่าคุณสมบัติวัสดุที่เผยแพร่จาก Markforged และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยทำการตั้งค่าในโมดูล ANSYS ACP (Pre) ในส่วน Engineering Data โดยค่าที่ป้อนในซอฟต์แวร์ แสดงดังตารางที่ 5.1 และการกำหนดค่าของซอฟต์แวร์แอนซิส แสดงดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ค่าคุณสมบัติของวัสดุโอนิกซ์

ความหนาแน่นของวัสดุ (G/cm^3)	ค่าโมดูลัสของยัง (GPa)	อัตราส่วนปัวซอง
1.2	1.4	0.3

ตารางที่ 5.2 ค่าคุณสมบัติวัสดุเส้นใยคาร์บอนซึ่งตั้งค่าคุณสมบัติการยืดหยุ่นเป็นแบบออร์โททรอปิก

ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นวัสดุในแนวแกน X (GPa)	64.70
ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นวัสดุในแนวแกน Y (GPa)	22.40
ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นวัสดุในแนวแกน Z (GPa)	22.40
อัตราส่วนปัวซองในทิศทาง XY	0.30
อัตราส่วนปัวซองในทิศทาง YZ	0.35
อัตราส่วนปัวซองในทิศทาง XZ	0.30
ค่าโมดูลัสของแรงเฉือนในทิศทาง XY	22.10
ค่าโมดูลัสของแรงเฉือนในทิศทาง YZ	8.30
ค่าโมดูลัสของแรงเฉือนในทิศทาง XZ	22.10

Properties of Outline Row 4: Markforged Onyx			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1.2	g cm^{-3}
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and...	
6	Young's Modulus	1.4	GPa
7	Poisson's Ratio	0.3	
8	Bulk Modulus	$1.1667\text{E}+09$	Pa
9	Shear Modulus	$5.3846\text{E}+08$	Pa
10	Tensile Yield Strength	40	MPa
11	Tensile Ultimate Strength	37	MPa

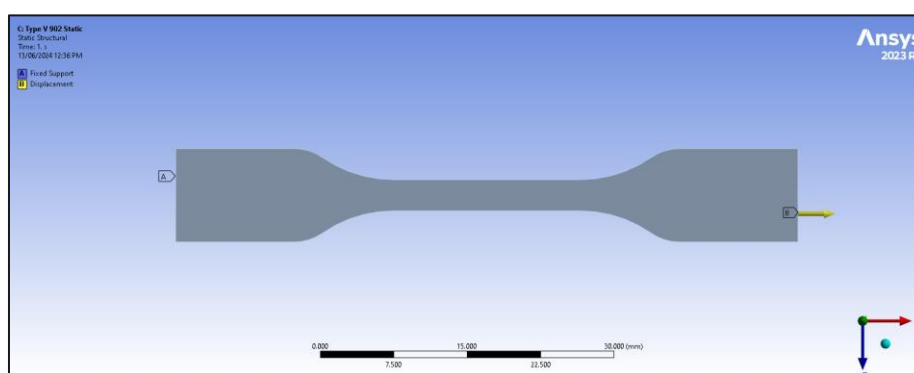
รูปที่ 5.3 การกำหนดค่าของวัสดุโอนิกซ์ในซอฟต์แวร์แอนซิส

Properties of Outline Row 3: Markforged Carbon Fiber			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1.4	g cm ⁻³
4	Orthotropic Elasticity		
5	Young's Modulus X direction	64.7	GPa
6	Young's Modulus Y direction	22.4	GPa
7	Young's Modulus Z direction	22.4	GPa
8	Poisson's Ratio XY	0.3	
9	Poisson's Ratio YZ	0.35	
10	Poisson's Ratio XZ	0.3	
11	Shear Modulus XY	22.1	GPa
12	Shear Modulus YZ	8.3	GPa
13	Shear Modulus XZ	22.1	GPa
14	Tensile Ultimate Strength	800	MPa

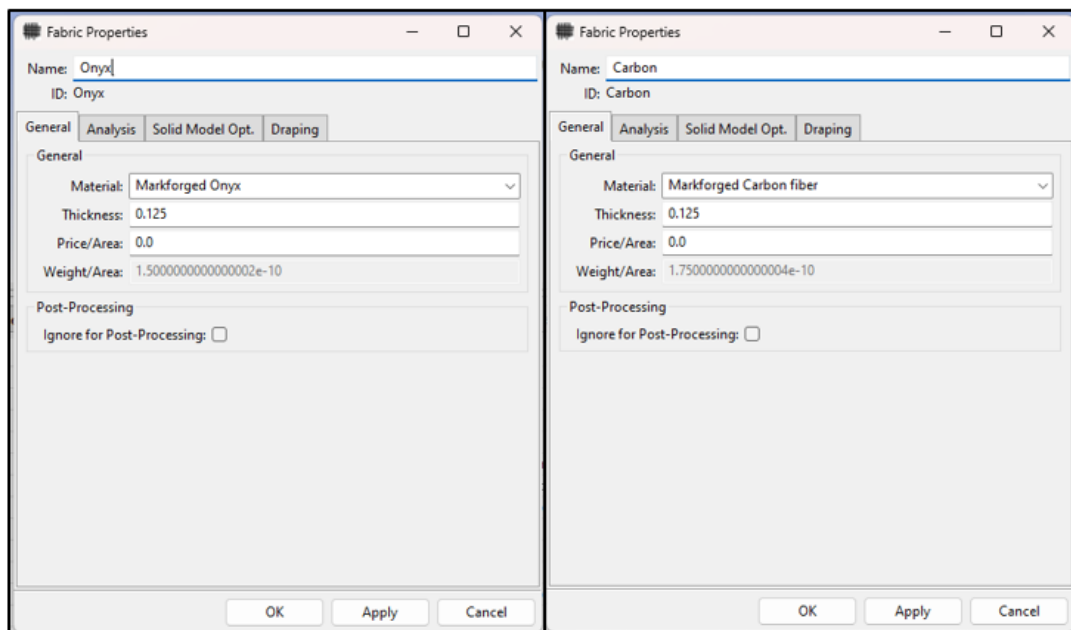
รูปที่ 5.4 ภาพแสดงการกำหนดค่าคุณสมบัติวัสดุของเส้นใยคาร์บอน

5.2.2 การทดสอบเทียบค่าการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

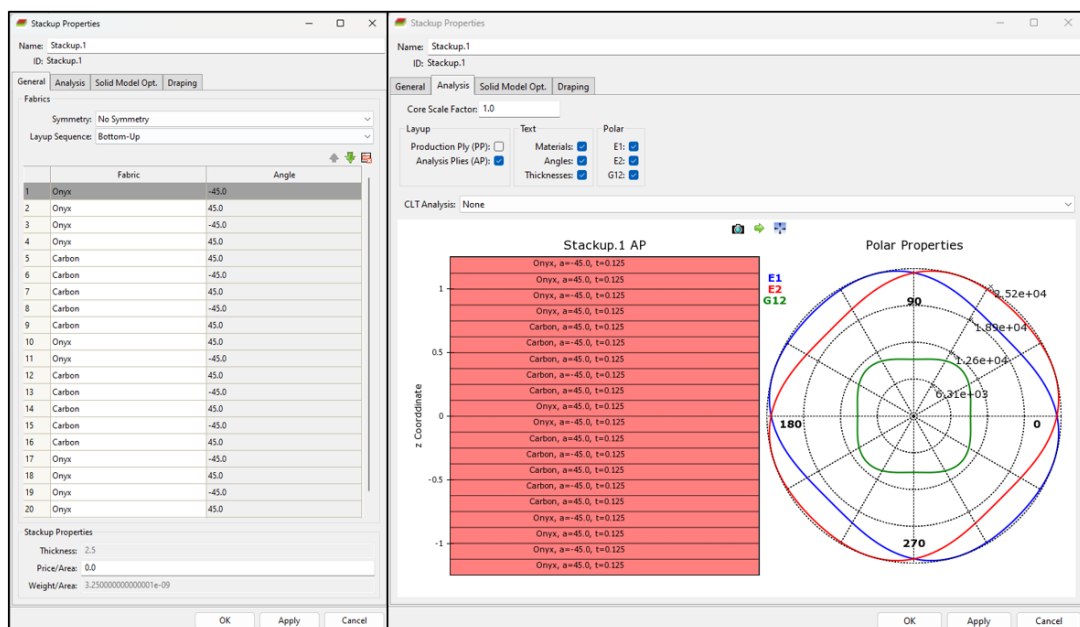
ซอฟต์แวร์แอนซิสสามารถสร้างชิ้นงานได้ด้วยซอฟต์แวร์ SpaceClaim หรือ DesignModeler ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ภายในโมดูลของซอฟต์แวร์แอนซิส หรือสามารถนำเข้าไฟล์ชิ้นงานจากภายนอกก็ทำได้ โดยในการวิจัยในส่วนของการเปรียบเทียบชิ้นงาน ได้ทำการขึ้นรูปชิ้นงานเป็น 2 มิติ เพื่อทำการกำหนดชั้นของการวางวัสดุคอมโพสิตในภายหลัง โดยเริ่มจากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยซอฟต์แวร์ SpaceClaim ในส่วน Geometry และตัดให้เหลือเพียงพื้นที่ผิว จากนั้นจึงนำผิวไปขึ้นรูปด้วย ANSYS ACP แล้วจึงนำมาทดสอบความแข็งแรงดึงเพื่อเทียบค่า ชิ้นงานการทดสอบที่เลือกใช้เป็นชิ้นงาน ASTM D638 Type V รูปที่ 5.5 แสดงการตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตการทดลอง



รูปที่ 5.5 การตั้งเงื่อนไขขอบเขตการทดลองเทียบค่า



รูปที่ 5.7 ภาพแสดงการตั้งค่าในส่วน Fabric โดยตั้งความหนาของทั้งสองวัสดุที่ 0.125 มิลลิเมตร

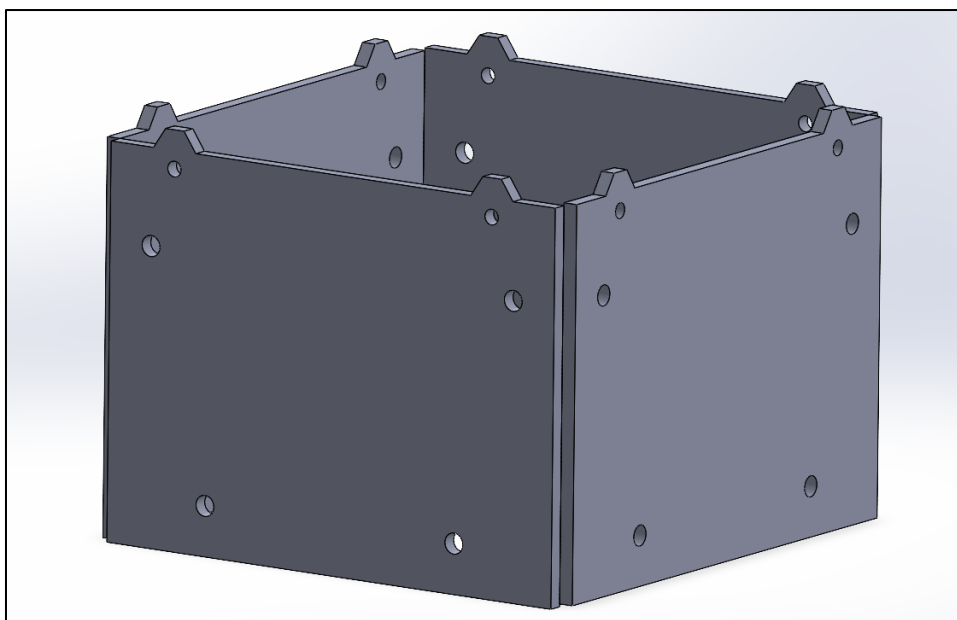


รูปที่ 5.8 ภาพแสดงการตั้งค่าในส่วน Stackups และแสดงแผนภาพคุณสมบัติพิกัดเชิงมุม

5.3 การทดสอบกล่องต้านแรงบิดด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

5.3.1 การออกแบบชิ้นงานกล่องต้านแรงบิด

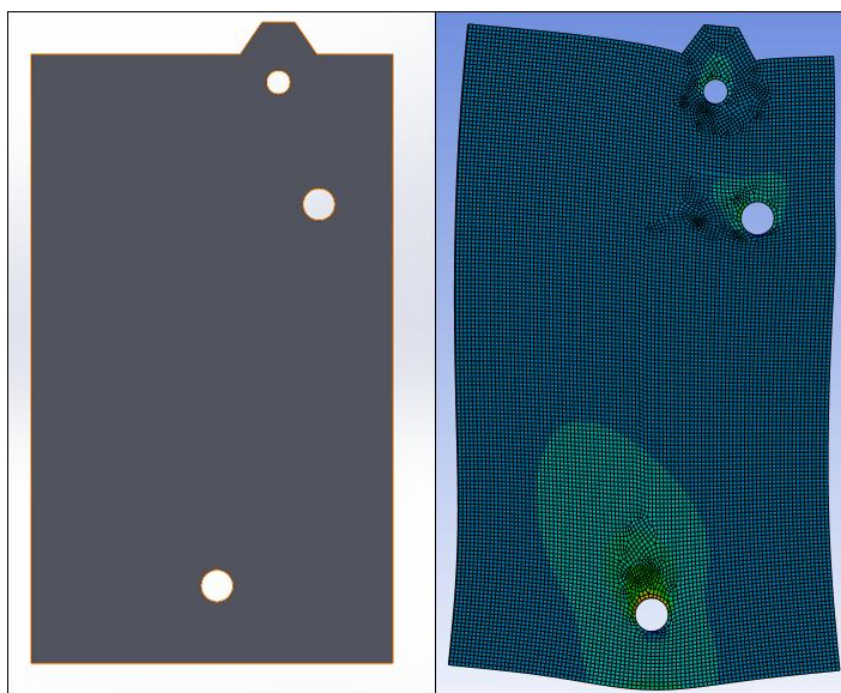
กล่องต้านแรงบิดซึ่งใช้ในแทนทดสอบแรงขับของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช มีลักษณะการออกแบบเบื้องต้นเป็นการประกอบของแผ่นคอมโพสิต 4 แผ่น แสดงดังรูปที่ 5.11



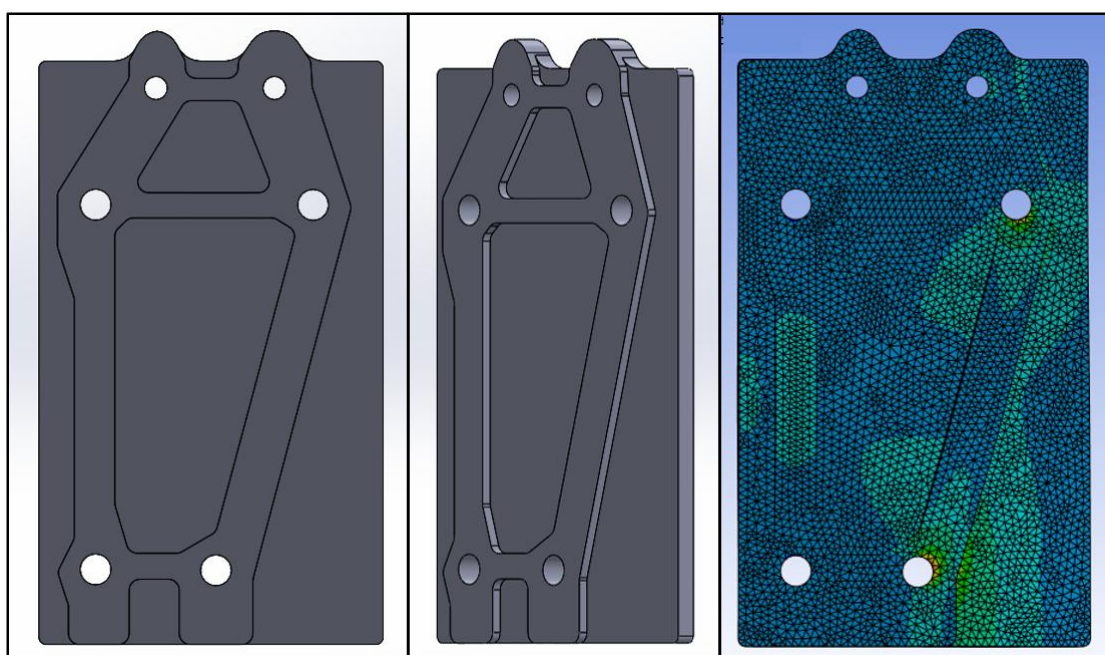
รูปที่ 5.9 ชิ้นงานต้นแบบของกล่องต้านแรงบิด

เนื่องจากในการศึกษาครั้งนี้มีการออกแบบการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติ ซึ่งใช้ระยะเวลาในการพิมพ์ และมีโอกาสจะเกิดความไม่เสถียรของอุณหภูมิในช่วงที่ทำการพิมพ์ชิ้นงาน ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบเพียงครึ่งหนึ่งของแผ่นคอมโพสิตเพื่อลดระยะเวลาที่ใช้ในการพิมพ์ จากนั้นจึงได้ทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เบื้องต้น เพื่อตรวจสอบบริเวณที่จะเกิดความเค้นสูงสุด แสดงดังรูปที่ 5.12

จากการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เบื้องต้น ทำให้มีในการออกแบบครั้งที่ 2 ได้กำหนดให้มีส่วนยื่นขึ้นมาจากผิวหน้าของชิ้นงาน เพื่อช่วยกระจายพื้นที่บริเวณที่จะเกิดความเค้นสูงสุด และสุดท้ายจึงได้ทำการลดความคมของชิ้นงานตามบริเวณขอบต่าง ๆ เพื่อลดการสะสมของความเค้นที่บริเวณขอบของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 5.13



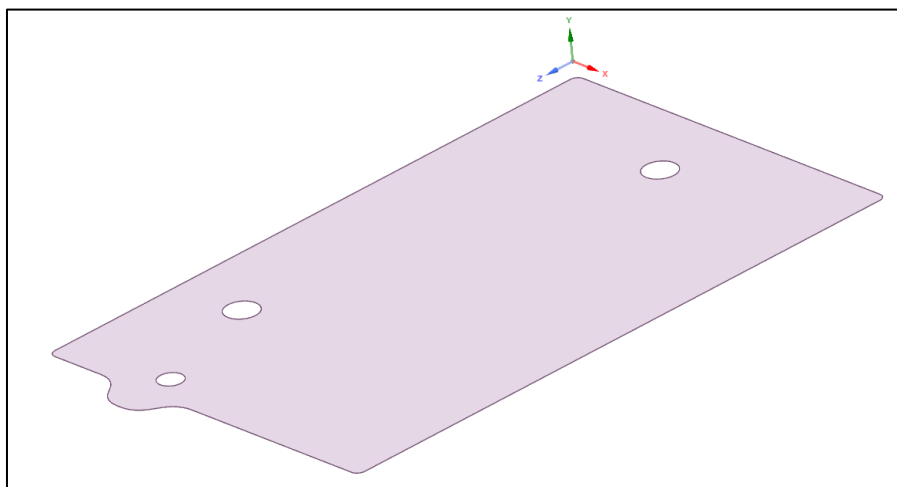
รูปที่ 5.10 การขึ้นรูปชิ้นงานครั้งที่ 1 และการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อตรวจสอบบริเวณการเกิดความเค้นสูงสุดครั้งที่ 1



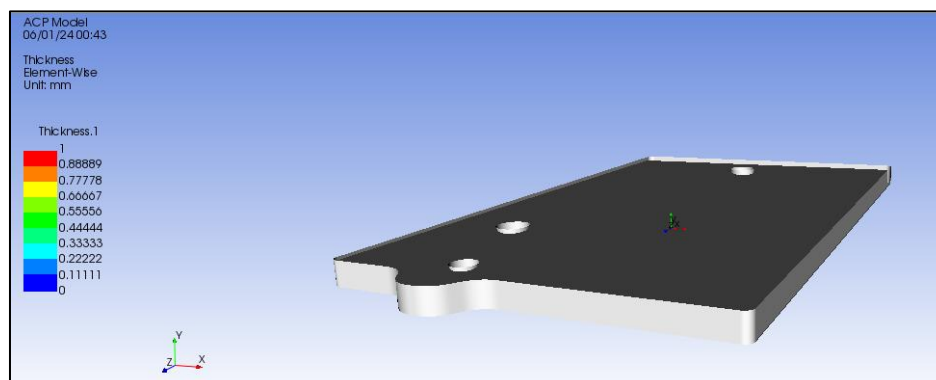
รูปที่ 5.11 การขึ้นรูปชิ้นงานครั้งที่ 2 และการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อตรวจสอบบริเวณการเกิดความเค้นสูงสุดครั้งที่ 2 และจำนวนอีลิเมนต์ 117,679 อีลิเมนต์

5.3.2 การขึ้นรูปชิ้นส่วนกล่องด้านแรงบิดเพื่อทดสอบด้วยซอฟต์แวร์แอนซิส

การขึ้นรูปชิ้นงานในซอฟต์แวร์แอนซิสเพื่อเลียนแบบการพิมพ์ของชิ้นส่วนกล่องด้านแรงบิด มีข้อจำกัดคือขาดความอิสระของการตั้งค่าการพิมพ์ กล่าวคือไม่สามารถเลียนแบบการพิมพ์ทั้งหมดได้ เช่น การพิมพ์วงแหวนไฟเบอร์ การกำหนดจำนวนชั้นผนัง เป็นต้น อย่างไรก็ตามตัวแปรสำคัญสำหรับการออกแบบในการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ได้แก่ จำนวนชั้นของไฟเบอร์ และรูปแบบการวางเส้นใยของวัสดุเสริมแรง สามารถกำหนดค่าผ่านซอฟต์แวร์แอนซิสได้ ด้วยโมดูล ANSYS ACP (Pre) โดยในการขึ้นรูปทีละชั้น จำเป็นต้องเลือกโมเดลที่มีลักษณะเป็นพื้นผิว (Surface) แล้วจึงกำหนดความหนาของแต่ละชั้น เพื่อกำหนดความหนาโดยรวมของชิ้นงาน ดังนั้นในขั้นตอนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ จึงไม่สามารถสร้างการย่นของชิ้นส่วนเสริมความแข็งแรงด้านบนได้ (แต่สามารถพิมพ์ขึ้นจริงได้) การขึ้นรูปพื้นผิวของชิ้นงานด้วยซอฟต์แวร์ ANSYS SpaceClaim แสดงดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 การขึ้นรูปพื้นผิวของชิ้นงานด้วยซอฟต์แวร์ ANSYS SpaceClaim



รูปที่ 5.13 ภาพแสดงความหนาของชิ้นงานซึ่งได้จากการวางชั้นของวัสดุคอมโพสิตใน ANSYS ACP

5.4 การกำหนดตัวแปรรูปแบบ เจริญใจ และฟังก์ชันวัตถุประสงค์

5.4.1 การกำหนดตัวแปรรูปแบบ

ตอนที่ 2 จะกำหนดการตั้งค่าวัสดุสำหรับทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบจำนวน 2 ตัวแปร มีขอบเขตของตัวแปรแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ความหมายของตัวแปรในการออกแบบการตั้งค่าวัสดุคอมโพสิต

ตัวแปร	ความหมาย	ขอบเขตและระดับของตัวแปร				
		ต่ำมาก	ต่ำ	กลาง	สูง	สูงมาก
C	จำนวนชั้นของเส้นใยเสริมแรง	12	14	16	18	20
D	การวางองศาเส้นใย	0°	45°	90°	-45°	45°/-45°

จากตารางที่ 5.3 ได้ทำการเลือกระดับของตัวแปรอย่างละ 5 ระดับ คือระดับต่ำมาก ต่ำ กลาง สูง และระดับสูงมาก โดยในตัวแปร C คือมีจำนวนชั้นในการพิมพ์เส้นใยเสริมแรง 12 ชั้น และมีสัดส่วนการพิมพ์อยู่ที่ 25 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับสัดส่วนโดยรวมของชิ้นงาน ซึ่งมีเงื่อนไขเสริมว่าชั้นของเส้นใยเสริมแรง 4 ชั้นบนสุดและล่างสุดจะวางเส้นใยเป็นรูปแบบ 45°/-45° สลับกันอย่างสมมาตร และเว้นพื้นที่ให้บริเวณตรงกลางสำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการวางองศาเส้นใย โดยเลือกให้เป็นองศาอื่น ๆ ทั้งหมด เพื่อเลือกองศาที่สอดคล้องกับทิศทางการรับแรงมากที่สุดพร้อมทั้งสิ้นเปลืองการพิมพ์น้อยที่สุด ซึ่งจำนวนการพิมพ์ 12 ชั้น หมายถึงจะมีชั้นของเส้นใยเสริมแรงส่วนกลางของชิ้นงานจำนวน 2 ชั้นที่สามารถถูกพิมพ์ได้อย่างสมมาตร และที่จำนวน 20 ชั้นซึ่งเป็นระดับสูงสุด คือช่วงที่มีการสิ้นเปลืองของเส้นใยในสัดส่วนถึง 41.67 เปอร์เซ็นต์ จึงถูกจำกัดไว้เป็นขอบเขตบนของการออกแบบตัวแปรการทดลอง

ตัวแปร D มีการวางองศาเส้นใยในระดับต่ำสุดที่ 0 องศา ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.16 จะพบว่าเป็นองศาที่ต้านแรงในแนวนอนซึ่งเกิดจากโมเมนต์การหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าโดยตรงในระดับกลางที่ 90 องศาเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.14 จะพบว่าเส้นใยต้านแรงในทิศทางแรงขับ (thrust) ส่วนในระดับ 45° , -45° และ 45°/-45° จะมีทิศทางต้านแรงทั้งจากโมเมนต์และแรงขับ

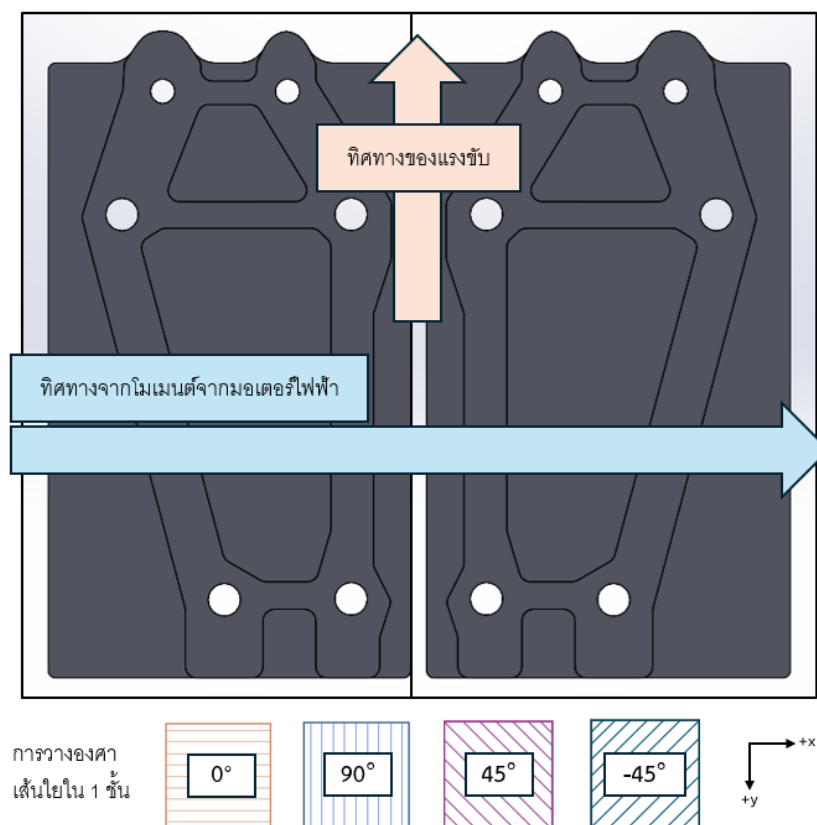
5.4.2 เงื่อนไขสำหรับการออกแบบการตั้งค่าวัสดุคอมโพสิต

ตอนที่ 2 จะออกแบบการตั้งค่าวัสดุคอมโพสิตภายในโมดูลซอฟต์แวร์ ANSYS ACP เพื่อใช้ในการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยรูปทรงของชิ้นงานจะถูกกำหนดด้วยพื้นผิวซึ่งสร้างจากโมดูล ANSYS SpaceClaim และมีความหนาเท่ากับ ความหนาของวัสดุ 1 ชั้นที่วาง ซึ่งวัสดุคอมโพสิตจาก Markforged ที่การตั้งค่าดังเดิมนั้น มีความหนาที่ชั้นละ 0.125 มิลลิเมตร และชิ้นงานกล่อ

ด้านแรงบิดมีความหนา 6 มิลลิเมตร แสดงภาพความหนาจากการขึ้นรูปดังรูปที่ 5.13 และได้จำนวนชั้นของวัสดุทั้งหมดคือ 48 ชั้น โดยจะมีการปรับตั้งค่าวัสดุดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 การปรับตั้งค่าวัสดุในซอฟต์แวร์ ANSYS ACP

หัวข้อการปรับตั้งค่า	การปรับตั้งค่าที่เลือกใช้
จำนวนชั้นทั้งหมดของวัสดุคอมโพสิต	48 ชั้น
วัสดุเมทริกซ์	อีพ็อกซี
วัสดุเสริมแรง	เส้นใยคาร์บอน
จำนวนชั้นในการพิมพ์เส้นใยเสริมแรง	12, 14, 16, 18 และ 20 ชั้น
องศาการวางตัวเส้นใย 4 ชั้นบนสุด/ล่างสุด	45°/-45°
องศาการวางตัวเส้นใยที่สมมาตรในส่วนกลาง	0°, 45°, 90°, -45° และ 45°/-45°



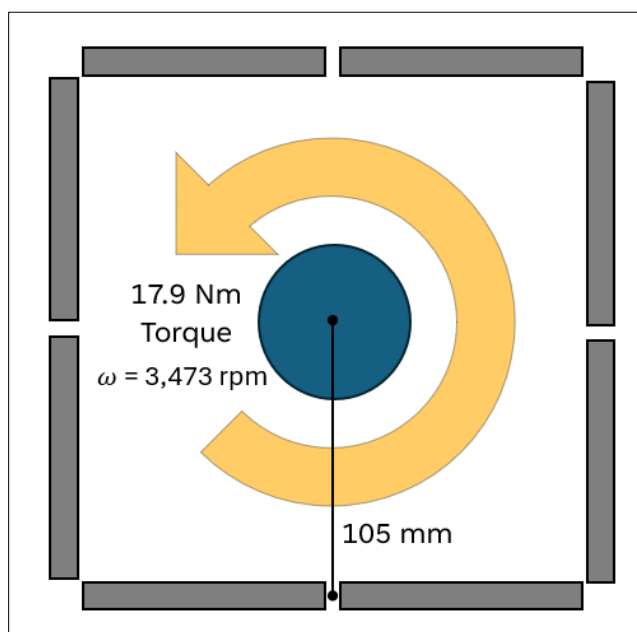
รูปที่ 5.14 ภาพแสดงการวางองศาเส้นใยเทียบกับแนวแรงของกล่องด้านแรงบิด

5.4.3 การกำหนดค่าการทดสอบแท่นทดสอบแรงขับด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

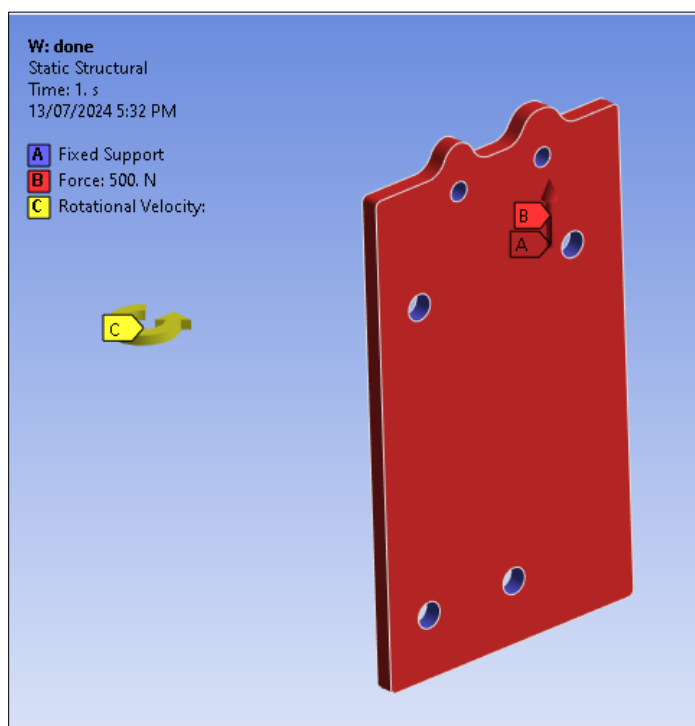
มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในแท่นทดสอบแรงขับ ได้แก่มอเตอร์ไฟฟ้ารุ่น U15 II Power Type UAV Motor KV100 ซึ่งมีที่การจ่ายกำลังไฟสูงสุดสามารถสร้างขนาดแรงดูดได้สูงสุดที่ 35.5 กิโลกรัม (348.255 นิวตัน) และมีค่าแรงบิดเนื่องจากการหมุนของมอเตอร์นี้ที่ 17.9 นิวตัน-เมตร และมีระยะห่างจากแผ่นทดสอบ 105 มิลลิเมตร และ Load cell ที่ใช้กับแท่นทดสอบแรงขับสามารถวัดแรงขับได้สูงสุดที่ 500 นิวตัน จึงได้กำหนดการออกแบบจากความสามารถสูงสุดของ Load cell ดังกล่าวไปใช้ในการดำเนินการทดสอบ แสดงความสัมพันธ์ของแรงและทิศทางการวางเส้นใยดังรูปที่ 5.14 และแสดงวิธีตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตของภาระที่กระทำต่อแผ่นด้านแรงบิดซึ่งเกิดจากการหมุนของมอเตอร์ดังรูปที่ 5.15 และเนื่องจากใบพัดและมอเตอร์ไฟฟ้ามีมวลซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับแรงขับที่เกิดขึ้น โดยมอเตอร์ไฟฟ้ามัมน้ำหนัก 1,740 กรัม และใบพัดที่ใช้มีน้ำหนัก 237 กรัม (T-Motor, 2024) แต่ในการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ได้ทำการตัดแรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักออกไป เพื่อให้เกิดค่าสูงสุดที่ได้จากการทดลองด้วยการทำการทดสอบด้วยแรงกระทำเพื่อให้เกิดความเสียหายสูงสุด และแสดงการตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตในซอฟต์แวร์แอนซิส ดังรูปที่ 5.16 โดยค่าภาระแรงในแนวแกนตั้งอ้างอิงจากภาระสูงสุดที่ Load cell รับผิดชอบ และค่าความเร็วเชิงมุมแปลงมาจากความเร็วรอบที่แรงขับสูงสุดของมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดแรงดูด 35.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 3,743 รอบต่อวินาที โดยแปลงให้อยู่ในหน่วยความเร็วเชิงมุมเรเดียนต่อวินาที

ตารางที่ 5.5 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตในการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

ประเภทภาระแรง	ค่าจากสมมติฐาน	ค่าที่ใช้ในไฟไนต์อีลิเมนต์
แรงแนวแกนตั้ง (N)	500.00	500.00
ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	363.63	370.00



รูปที่ 5.15 การคำนวณแรงกระทำต่อแผ่นต้านแรงบิดที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์



รูปที่ 5.16 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

5.4.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของชิ้นงานทดสอบ

การออกแบบการจำลองการพิมพ์สามมิติของวัสดุคอมโพสิต มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ชิ้นงานแผ่นกล่องต้านแรงบิดมีค่าคุณสมบัติทางกลที่ดีที่สุด และมีการสิ้นเปลืองวัสดุเส้นใยเสริมแรงที่ใช้ในการพิมพ์น้อยที่สุด และเนื่องจากส่วนที่ 2 ของงานวิจัยเป็นการจำลองการรับภาระของกล่องต้านแรงบิดจากมอเตอร์ของแท่นทดสอบแรงขับ ดังนั้นจึงได้ตั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงทางกลและความประหยัดวัสดุเสริมแรง แสดงดังสมการที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ

$$\text{Minimize (f1): } \sigma \quad (5.1)$$

โดย σ คือ ค่าความเค้นหลักของชิ้นงานแผ่นต้านแรงบิด

$$\text{Minimize (f2): CFC} \quad (5.2)$$

โดย CFC คือ ค่าความสิ้นเปลืองของเส้นใยคาร์บอน

สมการที่ 5.1 มีวัตถุประสงค์การออกแบบเพื่อให้ได้ค่าความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress) มีค่าน้อยที่สุด โดยสำหรับการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์นั้น จะนำค่าความเค้นหลักสูงสุดมาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุ เพื่อพิจารณาว่าวัสดุเกิดความเสียหายหรือไม่ และค่าความเค้นหลักสูงสุดที่มีค่าน้อยจะบ่งบอกถึงความเสียหายที่เกิดจากการรับภาระแรงที่น้อยของวัสดุ

สมการที่ 5.2 มีวัตถุประสงค์การออกแบบเพื่อหาค่าความสิ้นเปลืองของเส้นใยคาร์บอนที่น้อยที่สุด โดยสามารถคำนวณได้อัตโนมัติจากซอฟต์แวร์ eiger.io ซึ่งคำนวณมาจากตัวแปรต้นของการทดลอง ได้แก่ จำนวนชั้นของวัสดุเสริมแรง และการวางองศาของเส้นใยเสริมแรง

5.5 การออกแบบตัวแปรการทดลองในการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

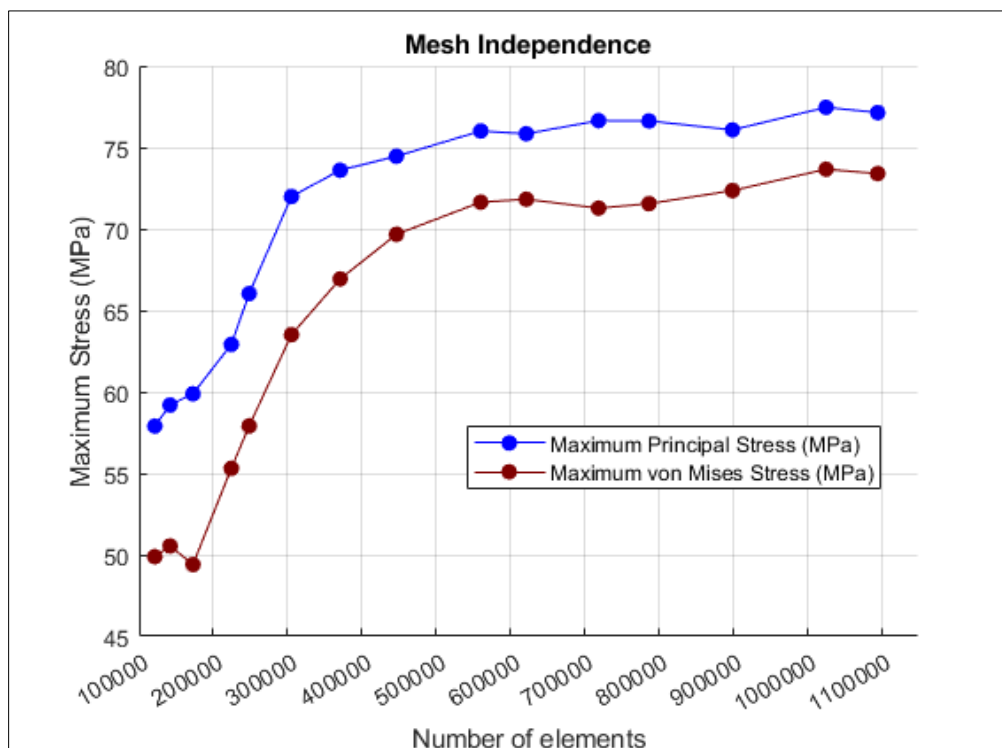
การออกแบบตัวแปรการเก็บข้อมูลของการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ใช้วิธีแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยออกแบบจำนวน 25 ตัวแปร โดยไม่มีการทดลองซ้ำ โดยผลจากการแปลงค่าขอบเขตและระดับตัวแปรจากตารางที่ 5.3 จะแสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ชื่อชิ้นงานแผ่นต้านแรงบิดในการทดสอบ และการปรับค่าวัสดุคอมโพสิตในซอฟต์แวร์

ชื่อชิ้นงาน	จำนวนชั้นที่มีวัสดุเสริมแรง (ชั้น)	การวางองค์ของเส้นใยวัสดุเสริมแรง (องศา)
12A	12	0
12B	12	45
12C	12	90
12D	12	-45
12E	12	45/-45
14A	14	0
14B	14	45
14C	14	90
14D	14	-45
14E	14	45/-45
16A	16	0
16B	16	45
16C	16	90
16D	16	-45
16E	16	45/-45
18A	18	0
18B	18	45
18C	18	90
18D	18	-45
18E	18	45/-45
20A	20	0
20B	20	45
20C	20	90
20D	20	-45
20E	20	45/-45

5.6 การทดสอบความเป็นอิสระของเมช

ในการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นจะต้องมีการหาขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมโดยจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณ และเพื่อลดความสิ้นเปลืองของทรัพยากรและเวลาในการทดลองซ้ำกับโมเดลเดิม โดยในการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 2 นี้ ได้ทำการทดสอบกับชิ้นงานซึ่งประกอบด้วยจำนวนชั้นของเส้นใยคาร์บอน 8 ชั้น จำนวน 15 ครั้ง ซึ่งได้ตั้งเงื่อนไขขอบเขตโดยใส่แรงในแกนตั้ง 500 นิวตัน แรงในแนวแกนนอน 170.5 นิวตัน และโมเมนต์บิดชิ้นงาน 17.5 นิวตัน-เมตร โดยตั้งตัวแปรในการสังเกตความเป็นอิสระคือ ค่าความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress) ค่าความเค้นพอนมิสเสส (von Mises Stress) และการเกิดการเสียรูปโดยรวม (Total deformation) ผลจากการทดสอบเพื่อทดสอบความเป็นอิสระของเมชแสดงดังตารางที่ 5.4 และแสดงความเป็นอิสระของเมชโดยวิเคราะห์จากค่าความเค้นหลักสูงสุด และความเค้นพอนมิสเสส ได้จากกราฟที่ 5.18 และสุดท้ายได้เลือกใช้การตั้งค่าเมชให้เกิดจำนวนเอลิเมนต์ที่ 719,136 เอลิเมนต์ เนื่องจากอยู่ในช่วงการลู่เข้าของคำตอบ เมื่อพิจารณาจากทุกกราฟแสดงความสัมพันธ์ข้างต้น



รูปที่ 5.17 ภาพแสดงการลู่เข้าของค่าความเค้นหลักสูงสุดและความเป็นอิสระของเมช

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบความเป็นอิสระของเมฆ

ครั้งที่	จำนวนอิเลิเมนต์	ค่าความเค้นหลัก สูงสุด (MPa)	ค่าความเค้นพอนมิส เสส (MPa)	การเสียรูปโดยรวม (มิลลิเมตร)
1	121,248	57.9	49.887	0.17801
2	141,744	59.19	50.544	0.17816
3	172,608	59.879	49.406	0.17792
4	224,304	62.909	55.304	0.17842
5	248,352	66.028	57.907	0.17918
6	305,328	71.988	63.508	0.17956
7	370,992	73.6	66.928	0.17973
8	446,880	74.459	69.667	0.17997
9	560,400	76.004	71.64	0.18003
10	621,744	75.836	71.818	0.17982
11	719,136	76.641	71.27	0.17989
12	787,056	76.621	71.546	0.18003
13	899,568	76.073	72.35	0.17999
14	1,025,616	77.458	73.659	0.18002
15	1,095,216	77.134	73.394	0.18001

จากรูปที่ 5.18 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของอิเลิเมนต์ซึ่งสร้างภายในโมเดล เทียบกับค่าความเค้นหลักสูงสุด แสดงให้เห็นว่าจำนวนของอิเลิเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความเค้นหลักสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นหลักสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อเกิดการลู่เข้าของคำตอบ (Convergence) โดยสามารถอธิบายได้เป็น 3 ช่วงดังนี้

ช่วงที่ 1 ค่าความเค้นหลักสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงจำนวนอิเลิเมนต์ที่ 124,722 ถึง 340,800 อิเลิเมนต์ เนื่องจากเมื่อจำนวนของอิเลิเมนต์มีน้อย ทำให้ขนาดของอิเลิเมนต์ใหญ่เกินไป เป็นช่วงที่ยังไม่เกิดการลู่เข้าของคำตอบ จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนอิเลิเมนต์เพื่อทดสอบต่อไป

ช่วงที่ 2 อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นหลักสูงสุดมีค่าลดลง ที่ช่วงจำนวน 340,800 ถึง 598,944 อิเลิเมนต์ เป็นช่วงที่ขนาดอิเลิเมนต์เริ่มเล็กลง และเริ่มเกิดการลู่เข้าของคำตอบ

ช่วงที่ 3 เกิดการลู่เข้าของคำตอบที่จำนวน 598,944 อิเลิเมนต์เป็นต้นไป ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นหลักสูงสุดในช่วงนี้มีความเสถียรมากขึ้น ทำให้สามารถเชื่อถือผลการ

ทดสอบที่ใช้การตั้งค่าเมช และจำนวนอิลิเมนต์ในช่วงนี้ เนื่องจากการเพิ่มจำนวนอิลิเมนต์มากเกินไป ทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรในการคำนวณ และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของคำตอบอย่างมีนัยสำคัญ

5.7 การสร้างสมการจำลองทดแทนข้อมูลการทดลอง

การสร้างสมการจำลองทดแทนในการจำลองทดแทนข้อมูลการทดสอบความแข็งแรงของกล่องด้านแรงบิดด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ในการดำเนินการวิจัยส่วนที่ 2 คือการสร้างฟังก์ชันคณิตศาสตร์ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น และตัวแปรตามของข้อมูลการทดลอง โดยกำหนดให้ตัวแปรต้นได้แก่ จำนวนชั้นของวัสดุเสริมแรงและการวางองศาของเส้นใยเสริมแรง และกำหนดให้ตัวแปรตามได้แก่ผลการทดสอบไฟไนต์อิลิเมนต์ของค่าความเค้นหลักสูงสุด และความสิ้นเปลืองของเส้นใยคาร์บอน โดยสร้างฟังก์ชันดังกล่าวจากสมการคริกกิง ทำให้ได้ฟังก์ชันซึ่งสามารถทดแทนข้อมูลผลการทดลองและค่าความสิ้นเปลืองที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรต้นได้จากตัวแปรค่าเฉลี่ยของสมการคริกกิง สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ออกแบบจากสมการที่ 5.1 และ 5.2 แสดงดังสมการที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ

$$\sigma_1(x) = \mu(x) + r^T R^{-1}(F - \mu) \quad (5.3)$$

โดย $\sigma_1(x)$ คือ สมการจำลองทดแทนของสมการที่ 5.1
 x คือ ค่าตัวแปรการออกแบบจากตารางที่ 5.3

$$CFC(x) = \mu(x) + r^T R^{-1}(F - \mu) \quad (5.4)$$

โดย $CFC(x)$ คือ สมการจำลองทดแทนของสมการที่ 5.2
 x คือ ค่าตัวแปรการออกแบบจากตารางที่ 5.3

5.8 การกำหนดการหาค่าเหมาะสมที่สุดของการทดลอง

ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ได้กำหนดให้มีจำนวนประชากรเริ่มต้นที่ 50 และไม่กำหนดจำนวนรุ่นของประชากร (Generation) โดยในการคัดเลือกประชากรเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของขั้นตอนวิธีนี้ ซึ่งในแต่ละรุ่นของประชากรจะมีการไขว้เปลี่ยนของข้อมูล (Crossover) เพื่อให้ข้อมูลมีความหลากหลาย โดยมีอัตราการไขว้เปลี่ยนอยู่ที่ 0.9 นอกจากนี้ยังมีอัตราการกลายพันธุ์ (Mutation) ที่ 0.1 มาใช้ในการสร้างกลุ่มข้อมูลใหม่ที่ไม่ซ้ำกับข้อมูลประชากรรุ่นก่อนหน้า