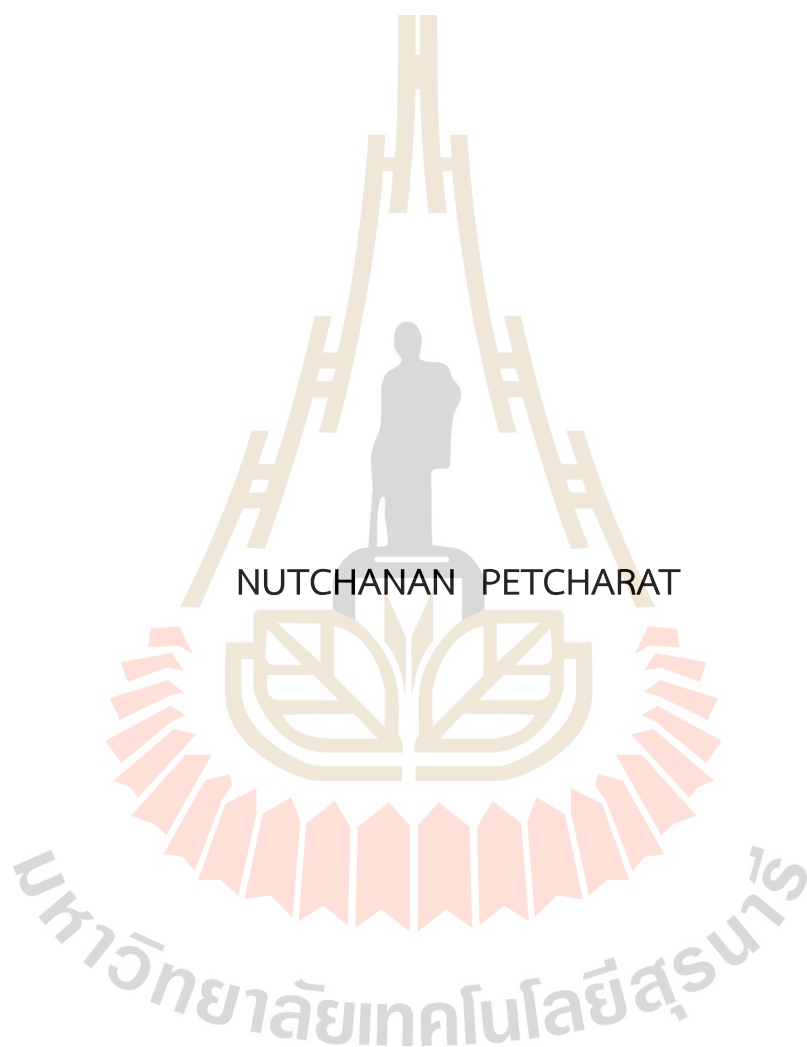


การหาค่าเหมาะสมที่สุดของวัสดุพิมพ์สามมิติชนิดคอมโพสิตในการออกแบบ
กล่องต้านแรงบิดสำหรับการใช้งานในแท่นทดสอบแรงขับ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

OPTIMIZATION OF 3D-PRINTED COMPOSITE TORSION BOX
DESIGN IN THRUST STAND APPLICATIONS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

การหาค่าเหมาะสมที่สุดของวัสดุพิมพ์สามมิติชนิดคอมโพสิตในการออกแบบกล่องด้าน
แรงบิดสำหรับการใช้งานในแท่นทดสอบแรงขับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

Otharl

(ผศ. ดร.อรรถสิทธิ์ เวียงคำ)

ประธานกรรมการ

อรรถสิทธิ์ เวียงคำ

(รศ. ดร.อรรถพล อริยฤทธิ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

ธีทัต ดลวิชัย

(ผศ. ดร.ธีทัต ดลวิชัย)

กรรมการ

อรลักษณ์ พิชิตกุล

(อ. ดร.อรลักษณ์ พิชิตกุล)

กรรมการ

ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์

(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

และประกันคุณภาพ

พรศิริ จงกล

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัชนันท์ เพชรรัตน์ : การหาค่าเหมาะสมที่สุดของวัสดุพิมพ์สามมิติชนิดคอมโพสิตในการ
ออกแบบกล่องต้านแรงบิดสำหรับการใช้งานในแท่นทดสอบแรงขับ (OPTIMIZATION OF 3D-
PRINTED COMPOSITE TORSION BOX DESIGN IN THRUST STAND APPLICATIONS)
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์. ดร.อภินันท์ อริยฤทธิ์, 105 หน้า.

คำสำคัญ: วัสดุคอมโพสิต/การพิมพ์สามมิติ/สมการจำลองทดแทน/การหาค่าเหมาะสมที่สุด

ในปัจจุบันวัสดุคอมโพสิตเข้ามามีบทบาทสำคัญในด้านวิศวกรรมโดยการนำข้อดีของวัสดุสองชนิดมารวมเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถประยุกต์ใช้กับการใช้งานที่หลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุคอมโพสิตและกรรมวิธีในการขึ้นรูปชิ้นงาน หนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปที่มีความโดดเด่นในด้านความอิสระในการขึ้นรูป คือการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ซึ่งในการปรับตั้งค่าการพิมพ์ที่ต่างกันจะค่าคุณสมบัติในแต่ละทิศทางที่ต่างกันไปด้วย ทั้งวัสดุคอมโพสิตโดยเฉพาะในส่วนของวัสดุเสริมแรงมักจะมีราคาสูง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับตั้งค่าการพิมพ์ที่เหมาะสม การเลือกปริมาตรของวัสดุที่จะใช้ในการพิมพ์จึงมีบทบาทสำคัญการลดต้นทุนการผลิต ในการศึกษาของงานวิจัยฉบับนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการออกแบบการปรับตั้งค่าการพิมพ์วัสดุคอมโพสิต โดยรวมกับการใช้เทคนิคการสร้างสมการทดแทน เพื่อช่วยลดต้นทุนการวิจัย และลดจำนวนการทดลองที่ไม่จำเป็น ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ได้แบ่งการดำเนินการวิจัยออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 จะประยุกต์ใช้เทคนิคที่กล่าวมาข้างต้น ร่วมกับการทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การเติมร่วมกับจำนวนวงแหวนไฟเบอร์ที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้ค่าคุณสมบัติความแข็งแรงดึงสูงสุด และค่าโมดูลัสการยืดของวัสดุมีค่าสูงสุด จากนั้นการดำเนินการในส่วนที่ 2 จะเป็นการนำเทคนิคดังกล่าวมาประยุกต์กับวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับการออกแบบชิ้นงานกล่องต้านแรงบิดสำหรับใช้ในแท่นทดสอบแรงขับใบพัดอากาศยาน โดยออกแบบให้มีจำนวนชั้นการพิมพ์เส้นใยเสริมแรง และการวางองศาการพิมพ์ที่เหมาะสม ซึ่งทำให้มีค่าความเค้นหลักสูงสุดมีค่าน้อยที่สุด โดยที่สิ้นเปลืองปริมาตรเส้นใยคาร์บอนที่ใช้น้อยที่สุด โดยในส่วนที่ 1 ได้จำนวนวงแหวนไฟเบอร์ที่เหมาะสมที่ 3-4 วงแหวน ร่วมกับความหนาแน่นการเติมที่ 50 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่ 2 ได้ผลการออกแบบจำนวนชั้นการพิมพ์เส้นใยเสริมแรงและการวางองศาเส้นใยส่วนกลางจากทั้งการขึ้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม และผลจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ สำหรับใช้ในแท่นทดสอบแรงขับ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา ณัชนันท์ เพชรรัตน์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อภินันท์ อริยฤทธิ์

NUTCHANAN PETCHARAT : OPTIMIZATION OF 3D-PRINTED COMPOSITE
TORSION BOX DESIGN IN THRUST STAND APPLICATIONS.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. ATTHAPHON ARIYARIT, D.Eng., 105 PP.

Keywords: Composite material/3D Printing/Surrogate model/Optimization

Composite materials have gained significant attention in the engineering field due to their ability to combine the advantageous properties of two distinct materials, enabling a wide range of applications. The properties of these materials are highly dependent on the type of composite and the fabrication process. Among various fabrication techniques, 3D printing offers remarkable design flexibility for composite components. However, the printing parameters significantly influence the mechanical properties of the printed parts, and the high cost of composite materials, particularly reinforcing fibers, necessitates the optimization of printing settings to minimize material consumption. This study employs the multi-objective optimization technique and surrogate modeling approach to optimize the printing parameters for 3D-printed composite materials, aiming to reduce experimental effort. The research is divided into two phases. In Phase 1, the tensile strength testing, following ASTM standards for polymer composites, determines the optimal infill density and concentric fiber ring that maximize tensile strength and modulus of elasticity. In Phase 2, the optimized printing parameters are integrated with finite element analysis (FEA) to design a torsion-resistant box for thrust stand. The objective is to minimize the maximum principal stress while minimizing carbon fiber consumption. The results of Phase 1 indicate that the optimal fiber ring number is 3-4 rings, and the infill density is 50%. Phase 2 able to find optimum settings from both optimization process and results analysis for the aircraft propeller thrust stand application.

School of Mechanical Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature...ณัฐนันท์ เพชรรัตน์...
Advisor's Signature...อรรถพร อริยาริต...

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วย ความกรุณา แนะนำ ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไข ทั้งทางด้านวิชาการ และทางด้านการดำเนินงานวิจัยจาก คณาจารย์ บุคลากร นักศึกษาที่เกี่ยวข้องของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้เขียนขอขอบพระคุณอย่างสุดซึ้งไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร.อัฐพล อริยฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำปรึกษา และคำแนะนำในการดำเนินการวิจัยทุกขั้นตอนเป็นอย่างดี ตลอดจนเอาใจใส่ในการตรวจทานข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์เล่มนี้และสนับสนุนค่าใช้จ่ายสำหรับการนำเสนอผลงานวิชาการและตีพิมพ์ผลงานวิชาการในระดับนานาชาติ

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย อาจารย์ ดร.อรรถสิทธิ์ เวียงคำ ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีทัต ดลวิชัย และอาจารย์ ดร.อรลักษณ์ พิษิตกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งได้ตรวจทาน แก้ไข และให้คำแนะนำอันมีประโยชน์ต่อความบริบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ นายธีรพรพงษ์ ศรีอ่อน ผู้ดูแลอาคารเครื่องมือ 5 นางสาวสุวัจนีย์ บานพับ และนายปิยณัฐ ขุนทองพลัดประเสริฐ นักศึกษาระดับปริญญาตรี ที่เสียสละเวลาเพื่อช่วยผู้วิจัยทดสอบเครื่องมือการทดลอง และจัดเก็บผลการทดลอง ให้การดำเนินงานผ่านลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้มอบทุนผู้มีผลการเรียนดีเด่นให้แก่ผู้วิจัย สำหรับการสนับสนุนค่าครองชีพและค่าเล่าเรียนในระดับบัณฑิตศึกษา รวมถึงพื้นที่ทำงานวิจัยที่อาคารเครื่องมือ 5 และอาคารเครื่องมือ 11 ทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินการเก็บผลการทดลองได้ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเจตนิพัทธ์ สิริอมราภรณ์ และคุณแม่สุจิตรา เพชรรัตน์ ที่คอยให้กำลังใจ และเป็นแรงผลักดัน ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์ด้านทุนทรัพย์ที่ใช้สำหรับการเล่าเรียนในระดับบัณฑิตศึกษาตลอดจนจบการศึกษาในครั้งนี้

ณัชนันท์ เพชรรัตน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2 ปรัชญารวบรวมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ปรัชญารวบรวมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคอมโพสิตและการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ.....	6
2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์.....	8
2.1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด.....	9
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite materials)	11
2.2.1.1 วัสดุเมทริกซ์ (Matrix)	11
2.2.1.2 วัสดุเสริมแรง (Reinforcement).....	12
2.2.2 การพิมพ์วัสดุคอมโพสิตด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ.....	13
2.2.2.1 การตั้งค่าการพิมพ์ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเมทริกซ์	13
2.2.2.2 การตั้งค่าการพิมพ์ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเสริมแรง	15
2.2.3 คุณสมบัติความเค้นและความเครียดของวัสดุ (Stress and Strain)	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.4	วัสดุไอโซทรอปิกและวัสดุแอนไอโซทรอปิก	22
2.2.4.1	วัสดุไอโซทรอปิก (Isotropic material).....	22
2.2.4.2	วัสดุแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic material).....	22
2.2.5	การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลเต็มรูป.....	23
2.2.6	แท่นทดสอบแรงขับ (Thrust stand)	23
2.2.7	การทดสอบแรงดึงของโพลิเมอร์และคอมโพสิตด้วยมาตรฐาน ASTM D3039	24
2.2.7.1	รูปแบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึง.....	24
2.2.7.2	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึง	25
2.2.7.3	ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงดึง	25
2.2.8	การทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ และซอฟต์แวร์แอนซิส	26
2.2.8.1	การทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์.....	26
2.2.8.2	ซอฟต์แวร์แอนซิส และโมดูลแอนซิสเอซีพี	26
2.2.9	การสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบ.....	27
2.2.9.1	การสร้างแบบจำลองทดแทนด้วยวิธีคริกกิง	27
2.2.10	วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด	29
2.2.10.1	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับไม่ครอบงำ	29
3	วิธีดำเนินการวิจัย ส่วนที่ 1	32
3.1	กรอบแนวคิดของการดำเนินการวิจัย.....	32
3.2	การกำหนดตัวแปรออกแบบ เงื่อนไข และฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	33
3.2.1	การกำหนดตัวแปรออกแบบ.	33
3.2.2	เงื่อนไขสำหรับการออกแบบชิ้นงานทดสอบ	34
3.2.3	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	35
3.3	การออกแบบตัวแปรการทดลองการทดสอบความแข็งแรงดึง.....	36
3.4	การทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต	36
3.4.1	รูปร่างและขนาดของการสร้างชิ้นงานทดสอบ	36
3.4.2	การตั้งค่าการพิมพ์ของวัสดุคอมโพสิต	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.2.1 รายละเอียดการปรับตั้งค่าการพิมพ์	38
3.4.3 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงดึงวัสดุคอมโพสิต	40
3.5 ผลของค่าความเค้นและความเครียดโดยสรุปจากการทดลอง	42
3.6 การสร้างสมการจำลองข้อมูลการทดสอบ	43
3.7 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์จากสมการจำลอง	43
4 ผลการดำเนินการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัยส่วนที่ 1	44
4.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต	44
4.2 ความน่าเชื่อถือของการสร้างสมการจำลองทดแทน	47
4.3 การรู้เข้าของคำตอบจากการหาค่าเหมาะสมที่สุด	50
4.4 ผลของการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการพิมพ์ชิ้นงานคอมโพสิตแบบสามมิติ	51
5 การดำเนินการวิจัยส่วนที่ 2	53
5.1 กรอบแนวคิดของการดำเนินการวิจัย	53
5.2 การเปรียบเทียบการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	54
5.2.1 การตั้งค่าคุณสมบัติวัสดุในซอฟต์แวร์แอนซิส	55
5.2.2 การทดสอบเทียบค่าการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	56
5.2.3 การกำหนดค่าการวางตัวของวัสดุคอมโพสิต	57
5.3 การทดสอบกล่องต้านแรงบิดด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	59
5.3.1 การออกแบบชิ้นงานกล่องต้านแรงบิด	59
5.3.2 การขึ้นรูปชิ้นส่วนกล่องต้านแรงบิดเพื่อทดสอบด้วยซอฟต์แวร์แอนซิส	61
5.4 การกำหนดตัวแปรออกแบบ เงื่อนไข และฟังก์ชันวัตถุประสงค์	62
5.4.1 การกำหนดตัวแปรออกแบบ	62
5.4.2 เงื่อนไขสำหรับการออกแบบการตั้งค่าวัสดุคอมโพสิต	62
5.4.3 การกำหนดค่าการทดสอบแทนทดสอบแรงขับด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	64
5.4.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของชิ้นงานทดสอบ	66
5.5 การออกแบบตัวแปรการทดลองในการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	66
5.6 การทดสอบความเป็นอิสระของเมช	68
5.7 การสร้างสมการจำลองทดแทนข้อมูลการทดลอง	70

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.8 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของการทดลอง	70
6 ผลการดำเนินการวิจัย ส่วนที่ 2	71
6.1 การยืนยันผลวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ จากการเทียบค่าผลการทดลอง	71
6.2 ผลการทดสอบแผ่นต้านแรงบิดด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์	72
6.2.1 ผลการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.....	72
6.3 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของการทดสอบ	75
6.3.1 การหาค่าเหมาะสมที่สุดจากการทดสอบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	75
6.3.2 การวิเคราะห์ค่าเหมาะสมที่สุดโดยตรงจากผลการทดสอบ	80
7 สรุปและข้อเสนอแนะ	82
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	82
รายการอ้างอิง	84
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	87
ภาคผนวก ข	93
ประวัติผู้เขียน	105

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ความหมายของตัวแปรในการออกแบบการพิมพ์วัสดุคอมโพสิต	33
3.2 การปรับตั้งค่าในการพิมพ์วัสดุคอมโพสิต	34
3.3 การปรับตั้งค่าในการพิมพ์ในส่วนวัสดุเสริมแรง.....	34
3.4 ชื่อชิ้นงานทดสอบ และการปรับตั้งค่าตัวแปรออกแบบของชิ้นงานทดสอบ.....	36
3.5 ตารางแสดงข้อมูลของตัวแปรต้นและตัวแปรตามซึ่งได้จากการทดลอง.....	42
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม	46
4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด	47
4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าโมดูลัสการยืดของวัสดุ	47
4.4 ค่าจากการเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพความแม่นยำต่าง ๆ ของสมการจำลอง ส่วนที่ 1.....	50
4.5 ข้อมูลขาเข้าและขาออกของกลุ่มตัวอย่างจากขอบหน้าพาเรโต ในการวิจัยส่วนที่ 1.....	51
5.1 ค่าคุณสมบัติของวัสดุโณนิคซ์	55
5.2 ค่าคุณสมบัติวัสดุเส้นใยคาร์บอนคุณสมบัติการยืดหยุ่นเป็นแบบบอร์โรโทรปิก.....	55
5.3 ความหมายของตัวแปรในการออกแบบการตั้งค่าวัสดุคอมโพสิต	62
5.4 การปรับตั้งค่าวัสดุในซอฟต์แวร์ ANSYS ACP	63
5.5 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตในการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	64
5.6 ชื่อชิ้นงานแผ่นต้านแรงบิด และการปรับค่าวัสดุคอมโพสิตในซอฟต์แวร์.....	67
5.7 ผลการทดสอบความเป็นอิสระของเมช.....	69
6.1 การเทียบค่ายืนยันผลการทดสอบจากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์.....	71
6.2 ผลการทดลองแผ่นต้านแรงบิดด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	74
6.3 ค่าจากการเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพความแม่นยำต่าง ๆ ของสมการจำลอง ส่วนที่ 2.....	78
6.4 ข้อมูลขาเข้าและขาออกของกลุ่มตัวอย่างจากขอบหน้าพาเรโต ในการวิจัยส่วนที่ 1	80

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ตัวอย่างการรวมกันของวัสดุเมทริกซ์และวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต 11
2.2	ภาพตัวอย่างวัสดุคอมโพสิตเมื่อรับแรง 12
2.3	รูปแบบการพิมพ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบต่าง ๆ 14
2.4	ภาพแสดงชั้นของรูปและฟลอร์ของวัสดุคอมโพสิต 14
2.5	ภาพแสดงจำนวนชั้นของผนังของวัสดุ 2 ชั้น และแสดงการนับจำนวนวงแหวนไฟเบอร์ 15
2.6	ภาพแสดงการตั้งค่าองค์การพิมพ์เส้นใย และตัวอย่างของการเรียงตัวเส้นใยที่ องศาต่าง ๆ 16
2.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียวเมื่อทำการ ทดสอบ แรงดึง 18
2.8	อิลิเมนต์ของความเค้นในทิศทางต่าง ๆ และการเกิดความเค้นหลักในสองมิติ 19
2.9	อิลิเมนต์ของความเค้นต่าง ๆ ในสามมิติ 20
2.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเปราะเมื่อรับภาระแรง จากการทดสอบแรงดึง 22
2.11	ชุดแท่นทดสอบแรงขับซึ่งพัฒนาโดยหน่วยวิจัยจากทางโรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทกษัตริยาธิราช 24
2.12	ภาพแสดงชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง 25
2.13	การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม 30
2.14	การคำนวณระยะห่างจากกลุ่มคำตอบอื่น 31
2.15	การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับไม่ครอบงำ 2 31
3.1	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยในส่วนที่ 1 32
3.2	ภาพแสดงเนื้อวัสดุส่วนกลางของชิ้นงานทดสอบที่ลดลงตามจำนวนวงแหวนไฟเบอร์ 33
3.3	ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึงและขนาดของชิ้นงาน 37
3.4	ภาพแสดงหน้าต่างซอฟต์แวร์ Eiger 37
3.5	ภาพแสดงหน้าต่างของแท็บย่อยต่าง ๆ ของแท็บ PART 39
3.6	ภาพแสดงหน้าต่างเมื่อเลือกการปรับตั้งค่าในแท็บ XRAY 39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7	แสดงเครื่องพิมพ์วัสดุคอมพิวเตอร์แบบสามมิติ Markforged รุ่น X7 และขณะ เครื่องพิมพ์กำลังพิมพ์ชิ้นงานทดสอบ.....40
3.8	แสดงเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ Lloyd รุ่น LD 100 หน้าจอบอกระยะของ ปากกาจับชิ้นงานของเครื่องทดสอบ และการแตกหักของชิ้นงานทดสอบ.....40
3.9	ภาพแสดงหน้าต่างการตั้งค่าซอฟต์แวร์ NEXYGEN PLUS441
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรออกแบบและค่าความแข็งแรงดึงจากการทดสอบ45
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรออกแบบและค่าโมดูลัสความยืดจากการทดสอบ45
4.3	ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองคริกกิ้งกับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดจาก ผลการทดลอง.....48
4.4	ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองคริกกิ้งกับค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุ48
4.5	ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองการถดถอยเชิงเส้นกับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด..49
4.6	ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองการถดถอยเชิงเส้นกับค่าโมดูลัส ความยืดของวัสดุ49
4.7	การลู่เข้าของค่าวัดความหลากหลายค่าตอบในแต่ละรุ่นประชากรการวิจัยส่วนที่ 151
4.8	ภาพแสดงผลค่าตอบจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดและขอบหน้าพาเรโต52
4.9	ภาพแสดงผลข้อมูลขาออกของตัวอย่างจากขอบหน้าพาเรโตจากการหาค่าเหมาะสมที่สุด....52
5.1	กรอบแนวคิดของการดำเนินการวิจัยในส่วนที่ 253
5.2	ภาพแสดงโมดูลของซอฟต์แวร์แอนซิสได้แก่ ACP (Pre) และ Static Structural.....54
5.3	การกำหนดค่าของวัสดุโณิกซีในซอฟต์แวร์แอนซิส.....55
5.4	ภาพแสดงการกำหนดค่าคุณสมบัติวัสดุของเส้นใยคาร์บอน.....56
5.5	การตั้งเงื่อนไขขอบเขตการทดลองเทียบค่า.....56
5.6	การตั้งค่าการพิมพ์ของชิ้นงานเทียบค่า.....57
5.7	ภาพแสดงการตั้งค่าในส่วน Fabric โดยตั้งความหนาของทั้งสองวัสดุที่ 0.125 มิลลิเมตร...58
5.8	ภาพแสดงการตั้งค่าในส่วน Stackups และแสดงแผนภาพคุณสมบัติพิกัดเชิงมุม58
5.9	ชิ้นงานต้นแบบของกล่องต้านแรงบิด.....59
5.10	การขึ้นรูปชิ้นงานครั้งที่ 1 และการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อตรวจสอบ บริเวณการเกิดความเค้นสูงสุดครั้งที่60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 การขึ้นรูปชิ้นงานครั้งที่ 2 และการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อตรวจสอบ บริเวณการเกิดความเค้นสูงสุดครั้งที่ 2	60
5.12 การขึ้นรูปพื้นผิวของชิ้นงานด้วยซอฟต์แวร์ ANSYS SpaceClaim	61
5.13 ภาพแสดงความหนาของชิ้นงานซึ่งได้จากการวางชั้นของวัสดุคอมโพสิตใน ANSYS ACP	61
5.14 แสดงการวางองศาเส้นใยเทียบกับแนวแรงของกล่องต้านแรงบิด	63
5.15 การคำนวณแรงกระทำต่อแผ่นต้านแรงบิดที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์	65
5.16 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	65
5.17 ภาพแสดงการลู่เข้าของค่าความเค้นหลักสูงสุดและความเป็นอิสระของเมช	68
6.1 ภาพแสดงผลความเค้นจากการทดสอบเทียบค่าเพื่อยืนยันผลทั้ง 3 ตัวอย่าง	71
6.2 แสดงผลจากการทดลองวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของตัวอย่างที่ 18A	72
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและค่าความเค้นหลักสูงสุด	73
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและค่าความสิ้นเปลืองเส้นใยคาร์บอน	73
6.5 ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองคริกกิ้งกับผลความเค้นหลักสูงสุด	75
6.6 ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองคริกกิ้งกับค่าความสิ้นเปลืองเส้นใยคาร์บอน	76
6.7 ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองการถดถอยเชิงเส้นกับผลความเค้นหลักสูงสุด ...	76
6.8 ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองการถดถอยเชิงเส้นกับค่าความสิ้นเปลือง เส้นใยคาร์บอน	77
6.9 การลู่เข้าของค่าวัดความหลากหลายคำตอบในแต่ละรุ่นประชากรในการวิจัยส่วนที่ 2	78
6.10 ขอบหน้าพาเรโตของคำตอบจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดในส่วนที่ 2.	79
6.11 ภาพแสดงผลข้อมูลขาออกของตัวอย่างจากขอบหน้าพาเรโตจากการหาค่า เหมาะสมที่สุด ส่วนที่ 2	80
6.12 กราฟเปรียบเทียบผลความเค้นหลักสูงสุดซึ่งได้จากการทดลอง	82
ก.1 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 50 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวน ไฟเบอร์ 2 วง	88
ก.2 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 50 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 3 วง	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.3 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 50 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 4 วง.....	89
ก.4 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 70 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 2 วง.....	90
ก.5 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 70 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 3 วง.....	90
ก.6 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 70 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 4 วง.....	91
ก.7 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 90 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 2 วง.....	91
ก.8 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 90 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 3 วง.....	92
ก.9 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 90 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 4 วง.....	92

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BLX	=	Blend Crossover Operator
CFR	=	Concentric Fiber Ring
E	=	Modulus of elasticity
FEM	=	Finite Element Method
FFD	=	Full Factorial Design
GA	=	Genetic Algorithm
NSGA-II	=	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
ε	=	Material Strain
σ	=	Material Stress
σ_f	=	Fracture Stress
σ_u	=	Ultimate Stress
σ_{pl}	=	Proportional limit
σ_y	=	Yield Stress or elastic limit
ν	=	Poisson's ratio

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

วัสดุคอมโพสิตหรือวัสดุเชิงซ้อน (Composite material) คือ วัสดุที่เกิดจากการนำวัสดุทางเคมี 2 ชนิดขึ้นไปมาประกอบกัน โดยจะต้องไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อนำข้อได้เปรียบของวัสดุเหล่านั้นมารวมกัน และเพื่อให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นกว่าเดิม โดยเมื่อจำแนกตามประเภทของวัสดุที่นำมาเป็นส่วนผสมหลัก วัสดุคอมโพสิตจะสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุคอมโพสิตที่มีโลหะเป็นส่วนผสมหลัก, วัสดุคอมโพสิตที่มีเซรามิกเป็นส่วนผสมหลัก และวัสดุคอมโพสิตที่มีโพลิเมอร์เป็นส่วนผสมหลัก ซึ่งในปัจจุบันวัสดุคอมโพสิตถูกใช้อย่างกว้างขวางในงานทางด้านวิศวกรรม เนื่องจากข้อได้เปรียบในเชิงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่มีมากกว่าวัสดุที่ใช้ทั่วไป หนึ่งในตัวอย่างที่พบได้อย่างเห็นชัด คือการเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตในด้านอุตสาหกรรมการบิน โดยปัจจัยหลักคือข้อได้เปรียบทางด้านน้ำหนักที่เบาแต่คุณสมบัติทางกลที่มีความแข็งแรง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการประหยัดปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการบิน เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะศึกษาคุณสมบัติวัสดุคอมโพสิตประเภทที่มีพอลิเมอร์เป็นส่วนผสมหลัก (วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต) เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการปรับคุณสมบัติวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานอย่างกว้างขวาง มีทางเลือกการขึ้นรูปที่หลากหลาย ซึ่งหนึ่งในวิธีการขึ้นรูปซึ่งนำมาออกแบบเป็นวัตถุประสงค์ในการศึกษาคือการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

โดยทั่วไปวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต จะประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ 1. ส่วนที่เป็นเมทริกซ์ (Matrix) ซึ่งมีหน้าที่ในการทำให้วัสดุคงรูปอยู่ได้ รวมทั้งปกป้องวัสดุส่วนเสริมแรงจากการรับความเสียหายภายนอกโดยตรง ซึ่งเมทริกซ์ที่ใช้ในวัสดุคอมโพสิต อาจเลือกเป็นทั้งวัสดุจำพวกเทอร์โมเซต (Thermosets) ได้แก่ อีพอกซี (Epoxy) พอลีเอสเตอร์ (Polyester) เป็นต้น หรือวัสดุจำพวกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ได้แก่ โอนิกซ์ (Onyx) และไนลอน (Nylon) และอีกหนึ่งส่วนประกอบหลัก คือ 2. ส่วนที่เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) ซึ่งจะมีความแข็งแรงและความแข็งตึงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนักของวัสดุ โดยวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตมีทั้งรูปแบบเป็นอนุภาคกลม (Particle) แบบแผ่นบาง

(Flake) และรูปแบบเป็นเส้นใย (Fiber) เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) และเส้นใยแก้ว (Fiber glass) เป็นต้น ในการผลิตวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตจะมีวิธีการขึ้นรูปที่หลากหลาย เช่น การขึ้นรูปด้วยมือ การขึ้นรูปด้วยแรงดันอากาศ การขึ้นรูปโดยสุญญากาศ การขึ้นรูปโดยการปั่นเส้นใย เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันได้มีการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์วัสดุคอมโพสิตแบบสามมิติ ซึ่งมีข้อได้เปรียบ คือ มีรูปร่างในการผลิตอิสระ และมีความแม่นยำสูงในการผลิตแบบซ้ำเป็นจำนวนมาก โดยในการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตนั้นจะมีทางเลือกของการปรับแต่งที่หลากหลาย ตั้งแต่การปรับความหนาแน่นของการพิมพ์วัสดุ การปรับรูปแบบการพิมพ์โครงสร้างแต่ชั้นของวัสดุคอมโพสิต การปรับตั้งค่าจำนวนชั้นด้านบนสุดและล่างสุดของวัสดุเมทริกซ์ก่อนเริ่มพิมพ์วัสดุเสริมแรง ตลอดจนจนถึงการปรับจำนวนชั้นและรูปแบบการพิมพ์ของวัสดุเสริมแรง ซึ่งการปรับแต่งการพิมพ์เหล่านี้ล้วนส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ความสิ้นเปลืองในการพิมพ์ ซึ่งนำไปสู่ค่าใช้จ่ายที่ไม่คุ้มค่าในการผลิต

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุมีความสำคัญต่อรูปแบบการนำไปใช้งาน ขึ้นอยู่กับว่าวัสดุคอมโพสิตนั้น ๆ ถูกนำไปใช้งานรูปแบบใด เนื่องจากในงานทางด้านวิศวกรรมที่ต่างกันจะต้องเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ต่างกันออกไป โดยตัวอย่างของค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่นำมาศึกษา ได้แก่ ค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ซึ่งส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกค่าความแข็งแรงและแข็งแรงของวัสดุเมื่อถูกแรงดึงกระทำ ซึ่งในกระบวนการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุต่างชนิดกัน จะมีมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบที่แตกต่างกัน โดยมาตรฐานในการทดสอบวัสดุจะถูกกำหนดโดยเอเอสทีเอ็ม (American Society for Testing and Material) ซึ่งเป็นสมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งทำหน้าที่กำหนดและจัดทำมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ โดยในการทดสอบความแข็งแรงดึงนี้ รูปแบบขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ เงื่อนไขของการทดสอบ รวมทั้งเกณฑ์ต่างในการตั้งค่าการทดสอบ จะถูกกำหนดมาจากมาตรฐาน ASTM ดังกล่าว

ในกระบวนการของการหาค่าเหมาะสมที่สุด การสร้างสมการจำลองทดแทนเพื่อนำไปใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด มีความสำคัญที่จะต้องเลือกรูปแบบการสร้างสมการจำลองให้เหมาะสมและสอดคล้องกับการนำไปใช้งาน โดยขั้นตอนการสร้างสมการจำลองที่นำไปใช้ในการสร้างฟังก์ชันประเภทย่อยวัตถุประสงค์ที่ได้รับความนิยม ได้แก่ วิธีคริกกิง (Kriging method) ซึ่งเป็นวิธีการประมาณค่าช่วงขั้นสูง โดยประยุกต์ใช้กระบวนการทางสถิติและสมการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการวิเคราะห์

ขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือการหาคำตอบที่ได้จากฟังก์ชันด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) ซึ่งรูปแบบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่เลือกใช้ในการศึกษา คือขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ 2 (Non-dominated Sorting

Generic Algorithm II : NSGA-II) ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่พัฒนามาจากรุ่นก่อนหน้า โดยมีความเร็วที่ใช้ในการประมวลผล (Time complexity) ที่ดีขึ้นกว่ารุ่นก่อน และขั้นตอนวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์อย่างแพร่หลาย และเป็นขั้นตอนวิธีซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบในงานวิจัยซึ่งประยุกต์ใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ เนื่องจากมีการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นต้นแบบ แต่มีการปรับใช้ให้สามารถใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ได้

ด้วยความก้าวหน้าทางเทคนิคการพิมพ์สามมิติและการเพิ่มประสิทธิภาพ ช่วยเปิดทางสู่การประยุกต์ใช้อย่างสร้างสรรค์ในหลากหลายอุตสาหกรรม โดยในงานวิจัยฉบับนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด ร่วมกับเทคโนโลยีการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตสามมิติ เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบการตั้งค่าการพิมพ์ขึ้นส่วนกล่องต้านแรงบิดของแท่นทดสอบแรงขับ

แท่นทดสอบแรงขับ คือ เครื่องมือเฉพาะทางที่ใช้ในการวัดค่าแรงขับที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์หรือมอเตอร์ไฟฟ้า มีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ โดยในปัจจุบันหน่วยวิจัยของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชได้ทำการสร้างและออกแบบแท่นทดสอบแรงขับสำหรับทดสอบใบพัดอากาศยานไร้คนขับ โดยแท่นทดสอบนี้ต้องการขึ้นส่วนประกอบที่สำคัญ คือ กล่องต้านแรงบิด (Torsion box) ซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมระหว่างมอเตอร์ไฟฟ้าแรงขับ 36 กิโลกรัม และส่วนขาตั้งของแท่นทดสอบ โดยตัวกล่องต้านแรงบิดจำเป็นจะต้องมีค่าคุณสมบัติทางกลที่แข็งแรงเพียงพอต่อการต้านแรงบิดและแรงขับของมอเตอร์แท่นทดสอบ การออกแบบการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตที่เหมาะสมจึงถูกนำมาศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับตั้งค่าการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตแบบสามมิติที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ชิ้นงานกล่องต้านแรงบิดสำหรับใช้ในแท่นทดสอบแรงขับที่มีความแข็งแรงถึง ค่าความต้านทานแรงบิด ในแนวแกนรับแรงที่สูงที่สุด และมีความสิ้นเปลืองในการพิมพ์วัสดุเสริมร่น้อยที่สุด โดยมีการดำเนินการทดสอบวัสดุตามมาตรฐานที่ได้รับการรับรองเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ใช้กับการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ แล้วจึงดำเนินการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จากนั้นนำผลทดสอบไปสร้างสมการจำลองจากฟังก์ชันการออกแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธีคริกกิ้ง และนำฟังก์ชันไปใช้ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดในการออกแบบการปรับตั้งค่าการพิมพ์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตแบบสามมิติ โดยมีความแข็งแรงสอดคล้องกับวิธีการพิมพ์ของวัสดุด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด

- 2) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้วยเทคนิคการสร้างสมการจำลองทดแทนเพื่อใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดจากฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธีคริกกิง
- 3) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์การออกแบบ โดยประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมการจัดลำดับที่ไม่ถูกรอบงำ
- 4) เพื่อออกแบบชิ้นส่วนและอัตราส่วนการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตสามมิติของกล่องต้านแรงบิดสำหรับใช้ในแท่นทดสอบแรงขับของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชที่สามารถต้านทานแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าและใช้ในการทดสอบแรงขับใบพัดอากาศยานไร้คนขับได้จริง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะแบ่งวิธีดำเนินการและผลการวิจัยออกเป็น ส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ซึ่งมีการกำหนดเงื่อนไข ตัวแปรการออกแบบการทดลองที่แตกต่างกัน แต่ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากส่วนที่ 1 จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบตัวแปรการทดลองในส่วนที่ 2 ของงานวิจัย

ส่วนที่ 1 การทดสอบวัสดุและศึกษาผลจากการออกแบบด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมสุด

- 1) สร้างชิ้นงานทดสอบ ASTM D3039 ด้วยเครื่องพิมพ์วัสดุคอมโพสิต แบบ 3 มิติ Markforged รุ่น X7 โดยมีวัสดุเมทริกซ์ คือ โอนิกซ์ (Onyx) และมีวัสดุเสริมแรง คือ เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เพื่อทดสอบอิทธิพลของตัวแปรต้น
- 2) พิมพ์รูปแบบโครงสร้างภายในรูปแบบสี่เหลี่ยมของการพิมพ์วัสดุสามมิติสำหรับการนำไปใช้หาค่าเหมาะสมสุด
- 3) ศึกษาประสิทธิภาพของชิ้นงานการทดสอบความแข็งแรงดึง ตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึงของวัสดุโพลิเมอร์และคอมโพสิต ASTM D3039 โดยใช้เครื่อง ใช้เครื่อง Universal Testing Machine ในการทดสอบ
- 4) ใช้ผลจากการทดสอบในการออกแบบอัตราส่วนการพิมพ์ที่เหมาะสมโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ในกระบวนการออกแบบ

ส่วนที่ 2 การทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ และนำผลการทดสอบไปประยุกต์ในกระบวนการหาค่าตอบการหาค่าเหมาะสมสุดสำหรับการออกแบบกล่องต้านแรงบิดสำหรับใช้ในแท่นทดสอบแรงขับ

- 5) ออกแบบกล่องต้านแรงบิดสำหรับใช้ในแท่นทดสอบแรงขับใบพัดอากาศยาน
- 6) ใช้การทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และค่าจากซอฟต์แวร์ตั้งค่าการพิมพ์ในการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรต้น

7) ใช้ผลจากการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในการออกแบบอัตราส่วนการพิมพ์ที่เหมาะสมโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ในกระบวนการออกแบบ

8) วิเคราะห์ผลจากการทดสอบด้วยโมดูลการทดสอบโครงสร้างเชิงสถิติ

9) การออกแบบการทดลองไฟไนต์อีลิเมนต์จะออกแบบโดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการทดสอบได้แก่ แรงขับสูงสุดของใบพัดที่กระทำต่อกล่องด้านแรงบิด แรงบิดจากมอเตอร์ไฟฟ้าที่กระทำต่อกล่องด้านแรงบิด โดยไม่คำนึงถึงแรงกระทำหรือแรงเฉือนตามจุดยึด รูปแบบโครงสร้างภายในกล่อง และน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของกล่องด้านแรงบิด

10) ใช้เกณฑ์ในการวิเคราะห์การเสียหายคือการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดิ่งกับค่าความเค้นหลักสูงสุด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต้นจากการใช้ข้อมูลจากการทดลองในการออกแบบด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์การออกแบบ

2) ได้ศึกษาการสร้างการจำลองเพื่อใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์โดยประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

3) ได้ผลการทำนายของสมการจำลองที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากที่สุด เพื่อให้การออกแบบด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมได้ความแม่นยำและมีประโยชน์ในการเลือกใช้งานจริง

4) ได้ผลการออกแบบการปรับตั้งค่าการพิมพ์วัสดุคอมสิตสามมิติซึ่งใช้ในการพิมพ์ชิ้นส่วนกล่องด้านแรงบิดสำหรับใช้ในแท่นทดสอบแรงขับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปรีทัศน์วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทปรีทัศน์วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะกล่าวถึงงานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งเกี่ยวกับวัสดุคอมโพสิต การศึกษาการพิมพ์วัสดุคอมโพสิต การทดสอบคุณสมบัติวัสดุ วิถีไฟไนต์อีลิเมนต์ รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้กระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดในการศึกษาและออกแบบทางด้านวิศวกรรม

2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคอมโพสิตและการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

Velmurugan et al., 2012 ได้ทำการทดสอบวัสดุคอมโพสิตที่มีวัสดุเมทริกซ์เป็นอีพ็อกซีเรซิน และใช้เส้นใยธรรมชาติจากต้นตาลโตนดเป็นวัสดุเสริมแรง โดยในการทดสอบประกอบไปด้วยการทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638 และใช้การวิเคราะห์ความแข็งแรงดึงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ผ่านซอฟต์แวร์ ANSYS เพื่อเป็นการลดความสิ้นเปลืองของวัสดุและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นทำการเทียบผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงดึงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการใช้คอมพิวเตอร์อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้เงื่อนไขของการศึกษา

Sanei et al., 2019 ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตประเภทเทอร์โมพลาสติกซึ่งขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยวัสดุคอมโพสิตดังกล่าวเลือกวัสดุเมทริกซ์เป็นโอนิกซ์ (Onyx) และมีวัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) ซึ่งการทดสอบความแข็งแรงดึงดำเนินไปตามมาตรฐาน ASTM D3039 ผลการทดสอบชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของอัตราส่วนของปริมาตรเส้นใย เนื่องจากเมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่าวัสดุคอมโพสิตซึ่งผลิตด้วยวิธีการพิมพ์ยังมีคุณสมบัติที่ดีกว่าข้อมูลการแพร่กระจายวัสดุด้วยอีพ็อกซี เป็นเหตุมาจากปริมาตรของวัสดุเสริมแรงที่ต่างกัน และวัสดุเมทริกซ์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นวัสดุคนละชนิดกับวัสดุพรีเพอร์กที่กล่าวถึงในงานวิจัย

M. Kazi et. al., 2020 ได้ประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) ในการออกแบบวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตซึ่งมีเมทริกซ์เป็นโพลิพอลิซีน และมีเส้นใยฝ้ายเป็นวัสดุเสริมแรง ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้มีการพัฒนาปัญญาประดิษฐ์โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ในการหาปริมาณการเติมเส้นใยฝ้ายที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุมากที่สุด โดยใช้ชุดข้อมูลการเทรนโมเดลในการตั้งข้อมูลขาเข้า (Input) เป็นค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุและค่าพลังงาน

และตั้งขาออก (output) เป็นปริมาณเส้นใยที่เหมาะสมในวัสดุคอมโพสิต ผลการออกแบบพบว่า ปริมาณการเติมเส้นใยฝ้ายที่เหมาะสมอยู่ที่ 14.38 wt% จึงทำให้ได้ค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตที่ต้องการ และงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงข้อได้เปรียบในการใช้ปัญญาประดิษฐ์โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อหาค่าเหมาะสมสุดในการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต และยังสามารถนำโมเดลที่ได้จากการเทรนไปใช้ต่อในงานวิจัยต่อยอดในอนาคตได้

Suchat et al., 2020 ได้ทดสอบและปรับปรุงคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ชีวภาพสำหรับวัสดุเชิงวิศวกรรมที่ได้จากยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (ENR50) ซึ่งได้มาจากการดัดแปลงโครงสร้างจากยางธรรมชาติกับอีพ็อกซีเรซิน และนาโนเซลลูโลสซึ่งได้จากต้นยูคาลิปตัส ผลที่ได้คือวัสดุนาโนคอมโพสิตและได้นำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุทั้งการทดสอบคุณสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 และการทดสอบความแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค Thermogravimetric ผลจากการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบทำให้ได้สูตรส่วนผสมที่เหมาะสม และทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ชีวภาพสำหรับวัสดุเชิงวิศวกรรมของนาโนคอมโพสิตชนิดใหม่เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม ที่มีผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลที่ดีและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Ramalingam et al., 2021 ได้ทำการทดสอบวัสดุคอมโพสิตซึ่งขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติจากเครื่องพิมพ์ Markforged รุ่น X7 โดยเป็นวัสดุคอมโพสิตที่ใช้โอบินซ์เป็นเมทริกซ์ และเลือกเส้นใยแก้ว (Fiber glass) เป็นวัสดุเสริมแรง โดยทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับพลังงาน ผ่านการทดสอบการรับแรงกระแทก (Impact test) ตามมาตรฐาน ASTM และกำหนดตัวแปรต้น 2 ตัวแปร คือรูปแบบการพิมพ์วัสดุแต่ละชั้น (รูปแบบสามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม และหกเหลี่ยม) และความหนาแน่นการเติมของวัสดุ (30%, 40% และ 50%) ผลการทดสอบพบว่าการพิมพ์รูปแบบหกเหลี่ยมสามารถดูดซับพลังงานได้ดีที่สุดจากรูปแบบทั้งสามที่ทำการทดสอบ และความหนาแน่นการเติมที่สูงขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานออกมาดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

Li et al., 2022 ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐานทั้งการทดสอบความแข็งแรงดึง การทดสอบแรงกด การทดสอบการดัดโค้ง และการทดสอบการรับแรงกระแทก โดยผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของรูปแบบการพิมพ์และองค์การเรียงตัวของวัสดุเสริมแรงที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน และผลวิจัยชี้ให้เห็นว่าการผลิตวัสดุคอมโพสิตด้วยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ ไม่เหมาะกับการผลิตชิ้นงานที่มีรอยบากจำนวนมาก

El Essawi et. al., 2024 ได้ทำการทดสอบวัสดุคอมโพสิตซึ่งขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ โดยในขั้นตอนการออกแบบการทดลองได้ใช้วิธี Taguchi ในการออกแบบเนื่องจากจำนวนตัวแปรของการทดสอบมีจำนวนมาก การใช้วิธี Taguchi จึงช่วยลดจำนวนการทดลองที่ไม่จำเป็น จากนั้นได้ทำการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่การตั้งค่าการพิมพ์ต่าง ๆ จากนั้นได้ผลการทดสอบว่าตัวแปรต้นที่มีผลต่อค่าคุณสมบัติทางกลมากที่สุด คือ องศาการวางตัวของเส้นใย (เนื่องจากการทดสอบความแข็งแรงดึง) โดยมีส่วน 54.13% และค่าเปอร์เซ็นต์การเติมมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลเป็นลำดับถัดมาที่ 16.25% และการเลือกชั้นการพิมพ์ที่มีเส้นใยเสริมแรงมีผลน้อยที่สุด (10.12%)

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

Arriaga et al., 2007 ได้ใช้ซอฟต์แวร์แอนซิส (ANSYS) ในการจำลองการทดลองประเภทสภาวะกึ่งคงที่ (quasi-static test) โดยได้เลือกวัสดุพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน (PP) และชนิดโพลีคาร์บอเนต/อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (PC-ABS) ในการทดลองจริงของการทดสอบแรงดัดงอแบบสามจุด และการทดสอบเพนเทรชัน โดยเมื่อเทียบผลจากการทดลองจริงและการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์พบว่าข้อมูลผลการทดสอบมีความสัมพันธ์กันทั้งรูปร่างการตอบสนองจากการทดสอบ และค่าของข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้จากการทดสอบ

Shahani et al., 2008 ได้นำเสนอการจำลองกระบวนการรีดร้อนของโลหะอลูมิเนียม AA5083 โดยวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในการรีดร้อน ความเค้น ความเครียดของโลหะที่สภาวะคงที่ (steady state) โดยกำหนดตัวแปรหลักของกระบวนการรีดได้แก่ รูปทรงของการรีด ภาระน้ำหนักและความเร็วในการรีด และเปอร์เซ็นต์ความหนาที่ลดลง โดยประเมินการลู่เข้าของคำตอบจากการทดลองและทฤษฎี นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์ใช้โมเดลปัญญาประดิษฐ์โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายพฤติกรรมของกระบวนการรีดโลหะเพื่อช่วยลดเวลาที่ใช้ในการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

Chang et al., 2009 ได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในการวิเคราะห์พลศาสตร์ที่ไม่เป็นเส้นตรงของการทดสอบแรงกระแทกของล้อจากสมาคมวิศวกรยานยนต์นานาชาติ (Society of Automotive Engineers International) โดยใช้ในการทำนายความเสียหายของล้อรถยนต์ โดยได้ผลสรุปของงานวิจัยว่าการระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถใช้ลดต้นทุนจากการทดลอง และมีผลการทำนายที่ใกล้เคียงและมีความน่าเชื่อถือเมื่อเทียบกับการทดสอบจริง เมื่อตั้งค่าขนาดของเมชและระยะขั้นของเวลาที่เหมาะสม โดยสามารถทำนายช่วงวิกฤตของการแตกหักเพื่อทำนายการแตกหักของล้อรถยนต์ในการทดสอบแรงกระแทกได้

2.1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด

Leusink et al., 2015 ได้ใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบแม่นยำหลายระดับในการออกแบบใบพัดของเฮลิคอปเตอร์ทั้งในขณะบินแนวดิ่งและขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า โดยในขั้นตอนการเก็บข้อมูลความแม่นยำระดับต่ำ (Low fidelity data) ได้ใช้ Helicopter Overall Simulation Tool (HOST code) ประกอบกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) ในการเลือกรูปทรงใบพัดไปใช้ในการเก็บข้อมูลความแม่นยำระดับสูง (High fidelity data) ต่อไป และในขั้นตอนการเก็บข้อมูลความแม่นยำระดับสูงได้ใช้การจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics simulation) และนำข้อมูลไปสร้างสมการจำลองความแม่นยำระดับสูง จากนั้นนำสมการจำลองไปใช้ในเทคนิคการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์อีกครั้งเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของข้อมูลสมการจำลองในทุกระดับความแม่นยำ

Ariyarat et al., 2015 ได้ทำการออกแบบแพนอากาศ (Airfoil) โดยการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ร่วมกับเทคนิคการไขว้เปลี่ยนแบบกระจายหลายส่วน (Multi-Modal Distribution Crossover) ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีการไขว้เปลี่ยนแบบกระจายส่วนเดียว (Unimodal Normal Distribution Crossover) ให้มีอัตราการสร้างประชากรที่มากกว่าเมื่อเทียบกับประชากรรุ่นเริ่มต้น โดยที่ผลจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดของงานวิจัยนี้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการไขว้เปลี่ยนด้วยวิธีการอื่นอีก 2 วิธี ได้แก่ วิธีการไขว้เปลี่ยนแบบผสมผสาน (Blended Crossover : BLX) และวิธีการไขว้เปลี่ยนแบบกระจายส่วนเดียว ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าได้ความหลากหลายและกระจายตัวของข้อมูลที่ดีกว่า นำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการออกแบบแพนอากาศ

Bellary et al., 2016 ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีคริกกิงแบบต่าง ๆ ได้แก่ คริกกิงแบบดั้งเดิม (Ordinary Kriging), แบบ Universal Kriging และแบบ Blind Kriging รวมทั้งเปรียบเทียบร่วมกับฟังก์ชันการประมาณค่าพื้นผิวการตอบสนอง (Response Surface Approximation) จากนั้นนำไปใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบลูกผสม (Hybrid Genetic Algorithm) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบใบพัดแบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal impeller) ของเครื่องจักรอัดของไหล (Turbomachinery design) โดยใช้ข้อมูลความแม่นยำสูงจะเข้ามาจากผลของโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) หลังจากการเปรียบเทียบ พบว่าผลจากการออกแบบด้วยวิธี Blind Kriging สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบได้ดีที่สุด

Ariyarat et al., 2018 ได้ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบความแม่นยำหลายระดับด้วยวิธีเพิ่มประสิทธิภาพของภาพใหญ่โดยใช้สมการจำลองแบบลูกผสมในการออกแบบใบพัดสำหรับอากาศยานเฮลิคอปเตอร์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพใบพัดที่ดีที่สุดในการบินในเชิงอากาศพลศาสตร์ โดยในขั้นตอนการคำนวณส่วนเบี่ยงเบนเฉพาะที่ (Local deviation)

ทำนายจากวิธีคริกกิง (Kriging method) ซึ่งใช้ข้อมูลความแม่นยำระดับสูงโดยวิเคราะห์จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และสมการจำลองวงกว้าง (Global model) ทำนายจากฟังก์ชันพื้นฐานรัศมี (Radial basis function) ซึ่งใช้ข้อมูลความแม่นยำระดับต่ำ ซึ่งวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีโมเมนต์ขององค์ประกอบใบพัด (Blade Element Momentum Theory : BEMT) โดยผลลัพธ์จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์การหาค่าเหมาะสมที่สุดที่ได้จากวิธีคริกกิงแบบดั้งเดิมและจากวิธีโคคริกกิง (Co-Kriging method) และพบว่าวิธีเพิ่มประสิทธิภาพของภาพใหญ่โดยใช้สมการจำลองแบบลูกผสมของงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพ สามารถลดจำนวนการทดลองความแม่นยำระดับสูงได้

Zhou et al., 2021 ได้นำเสนอวิธีการการใช้สมการจำลองแบบหลายความแม่นยำเป็นสมการจำลองที่ใช้ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยในขั้นตอนแรกได้สร้างชุดข้อมูลคำตอบพาเรโต (Pareto solutions) จากข้อมูลความแม่นยำระดับต่ำ ต่อมาได้สร้างสมการจำลองข้อมูลแบบหลายความแม่นยำซึ่งสร้างมาจากข้อมูลความแม่นยำระดับต่ำและข้อมูลความแม่นยำระดับสูง ซึ่งคัดเลือกมาจากชุดข้อมูลคำตอบพาเรโตจากขั้นตอนแรกซึ่งนำมาคำนวณฟังก์ชันระยะห่างของข้อมูล (Crowding distance) จากนั้นนำค่าความแข็งแรงข้อมูลมาประเมินโดยใช้สมการความแม่นยำหลายระดับ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการสาธิตให้เห็นถึงประสิทธิภาพเทียบได้กับข้อมูลความแม่นยำระดับสูงซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทำการทดลองได้อย่างมีนัยสำคัญ

Phiboon et al., 2021 ได้ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบความแม่นยำหลายระดับ หลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective multi fidelity optimization) ในการออกแบบแพนอากาศ (Airfoil) สำหรับใช้ในอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึง (Fixed-wing UAVs) โดยในขั้นตอนการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลความแม่นยำระดับต่ำได้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยวิธี Panel ผ่านซอฟต์แวร์ (Javafoil) และในขั้นตอนการเก็บข้อมูลความแม่นยำระดับสูงมาจากการทดลองในอุโมงค์ลม ซึ่งแพนอากาศที่ใช้ในการทดลองในอุโมงค์ลมสร้างขึ้นจากการพิมพ์สามมิติ ซึ่งสมการจำลองที่ใช้ในกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดเป็นสมการจำลองข้อมูลแบบลูกผสม ซึ่งข้อมูลความแม่นยำระดับต่ำถูกนำมาสร้างเป็นสมการจำลองทดแทนจากวิธีคริกกิง และข้อมูลความแม่นยำระดับสูง ถูกนำมาสร้างเป็นสมการจำลองด้วยฟังก์ชันพื้นฐานรัศมี จากนั้นนำสมการจำลองลูกผสมที่ได้ไปเข้าสู่กระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมการจัดลำดับไม่ครอบงำ (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพรูปแบบแพนอากาศที่ดีที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบ

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าไม่มีงานวิจัยใดที่ประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดจากสมการจำลองหรือการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ในการออกแบบการขึ้นรูปวัสดุด้วยการพิมพ์สามมิติ งานวิจัยนี้จึงได้นำการสร้างสมการจำลองทดแทนด้วยวิธีคริกกิงมาใช้ในการเพิ่มจำนวนข้อมูลของค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุ ผสมผสานกับเทคนิคการหา

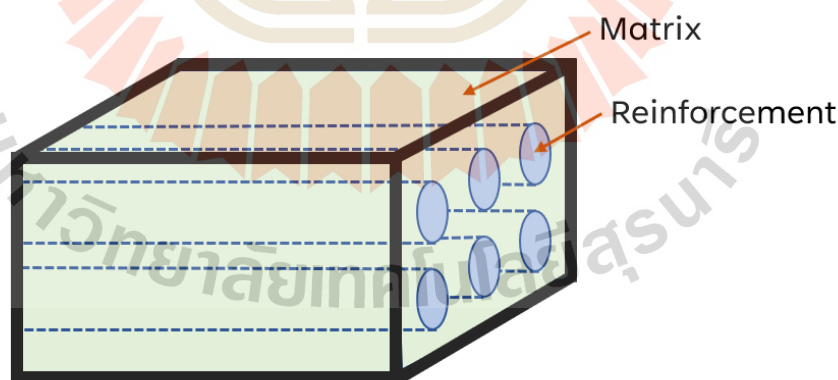
ค่าเหมาะสมสุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม รวมถึงการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อลดค่าใช้จ่ายของการทดลอง มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการออกแบบการพิมพ์ขึ้นส่วนกล่องด้านแรงบิดสำหรับใช้ในแท่นทดสอบแรงขับ

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยฉบับนี้มีการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติวัสดุและการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมสุด (Optimization) ในการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตสามมิติ และมีการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile test) โดยผลจากการทดสอบจะนำเข้าไปใช้สร้างข้อมูลโดยวิธีคริกกิง (Kriging) และนำผลไปเข้ากระบวนการหาค่าเหมาะสมสุด

2.2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite materials)

วัสดุคอมโพสิตหรือวัสดุเชิงซ้อนเป็นวัสดุที่เกิดจากการรวมกันของวัสดุ 2 ชนิดขึ้นไปที่ไม่ละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีประโยชน์และแพร่หลายในวงการวิศวกรรมเนื่องจากมีข้อได้เปรียบทั้งจากคุณสมบัติวัสดุที่นำมาวมกัน และจากวิธีการผลิตวัสดุนั้น ๆ แต่มีข้อเสียคือต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตที่สูงกว่าวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมแบบดั้งเดิม โดยทั่วไปแล้วการผลิตวัสดุคอมโพสิตประเภทที่ทำจากพอลิเมอร์จะมีหลายประเภท แต่เนื้อวัสดุที่ใช้ในการผลิตวัสดุคอมโพสิตนั้นจะสามารถแบ่งหลักได้ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นวัสดุเมทริกซ์ซึ่งจะช่วยให้วัสดุคอมโพสิตนั้นคงรูปร่างได้ ช่วยยึดวัสดุเสริมแรงไว้ด้วยกัน และส่วนที่เป็นวัสดุเสริมแรงซึ่งช่วยเสริมให้วัสดุมีความแข็งแรงและความแข็งแรง



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการรวมกันของวัสดุเมทริกซ์และวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต

2.2.1.1 วัสดุเมทริกซ์ (Matrix)

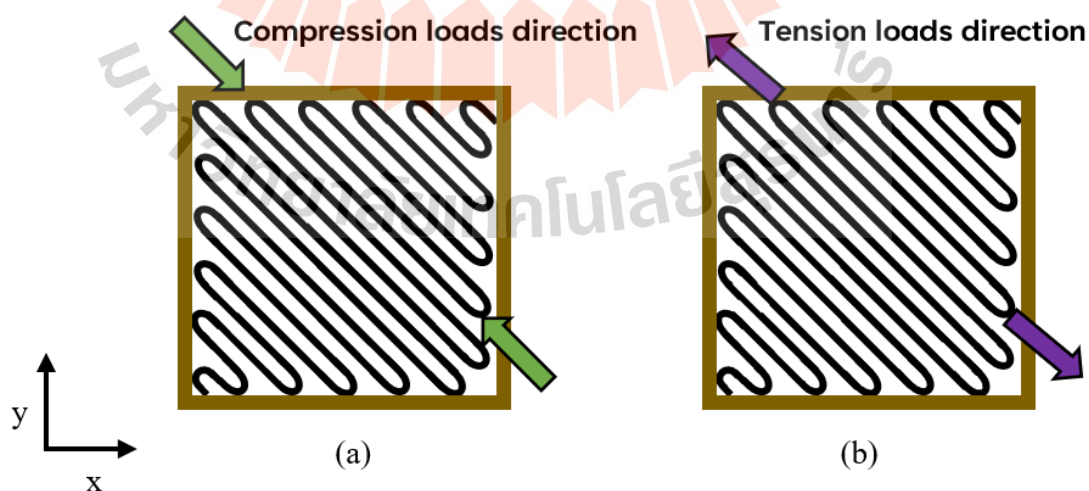
มีบทบาทในการรักษารูปร่างและขนาดของวัสดุคอมโพสิต ทั้งยังช่วยรักษาระยะของวัสดุเสริมแรงภายในชิ้นงาน และยึดเหนี่ยววัสดุเสริมแรงไว้เข้าไว้ภายในวัสดุคอมโพสิต

โดยทั่วไปวัสดุเมทริกซ์ที่ใช้วัสดุคอมโพสิตมักจะเป็นวัสดุจำพวกเทอร์โมเซต (Thermosets) เช่น พลาสติกประเภท PLA (Polylactic Acid) หรือวัสดุจำพวกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เช่น โอนิกซ์ (Onyx) และไนลอน (Nylon) ซึ่งวัสดุส่วนที่เป็นเมทริกซ์จะมีคุณสมบัติด้านความเหนียวและความยืดหยุ่นที่โดดเด่นกว่าวัสดุเสริมแรง จึงช่วยในด้านการคงรูปร่างโดยรวมของชิ้นงาน

2.2.1.2 วัสดุเสริมแรง (Reinforcement)

มีหน้าที่ในการเสริมคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตโดยรวม และมีบทบาทหลักในการรับแรงกระทำเมื่อวัสดุคอมโพสิตเกิดความเค้นในการใช้งาน ประเภทของวัสดุเสริมแรงที่ใช้ในการผลิตวัสดุคอมโพสิตมีหลายประเภท เช่น ในรูปแบบอนุภาค (Particle) เช่น อนุภาคอลูมินา อนุภาคซิลิกา เป็นต้น หรืออาจเป็นรูปแบบเส้นใย (Fiber) เช่น เส้นใยแก้ว หรือเส้นใยคาร์บอน ซึ่งวัสดุเสริมแรงมักจะมีคุณสมบัติความแข็งแรง (Strength) และความแข็งแกร่ง (Stiffness) ที่ดีกว่าเมทริกซ์

วัสดุคอมโพสิตซึ่งเป็นการรวมวัสดุเมทริกซ์ และวัสดุเสริมแรงเข้าด้วยกันจึงเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติของวัสดุทั้งสองเข้าด้วยกัน คือมีรูปร่างและความยืดหยุ่นจากวัสดุเมทริกซ์ ในขณะที่มีความแข็งแรงและความแข็งแกร่งจากวัสดุเสริมแรง โดยสามารถปรับแต่งคุณสมบัติได้จากกระบวนการผลิต เช่น การเพิ่มอัตราส่วนของวัสดุเสริมแรงหรือเปลี่ยนทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย จะสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้เหมาะกับการใช้งานได้ หรือการเพิ่มอัตราส่วนของวัสดุเมทริกซ์จะทำให้มีความยืดหยุ่น มีคุณสมบัติความเหนียว (Ductility) และความแกร่ง (Toughness) ของวัสดุที่มากกว่า โดยรูปที่ 2.2 แสดงภาพตัวอย่างของวัสดุคอมโพสิตเมื่อถูกแรงกระทำ ซึ่งวัสดุเมทริกซ์จะช่วยคงรูปร่างของวัสดุคอมโพสิตไว้ และเส้นใยของวัสดุเสริมแรงจะช่วยรับแรงที่มากกระทำเมื่อแรงกระทำมีทิศทางที่ตรงกับแนวตามยาวของเส้นใย



รูปที่ 2.2 ภาพตัวอย่างวัสดุคอมโพสิตเมื่อรับแรง (a) เมื่อรับภาระแรงกด และ (b) เมื่อรับภาระแรงดึง

2.2.2 การพิมพ์วัสดุคอมโพสิตด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

จากที่กล่าวข้างต้นว่าวัสดุคอมโพสิตจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นวัสดุเมทริกซ์และวัสดุเสริมแรง ซึ่งในการผลิตวัสดุคอมโพสิตด้วยวิธีการพิมพ์ 3 มิตินั้น ก็เช่นเดียวกัน แต่จะมีความแตกต่างจากวิธีการผลิตแบบอื่น ๆ ตรงที่วัสดุทั้งในส่วนของวัสดุเมทริกซ์และวัสดุเสริมแรงที่นำมาพิมพ์ จะเริ่มต้นมาจากการเป็นเส้นใยซึ่งนำมาพิมพ์รวมกันทีละชั้นจนขึ้นงานขึ้นรูปสมบูรณ์ โดยข้อได้เปรียบของการพิมพ์ขึ้นงานทีละชั้น ทำให้มีความยืดหยุ่นในการปรับแต่งคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับรูปแบบการใช้งานได้อย่างอิสระ โดยในเครื่องพิมพ์วัสดุคอมโพสิต 3 มิติ Markforged X7 จะสามารถจำแนกการปรับแต่งการพิมพ์จากวัสดุทั้งสองชนิดที่นำมาใช้ในการผลิตได้ดังนี้

2.2.2.1 การตั้งค่าการพิมพ์ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเมทริกซ์

โดยทั่วไป การตั้งค่าการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตสามมิติของเครื่องพิมพ์ Markforged ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเมทริกซ์ จะแบ่งได้เป็น 4 ส่วนสำคัญดังนี้

1) การตั้งค่าความหนาแน่นการเติม (Infill density) ซึ่งการปรับแต่งค่าคุณสมบัติส่วนนี้จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นในการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตทั้งชิ้นงาน หากกำหนดค่าความหนาแน่นการเติมสูงเกินไปจะทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นและความแข็งแรง แต่จะใช้เวลาในการพิมพ์นานและสิ้นเปลืองวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ ในทางกลับกัน หากตั้งค่าความหนาแน่นการเติมน้อยจนเกินไป อาจทำให้ชิ้นงานไม่แข็งแรง หรือน้ำหนักเบาจนเกินไปเนื่องจากมีความว่างเปล่าภายในชิ้นงานมากเกินไป ซึ่งอาจทำให้ชิ้นงานไม่เหมาะสมกับการใช้งานบางประเภท ดังนั้นการตั้งค่าความหนาแน่นการเติมที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญ ช่วยให้สามารถใช้วัสดุในการพิมพ์ได้อย่างคุ้มค่าต่อการใช้งาน และประหยัดเวลาที่ใช้ในการพิมพ์

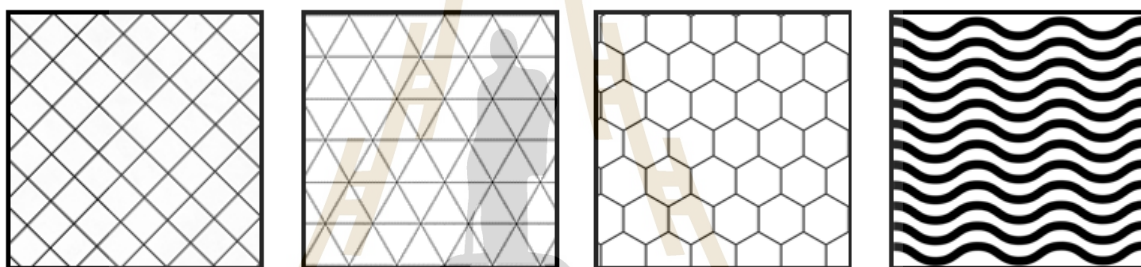
2) การตั้งค่ารูปแบบการพิมพ์ (Fill pattern) โดยซอฟต์แวร์ของ Markforged สามารถตั้งค่าให้เติมการพิมพ์วัสดุตัน (Solid) ได้ แต่การตั้งค่าการเติมให้วัสดุตันสิ้นเปลืองการใช้วัสดุและเวลาที่ใช้ในการพิมพ์ ดังนั้นการปรับในส่วนนี้จะเกี่ยวกับการพิมพ์โครงสร้างภายในชิ้นงานให้เหมาะสมกับการนำชิ้นงานไปใช้ เนื่องจากการตั้งค่าในส่วนนี้จะส่งผลต่อความอิสระของการตั้งค่าความหนาแน่นการเติม ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการสั่งพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ Markforged จะมีรูปแบบการพิมพ์ให้เลือกได้แก่ รูปแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular pattern), รูปแบบสามเหลี่ยม (Triangular pattern) รูปแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal pattern) และรูปแบบไจรอยด์ (Gyroid pattern) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

2.1) การพิมพ์รูปแบบสี่เหลี่ยม มีช่วงการตั้งค่าความหนาแน่นการเติมของวัสดุคอมโพสิตได้สูงที่สุด สามารถตั้งค่าช่วงของความหนาแน่นการเติมได้ตั้งแต่ 0 ถึง 92 เปอร์เซนต์

2.2) การพิมพ์รูปแบบสามเหลี่ยม สามารถตั้งค่าช่วงของความหนาแน่นการเติมได้ตั้งแต่ 28 ถึง 52 เปอร์เซ็นต์ มีความโดดเด่นเรื่องความสามารถในการรับน้ำหนัก และคุณสมบัติความแข็งแรงของโครงสร้าง

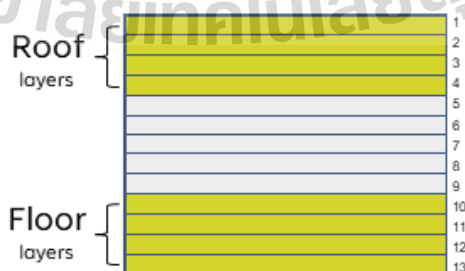
2.3) การพิมพ์รูปแบบหกเหลี่ยม สามารถตั้งค่าช่วงของความหนาแน่นการเติมได้ตั้งแต่ 18 ถึง 62 เปอร์เซ็นต์ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องชี้ว่าการตั้งค่ารูปแบบการพิมพ์เป็นหกเหลี่ยมจะทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการทดสอบแรงกระแทกได้ดีที่สุด (Ramalingam et al., 2021)

2.4) การพิมพ์รูปแบบไจรอยด์ สามารถตั้งค่าช่วงของความหนาแน่นการเติมได้ตั้งแต่ 28 ถึง 62 เปอร์เซ็นต์ มีความโดดเด่นเรื่องการใช้เปอร์เซ็นต์การเติมที่น้อย แต่ยังให้ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ดี มีการกระจายน้ำหนักที่ดี และความแข็งแรงเกือบทุกทิศทาง



รูปที่ 2.3 รูปแบบการพิมพ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบต่าง ๆ ได้แก่ รูปแบบสี่เหลี่ยม รูปแบบสามเหลี่ยม รูปแบบหกเหลี่ยม และรูปแบบไจรอยด์ เรียงจากซ้ายไปทางขวาตามลำดับ

3) การตั้งค่าจำนวนชั้นของรูฟและฟลอร์ (Roof & Floor layers) คือการตั้งค่าจำนวนของชั้นบนสุดและชั้นล่างสุดที่จะพิมพ์เพียงแค่วัสดุเมทริกซ์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยจะไม่มีการพิมพ์วัสดุเสริมแรงลงไปจำนวนชั้นของการตั้งค่าในส่วนนี้ แสดงดังรูปที่ 2.4



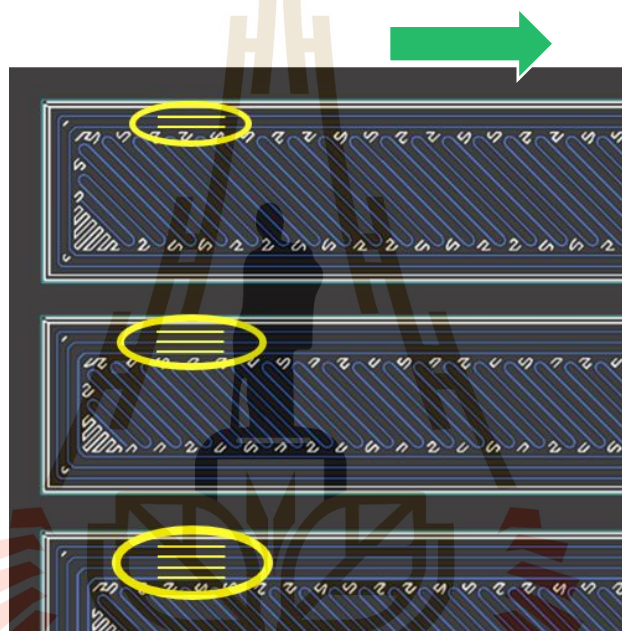
รูปที่ 2.4 ภาพแสดงชั้นของรูฟและฟลอร์ของวัสดุคอมโพสิต

4) การตั้งค่าจำนวนชั้นผนังของวัสดุ (Wall layers) คือ การตั้งค่าจำนวนของชั้นของผนังซึ่งพิมพ์จากวัสดุเมทริกซ์ที่จะปกป้องโดยรอบชิ้นงานวัสดุคอมโพสิต โดยเป็นชั้นของวัสดุเมทริกซ์ด้านนอกก่อนถึงชั้นของวงแหวนไฟเบอร์ แสดงดังรูปที่ 2.5

2.2.2.2 การตั้งค่าการพิมพ์ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเสริมแรง

การตั้งค่าการพิมพ์โดยทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับเมทริกซ์ จะแบ่งได้ดังนี้

1) การตั้งค่าจำนวนของวงแหวนไฟเบอร์ (Concentric fiber ring) คือการตั้งค่าจำนวนวงของเส้นใยที่พิมพ์จากวัสดุเสริมแรง ที่จะถูกกำหนดให้วางปกป้องโดยรอบชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 2.5



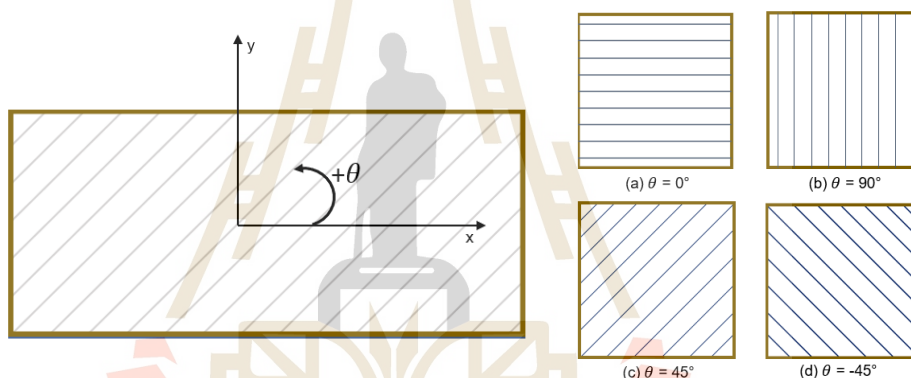
รูปที่ 2.5 ภาพแสดงจำนวนชั้นของผนังของวัสดุ 2 ชั้น (ลูกศรสีเขียว) และแสดงการนับจำนวนวงแหวนไฟเบอร์จำนวนต่าง ๆ ได้แก่ จำนวน 2 วง (รูปบน) 3 วง (รูปกลาง) และ 4 วง (รูปล่าง)

2) การตั้งค่าประเภทการเติมเส้นใย (Fiber fill type) คือการเลือกรูปแบบวิธีการเติมเส้นใยลงในวัสดุคอมโพสิตในขณะพิมพ์ ซึ่งเครื่องพิมพ์ Markforged X7 สามารถเลือกได้ 2 รูปแบบ คือรูปแบบวงกลมรอบชิ้นงาน (Concentric) และรูปแบบเส้นขนาน (Isotropic)

2.1) การพิมพ์วัสดุเสริมแรงด้วยรูปแบบวงกลมรอบชิ้นงาน (Concentric) จะเป็นการพิมพ์เส้นใยซึ่งช่วยเสริมแรงไปโดยรอบวัสดุ โดยจะช่วยเสริมความแข็งแรงของผนัง และช่วยป้องกันไม่ให้ผนังของชิ้นงานเกิดการเสียรูป

2.2) การพิมพ์วัสดุเสริมแรงด้วยรูปแบบเส้นขนาน (Isotropic) จะทำการพิมพ์แผ่นไฟเบอร์ในทิศทางเดียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะเดินเส้นใยทั้งหมดให้ขนานกันไปในทิศทางเดียว และเมื่อเดินเส้นใยถึงขอบของชิ้นงาน หัวฉีดจะหันกลับ 180 องศา เพื่อเดินเส้นใยขนานต่อ ซึ่งการพิมพ์เส้นใยในลักษณะนี้จะช่วยเสริมแรงที่มากกระทำด้านข้างของชิ้นงานได้ นอกจากนี้ในการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตเป็นรูปแบบเส้นขนาน จะสามารถกำหนดจำนวนของวงแหวนไฟเบอร์รอบชิ้นงานได้ เพื่อช่วยให้พื้นผิวภายนอกชิ้นงานมีความราบเรียบ และเสริมความแข็งแรงของผนังได้

3) การตั้งค่าองศาการวางตัวเส้นใย (Fiber angle) คือการกำหนดองศาที่จะทำการพิมพ์เส้นใยของชิ้นงานคอมโพสิต โดยสามารถเลือกองศาการพิมพ์ในการพิมพ์แต่ละชั้นได้อย่างอิสระ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงการตั้งค่าองศาการพิมพ์เส้นใย และตัวอย่างของการเรียงตัวเส้นใยที่องศาต่าง ๆ

4) การตั้งค่าจำนวนชั้นที่จะพิมพ์เส้นใย (Total fiber layer) คือ การกำหนดจำนวนชั้นที่จะใช้ในการพิมพ์เส้นใยคอมโพสิตทั้งหมด โดยในส่วนนี้จะสามารถตั้งค่าอย่างละเอียด เพื่อเลือกได้ว่าจะให้พิมพ์วัสดุเสริมแรงเข้าไปในชั้นใดของการพิมพ์วัสดุคอมโพสิต

2.2.3 คุณสมบัติความเค้นและความเครียดของวัสดุ (Stress and Strain)

คุณสมบัติทางกลของวัสดุ คือ ลักษณะทางกายภาพของวัสดุซึ่งบ่งบอกถึงพฤติกรรมที่วัสดุตอบสนองต่อแรงภายนอกหรือการที่วัสดุนั้นรับน้ำหนัก คุณสมบัติเหล่านี้มีความสำคัญในการพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุสำหรับการใช้งาน โดยคุณสมบัติทางกลที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ คุณสมบัติความแข็งแรงดึง ซึ่งพิจารณาได้จากค่าดังต่อไปนี้

1) ความเค้น (Stress) คือผลของแรงกระทำที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยความเค้นเป็นค่าที่มีความสำคัญในการพิจารณาความแข็งแรงของวัสดุ สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.1

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

โดย σ คือ ค่าความเค้นของวัสดุ มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa)

F คือ ค่าของแรงที่กระทำต่อวัสดุ มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุที่ถูกแรงกระทำหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

2) ความเครียด (Strain) คือ อัตราส่วนระหว่างระยะยืดของวัสดุที่เปลี่ยนไปเมื่อรับแรงกระทำต่อระยะดั้งเดิมของวัสดุ โดยค่าความเครียดมีความสำคัญในการพิจารณาความแข็งแรง (Stiffness) และความเหนียว (Ductility) ของวัสดุ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.2

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

โดย ε คือ ค่าความเครียดเชิงเส้น

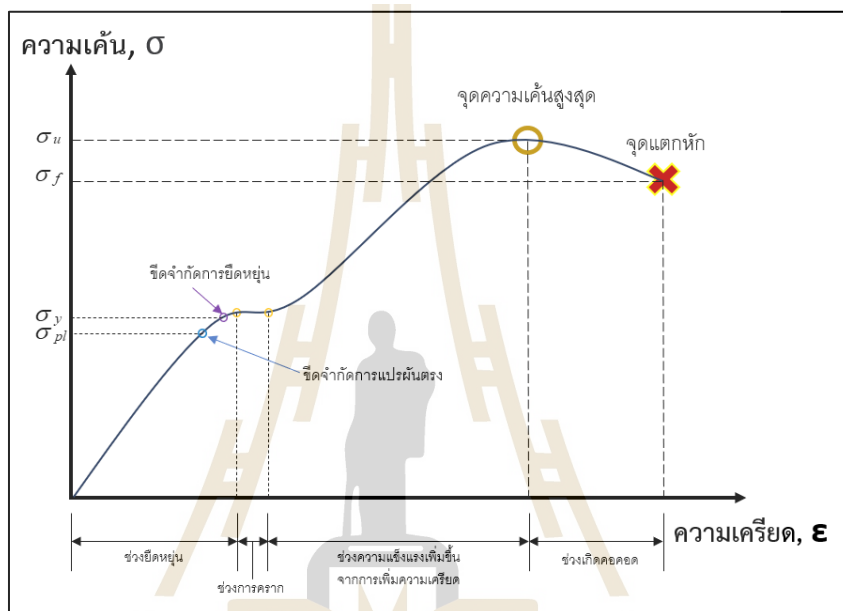
ΔL คือ ค่าความยาวที่เปลี่ยนไปของวัสดุ

L_0 คือ ค่าความยาวดั้งเดิมของวัสดุ

การทดสอบความแข็งแรงดึง คือการทดสอบคุณสมบัติวัสดุพื้นฐานที่ใช้ในการหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ในแต่ละช่วงพฤติกรรมของวัสดุ ทำได้โดยการดึงชิ้นงานทดสอบในแนวแกนทำให้เกิดความเค้นตึงฉากและความเครียดตึงฉากในแนวแกน และเมื่อนำค่าทั้งสองมาเขียนเป็นกราฟจะได้กราฟดังรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียว (Ductile material) โดยที่พฤติกรรมในช่วงแรกจะมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงที่ค่าความเค้นแปรผันตรงกับความเครียด เรียกว่าช่วงยืดหยุ่น (Elastic) ซึ่งหากมีการหยุดการให้ภาระหรือหยุดออกแรงดึงต่อชิ้นงาน วัสดุจะสามารถหดกลับสู่สภาพเดิมโดยไม่เสียรูป กล่าวคือเป็นช่วงการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) ในช่วงนี้มีความเค้นที่แสดงคุณสมบัติทางวัสดุที่สำคัญ 2 จุด คือขีดจำกัดการแปรผันตรง (Proportional limit, σ_{pl}) คือค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะรับได้โดยที่ความเครียดของวัสดุยังคงแปรผันตรงกับความเค้น และขีดจำกัดการยืดหยุ่น (Elastic limit, σ_y) คือความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะรับได้โดยไม่เกิดความเครียดตกค้าง (Residual strain)

เมื่อวัสดุถูกดึงจนเกิดขีดจำกัดความยืดหยุ่น ในช่วงนี้วัสดุจะเกิดการคราก (Yielding) ในช่วงนี้จะเห็นได้ถึงความชัดเจนในการเปลี่ยนรูปของวัสดุ ซึ่งจากในรูป 2.7 จะแสดงให้เห็นว่าค่าความเครียดจะเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเค้นมีค่าคงที่ ความเค้นที่เกิดขึ้นในช่วงการคราก เรียกว่า ความเค้นคราก (Yield stress, σ_y) ในการออกแบบชิ้นส่วนทางกล ความเค้นครากแสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุ

เมื่อพ้นช่วงการคราก วัสดุจะอยู่ในช่วงที่มีความแข็งแรงเพิ่มจากความเครียด (Strain hardening) ซึ่งวัสดุในช่วงนี้จะสามารถรับความเค้นได้สูงสุดเท่าที่วัสดุชนิดนั้น ๆ จะรับได้ เรียกว่า ความเค้นสูงสุด (Ultimate stress, σ_u) จากนั้นวัสดุจะถูกดึงเกินค่าความเค้นที่รับได้จนเข้าสู่ช่วงคอคอด (Necking) ซึ่งความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ในทางกลับกันความเค้นจะมีค่าลดลง จนวัสดุขาดออกจากกัน วัสดุจึงเข้าสู่จุดความเค้นแตกหัก (Fracture stress, σ_f)



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเหนียวเมื่อทำการทดสอบแรงดึง

ค่าความเค้นคราก ความเค้นสูงสุด และความเค้นแตกหัก คือสมบัติเชิงกลในมุมมองของความแข็งแรง (Strength) กล่าวคือ หากพิจารณาเป็นค่าจากผลของการทดสอบจะสามารถนิยามได้ว่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) บ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ต้านทานต่อการถูกแรงกระทำดึงให้ยืดยอกจากกัน โดยค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) คือค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดในกราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด

ค่าความเค้นหลัก (Principal Stress) คือ ค่าความเค้นตามแนวแกนเมื่อค่าความเค้นเฉือนมีค่าเป็นศูนย์ ความเค้นหลักจะมีทิศทางตั้งฉากกัน และเป็นจุดที่ความเค้นสูงสุดและต่ำสุดเกิดขึ้น โดยค่าความเค้นหลักมีความสำคัญในการวิเคราะห์ความเค้นหลักสูงสุดและต่ำสุดในการวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุเปราะ ค่าความเค้นหลักสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3 และภาพประกอบแสดงดังรูปที่ 2.8

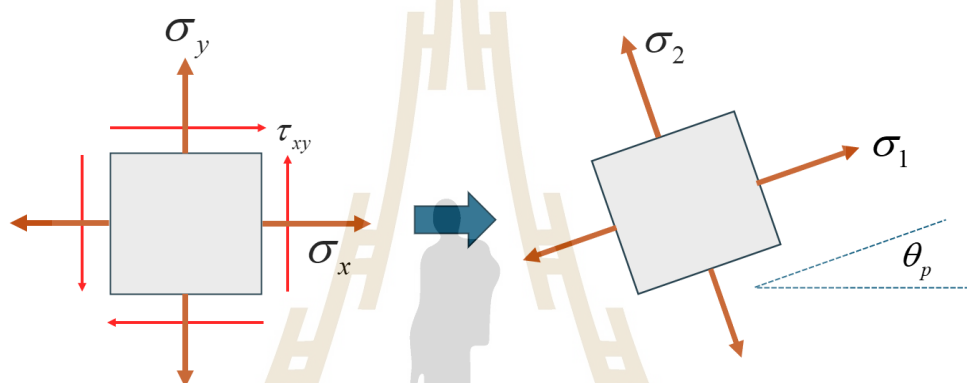
$$\sigma_{1,2} = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \pm \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{2} + \tau_{xy}^2} \quad (2.3)$$

โดย $\sigma_{1,2}$ คือ ค่าความเค้นหลัก

σ_x คือ ค่าความเค้นในแนวแกนนอน

σ_y คือ ค่าความเค้นในแนวแกนตั้ง

τ_{xy} คือ ค่าความเค้นเฉือน



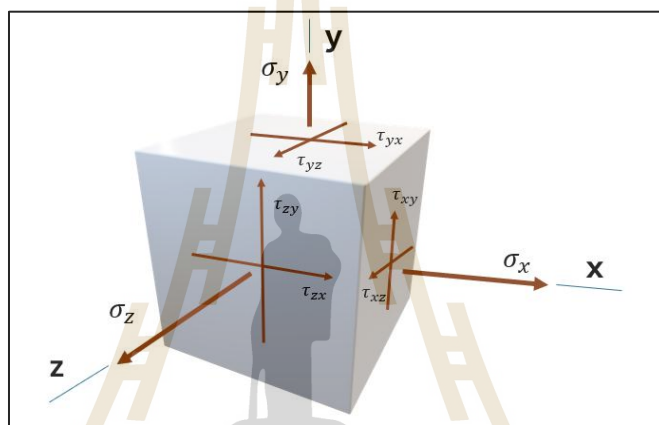
รูปที่ 2.8 อธิบายของค่าความเค้นในทิศทางต่าง ๆ และการเกิดค่าความเค้นหลักในสองมิติ

ค่าความเค้นฟอนมิสเสส (Von mises Stress) คือ ค่าความเค้นแบบสเกลาร์ที่ใช้ในการทำนายว่าวัสดุมีความเสียหายรูปร่างอย่างไร เมื่อได้รับภาระแรงที่ซับซ้อน โดยการลดรูปร่างอย่างง่ายให้เหลือเพียงปริมาณสเกลาร์ ค่าความเค้นฟอนมิสเสสในรูปแบบสามมิติสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 และในรูปแบบองค์ประกอบของความเค้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5 และแสดงภาพการกระทำของความเค้นในแนวแกนต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.8

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2.4)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]} \quad (2.5)$$

โดย σ_v	คือ ค่าความเค้นพอนมิสเสส
σ_x	คือ ค่าความเค้นในแนวแกนอน
σ_y	คือ ค่าความเค้นในแนวแกนตั้ง
$\sigma_{1,2,3}$	คือ ค่าความเค้นหลัก
τ_{xy}	คือ ค่าความเค้นเฉือนในแนวแกน xy
τ_{yz}	คือ ค่าความเค้นเฉือนในแนวแกน yz
τ_{zx}	คือ ค่าความเค้นเฉือนในแนวแกน zx.



รูปที่ 2.9 อิทธิพลของความเค้นต่าง ๆ ในสามมิติ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในมุมมองของสมบัติด้านความแข็งแรง (Stiffness) พารามิเตอร์ที่สนใจจะได้แก่ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ (Modulus of elasticity) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) โดยโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ หรือค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) คือค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดในช่วงความยืดหยุ่นของวัสดุ โดยหากวัสดุมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยเมื่อถูกแรงกระทำต่อวัสดุ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุสามารถหาค่าได้แสดงดังสมการที่ 2.6

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.6)$$

โดย E	คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ
σ	คือ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานรับภาระช่วงยืดหยุ่น
ε	คือ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานรับภาระช่วงยืดหยุ่น

อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) คือ ค่าคุณสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งบ่งบอกถึงการเปลี่ยนรูปของวัสดุในทิศทางแนวขวางกับความเค้นในแนวแกน เทียบกับการเปลี่ยนรูปของวัสดุในทิศทางของแนวเดียวกับความเค้นในแนวแกน โดยอัตราส่วนปัวซองสามารถหาค่าได้แสดงดังสมการที่ 2.7

$$\nu = \frac{-\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{axial}} \quad \left| \text{apply } \sigma_{axial} \text{ only} \right. \quad (2.7)$$

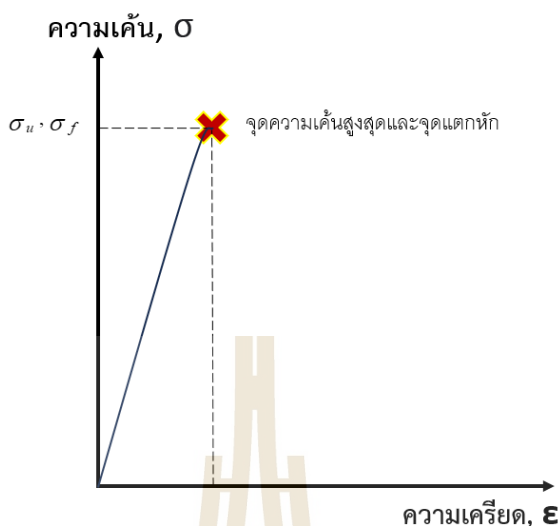
โดย ν คือ อัตราส่วนปัวซอง

$\varepsilon_{lateral}$ คือ ค่าความเครียดตั้งฉากที่วัดในแนวขวางกับความเค้นในแนวแกน σ_{axial}

ε_{axial} คือ ค่าความเครียดตั้งฉากที่วัดในแนวขวางกับความเค้นในแนวแกน σ_{axial}

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเค้น-ความเครียดของวัสดุในรูปที่ 2.7 แสดงถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมเมื่อทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุเหนียว ในทางกลับกันหากทดสอบความแข็งแรงดึงกับวัสดุประเภทแข็งแต่เปราะ (Brittle) จะได้กราฟลักษณะที่แตกต่างออกไป โดยวัสดุประเภทเปราะจะมีการยืดตัวน้อยหรือไม่ยืดตัวเลย เมื่อรับภาระกระทำ หรือเมื่อจะเกิดการแตกหัก ดังนั้นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุรับได้ และค่าความเค้นแตกหักจึงมีค่าใกล้เคียงกันมาก เพราะเมื่อถึงจุดค่าความเค้นสูงสุดวัสดุจะแตกหักทันที ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเมื่อวัสดุเปราะได้รับภาระแรงดึงในการทดสอบความแข็งแรงดึง แสดงดังรูปที่ 2.10

ในการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต วัสดุเมทริกซ์ที่อยู่ภายนอกมักจะแตกหักก่อน โดยคงเหลือวัสดุเสริมแรงซึ่งเสีรูปอยู่ภายในชิ้นงาน เมื่อมีการแตกหักเกิดขึ้น เครื่องทดสอบ Universal testing จะหยุดทำงาน ดังนั้นผลลัพธ์จากการทดสอบวัสดุคอมโพสิตจึงมีลักษณะเป็นกราฟของการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุเปราะ



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเปราะเมื่อรับภาระแรงจากการทดสอบแรงดึง

2.2.4 วัสดุไอโซทรอปิกและวัสดุแอนไอโซทรอปิก

2.2.4.1 วัสดุไอโซทรอปิก (Isotropic material)

คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง อาจหมายถึงในด้านคุณสมบัติทางกลหรือคุณสมบัติทางความร้อนก็ได้ ตัวอย่างวัสดุไอโซทรอปิกโดยทั่วไปในชีวิตประจำวันได้แก่ วัสดุจำพวกแก้ว ยาง และโลหะบางชนิด เช่น อลูมิเนียม เป็นต้น

2.2.4.2 วัสดุแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic material)

คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติต่างกันไปในแต่ละทิศทางของวัสดุ วัสดุแอนไอโซทรอปิกมีทั้งจากธรรมชาติเช่น ไม้ หรือเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีวัสดุเสริมแรงแบบเส้นใย วัสดุเหล่านี้จะมีพฤติกรรมแบบแอนไอโซทรอปิก เนื่องจากคุณสมบัติในการรับแรงทางกลในชิ้นงานเดียวกันจะแตกต่างกันไปตามทิศทางที่รับแรง นอกจากนี้วัสดุแอนไอโซทรอปิกยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็น วัสดุออร์โธทรอปิก (Orthotropic material) วัสดุแอนไอโซทรอปิกตามขวาง (Transversely Isotropic material) และวัสดุแอนไอโซทรอปิกแบบเต็มรูป (Fully Anisotropic material) โดยมีความแตกต่างกันคือ วัสดุออร์โธทรอปิกจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันในทั้งสามแนวแกนทิศทางของวัสดุ และวัสดุแอนไอโซทรอปิกตามขวางจะมีคุณสมบัติที่เหมือนกันในหนึ่งแนวแกน แต่จะมีคุณสมบัติที่ต่างออกไปในอีกสองทิศทางที่ตั้งฉากกันกับแนวแกนแรก กล่าวคือ มีพฤติกรรมไอโซทรอปิกหนึ่งแนวแกน และพฤติกรรมแบบแอนไอโซทรอปิกในทิศทางตั้งฉากอีกสองแนวแกนที่เหลือ และสุดท้ายคือวัสดุแอนไอโซทรอปิกแบบเต็มรูปซึ่งจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันในทุกทิศทางในทุกแนวแกน โดยวัสดุคอมโพสิตที่พิมพ์แบบสามมิติจะมีลักษณะของวัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใยที่วางตัวได้อย่างอิสระ ทำให้มีคุณสมบัติเป็น

แอนไอโซทรอปิกได้ทุกแบบขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบการพิมพ์ชิ้นงาน และการวางองค์ประกอบการพิมพ์เส้นใยของวัสดุเสริมแรง

2.2.5 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ

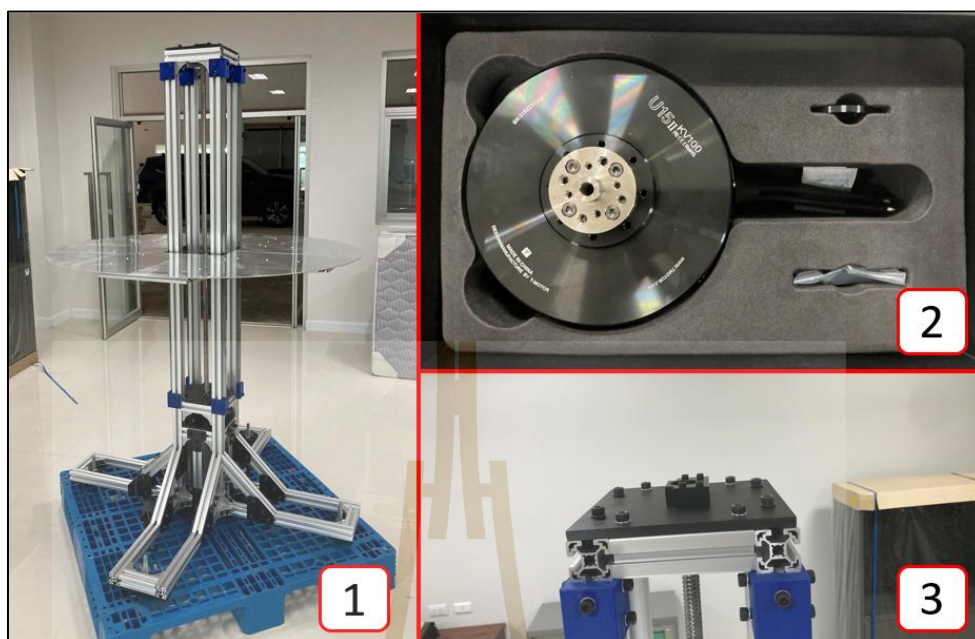
การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial experiment design) คือ เทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัย (Main effect) และผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction) ในทุกระดับ (Level of factors) ซึ่งอาจทำให้ใช้เวลาหรือใช้ทรัพยากรในการทดลองมาก แต่การทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบสามารถให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองได้เป็นอย่างดี

การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบมีข้อได้เปรียบคือทำให้สามารถศึกษาผลกระทบของปัจจัย และผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยได้ทั้งหมด โดยไม่มีการสุ่มหรือตัดปัจจัยใด ๆ ออกจากการทดลอง ซึ่งในการดำเนินการทดลองแบบนี้จะต้องระบุปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยที่จะศึกษา และ จากนั้นจึงทำการออกแบบการทดลองโดยใช้การผสมผสานระดับปัจจัยในทุกความเป็นไปได้ ทำให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด

2.2.6 แท่นทดสอบแรงขับ (Thrust stand)

ในอุตสาหกรรมและการศึกษาด้านวิศวกรรมอากาศยาน และการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับ แท่นทดสอบแรงขับ (Thrust stand) เป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์และใบพัด โดยแท่นทดสอบแรงขับจะทำงานตามหลักการของกฎข้อที่สามของนิวตัน โดยแรงผลักของใบพัดไปด้านหลังอากาศจะสร้างแรงขับไปข้างหน้าที่เท่ากัน ซึ่งแท่นทดสอบจะทำการวัดแรงขับนี้ แท่นทดสอบใช้เซลล์รับแรง (load cell) ซึ่งแปลงแรงที่กระทำเป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อวัดค่าแรงขับที่เกิดขึ้น จากการวิเคราะห์ข้อมูลนี้ควบคู่กับพารามิเตอร์ทางทฤษฎีของใบพัด เช่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงขับ (thrust coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (power coefficient) นักวิจัยสามารถประเมินประสิทธิภาพของชุดมอเตอร์-ใบพัด และปรับแต่งคุณลักษณะการบิน เช่น ระยะทางพิสัย และความจุของน้ำหนักบรรทุก

หน่วยวิจัยจากทางโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ได้พัฒนาแท่นทดสอบแรงขับขนาดใหญ่สำหรับทดสอบใบพัดอากาศยานไร้คนขับ โดยมีลักษณะเป็นแท่นทดสอบขนาดใหญ่ ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับอากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ T-Motor รุ่น U15II KV100 ซึ่งให้แรงขับขนาด 36 กิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยในการใช้งานจะต้องใช้กล่องต้านแรงบิดเพื่อยึดชิ้นส่วนระหว่างตัวมอเตอร์และขาตั้งของแท่นทดสอบเข้าไว้ด้วยกัน โดยที่กล่องต้านแรงบิดนี้จะต้องมีคุณสมบัติทางกลที่เพียงพอในการต้านแรงขับที่เกิดจากใบพัด และแรงบิดที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า จึงเป็นที่มาของการนำวิธีการออกแบบการพิมพ์วัสดุสามมิติของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไปใช้งานทางด้านวิศวกรรม



รูปที่ 2.11 ชุดแท่นทดสอบแรงขับซึ่งพัฒนาโดยหน่วยวิจัยจากทางโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ซึ่งประกอบไปด้วย (1) ขาตั้งแท่นทดสอบ (2) มอเตอร์ไฟฟ้า และ (3) จุดยึดกล่องต้านแรงบิดกับขาตั้งแท่นทดสอบ

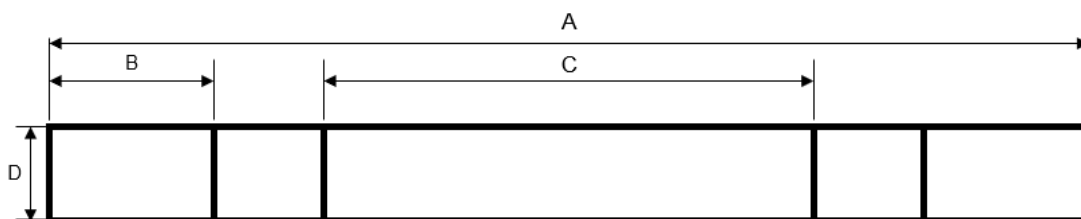
2.2.7 การทดสอบแรงดึงของโพลิเมอร์และคอมโพสิตด้วยมาตรฐาน ASTM D3039

American Society for Testing and Materials (ASTM) คือ สมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นผู้กำหนด จัดตั้ง และประกาศมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับรายละเอียดและการทดสอบวัสดุต่าง ๆ ซึ่งเป็นที่ได้รับการยอมรับจากทั่วโลก

มาตรฐาน ASTM D3039 คือมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบวัสดุคอมโพสิตชนิดพอลิเมอร์โดยเฉพาะ ซึ่งจะมีการออกแบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการทดสอบ และเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินผลการทดสอบเป็นค่าเฉพาะของมาตรฐาน ซึ่งจะแตกต่างจากมาตรฐานการทดสอบ ความแข็งแรงดึงของวัสดุประเภทอื่น ๆ โดยมีหลักการที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบดังนี้

2.2.7.1 รูปแบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึง

ชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D3039 จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยความยาวของชิ้นงานขั้นต่ำ จะถูกกำหนดจากผลรวมความยาวของบริเวณที่ใช้จับยึดชิ้นงาน บริเวณความยาวเกจ และความกว้างของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ภาพแสดงชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง เมื่อ A คือระยะความยาวชิ้นต่ำของชิ้นงาน, B คือความยาวของบริเวณที่ใช้จับยึดชิ้นงาน, C คือบริเวณความยาวเกจ และ D คือระยะความกว้างของชิ้นงาน

พิจารณารูปที่ 2.10 ความยาวชิ้นต่ำของชิ้นงานคำนวณได้ดังสมการที่ 2.8

$$A = B + C + 2D \quad (2.8)$$

2.2.7.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึง

ในการทดสอบความแข็งแรงดึง จะต้องทำการทดสอบโดยมีเครื่องมือวัดขนาดชิ้นงานก่อนการทดสอบที่ชัดเจนและแม่นยำ และต้องใช้เครื่องทดสอบแรงอนกประสงค์ในการทดสอบ ควบคู่กับขั้นตอนในการทดสอบความแข็งแรงดึงที่มีความน่าเชื่อถือ

2.2.7.3 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงดึง

- 1) วัดขนาดของชิ้นงาน โดยทำการบันทึกความกว้างและความหนาของชิ้นงาน
- 2) นำชิ้นงานใส่ในเครื่องทดสอบ โดยต้องจับยึดชิ้นงานกับปากกาจับยึดให้แน่น
- 3) ตรวจสอบว่าชิ้นงานทดสอบถูกจับในทิศทางที่ถูกต้อง
- 4) ทำการกรอกข้อมูลความกว้างและความหนาของชิ้นงานลงในซอฟต์แวร์
- 5) กำหนดขนาดของแรงและความเร็วที่ใช้ในการดึงชิ้นงานทดสอบในซอฟต์แวร์
- 6) กดเซ็ระยะของปากกาจับยึดชิ้นงานให้เป็นศูนย์ และทำการเริ่มดึงชิ้นงาน
- 7) รอจนชิ้นงานถูกดึงจนชิ้นงานทดสอบเกิดจุดแตกหัก ซึ่งเครื่องทดสอบจะหยุดดึงต่อโดยอัตโนมัติ
- 8) ตรวจสอบว่าชิ้นงานทดสอบ เกิดจุดแตกหักในความยาวเกจหรือไม่

9) ทำการบันทึกค่าแรงดึงสูงสุดที่ใช้ในการทดสอบและค่าระยะยืดที่เปลี่ยนไปจากซอฟต์แวร์

10) นำชิ้นงานทดสอบออกจากเครื่องทดสอบ

2.2.8 การทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และซอฟต์แวร์แอนซิส

2.2.8.1 การทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นกระบวนการเชิงตัวเลขเพื่อหาคำตอบของผลลัพธ์โดยประมาณ (Approximate solution) สำหรับการแก้ปัญหาทางวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ หรือศาสตร์อื่น ๆ ที่ประกอบไปด้วย สมการเชิงอนุพันธ์ เงื่อนไขขอบเขต และรูปร่างของปัญหา โดยวิธีการของไฟไนต์เอลิเมนต์คือการแบ่งโดเมน (Domain) ของปัญหาของเป็นเอลิเมนต์ (element) ย่อย ๆ จากนั้นทำการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับเอลิเมนต์เหล่านี้ โดยสมการดังกล่าวขึ้นอยู่กับประเภทของปัญหา จากนั้นจึงนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์ย่อยเหล่านี้มารวมกันเป็นระบบสมการขนาดใหญ่ แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตกับระบบสมการนี้เพื่อหาคำตอบ(ปราโมทย์ และ เสฏฐวรรธ, 2560)

2.2.8.2 ซอฟต์แวร์แอนซิส และโมดูลแอนซิสเอซีพี (ANSYS and ANSYS ACP)

แอนซิส (ANSYS) เป็นซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งถูกสร้างและพัฒนาโดยจอห์น สแวนสัน (John Swanson) ในปี พ.ศ.2512 โดยแรกเริ่มถูกเขียนขึ้นมาเพื่อวิเคราะห์งานในโรงงานปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยในปัจจุบันซอฟต์แวร์แอนซิสได้ถูกพัฒนาและเผยแพร่ใช้ในองค์กรต่าง ๆ ทั่วโลก เนื่องจากมีประโยชน์ในการปรับปรุงการออกแบบ ช่วยลดต้นทุนการพัฒนา และเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ ซึ่งแอนซิสสามารถใช้เป็นโปรแกรมจำลองการทดลองเพื่อแก้ปัญหาได้หลายหลายรูปแบบ เช่น ปัญหาการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic) และ กลศาสตร์วัสดุ (Mechanical properties) เป็นต้น เนื่องจากมีรูปแบบการใช้งานโปรแกรมที่ใช้งานง่าย เมื่อเทียบกับซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์อื่น ๆ ทั้งยังมีศักยภาพในการแก้ปัญหาได้หลากหลายสาขา (ปราโมทย์ และ เสฏฐวรรธ, 2560)

แอนซิสเอซีพี (ANSYS ACP) คือ โมดูลพิเศษภายในซอฟต์แวร์แอนซิส ที่ถูกออกแบบให้มีการใช้งานที่เหมาะสมกับการจำลองและวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตซึ่งประกอบด้วยวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดอยู่ในชิ้นงานเดียว โดยแอนซิสเอซีพีสามารถสร้างโมเดลโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตที่ซับซ้อน กำหนดคุณสมบัติวัสดุ การวางองศาวัสดุเสริมแรง จำลองการตอบสนองต่อเงื่อนไขการรับภาระ วิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุเสริมแรง และวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุเมทริกซ์ โดยแอนซิสเอซีพี จะแบ่งการใช้งานเป็น แอนซิสเอซีพี 프리 (ANSYS ACP Pre) และแอนซิสเอซีพี โพสต์ (ANSYS ACP Post)

แอนซิสเอซีพี พรี (ANSYS ACP Pre)เป็นส่วนหนึ่งของซอฟต์แวร์แอนซิสที่ใช้สำหรับเตรียมและจัดการข้อมูลวัสดุคอมโพสิตก่อนการจำลองและหลังการจำลอง โดยจะมีเครื่องมือและฟังก์ชันที่ช่วยในการสร้างโมเดล โครงสร้าง และคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิต และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ส่วนแอนซิสเอซีพี โพสต์ (ANSYS ACP Post) ใช้สำหรับการวิเคราะห์และการนำเสนอข้อมูลคำตอบหลังการจำลองโครงสร้างวัสดุคอมโพสิต โดยจะมีเครื่องมือและฟังก์ชันที่ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงกราฟิก พล็อตผลคำตอบ และการสร้างรายงานข้อมูลผลคำตอบ ช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของโครงสร้างวัสดุคอมโพสิตจากการจำลองด้วยซอฟต์แวร์แอนซิส

2.2.9 การสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบ (Objective function)

สมการจำลองทดแทน (Surrogate model) ถูกสร้างเพื่อใช้ในระบบการเพิ่มประสิทธิภาพแบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อประมาณค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective functions) และข้อจำกัด (Constraints) เนื่องจากการทดลองจริงเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าเหล่านี้ใช้เวลาและค่าใช้จ่ายที่สูง

ในระบบการสร้างสมการจำลองทดแทน มีทางเลือกในการใช้ฟังก์ชันประมาณค่าที่หลากหลาย เช่น ฟังก์ชันรัศมีพื้นฐาน (Radial basis function) ฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial) เป็นต้น แต่ในการสร้างสมการจำลองทดแทนสำหรับฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ การสร้างสมการจำลองด้วยวิธีคริกกิ้งได้รับความนิยมและใช้งานได้จริง เนื่องจากสามารถประมาณค่าได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการคำนวณ และเพิ่มประสิทธิภาพในการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้อย่างดี

2.2.9.1 การสร้างแบบจำลองทดแทนด้วยวิธีคริกกิ้ง (Kriging surrogate model)

วิธีคริกกิ้งแบบดั้งเดิม (Ordinary Kriging) จะสามารถทำนายฟังก์ชันคำตอบได้ ดังสมการที่ 2.9

$$y(x) = \mu(x) + \varepsilon(x) \quad (2.9)$$

โดย $y(x)$ คือ ฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่า (Unknown function)

$\mu(x)$ คือ สมการแบบวงกว้าง (Global model)

$\varepsilon(x)$ คือ สมการแบบวงแคบ (Local model)

การใช้ฟังก์ชันสุ่มแบบเกาส์เซียน (Gaussian random function) จุดตัวอย่าง x สามารถแก้ไขได้ ความสัมพันธ์ระหว่าง $Z(x_i)$ และ $Z(x_j)$ เกี่ยวข้องกับระยะห่างระหว่างจุดที่สอดคล้องกันสองจุดของ x_i และ x_j ซึ่งฟังก์ชันระยะห่างระหว่างจุดต่าง ๆ แสดงดังสมการที่ 2.10

$$d(x_i, x_j) = \sum_{k=1}^m \theta^k |x_i^k - x_j^k|^2 \quad (2.10)$$

โดย $d(x_i, x_j)$ คือ ฟังก์ชันระยะทางระหว่าง x_i และ x_j

θ^k มีค่าในช่วง $(0 \leq \theta^k \leq \infty)$ และ k^{th} คือ มิติของความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ตัวแปร โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างจุด x_i กับจุด x_j แสดงดังสมการที่ 2.11

$$\text{Corr}[Z(x_i), Z(x_j)] = \exp[-d(x_i, x_j)] \quad (2.11)$$

และการทำนายค่าโดยวิธีคริกกิ้งจะได้ดังสมการที่ 2.12

$$y(x) = \mu(x) + r^T R^{-1} (F - \mu) \quad (2.12)$$

เมื่อ $Z(x_i)$ คือ ค่าเบี่ยงเบนเฉพาะที่ของสมการวงกว้าง, $F = [f(x_1), f(x_2), f(x_3), \dots, f(x_n)]^T$ คือ ค่าของฟังก์ชันการประเมินค่าโดยที่ $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ และ เมื่อ n คือ จำนวนตัวอย่างการออกแบบของข้อมูลความแม่นยำระดับสูง R คือ มิติเมทริกซ์ $n \times n$ โดยมีพิกัด (i, j) สัมพันธ์กับฟังก์ชัน $\text{Corr}[Z(x_i), Z(x_j)]$ และ r คือ เวกเตอร์โดยที่มีมิติความสัมพันธ์ i^{th} ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.13

$$r_i(x) = \text{Corr}[Z(x), Z(x^i)] \quad (2.13)$$

ในสมการจำลองคริกกิ้งดั้งเดิม $\mu(x)$ จะถือว่ามีความคงที่ และค่าประมาณสำหรับ $\mu(x)$ จะแทนค่าด้วยตัวแปร μ ซึ่งจะได้จากสมการที่ 2.14

$$\mu = [\mu(x), \mu(x), \mu(x), \dots, \mu(x)] \quad (2.14)$$

ซึ่งถูกกำหนดดังสมการที่ 2.15

$$\mu(x) = \frac{I^T R^{-1} F}{I^T R^{-1} I} \quad (2.15)$$

ค่าพารามิเตอร์ θ ในสมการคริกก็จะสามารถถูกกำหนดได้โดยใช้การประมาณความน่าจะเป็นขั้นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation) ดังสมการที่ 2.16

$$\text{Ln}(\mu, \sigma^2, \theta) = -\frac{n}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{1}{2} \ln(|R|) \quad (2.16)$$

ซึ่งสมการดังกล่าวจะสามารถหาคำตอบได้ โดยการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) โดยจากค่า θ จะสามารถคำนวณหาค่าความแปรปรวน σ^2 ได้จากสมการที่ 2.17

$$\sigma^2 = \frac{(F - \mu)^T R^{-1} (F - \mu)}{n} \quad (2.17)$$

โดยที่ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (mean squared error) $s^2(x)$ ณ จุด x ของฟังก์ชัน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.18

$$s^2(x) = \sigma \left[1 - r^T R^{-1} r + \frac{(1 - r^T R^{-1} r)^2}{1^T R^{-1} 1} \right] \quad (2.18)$$

โดยที่ 1 หมายถึงเวกเตอร์หน่วย n มิติ

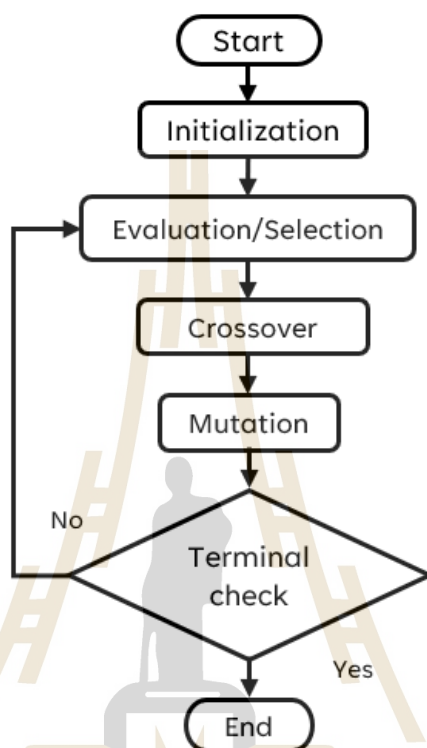
2.2.10 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization)

2.2.10.1 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับไม่ครอบงำ (Non-dominated Sorting Genetic algorithm)

การครอบงำของคำตอบ (Domination) หมายถึง การที่คำตอบในรุ่นนั้นไม่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใดที่ด้อยกว่าคำตอบอื่นในรุ่นเดียวกัน และคำตอบดังกล่าวจะต้องมีอย่างน้อยหนึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่าคำตอบอื่น ๆ ดังนั้น การจัดลำดับไม่ครอบงำ จึงหมายถึงการจัดลำดับคำตอบ โดยพิจารณาให้คำตอบที่ไม่ถูกครอบงำโดยคำตอบอื่นในชุดคำตอบ ซึ่งบ่งบอกว่าคำตอบนั้นคือคำตอบที่ดีที่สุดเมื่อพิจารณาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) คือขั้นตอนวิธี (Algorithm) ที่ใช้ในการจัดการข้อมูล โดยนำทฤษฎีวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตมาใช้ในการคัดเลือกข้อมูลในแต่ละชุด โดยข้อมูลชุดแรกจะเรียกว่า Parent และข้อมูลชุดถัดไปจะถูกเรียกว่า Offspring โดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมได้นำลักษณะการคัดเลือก (Selection) การไขว้เปลี่ยน (Crossover) และการกลายพันธุ์

(Mutation) มาใช้ในการเลือกและสร้างข้อมูลชุด Offspring โดยการทำงานของวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถเขียนเป็นแผนภาพแสดงดังรูปที่ 2.13

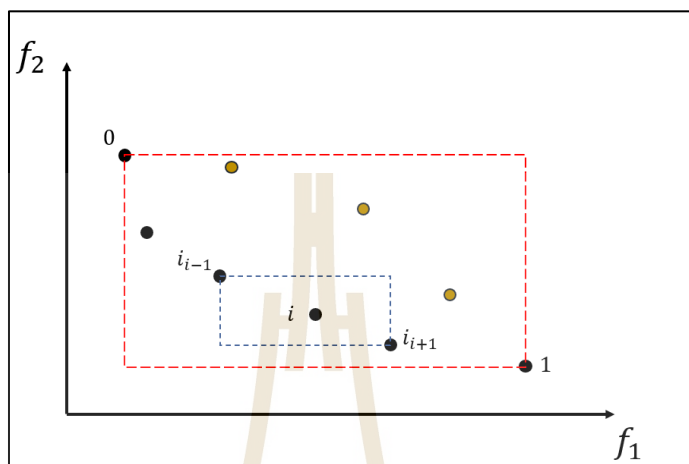


รูปที่ 2.13 การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

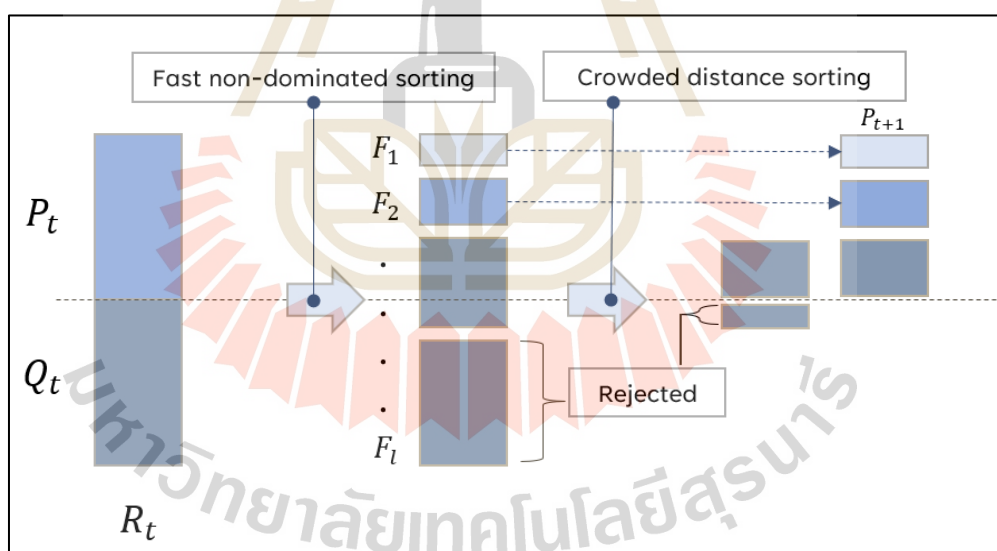
ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับไม่ครอบงำ 2 คือ ขั้นตอนวิธีที่มีความสามารถในการจัดลำดับและคัดเลือกข้อมูลเพื่อหาค่าชุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจากฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ โดยขั้นตอนการประเมิน/การคัดเลือก การไขว้เปลี่ยน และการสุ่มแบบจำลองการกลายพันธุ์ จะประยุกต์ใช้มาจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม แต่เนื่องจากวัตถุประสงค์ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ กระบวนการจัดลำดับข้อมูลจึงได้ประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการจัดลำดับไม่ถูกครอบงำอย่างรวดเร็ว (Fast-nondominated sorting algorithm) ในการจัดลำดับชุดคำตอบ

ในการจัดลำดับไม่ครอบงำ อาจมีคำตอบที่มีความไม่ถูกครอบงำอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน เพื่อที่จะคัดเลือกประชากรรุ่นต่อไป และเพื่อให้กลุ่มข้อมูลมีการกระจายตัวจึงได้มีการใช้ขั้นตอนวิธีการจัดลำดับจากระยะห่างจากการจัดกลุ่มของข้อมูล (Crowded distance sorting) เพื่อคัดเลือกและจัดลำดับข้อมูล โดยการหาระยะห่างจากกลุ่มคำตอบอื่น แสดงดังรูปที่ 2.14 และการ

ทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับไม่ครอบงำ 2 โดยรวมทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 การคำนวณระยะห่างจากกลุ่มคำตอบอื่น



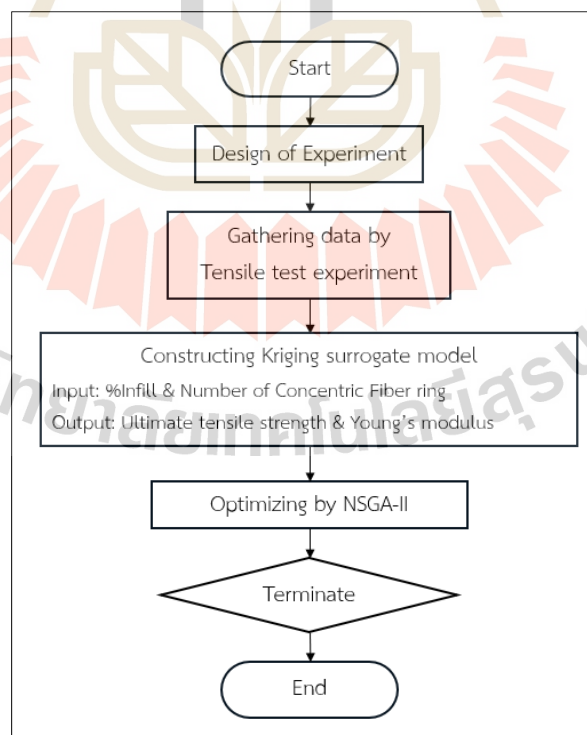
รูปที่ 2.15 การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับไม่ครอบงำ 2

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย ส่วนที่ 1

การดำเนินการวิจัยส่วนที่ 1 เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิควิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดกับการใช้เทคนิคการสร้างสมการจำลองทดแทน โดยทำการทดลองในการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตซึ่งขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์วัสดุคอมโพสิตแบบสามมิติ โดยเริ่มจากการออกแบบการทดลอง และตั้งวัตถุประสงค์การออกแบบให้วัสดุมีความแข็งแรงดึง และค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นสูงที่สุด ซึ่งได้กำหนดตัวแปรในการออกแบบ คือ การตั้งค่าเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นการเติม และจำนวนวงแหวนไฟเบอร์ โดยหลังจากทำการทดสอบชิ้นงานจริงตามมาตรฐาน ASTM D3039 จึงได้ทำการสร้างสมการจำลองทดแทนข้อมูลการทดลอง เพื่อใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด แสดงขั้นตอนการวิจัย ดังรูปที่ 3.1

3.1 กรอบแนวคิดของการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยในส่วนที่ 1

3.2 การกำหนดตัวแปรออกแบบ เงื่อนไข และฟังก์ชันวัตถุประสงค์

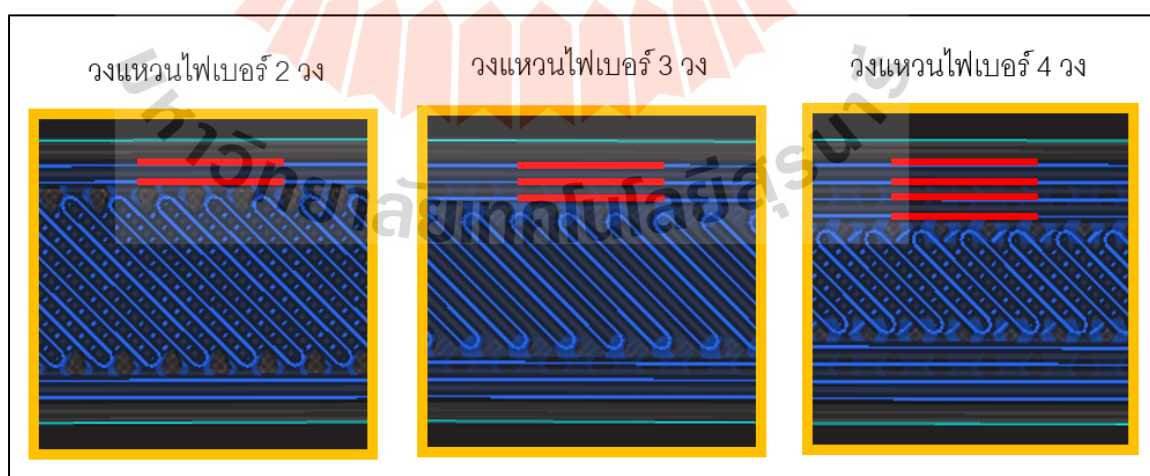
3.2.1 การกำหนดตัวแปรออกแบบ

ตอนที่ 1 จะออกแบบการปรับตั้งค่าการพิมพ์สามมิติของวัสดุคอมโพสิตและการทดลองของการทดสอบความแข็งแรงดึงวัสดุคอมโพสิตซึ่งขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบจำนวน 2 ตัวแปร มีขอบเขตของตัวแปรแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความหมายของตัวแปรในการออกแบบการพิมพ์วัสดุคอมโพสิต

ตัวแปร	ความหมาย	ขอบเขตและระดับของตัวแปร		
		ต่ำ	กลาง	สูง
A	เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นการเติม	50%	70%	90%
B	จำนวนวงแหวนไฟเบอร์	2	3	4

จากตารางที่ 3.1 ได้ทำการเลือกระดับของตัวแปรเป็นอย่างละ 3 ระดับ คือระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง โดยในแปร A มีเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นของการเติมต่ำสุดที่ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยถูกเลือกเนื่องจากพิจารณาว่ามีความแข็งแรงในระดับที่ยอมรับได้ ส่วนเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นการเติมสูงสุดที่ 90 เปอร์เซ็นต์ถูกเลือกเนื่องจากต้องการจำกัดความสิ้นเปลืองในการพิมพ์เนื้อวัสดุ และในตัวแปร B มีจำนวนวงแหวนไฟเบอร์ระดับต่ำสุดที่ 2 เนื่องจากเป็นช่วงที่วงแหวนไฟเบอร์มีบทบาทในการร่วมป้องกันเนื้อวัสดุ ไปจนถึงระดับ 4 วงแหวนที่วงแหวนไฟเบอร์มีจำนวนวงในการพิมพ์เยอะเกินไป จนลดพื้นที่ในการพิมพ์เนื้อวัสดุส่วนกลางของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงเนื้อวัสดุส่วนกลางของชิ้นงานทดสอบที่ลดลงตามจำนวนวงแหวนไฟเบอร์

3.2.2 เงื่อนไขสำหรับการออกแบบชิ้นงานทดสอบ

ตอนที่ 1 จะออกแบบการปรับตั้งค่าการพิมพ์ของชิ้นงาน เพื่อใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึง โดยรูปทรงของชิ้นงานการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต ASTM D3039 และในส่วนการปรับตั้งค่าในการพิมพ์วัสดุคอมโพสิต และการปรับตั้งค่าการพิมพ์ในส่วนวัสดุรับแรง แสดงดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 การปรับตั้งค่าในการพิมพ์วัสดุคอมโพสิต

การปรับตั้งค่า	การปรับตั้งค่าที่เลือกใช้ในการพิมพ์
รูปแบบโครงสร้างภายในของการพิมพ์	รูปแบบสี่เหลี่ยม
เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นในการเติม	50 %, 70% และ 90%
จำนวนชั้นของรูปและฟลอร์	4
จำนวนชั้นผนังของวัสดุ	2

จากตารางที่ 3.2 ได้เลือกรูปแบบโครงสร้างภายในของวัสดุคอมโพสิตเป็นแบบสี่เหลี่ยม เนื่องจากตัวแปรในการออกแบบของการดำเนินการส่วนนี้คือเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นการเติมที่เหมาะสม การเลือกวัสดุพิมพ์รูปแบบเป็นสี่เหลี่ยมจะทำให้เลือกช่วงระยะของเปอร์เซ็นต์การพิมพ์ได้มากที่สุด (0 ถึง 92 เปอร์เซ็นต์) และการตั้งค่าในส่วนที่อื่น ๆ เป็นรูปแบบการตั้งค่าการพิมพ์ดั้งเดิมของซอฟต์แวร์

ตารางที่ 3.3 การปรับตั้งค่าในการพิมพ์ในส่วนวัสดุเสริมแรง

การปรับตั้งค่า	การปรับตั้งค่าที่เลือกใช้ในการพิมพ์
จำนวนชั้นของการพิมพ์วัสดุเสริมแรง	10
ประเภทการเติมเส้นใย	พิมพ์ในรูปแบบเส้นขนาน
จำนวนวงแหวนไฟเบอร์	2, 3 และ 4 วง
องศาการพิมพ์วัสดุเสริมแรง	45, -45

จากตารางที่ 3.3 ได้เลือกจำนวนชั้นของการพิมพ์ที่จำนวน 10 ชั้น เนื่องจากเป็นจำนวนชั้นที่เหมาะสมที่สุดที่จะมีจำนวนเส้นใยเพียงพอซึ่งทำให้ได้ความหนาของมาตรฐานการทดสอบ และในส่วนของการเติมเส้นใยได้เลือกเป็นการพิมพ์รูปแบบเส้นขนาน เนื่องจากชิ้นงานมีวงแหวนไฟเบอร์อยู่แล้ว และเพื่อให้เลือกองศาการพิมพ์เป็น 45 และ -45 องศาสลับกันได้ ส่วนจำนวนวงแหวนไฟเบอร์เป็นไปตามตัวแปรการออกแบบ

3.2.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การออกแบบชิ้นงานพิมพ์สามมิติของวัสดุคอมโพสิต มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ชิ้นงานทดสอบมีค่าคุณสมบัติทางกลที่ดีที่สุด เนื่องจากในส่วนของ 1 ของการดำเนินการวิจัยเป็นการทดสอบความแข็งแรงดึง ดังนั้นจึงได้ตั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงและความแข็งแรงที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงได้ตั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์สองฟังก์ชัน แสดงดังสมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ และแสดงข้อมูลขาเข้าและขาออกของทั้งสองฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ 3.3

$$\text{Maximize (f1): } \sigma_u \quad (3.1)$$

โดย σ_u คือ ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่วัสดุจะรับได้ มีหน่วยเป็น MPa .

$$\text{Maximize (f2): } E \quad (3.2)$$

โดย E คือ ค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุ มีหน่วยเป็น MPa

$$\begin{aligned} \text{Input1: ID(\%)} & [\text{Data type: Continuous}] \\ \text{Input2: CFR(ring)} & [\text{Data type: Discrete}] \end{aligned} \quad (3.3)$$

โดย ID คือ เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นการเติม มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์
CFR คือ จำนวนวงแหวนไฟเบอร์ มีหน่วยเป็น วง

สมการที่ 3.1 มีวัตถุประสงค์การออกแบบเพื่อค่าอัตราส่วนและการปรับตั้งค่าการพิมพ์ที่ทำให้วัสดุมีค่าความแข็งแรงดึงในด้านคุณสมบัติความแข็งแรงทางกลที่มากที่สุด โดยสำหรับการทดสอบวัสดุคอมโพสิตนั้นจะเริ่มพิจารณาว่าวัสดุเสียหายเมื่อเมทริกซ์ที่อยู่ชั้นภายนอกแตกหักก่อน และไม่มีช่วงยืดตัว ซึ่งทำให้พิจารณาการทดสอบแรงดึงเป็นไปการกราฟการทดสอบวัสดุเปราะ (แสดงดังรูปที่ 2.8) ดังนั้นค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด จึงถือเป็นจุดเดียวกับจุดแตกหักของชิ้นงานทดสอบ

สมการที่ 3.2 มีวัตถุประสงค์การออกแบบเพื่อค่าอัตราส่วนและการปรับตั้งค่าการพิมพ์ที่ทำให้วัสดุมีค่าความแข็งแรงดึงในด้านคุณสมบัติความแข็งแรงทางกลที่มากที่สุด เนื่องจากค่าโมดูลัสความยืดเป็นตัวแปรที่บ่งชี้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานเมื่อชิ้นงานถูกภาระแรงกระทำ ดังนั้นค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุนี้เองจึงถูกเลือกใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบในเชิงความแข็งแรงของวัสดุ

3.3 การออกแบบตัวแปรการทดลองการทดสอบความแข็งแรงดึง

การออกแบบตัวแปรของการเก็บข้อมูลการทดลองจากการทดสอบความแข็งแรงดึง ใช้วิธีแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยออกแบบตัวแปรจำนวน 9 ตัวแปร โดยผลจากการแปลงค่าขอบเขตและระดับตัวแปรจากตารางที่ 3.1 จะแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ชื่อชิ้นงานทดสอบ และการปรับตั้งค่าตัวแปรออกแบบของชิ้นงานทดสอบ

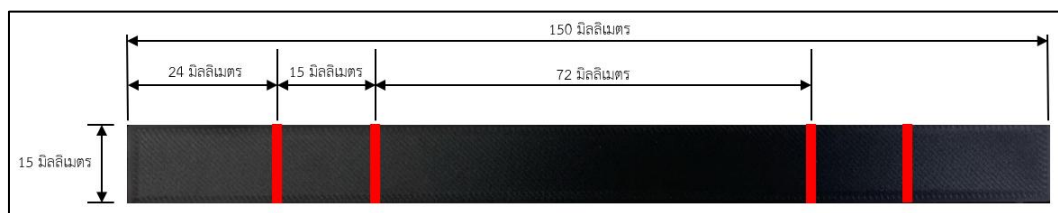
ชื่อชิ้นงาน	เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นการเติม	จำนวนวงแหวนไฟเบอร์ (วง)
502	50%	2
503	70%	3
504	90%	4
702	50%	2
703	70%	3
704	90%	4
902	50%	2
903	70%	3
904	90%	4

3.4 การทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต

การดำเนินการทดสอบความแข็งแรงดึงในการดำเนินงานวิจัยส่วนที่ 1 มีมาตรฐานการทดสอบรองรับในการทดสอบเป็นมาตรฐานการทดสอบ ASTM D3039 ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบแรงดึงที่ใช้กับวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต จึงนำมาตรฐานดังกล่าวมาใช้ในการทดสอบวัสดุคอมโพสิตซึ่งขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

3.4.1 รูปร่างและขนาดของการสร้างชิ้นงานทดสอบ

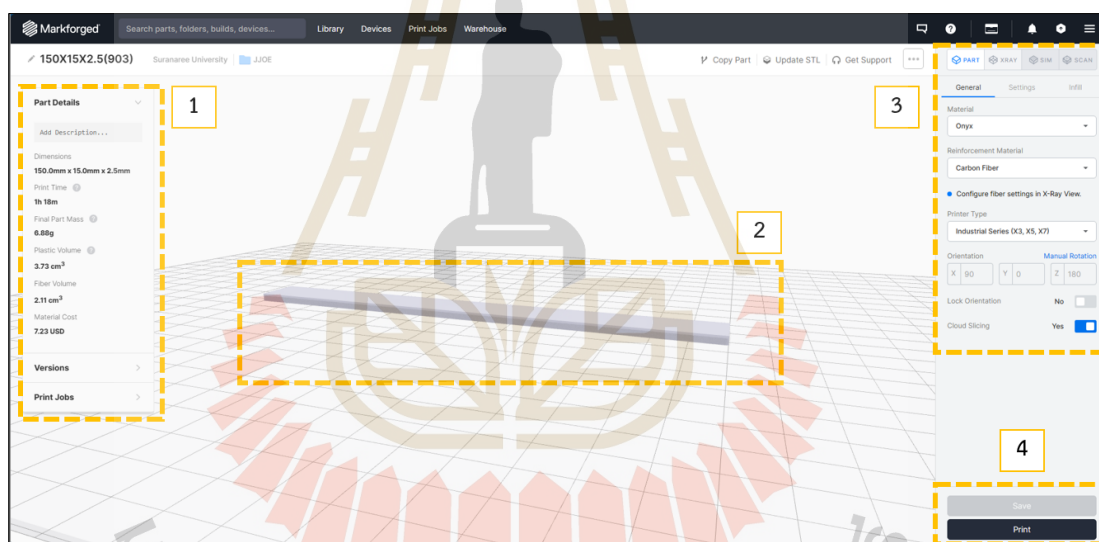
การสร้างชิ้นงานตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงดึงพอลิเมอร์คอมโพสิต มีข้อกำหนดของรูปร่างโดยให้ใช้ชิ้นงานทดสอบเป็นรูปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยกำหนดความหนาของชิ้นงานเพียงพอที่จะมีการพิมพ์เส้นใยของวัสดุเสริมแรงอยู่ภายใน ในการวิจัยนี้เลือกเป็น 2.5 มิลลิเมตร มีการกำหนดของระยะความยาวชิ้นงานขั้นต่ำ (Minimum length) มาจากระยะความยาวส่วนที่ชิ้นงานจะถูกจับ (Grip length) ความยาวของบริเวณที่ชิ้นงานควรจะต้องหัก (Gauge length) และระยะความกว้างของชิ้นงาน ตามสมการที่ 2.5 และแสดงตัวอย่างชิ้นงานทดสอบและขนาดของชิ้นงานดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึงและขนาดของชิ้นงาน

3.4.2 การตั้งค่าการพิมพ์ของวัสดุคอมโพสิต

การปรับตั้งค่าการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ Markforged X7 จะทำการปรับตั้งค่าตามตารางที่ 3.2 และ 3.3 ผ่านซอฟต์แวร์ Eiger ผ่านเว็บไซต์ <https://www.eiger.io/> แสดงหน้าต่างซอฟต์แวร์ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงหน้าต่างซอฟต์แวร์ Eiger ที่ใช้ในการปรับตั้งค่าและการสั่งพิมพ์เครื่องพิมพ์ Markforged

จากรูปที่ 3.4 ประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักของหน้าต่างการปรับตั้งค่าและการสั่งพิมพ์โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

หมายเลข 1 แสดงรายละเอียดชิ้นงานที่จะทำการพิมพ์ดังได้แก่ ขนาดของชิ้นงาน เวลาที่ใช้ในการพิมพ์ น้ำหนักสุทธิ ปริมาตรเมทริกซ์ที่ใช้ ปริมาตรวัสดุเสริมแรงที่ใช้ และราคาการพิมพ์โดยประมาณซึ่งซอฟต์แวร์คำนวณให้อัตโนมัติ

หมายเลข 2 แสดงรูปร่างของชิ้นงานเมื่อพิมพ์เสร็จ และพื้นที่ในตารางทั้งหมดในหน้าจอ คือการจำลองพื้นที่การพิมพ์ (Printing Bed) โดยสามารถใช้เมาส์ในการขยับจุดวาง หมุน ทำทางการพิมพ์ของวัสดุได้

หมายเลข 3 คือ ปุ่มสำหรับบันทึกการตั้งค่า และปุ่มสำหรับสั่งพิมพ์ชิ้นงาน

หมายเลข 4 คือ ส่วนของการปรับตั้งค่าการพิมพ์ต่าง ๆ โดยจะมีแท็บย่อยให้สามารถเลือกปรับได้หลากหลาย แสดงรายละเอียดดังหัวข้อย่อยที่ 3.4.2.1

3.4.2.1 รายละเอียดการปรับตั้งค่าการพิมพ์

จากรูปที่ 3.4 ในส่วนหมายเลข 4 ซึ่งเป็นส่วนของการปรับตั้งค่าการพิมพ์นั้น จะประกอบด้วย 4 แท็บ ได้แก่ PART XRAY SIM และ SCAN โดยผู้ใช้ทั่วไปที่ใช้งานเครื่องพิมพ์ Markforged สามารถเข้าถึงได้เพียงแท็บ PART และ XRAY เท่านั้น

การปรับตั้งค่าในแท็บ PART จะเป็นการปรับตั้งค่าโดยรวมของการพิมพ์ทั้งหมด โดยแบ่งเป็น 3 แท็บย่อย ได้แก่ General Settings และ Infill โดยในการปรับแท็บย่อย General คือ การเลือกประเภทของวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ การเลือกรุ่นเครื่องพิมพ์ที่ใช้ รวมถึงการปรับหมุนชิ้นงาน ส่วนในการปรับแท็บย่อย Settings คือการปรับเกี่ยวกับความสูงของชั้นที่พิมพ์ มาตรฐานชิ้นงาน และการปรับตั้งค่าต่าง ๆ ของการพิมพ์ซัพพอร์ต และสุดท้ายการปรับในแท็บย่อย Infill จะทำให้ผู้ใช้สามารถเลือกรูปแบบการพิมพ์โครงสร้างภายใน เฟอร์เซ็นต์ความหนาแน่นการเติม จำนวนชั้นรูป และฟลอร์ และจำนวนชั้นผนังของการพิมพ์ชิ้นงาน หน้าต่างการปรับค่าของแท็บย่อยทั้ง 4 แสดงดังรูปที่ 3.5

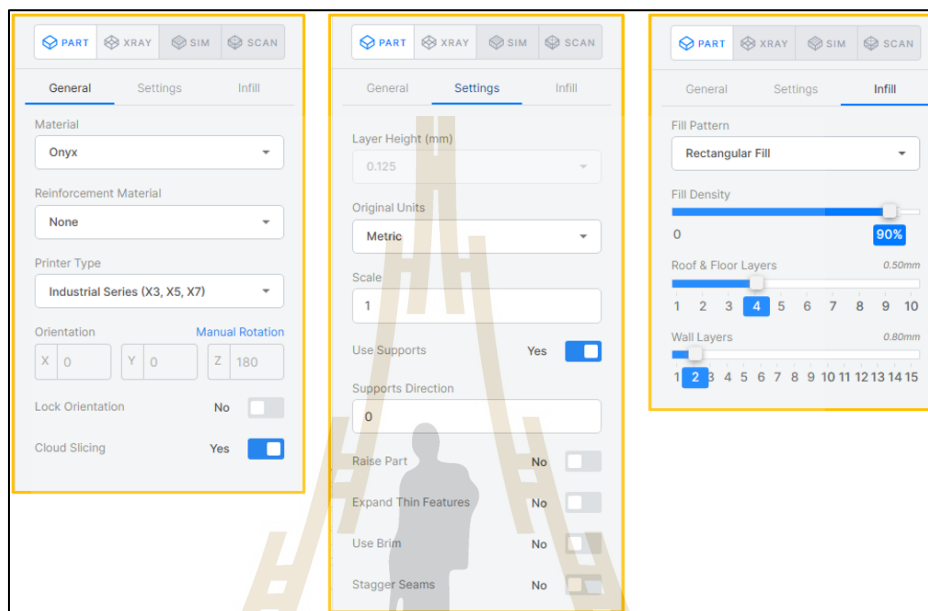
การปรับตั้งค่าในแท็บ XRAY จะทำให้หน้าต่างของโปรแกรมเปลี่ยนไป โดยจะมีการแสดงรายละเอียดของการพิมพ์เส้นใยที่ชัดเจน มีทางเลือกการแสดงผลเอเยอร์ต่าง ๆ ของการพิมพ์ และมีหน้าต่างในการปรับตั้งค่าการพิมพ์เส้นใยปรากฏขึ้นมา โดยแสดงดังรูปที่ 3.6 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

หมายเลข 5 คือส่วนที่สามารถกดเปิด-ปิดเลเยอร์ต่าง ๆ ที่แสดงการวางตัวของเส้นใย ช่วยให้เห็นรายละเอียดการพิมพ์ทั้งเมทริกซ์ และวัสดุเสริมแรง

หมายเลข 6 เป็นส่วนการปรับว่าจะพิมพ์วัสดุเสริมแรงในชั้นใดบ้าง โดยซ้ายสุดคือชั้นแรกของการพิมพ์ชิ้นงาน ไปจนถึงขวาสุดของชั้นสุดท้ายของการพิมพ์

หมายเลข 7 เป็น ส่วนของการปรับตั้งค่าเฉพาะในส่วนของเส้นใยวัสดุเสริมแรง โดยสามารถเลือกประเภทของการเติมเส้นใยเสริมแรง จำนวนวงแหวนไฟเบอร์ และองศาการวางตัวของเส้นใยได้จากการตั้งค่าในส่วนนี้

โดยในการดำเนินการวิจัยในตอนที 1 ได้ทำการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตด้วยตัวแปรการออกแบบจากตารางที่ 3.4 โดยทำการพิมพ์เข้าชิ้นงานละ 5 ชิ้น รวมจำนวนชิ้นงานที่พิมพ์ทั้งหมด คือ 45 ชิ้นงาน โดยส่งพิมพ์ชิ้นงานทดสอบทั้งหมดด้วยเครื่องพิมพ์ Markforged X7 แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.5 ภาพแสดงหน้าต่างของแท็บย่อยต่าง ๆ ของแท็บ PART



รูปที่ 3.6 ภาพแสดงหน้าต่างเมื่อเลือกการปรับตั้งค่าในแท็บ XRAY



รูปที่ 3.7 ภาพแสดงเครื่องพิมพ์วัสดุคอมโพสิตแบบสามมิติ Markforged รุ่น X7 (ซ้าย) และขณะเครื่องพิมพ์กำลังพิมพ์ชิ้นงานทดสอบ (ขวา)

3.4.3 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงดึงวัสดุคอมโพสิต

การดำเนินการทดสอบของวัสดุคอมโพสิตซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D3039 ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ เครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ Lloyd รุ่น LD 100 แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ภาพแสดงเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ Lloyd รุ่น LD 100 (ซ้าย) หน้าจอบอกระยะของปากกาจับชิ้นงานของเครื่องทดสอบ (กลาง) และการแตกหักของชิ้นงานทดสอบ (ขวา)

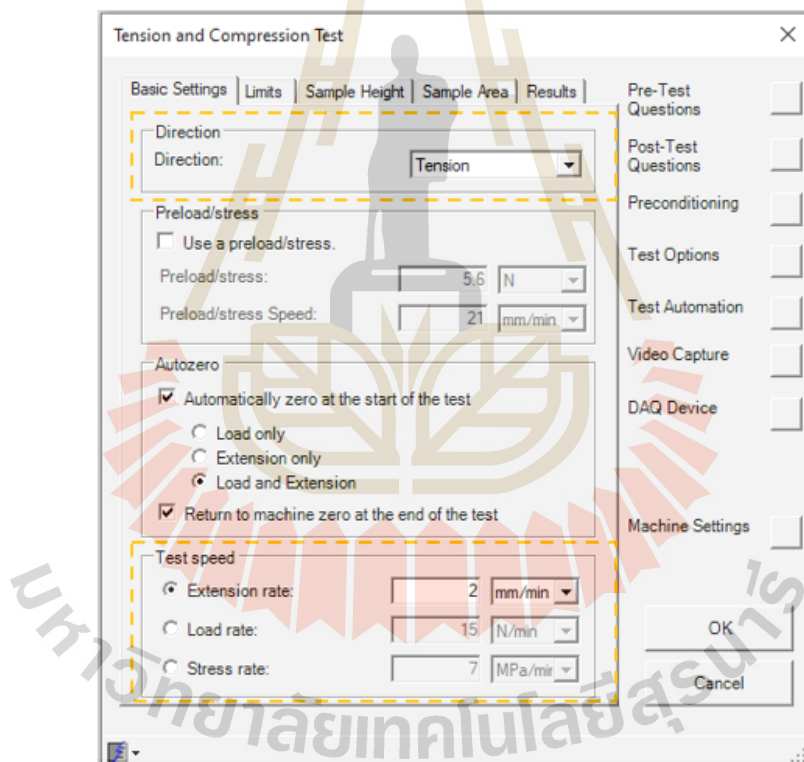
หมายเลข 1 ปากกาจับชิ้นงาน

หมายเลข 2 หน้าบอกระยะของปากกาจับชิ้นงาน

หมายเลข 3 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง

1) วัดขนาดความกว้างและความหนาของชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องมือเวอร์เนียร์ คาลิปเปอร์ และวัดระยะ grip length และ gauge length ของชิ้นงานพร้อมทั้งทำสัญลักษณ์เพื่ออ้างอิงบริเวณที่ชิ้นงานจะถูกจับ และบริเวณขอบเขตการแตกหักของชิ้นงานตามลำดับ

2) ป้อนค่าขนาดความกว้างและความหนาของชิ้นงาน เลือกทิศทางการทดสอบเป็นการดึง (Tension) และตั้งค่าอัตราเร็วในการดึงชิ้นงานทดสอบ (Extension rate) ที่ 2 มิลลิเมตรต่อนาทีลงในซอฟต์แวร์ NEXYGEN PLUS4 ซึ่งใช้ในการควบคุมเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ แสดงหน้าต่างซอฟต์แวร์ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 ภาพแสดงหน้าต่างการตั้งค่าซอฟต์แวร์ NEXYGEN PLUS4

3) ติดตั้งชิ้นงานทดสอบ โดยยึดจับด้วยปากกาจับชิ้นงานของเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ ทำการปรับระยะความสูงของปากกาจับชิ้นงานได้ที่ปุ่มบนหน้าจอบอกระยะของปากกาจับชิ้นงานของเครื่องทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.8 (กลาง)

4) กดปุ่มเริ่มการทดสอบที่ซอฟต์แวร์ NEXYGEN PLUS4 รอจนวัสดุแตกหัก จากนั้นเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์จะหยุดทำงานโดยอัตโนมัติ โดยให้สังเกตชิ้นงานทดสอบว่าเกิดการแตกหักในช่วงบริเวณ Gauge length หรือไม่ หากเกิดการแตกหักนอกบริเวณ Gauge length หรือมีการครูดที่ปากกาจับชิ้นงาน ให้นำการทดสอบครั้งนั้นเป็นโมฆะและต้องทำการทดสอบใหม่ แต่หากเกิดการแตกหักบริเวณ Gauge length อย่างสมบูรณ์ ให้บันทึกผลการทดสอบ โดยซอฟต์แวร์จะสามารถบันทึกผลของการทดสอบได้เป็นค่าภาระแรงที่ใช้ในการดึง (Load) และระยะการยืดของเครื่องมือทดสอบ (Machine extension) ซึ่งค่าผลการทดสอบทั้งสอง ร่วมกับการบันทึกค่าขนาดของชิ้นงาน จะทำให้สามารถหาค่าความเค้น และความเครียด ทั้งยังนำไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้

3.5 ผลของค่าความเค้นและความเครียดโดยสรุปจากการทดลอง

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบทั้ง 45 ชิ้นงาน ไปคำนวณหาค่าความเค้นและความเครียด จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของความเค้นและความเครียดจากชิ้นงานที่พิมพ์โดยมีรูปแบบตัวแปรการออกแบบเหมือนกัน แสดงผลดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงข้อมูลของตัวแปรต้นและตัวแปรตามซึ่งได้จากการทดลอง

ตัวแปรต้น (Input)		ตัวแปรตาม (Output)	
เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นการเติม	จำนวนวงแหวนไฟเบอร์ (วง)	ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (MPa)	ค่าโมดูลัสการยืดของวัสดุ (MPa)
50%	2	139.929	1078.346
70%	3	152.997	1162.567
90%	4	138.314	1157.555
50%	2	124.504	1182.441
70%	3	162.643	1221.677
90%	4	165.069	1261.666
50%	2	134.090	1474.774
70%	3	159.534	1291.233
90%	4	158.321	1180.168

3.6 การสร้างสมการจำลองข้อมูลการทดสอบ

การสร้างสมการจำลองทดแทนข้อมูล (Surrogate model) ในการจำลองข้อมูลการทดสอบ ในการดำเนินการวิจัยส่วนที่ 1 คือ การสร้างฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่ประกอบไปด้วยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น และตัวแปรตามของข้อมูลการทดลอง โดยฟังก์ชันความสัมพันธ์ดังกล่าวสร้างได้โดยวิธีคริกกิง (Kriging method) จากความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและตัวแปรตามของตารางที่ 3.5 ทำให้ได้ฟังก์ชันซึ่งสามารถทดแทนข้อมูลการทดลองโดยได้จากตัวแปรค่าเฉลี่ยของสมการคริกกิง สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบจากสมการที่ 3.1 และ 3.2 แสดงดังสมการที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

$$\sigma_u(x) = \mu(x) + r^T R^{-1} (F - \mu) \quad (3.4)$$

โดย $\sigma_u(x)$ คือ สมการจำลองทดแทนของสมการที่ 3.1

x คือ ค่าตัวแปรการออกแบบการปรับตั้งค่าการพิมพ์จากตารางที่ 3.1

$$E(x) = \mu(x) + r^T R^{-1} (F - \mu) \quad (3.5)$$

โดย $E(x)$ คือ สมการจำลองทดแทนของสมการที่ 3.2

x คือ ค่าตัวแปรการออกแบบการปรับตั้งค่าการพิมพ์จากตารางที่ 3.1

3.7 การหาค่าเหมาะสมสุดของฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์จากสมการจำลอง

การหาค่าเหมาะสมสุดของฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ในการดำเนินการวิจัยส่วนที่ 1 ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับไม่ครอบงำ (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) โดยกำหนดให้มีจำนวนประชากรเริ่มต้น (Initial population) ที่ 100 และมีจำนวนรุ่นของประชากร (Generation) ที่ 1000 โดยในการคัดเลือกประชากรเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของขั้นตอนวิธีนี้ จะใช้วิธีค้นหาแบบแข่งขัน (Tournament search) เพื่อหาตัวแปรการออกแบบที่ดีที่สุดกับแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์และจัดลำดับเสมือนการแข่งขัน จากนั้นเพื่อป้องกันการเกาะกลุ่มกันของข้อมูลจึงใช้ขั้นตอนวิธีการจัดลำดับจากระยะห่างจากการจับกลุ่มข้อมูล เพื่อคัดเลือกและจัดลำดับข้อมูล ซึ่งในแต่ละรุ่นของประชากรจะมีการไขว้เปลี่ยนของข้อมูล (Crossover) เพื่อให้ข้อมูลมีความหลากหลาย โดยมีอัตราการไขว้เปลี่ยนอยู่ที่ 0.9 นอกจากนี้ยังมีตั้งอัตราการกลายพันธุ์ (Mutation) ที่ 0.1 มาใช้ในการสร้างกลุ่มข้อมูลใหม่ที่จะไม่ซ้ำกับข้อมูลประชากรรุ่นก่อนหน้า

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัยส่วนที่ 1

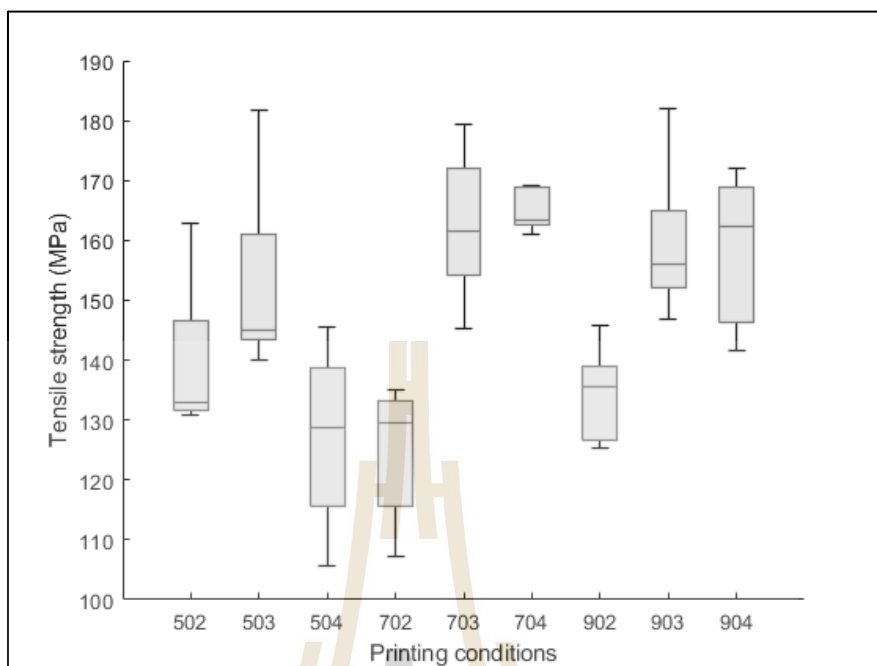
4.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต

ในการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต ได้ทำการทดสอบซ้ำ 5 ครั้งต่อการตั้งค่าตัวแปรออกแบบชิ้นงานทดสอบ 1 ครั้ง รวมแล้วมีการทดสอบทั้งหมด 45 ชิ้นงาน เมื่อนำผลจากการทดสอบไปหาค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และค่าโมดูลัสการยืดของวัสดุ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานทดสอบทุกชิ้น แสดงในภาคผนวก ก ดังรูปที่ ก.1-ก.9

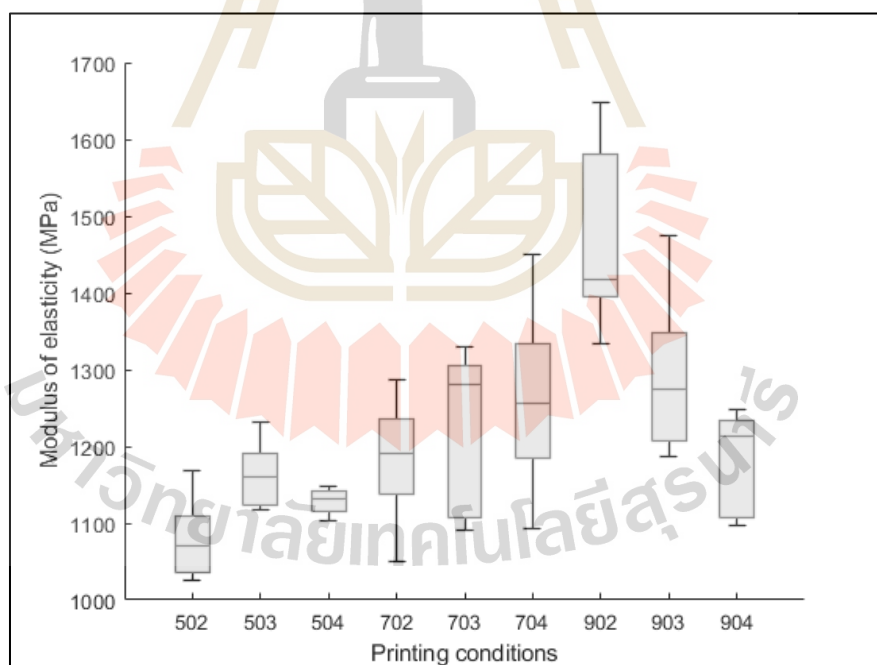
เมื่อนำผลการทดสอบของตัวแปรออกแบบไปหาค่าเฉลี่ยจากการทดสอบทั้ง 5 ครั้ง จะได้ผลสรุปความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม แสดงดังตารางที่ 4.1 และเมื่อนำค่าดังกล่าวมาพล็อตกราฟแท่งเทียนจะได้กราฟแสดงผลการหาความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

จากตารางที่ 4.1 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งบ่งบอกการกระจายของข้อมูล ซึ่งใช้ในการวัดความแม่นยำของการทดลองซ้ำ พบว่ามีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในทุก ๆ การทดลองที่น้อย บ่งชี้ว่าการทดลองซ้ำของผลการทดสอบให้ค่าที่ใกล้เคียงกันที่เงื่อนไขการทดสอบและหรือตัวแปรการออกแบบชิ้นงานการทดสอบเดียวกัน โดยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดและต่ำสุดของค่าความแข็งแรงดึงจากการทดสอบมีค่า 28.703 ของชิ้นงานหมายเลข 504 และมีค่า 3.682 ของชิ้นงานหมายเลข 704 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดและต่ำสุดของค่าโมดูลัสของความยืดอยู่ที่ 129.598 ของชิ้นงานหมายเลข 704 และมีค่า 45.654 ของชิ้นงานหมายเลข 503

กราฟแท่งเทียนจากรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ย (ขีดกลางแท่งเทียน) และค่าความคลาดเคลื่อน (เส้นที่ยึดออกจากแท่งเทียน) ของค่าความแข็งแรงดึงและค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุที่หาจากค่าที่ได้ของผลการทดสอบ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุโดยภาพรวมมีค่าสูงเมื่อชิ้นงานมีเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นการเติมที่สูงร่วมกับมีจำนวนวงแหวนไฟเบอร์ที่มากขึ้น แต่ที่ความหนาแน่นการเติมที่ 90 เปอร์เซ็นต์แสดงให้เห็นว่าจำนวนวงแหวนไฟเบอร์ที่มากกว่ากลับให้ค่าความแข็งแรงดึงที่น้อยลง เหตุจากจำนวนวงแหวนไฟเบอร์ที่มากเกินไปทำให้ความหนาแน่นของวัสดุที่เติมมีผลน้อยลง โดยค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดในการทดลองอยู่ในการกำหนดตัวแปรการออกแบบโดยที่เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นในการเติมที่ 70 เปอร์เซ็นต์ร่วมกับจำนวนวงแหวนไฟเบอร์ 4 วง ในขณะที่ค่าโมดูลัสของความยืดของวัสดุคอมโพสิตสูงที่สุดในการทดลอง อยู่ที่ความหนาแน่นในการเติมที่ 90 เปอร์เซ็นต์ร่วมกับจำนวนวงแหวนไฟเบอร์ 2 วง



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรออกแบบและค่าความแข็งแรงดึงจากการทดสอบ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรออกแบบและค่าโมดูลัสความยืดจากการทดสอบ

- เมื่อ ก. คือ เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นการเติม มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์
 ข. คือ จำนวนวงแหวนไฟเบอร์ มีหน่วยเป็น วง
 ค. คือ ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุ มีหน่วยเป็น MPa
 ง. คือ ค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุ มีหน่วยเป็น MPa

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม

หมายเลข ชิ้นงาน	ตัวแปรต้น			ตัวแปรตาม	
	ก.	ข.		ค.	ง.
502	50	2	ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ	139.929	1,078.346
			ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	13.423	56.373
503	50	3	ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ	152.997	1,162.567
			ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	16.823	45.654
504	50	4	ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ	138.314	1,157.555
			ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	28.703	66.131
702	70	2	ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ	124.504	1,182.441
			ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	11.597	86.018
703	70	3	ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ	162.643	1,221.677
			ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	12.911	111.545
704	70	4	ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ	165.069	1,261.666
			ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.682	129.598
902	90	2	ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ	134.090	1,474.774
			ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	8.270	125.993
903	90	3	ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ	159.534	1,291.233
			ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	13.375	113.017
904	90	4	ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ	158.321	1,180.168
			ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	13.072	70.363

เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบดังตารางที่ 4.1 มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance :ANOVA) ที่ระดับความมีนัยสำคัญ 0.05 ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งพบว่าจากตารางที่ 4.2 ค่า P-Value จากตัวแปรเปอร์เซ็นต์การเติมซึ่งมีค่า 0.437 มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ เช่นเดียวกับค่าจากตารางที่ 4.3 ซึ่ง P-Value ของจำนวนวงแหวนไฟเบอร์มีค่า 0.426 แต่เมื่อวิเคราะห์ค่าอิทธิพลรวม P-Value จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 จะมีค่า 0.026 และ 0 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นทั้งสอง (เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นการเติมและจำนวนวงแหวนไฟเบอร์)

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด

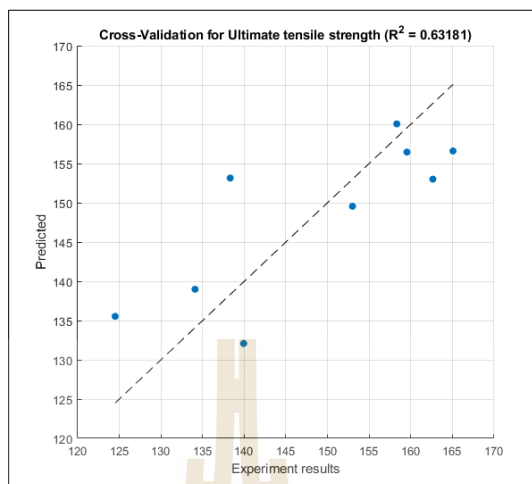
Source	Df	Adj Ss	Adj Ms	F-Value	P-Value
Model	8	8,562.4	1,070.3	4.94	0
Linear	4	5,856.4	1,464.1	6.76	0
Density	2	366.7	183.3	0.85	0.437
Cfr	2	5,489.8	2,744.9	12.67	0
2-Way Interactions	4	2,706	676.5	3.12	0.026
Density*CFR	4	2,706	676.5	3.12	0.026
Error	36	7,800.1	216.7		
Total	44	16,362.5			

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าโมดูลัสการยืดของวัสดุ

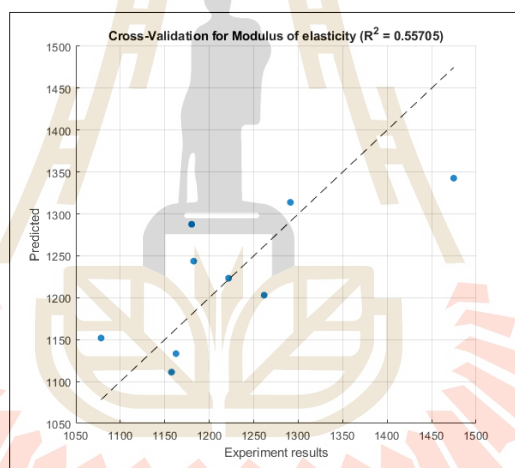
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	509,404	63,676	7.18	0
Linear	4	265,557	66,389	7.48	0
Density	2	250,034	125,017	14.09	0
CFR	2	15,523	7,762	0.87	0.426
2-Way Interactions	4	243,847	60,962	6.87	0
Density*CFR	4	243,847	60,962	6.87	0
Error	36	319,482	8,875		
Total	44	828,887			

4.2 ความน่าเชื่อถือของการสร้างสมการจำลองทดแทน

ฟังก์ชันของสมการจำลองทดแทนข้อมูลผลการทดลอง สามารถตรวจสอบความน่าเชื่อถือได้ โดยวิธีการตรวจสอบแบบไขว้ (Cross validation) โดยการนำผลที่ได้จากการทดลองออกบางส่วน แล้วให้ฟังก์ชันทำการทำนายผลเพื่อวัดผลความแม่นยำ โดยในรูปที่ 4.5 และ 4.6 จะเป็นการตรวจสอบแบบไขว้เมื่อเทียบผลการทำนายจากสมการจำลองทดแทนซึ่งสร้างจากวิธีครีกกิงกับผลการทดสอบความแข็งแรงดึงซึ่งเป็นตัวแปรตาม โดยพบว่าค่า R^2 ของการตรวจสอบเมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และเมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุอยู่ที่ 0.63181 และ 0.55705 ตามลำดับ

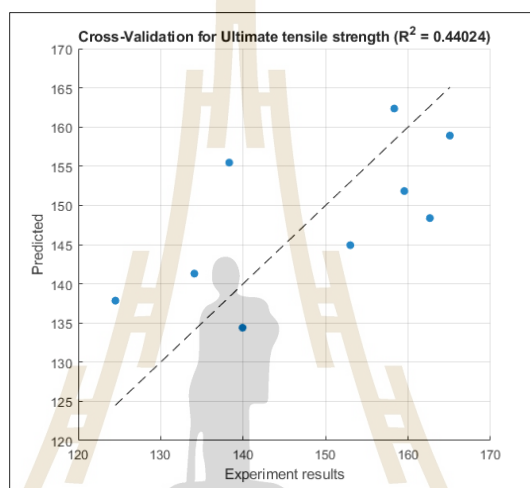


รูปที่ 4.3 ภาพแสดงการตรวจสอบไข้วสมการจำลองคริกกิ้งกับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดจากผลการทดลอง

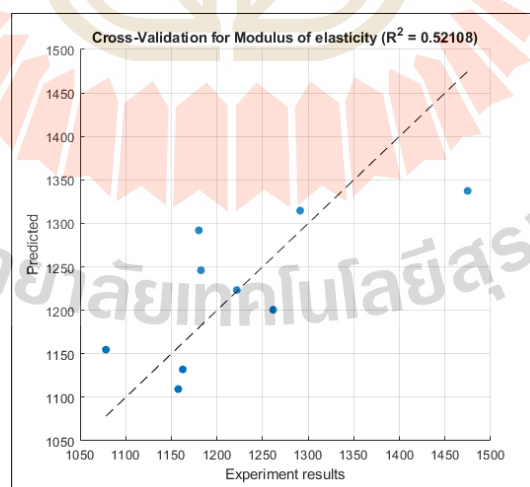


รูปที่ 4.4 ภาพแสดงการตรวจสอบไข้วสมการจำลองคริกกิ้งกับค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุ

จากนั้นจึงทำการตรวจสอบแบบไขว้กับสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) เพื่อเทียบผลการทำนาย โดยเปรียบเทียบจากเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพความแม่นยำต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 และเมื่อนำผลการทำนายด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นมาเทียบกับผลการทดลองจริงเพื่อหาค่ากำลังสอง แสดงดังรูปที่ 2.6 พบว่าค่า R^2 ของการตรวจสอบเมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และเมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุอยู่ที่ 0.44024 และ 0.52108 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ได้จากวิธีคริกกิ้ง



รูปที่ 4.5 ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองการถดถอยเชิงเส้นกับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด



รูปที่ 4.6 ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองการถดถอยเชิงเส้นกับค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุ

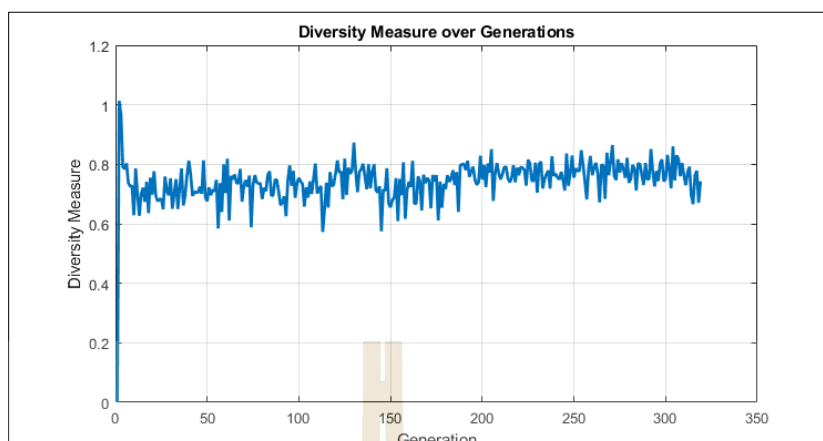
ค่าจากตารางที่ 4.4 แสดงถึงค่าจากการเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพความแม่นยำต่าง ๆ ของสมการจำลองที่ใช้ในการวิจัยส่วนที่ 1 โดยประกอบด้วยเกณฑ์ ได้แก่ เกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE) เกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Mean Square Error: MSE) และ เกณฑ์ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error: MAE) โดยในการทำนายทั้งค่าแรงดึงสูงสุดและโมดูลัสความยืดของวัสดุด้วยสมการจำลองคริกกิ้งมีประสิทธิภาพมากกว่าสมการจำลองการถดถอยเชิงเส้น ในทุกเกณฑ์การประเมิน โดยพบว่าทุกเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพของการทำนายด้วยสมการจำลองคริกกิ้งจากตารางที่ 4.4 มีค่าน้อยกว่าค่าจากการทำนายด้วยสมการจำลองการถดถอยเชิงเส้น

ตารางที่ 4.4 ค่าจากการเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพความแม่นยำต่าง ๆ ของสมการจำลอง ส่วนที่ 1

เกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพ	สมการจำลองคริกกิ้ง	สมการจำลองการถดถอยเชิงเส้น
RMSE for Ultimate tensile strength	8.2742	10.2022
RMSE for Modulus of elasticity	70.8111	73.6305
MSE for Ultimate tensile strength	68.4628	104.0845
MSE for Modulus of elasticity	5,014.2158	5,421.4523
MAE for Ultimate tensile strength	7.2182	9.2741
MAE for Modulus of elasticity	59.2023	61.5595

4.3 การรู้เข้าของคำตอบจากการหาค่าเหมาะสมที่สุด

รูปที่ 4.7 แสดงถึงการรู้เข้าของค่าความหลากหลายของคำตอบในแต่ละรุ่นของประชากรที่ได้จากการหาคำตอบด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด พบว่าในช่วงรุ่น 0 ถึง 50 จะมีความหลากหลายคำตอบที่สูงมาก (0 ถึง 1) และจากนั้นจึงเริ่มรู้เข้าและความหลากหลายในการทำนายคำตอบจึงอยู่ในช่วง 0.6 – 0.8 ของค่าการวัดความหลากหลาย และจึงสรุปได้ว่าค่าจากคำตอบของจำนวนรุ่นประชากรที่ 100 เป็นต้นไปมีความหลากหลายที่น้อยกว่าช่วงแรก และสามารถนำคำตอบมาใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ เนื่องจากการทำนายด้วยจำนวนรุ่นประชากรที่ 100 เป็นต้นไป ไม่แสดงถึงความหลากหลายของคำตอบ



รูปที่ 4.7 การลู่เข้าของค่าวัดความหลากหลายคำตอบในแต่ละรุ่นประชากรการวิจัยส่วนที่ 1

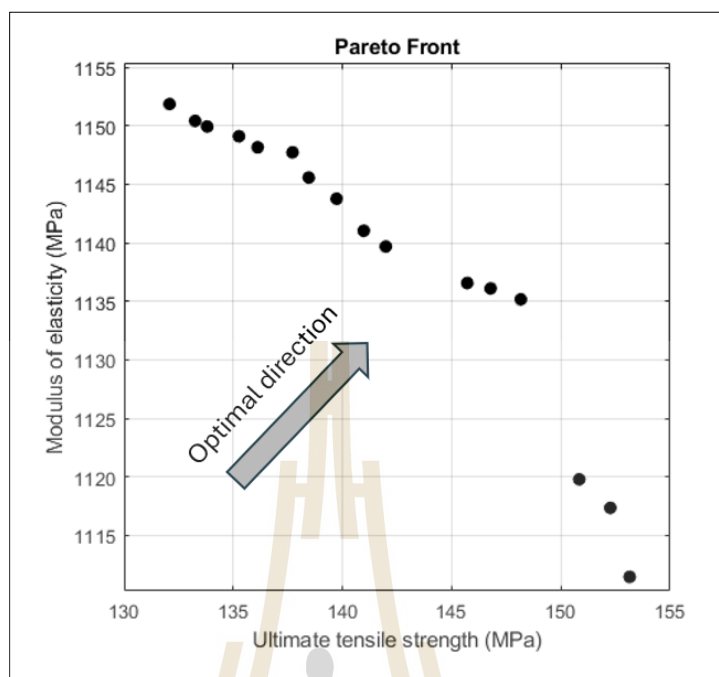
4.4 ผลของการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการพิมพ์ชิ้นงานคอมโพสิตแบบสามมิติ

ผลของการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมการจัดลำดับที่ไม่ครอบงำ แสดงดังรูปที่ 4.8 พร้อมทั้งขอบหน้าพาเรโต โดยทิศทางของคำตอบที่ดีที่สุดที่ถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือทิศทางที่ผลคำตอบมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและค่าโมดูลัสการยืดของวัสดุสูงที่สุด

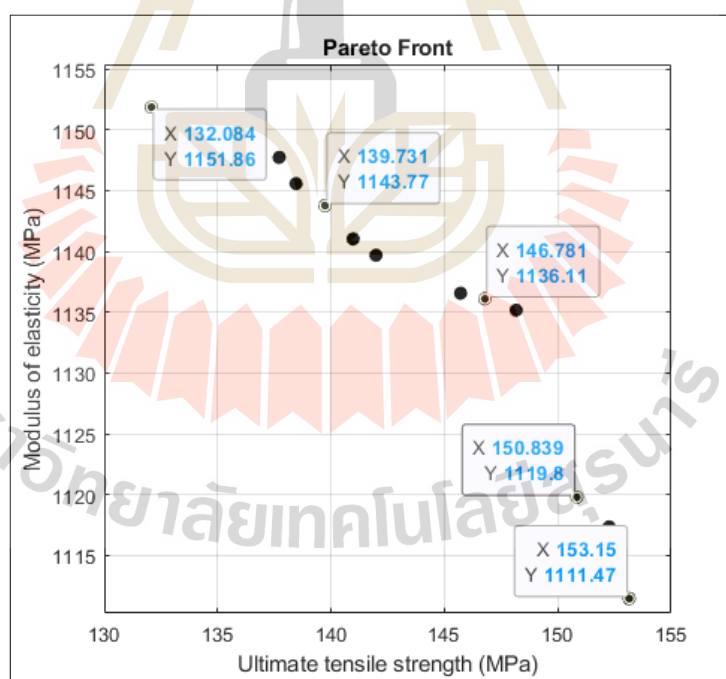
ค่าจากตารางที่ 4.5 คือการแสดงตัวอย่างของผลการทำนายและข้อมูลนำเข้าจากรูป 4.9 แสดงให้เห็นแนวโน้มของผลคำตอบทั้งหมด และตัวแปรการออกแบบการปรับตั้งค่าการพิมพ์ โดยแสดงให้เห็นว่าจากผลคำตอบวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุดมากที่สุดจะมีจำนวนวงแหวนไฟเบอร์ที่ 3 ถึง 4 วงแหวน และผลคำตอบของค่าโมดูลัสการยืดของวัสดุจากกลุ่มตัวอย่างจากขอบหน้าพาเรโตมีค่าใกล้เคียงกัน และค่าเปอร์เซ็นต์การเติมจากกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดอยู่ที่ 50 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลนำเข้าและขาออกของกลุ่มตัวอย่างจากขอบหน้าพาเรโต ในการวิจัยส่วนที่ 1

ค่าความแข็งแรงดึง สูงสุด	ค่าโมดูลัสความยืด ของวัสดุ	เปอร์เซ็นต์การเติม	จำนวนวงแหวน ไฟเบอร์
132.084	1,151.860	50	2
139.731	1,143.770	50	3
146.781	1,136.110	50	3
150.839	1,119.800	50	3
153.150	1,111.470	50	4



รูปที่ 4.8 ภาพแสดงผลคำตอบจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดและขอบหน้าพาเรโต



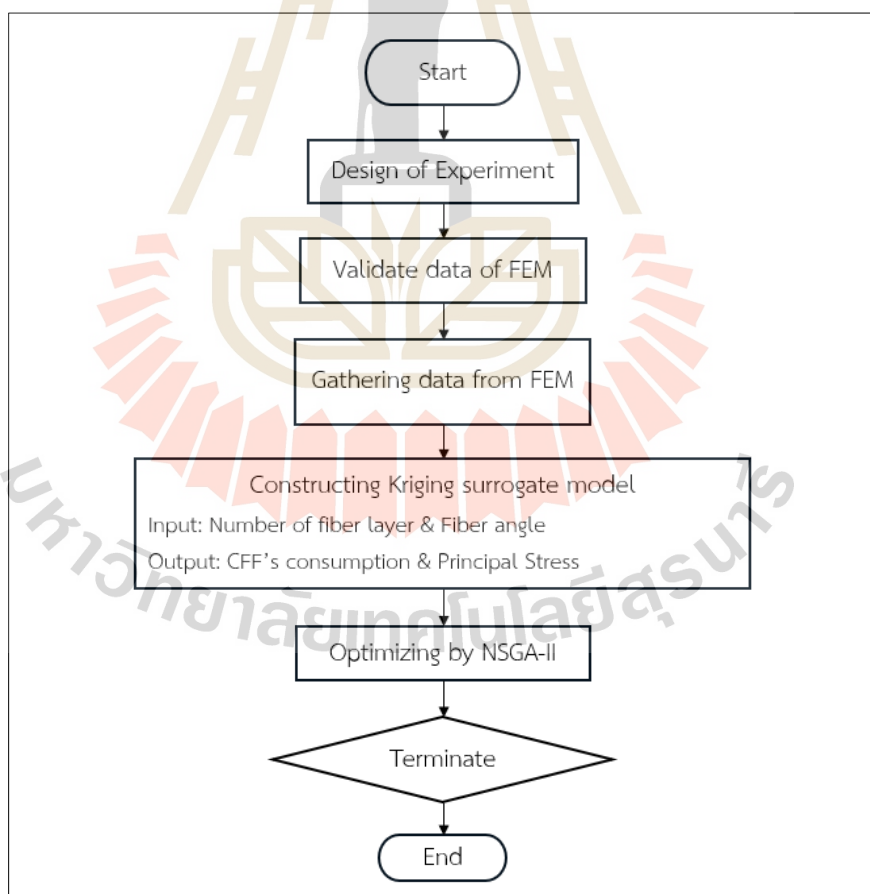
รูปที่ 4.9 ภาพแสดงผลข้อมูล خروجของตัวอย่างจากขอบหน้าพาเรโตจากการหาค่าเหมาะสมที่สุด

บทที่ 5

การดำเนินการวิจัยส่วนที่ 2

การดำเนินการวิจัยในส่วนที่ 2 จะทำการนำผลที่ได้จากการทดสอบของการดำเนินวิจัยส่วนที่ 1 มาใช้ในการวิเคราะห์ และใช้เป็นผลในการเทียบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ หลังจากตรวจสอบความถูกต้องของการทดสอบความแข็งแรงดึงด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จะใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในการทดสอบและออกแบบการพิมพ์ชิ้นส่วนกล่องด้านแรงบิด และทำการพิมพ์กล่องด้านแรงบิดที่ได้จากการหาค่าเหมาะสมที่สุดไปใช้งานจริงกับแท่นทดสอบแรงขับ

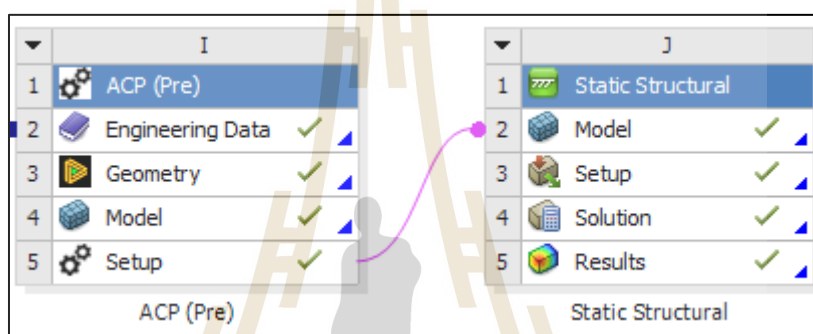
5.1 กรอบแนวคิดของการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 5.1 กรอบแนวคิดของการดำเนินการวิจัยในส่วนที่ 2

5.2 การเปรียบเทียบการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

โดยในลำดับแรกของการดำเนินการทดลองในส่วนที่ 2 คือการทดสอบวัดผลจากการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองจากการดำเนินการในส่วนที่ 1 เพื่อเทียบผลการตั้งค่าคุณสมบัติของการพิมพ์ จำนวนชั้นของการพิมพ์เส้นใย การวางองศาของวัสดุคอมโพสิตด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ว่ามีการตั้งค่าแม่นยำตรงเมื่อเทียบกับผลการทดลองหรือไม่ 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 ค่าคุณสมบัติของวัสดุโณนิคซ์

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
	Property	Value
		Unit
1		
2	Material Field Variables	Table
3	Density	1.2
4	Isotropic Elasticity	
5	Derive from	Young's Modulus and...
6	Young's Modulus	1.4
7	Poisson's Ratio	0.3
8	Bulk Modulus	1.1667E+09
9	Shear Modulus	5.3846E+08
10	Tensile Yield Strength	40
11	Tensile Ultimate Strength	37

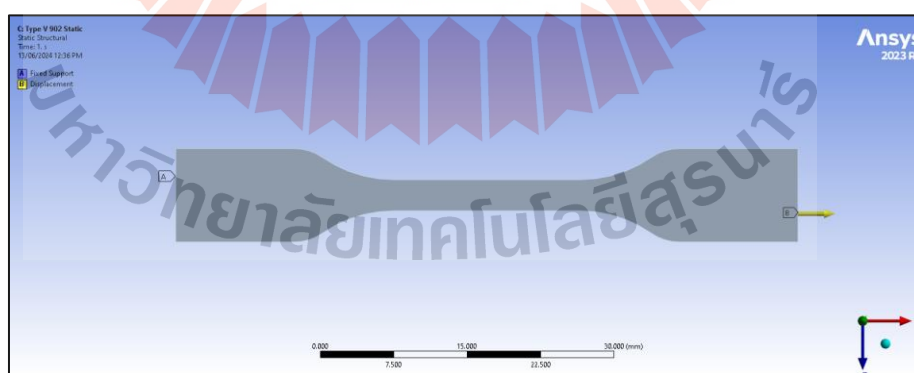
รูปที่ 5.3 การกำหนดค่าของวัสดุโณนิคซ์ในซอฟต์แวร์แอนซิส

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



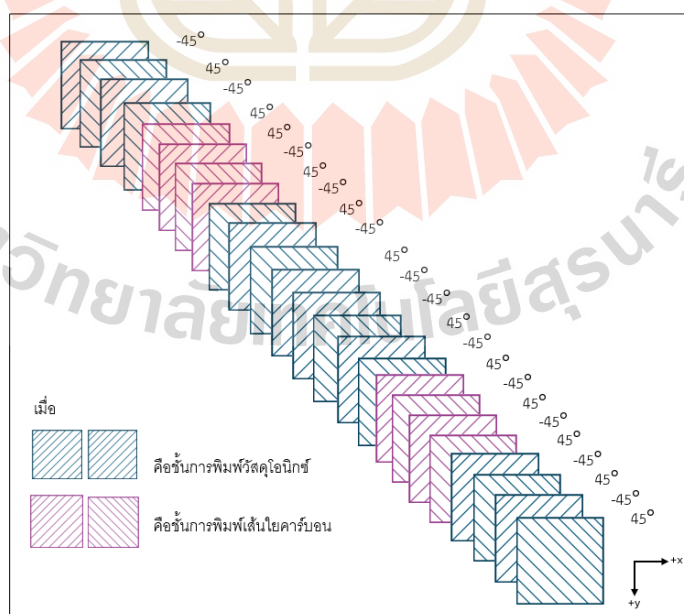
รูปที่ 5.5 การตั้งเงื่อนไขขอบเขตการทดลองเทียบค่า

5.2.3 การกำหนดค่าการวางตัวของวัสดุคอมโพสิต

การทดสอบเทียบจะทำการเทียบกับชิ้นงาน ASTM D638 Type V มีผลจากวงแหวนไฟเบอร์น้อยที่สุดเพื่อให้ได้การทดสอบที่แม่นยำตรงที่สุด โดยทำการเลียนแบบการกำหนดค่าในการพิมพ์ ได้แก่ จำนวนชั้นในการพิมพ์ วัสดุในการพิมพ์แต่ละชั้น และองศาการวางตัวของเส้นใย มาใช้ในการตั้งค่าในการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ลักษณะการตั้งค่าจากการทดลองในส่วนที่ 1 แสดงดังรูปที่ 5.6

ในการกำหนดการตั้งค่าการวางในแต่ละชั้นของวัสดุคอมโพสิต มีรายละเอียดการปรับตั้งค่าในส่วนของ Setup ซึ่งได้แบ่งย่อยส่วนสำคัญได้เป็น Materials Fabrics Stackups และ OrientedSelection โดยมีรายละเอียดการปรับตั้งค่าดังนี้

- 1) Materials คือ การเลือกวัสดุสำหรับการวางตัวของชิ้นงานคอมโพสิต ซึ่งวัสดุดังกล่าวได้นำเข้าค่าคุณสมบัติมาใช้ในการทดสอบ ดึงค่ามาจาก Engineering Data
- 2) Fabrics คือ การเลือกประเภทของวัสดุที่จะนำมาขึ้นรูป และการกำหนดความหนาของวัสดุในหนึ่งชั้น และพื้นที่ แสดงการตั้งค่าดังรูปที่ 5.7
- 3) Stackups คือ การนำ Fabrics มาจัดเรียงทีละชั้น โดยสามารถกำหนดจำนวนชั้นทั้งหมด การวางองศาได้จากส่วนนี้ แสดงตัวอย่างการตั้งค่าดังรูปที่ 5.8 และส่วนนี้ยังสามารถแสดงแผนภาพคุณสมบัติพิกัดเชิงมุมได้ด้วย
- 4) OrientedSelection คือ การกำหนดแกนและมุมเริ่มต้นของการวางเส้นใย

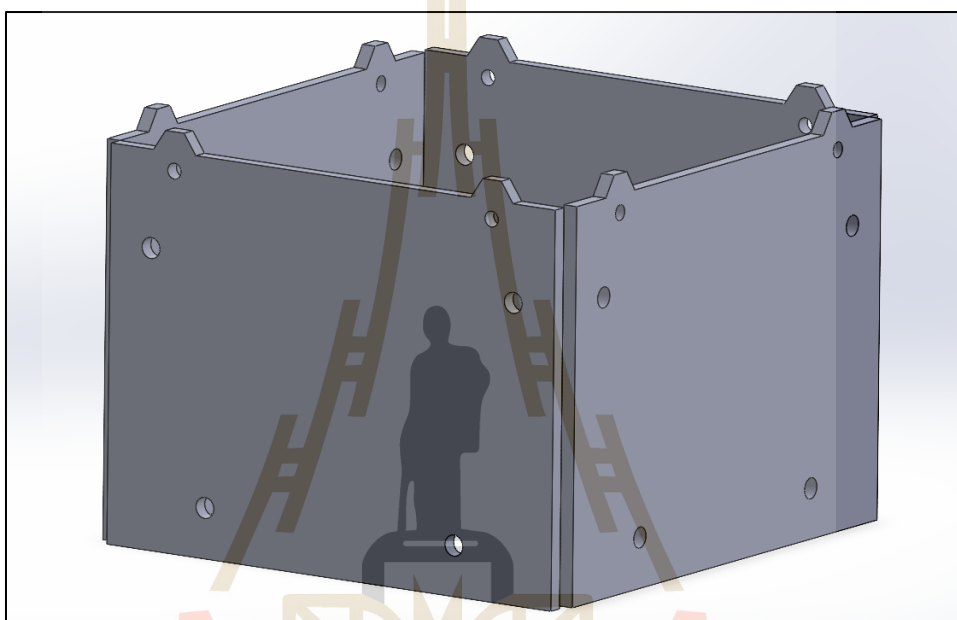


รูปที่ 5.6 การตั้งค่าการพิมพ์ของชิ้นงานเทียบค่า

5.3 การทดสอบกล่องต้านแรงบิดด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

5.3.1 การออกแบบชิ้นงานกล่องต้านแรงบิด

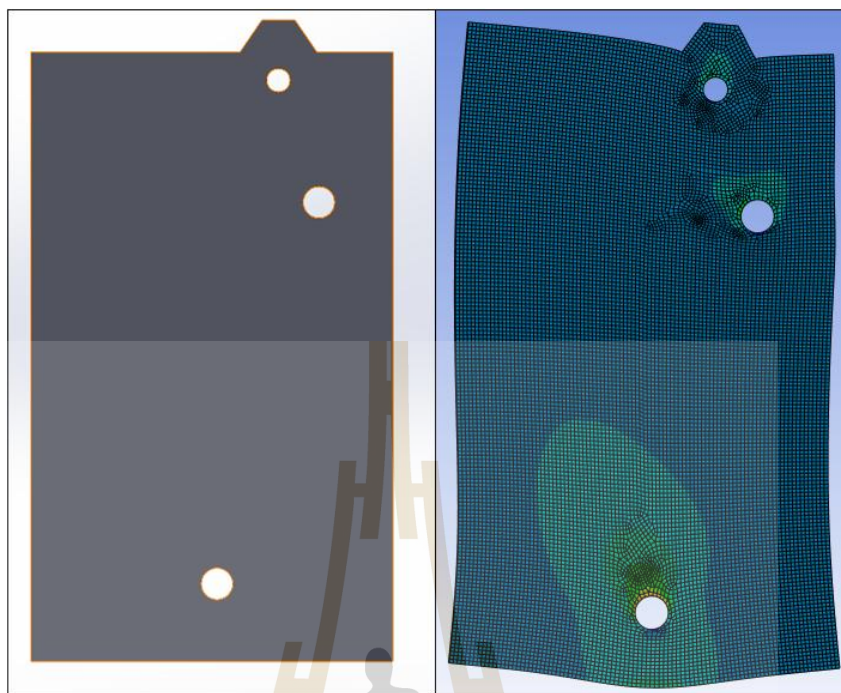
กล่องต้านแรงบิดซึ่งใช้ในแทนทดสอบแรงขับของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช มีลักษณะการออกแบบเบื้องต้นเป็นการประกอบของแผ่นคอมโพสิต 4 แผ่น แสดงดังรูปที่ 5.11



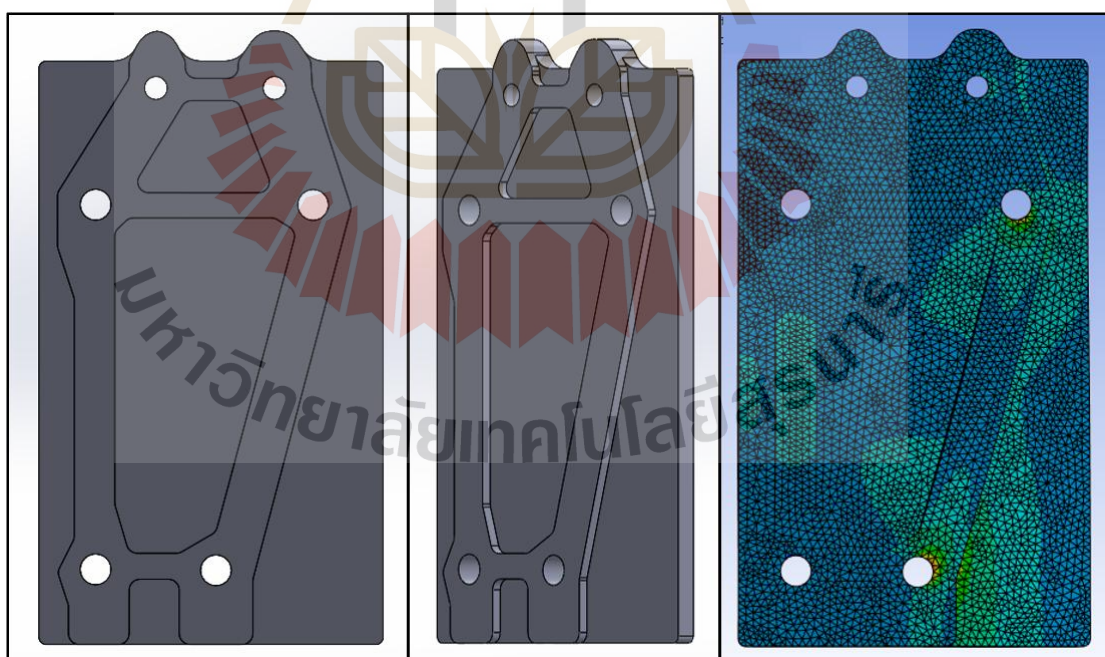
รูปที่ 5.9 ชิ้นงานต้นแบบของกล่องต้านแรงบิด

เนื่องจากในการศึกษาครั้งนี้มีการออกแบบการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติ ซึ่งใช้ระยะเวลาในการพิมพ์ และมีโอกาสจะเกิดความไม่เสถียรของอุณหภูมิในช่วงที่ทำการพิมพ์ชิ้นงาน ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบเพียงครึ่งหนึ่งของแผ่นคอมโพสิตเพื่อลดระยะเวลาที่ใช้ในการพิมพ์ จากนั้นจึงได้ทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เบื้องต้น เพื่อตรวจสอบบริเวณที่จะเกิดความเค้นสูงสุด แสดงดังรูปที่ 5.12

จากการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เบื้องต้น ทำให้มีในการออกแบบครั้งที่ 2 ได้กำหนดให้มีส่วนยื่นขึ้นมาจากผิวหน้าของชิ้นงาน เพื่อช่วยกระจายพื้นที่บริเวณที่จะเกิดความเค้นสูงสุด และสุดท้ายจึงได้ทำการลดความคมของชิ้นงานตามบริเวณขอบต่าง ๆ เพื่อลดการสะสมของความเค้นที่บริเวณขอบของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 5.13



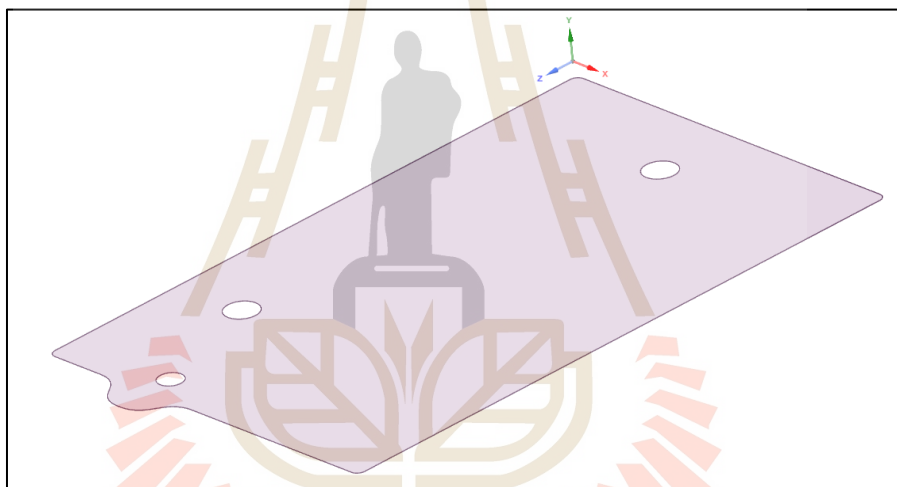
รูปที่ 5.10 การขึ้นรูปชิ้นงานครั้งที่ 1 และการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อตรวจสอบบริเวณการเกิดความเค้นสูงสุดครั้งที่ 1



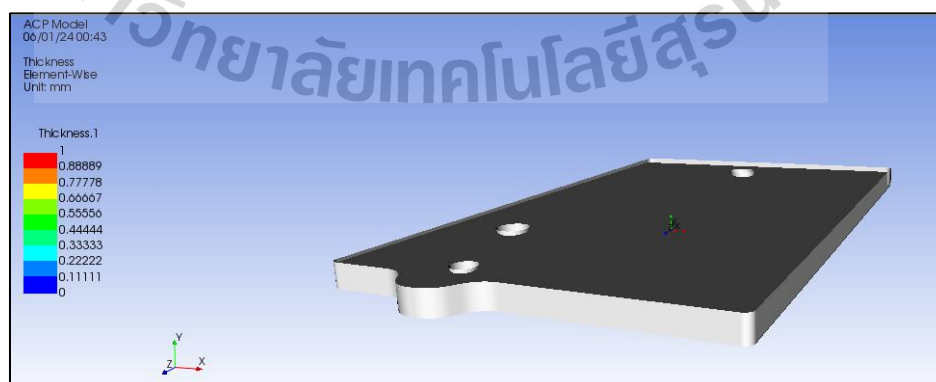
รูปที่ 5.11 การขึ้นรูปชิ้นงานครั้งที่ 2 และการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อตรวจสอบบริเวณการเกิดความเค้นสูงสุดครั้งที่ 2 และจำนวนอีลิเมนต์ 117,679 อีลิเมนต์

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 การกำหนดตัวแปรออกแบบ เงื่อนไข และฟังก์ชันวัตถุประสงค์

5.4.1 การกำหนดตัวแปรออกแบบ

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

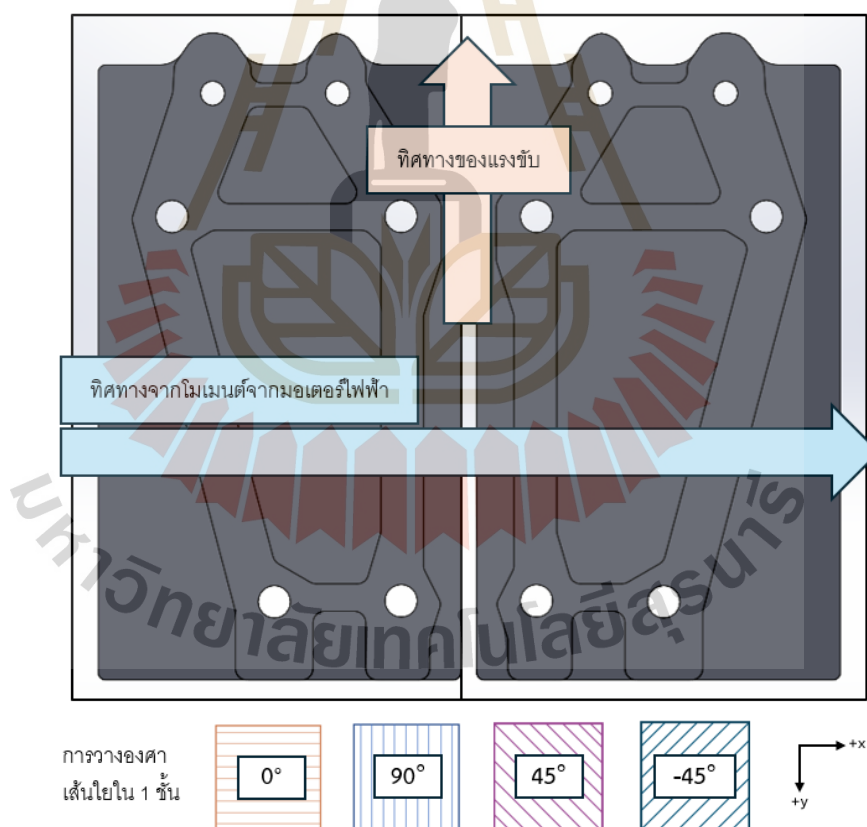
5.4.2 เงื่อนไขสำหรับการออกแบบการตั้งค่าวัสดุคอมโพสิต

ตอนที่ 2 จะออกแบบการตั้งค่าวัสดุคอมโพสิตภายในโมดูลซอฟต์แวร์ ANSYS ACP เพื่อใช้ในการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยรูปทรงของชิ้นงานจะถูกกำหนดด้วยพื้นผิวซึ่งสร้างจากโมดูล ANSYS SpaceClaim และมีความหนาเท่ากับความหนาของวัสดุ 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°



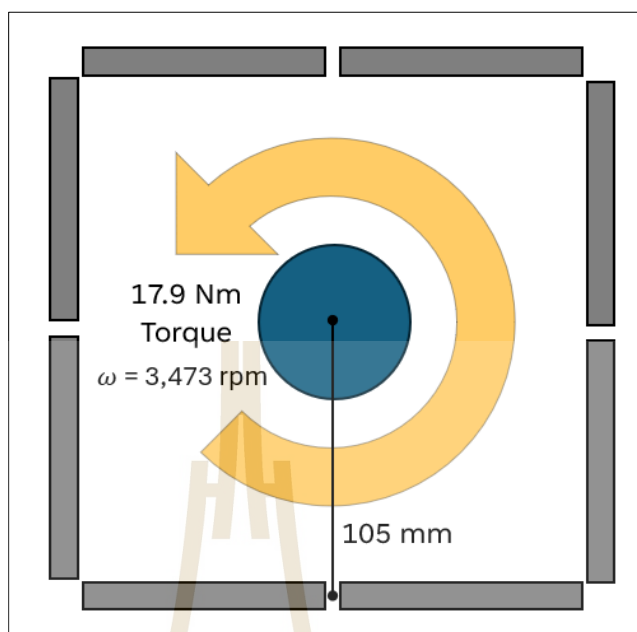
รูปที่ 5.14 ภาพแสดงการวางองศาเส้นใยเทียบกับแนวแรงของกล่องด้านแรงบิด

5.4.3 การกำหนดค่าการทดสอบแท่นทดสอบแรงขับด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

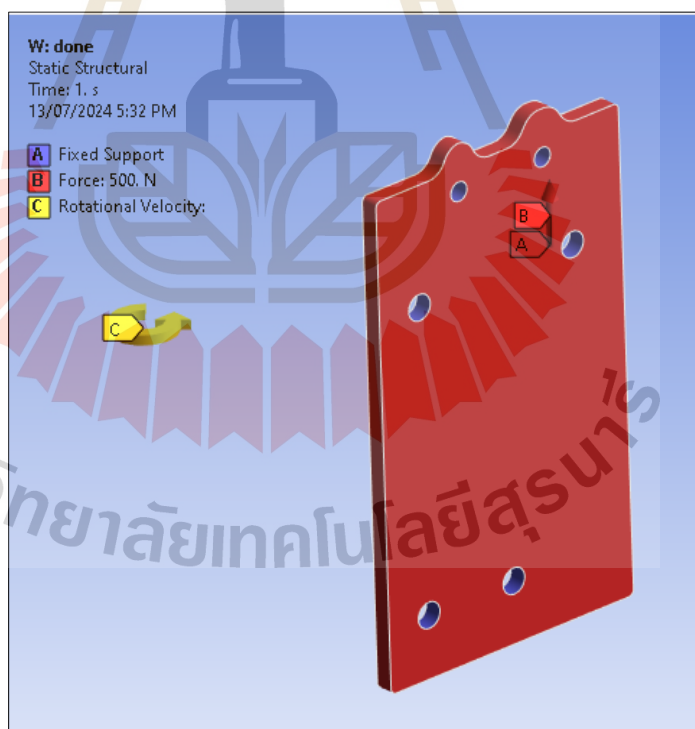
มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในแท่นทดสอบแรงขับ ได้แก่มอเตอร์ไฟฟ้ารุ่น U15 II Power Type UAV Motor KV100 ซึ่งมีที่การจ่ายกำลังไฟสูงสุดสามารถสร้างขนาดแรงดูดได้สูงสุดที่ 35.5 กิโลกรัม (348.255 นิวตัน) และมีค่าแรงบิดเนื่องจากการหมุนของมอเตอร์นี้ที่ 17.9 นิวตัน-เมตร และมีระยะห่างจากแผ่นทดสอบ 105 มิลลิเมตร และ Load cell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

ตารางที่ 5.5 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตในการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

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



รูปที่ 5.15 การคำนวณแรงกระทำต่อแผ่นต้านแรงบิดที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์



รูปที่ 5.16 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

5.4.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของขั้นตอนทดสอบ

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

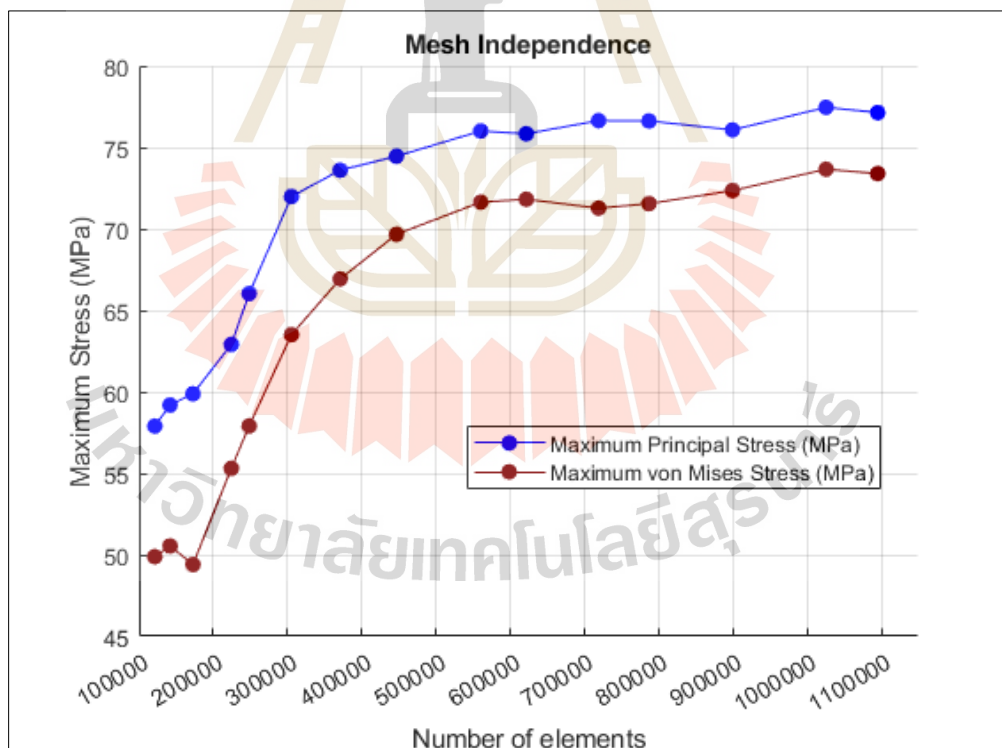
การออกแบบตัวแปรการเก็บข้อมูลของการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ใช้วิธีแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยออกแบบจำนวน 25 ตัวแปร โดยไม่มีการทดลองซ้ำ โดยผลจากการแปลงค่าขอบเขตและระดับตัวแปรจากตารางที่ 5.3 จะแสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ชื่อชิ้นงานแผ่นต้านแรงบิดในการทดสอบ และการปรับค่าวัสดุคอมโพสิตในซอฟต์แวร์

ชื่อชิ้นงาน	จำนวนชั้นที่มีวัสดุเสริมแรง (ชั้น)	การวางองศาของเส้นใยวัสดุเสริมแรง (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

ในการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นจะต้องมีการหาขนาดของอีลิเมนต์ที่เหมาะสมโดยจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณ 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 และสุดท้ายได้เลือกใช้การตั้งค่าเมชให้เกิดจำนวนอีลิเมนต์ที่ 719,136 อีลิเมนต์ 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

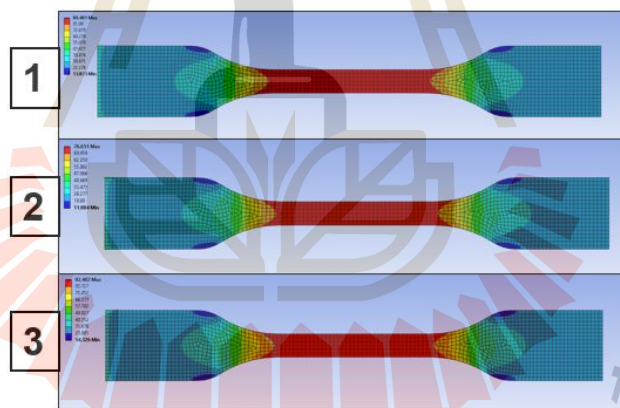
ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ได้กำหนดให้มีจำนวนประชากรเริ่มต้นที่ 50 และไม่กำหนดจำนวนรุ่นของประชากร (Generation) โดยในการคัดเลือกประชากรเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของขั้นตอนวิธีนี้ ซึ่งในแต่ละรุ่นของประชากรจะมีการไขว้เปลี่ยนของข้อมูล (Crossover) เพื่อให้ข้อมูลมีความหลากหลาย โดยมีอัตราการไขว้เปลี่ยนอยู่ที่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

บทที่ 6

ผลการดำเนินการวิจัย ส่วนที่ 2

6.1 การยืนยันผลวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จากการเทียบค่าผลการทดลอง

เนื่องจากมีความแตกต่างจากการจับยึดชิ้นงานจริง คือไม่มีการใช้ปากกาจับชิ้นงานในการจับยึดวัสดุทดสอบ ทำให้ไม่มีแรงกระทำบริเวณ Grip length ของการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ แสดงการจับยึดชิ้นงาน และการให้ภาระแรงกระทำดังรูปที่ 5.5 เมื่อพิจารณาการแสดงผลความเค้นหลักสูงสุด จะพบว่ามีการกระจายการเสียหายใกล้เคียงกับการทดสอบจริงแสดงดังรูปที่ 6.1 และมีค่าผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 6.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้ยืนยันผลได้ว่าการตั้งค่าคุณสมบัติ การตั้งค่าการวิเคราะห์ด้วย ANSYS ACP สามารถใช้ทดแทนการทดสอบจริงได้



รูปที่ 6.1 ภาพแสดงผลความเค้นจากการทดสอบเทียบค่าเพื่อยืนยันผลทั้ง 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ 6.1 แสดงการเทียบค่ายืนยันผลการทดสอบจากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

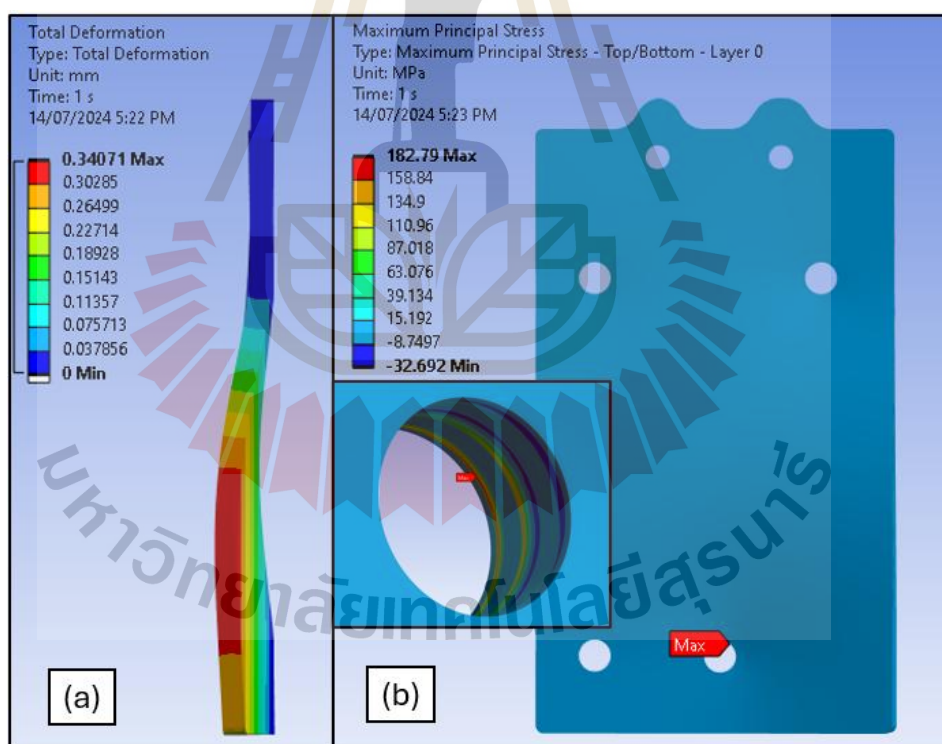
ชิ้นงาน	ค่าจากการทดลองจริง (MPa)	ค่าจากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (MPa)	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	82.509	89.481	8.450
2	81.198	76.651	5.599
3	85.401	92.402	8.198

6.2 ผลการทดสอบแผ่นต้านแรงบิดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

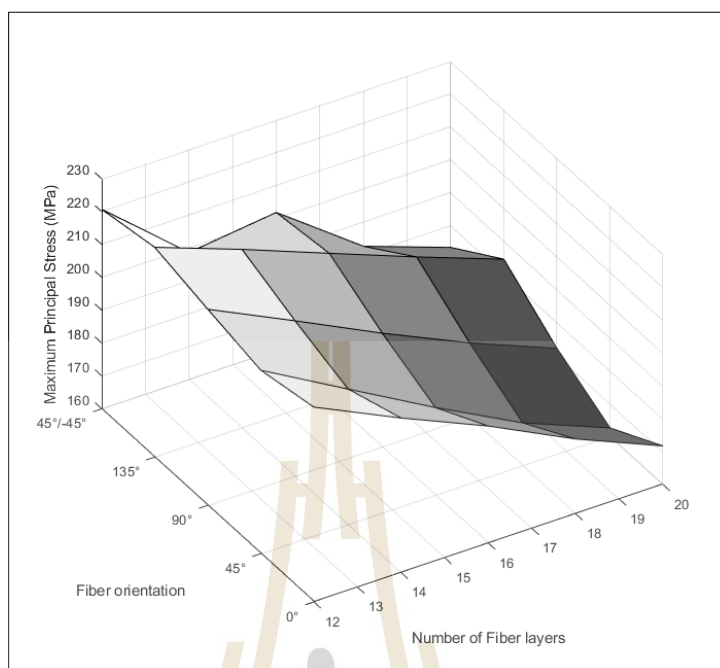
6.2.1 ผลการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในขั้นตอนการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้ทำการทดลองจำนวน 25 ครั้ง ตามการออกแบบตัวแปรการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป โดยรูปที่ 6.2 แสดงตัวอย่างผลจากการทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีลักษณะการเสียรูปเป็นการโก่งตัวตามทฤษฎีจากแรงสู่ศูนย์กลางเนื่องจากการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 6.2 (a) และเกิดความเค้นหลักสูงสุดที่บริเวณจุดยึดของแผ่นต้านแรงบิด ณ ชั้นของเส้นใยคาร์บอนแสดงดังรูปที่ 6.2 (b)

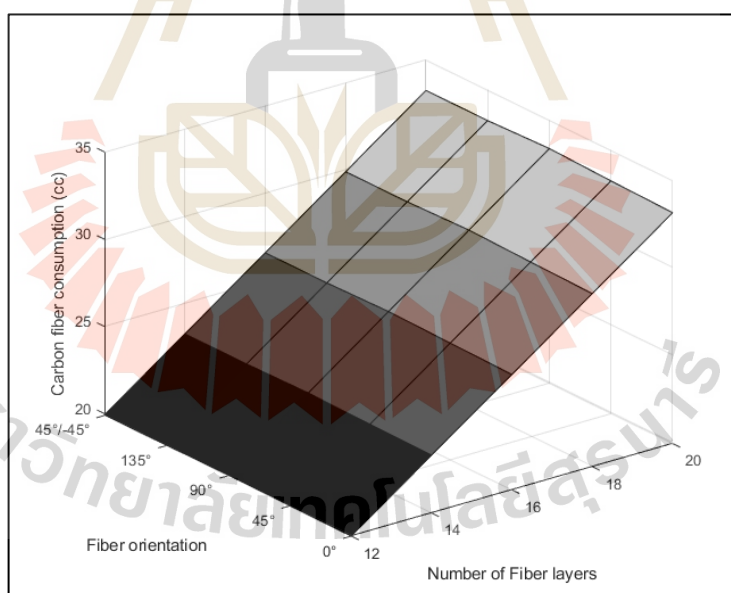
เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยพิจารณาจากความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงเส้นใยคาร์บอน (Consumption of Carbon fiber) ค่าความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress) จะได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6.2 และสามารถสร้างเป็นกราฟพื้นผิวแบบสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการออกแบบและตัวแปรตามได้ดังรูปที่ 6.3 และ 6.4 ซึ่งรูปที่ 6.4 แสดงถึงความสัมพันธ์ที่เชิงเส้นของการเปลี่ยนแปลงเส้นใยคาร์บอนและจำนวนชั้นในการพิมพ์เส้นใย



รูปที่ 6.2 แสดงผลจากการทดลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของตัวอย่างที่ 18A



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและค่าความเค้นหลักสูงสุด



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและค่าความสิ้นเปลืองเส้นใยคาร์บอน

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการทดลองแผ่นต้านแรงบิดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

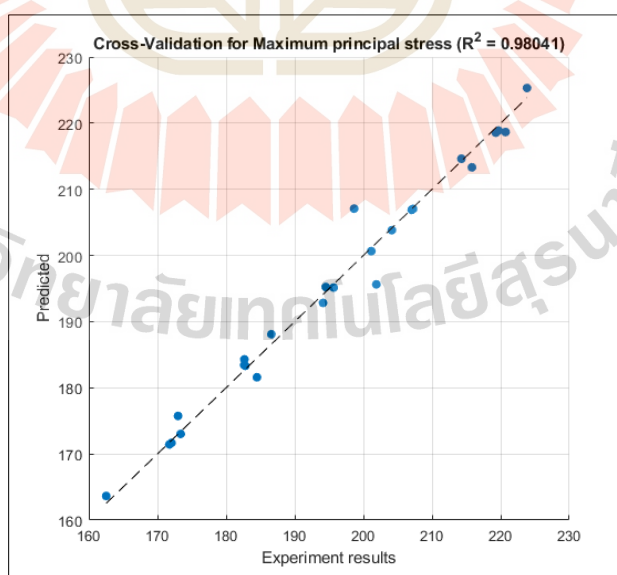
จำนวนชั้นที่มี วัสดุเสริมแรง (ชั้น)	การวางองศาของเส้น ใยวัสดุเสริมแรง (องศา)	Consumption of Carbon Fiber (cc)	Maximum Principal Stress (MPa)
12	0	19.90	219.29
12	45	19.93	215.81
12	90	19.98	219.68
12	-45	19.93	223.84
12	45/-45	19.93	220.72
14	0	23.21	207.04
14	45	23.25	201.15
14	90	23.32	207.23
14	-45	23.25	214.28
14	45/-45	23.25	198.65
16	0	26.51	195.66
16	45	26.58	186.60
16	90	26.66	194.52
16	-45	26.57	204.15
16	45/-45	26.57	201.89
18	0	29.82	182.79
18	45	29.90	173.00
18	90	30.00	182.64
18	-45	29.89	194.12
18	45/-45	29.89	182.66
20	0	33.13	171.74
20	45	33.22	162.54
20	90	33.35	172.05
20	-45	33.22	184.50
20	45/-45	33.22	173.38

6.3 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของการทดสอบ

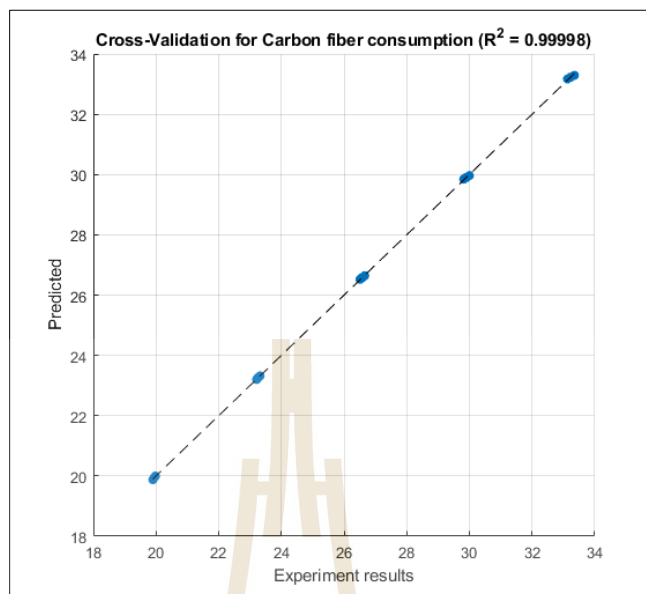
การหาค่าเหมาะสมที่สุดในส่วนที่ 2 ของการดำเนินการวิจัยจะแบ่งเป็นสองส่วน คือ การหาเหมาะสมสุดจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม และการหาค่าเหมาะสมที่สุดจากการวิเคราะห์ภาพรวมของผลการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

6.3.1 การหาค่าเหมาะสมที่สุดจากการทดสอบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

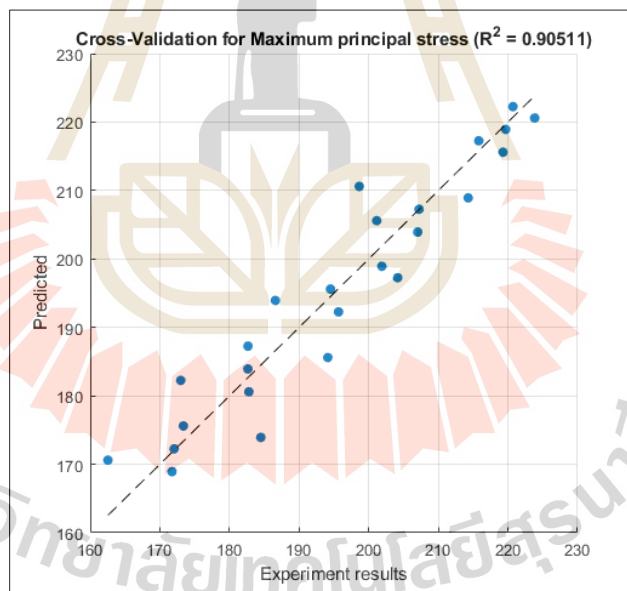
ในขั้นตอนตรวจสอบความน่าเชื่อถือของสมการจำลองในส่วนที่ 2 ของการดำเนินการวิจัย ได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการจำลองทดแทนจากการสร้างด้วยสมการจำลองคริกกิง (Kriging surrogate model) แสดงการตรวจสอบไขว้ ดังรูปที่ 6.5 และ 6.6 ตามลำดับ และการทำนายด้วยสมการจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression surrogate model) แสดงการตรวจสอบไขว้ ดังรูปที่ 6.7 และ 6.8 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบผลของค่า R^2 พบว่าความแม่นยำในการทำนายความสิ้นเปลืองเส้นใยคาร์บอนของสมการจำลองการถดถอยเชิงเส้น ($R^2 = 0.99990$) มีค่าใกล้เคียงมากกับการทำนายด้วยสมการจำลองคริกกิง ($R^2 = 0.99998$) แต่ในการทำนายค่าความเค้นหลักสูงสุด ความแม่นยำของการทำนายค่าด้วยสมการจำลองคริกกิง ($R^2 = 0.98041$) มีค่าสูงกว่าการทำนายด้วยสมการจำลองการถดถอยเชิงเส้น ($R^2 = 0.90511$) เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและตัวแปรตามสอดคล้องกับการทำนายด้วยฟังก์ชันของสมการ Gaussian ซึ่งเป็นพื้นฐานของสมการจำลองคริกกิง มากกว่าสมการจำลองการถดถอยเชิงเส้น ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง



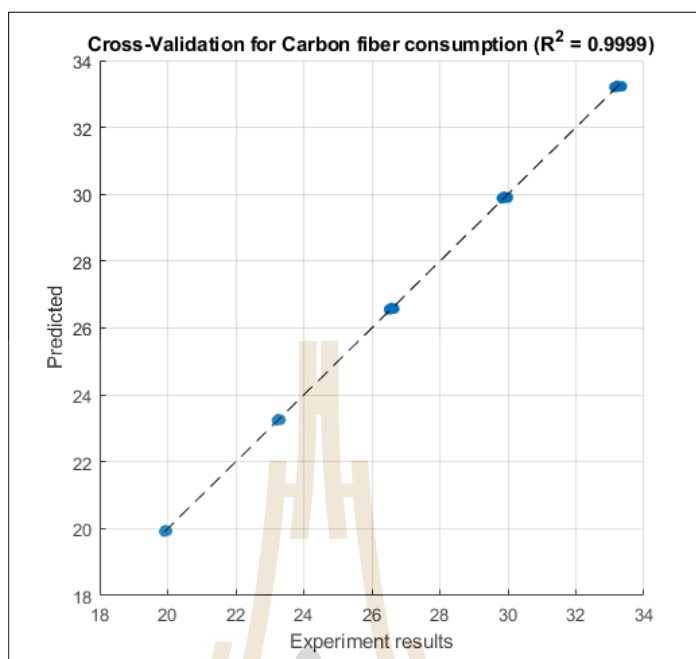
รูปที่ 6.5 ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองคริกกิงกับผลความเค้นหลักสูงสุด



รูปที่ 6.6 ภาพแสดงการตรวจสอบไข้วสมการจำลองคริกกิ่งกับค่าความสิ้นเปลืองเส้นใยคาร์บอน



รูปที่ 6.7 ภาพแสดงการตรวจสอบไข้วสมการจำลองการถดถอยเชิงเส้นกับผลความเค้นหลักสูงสุด



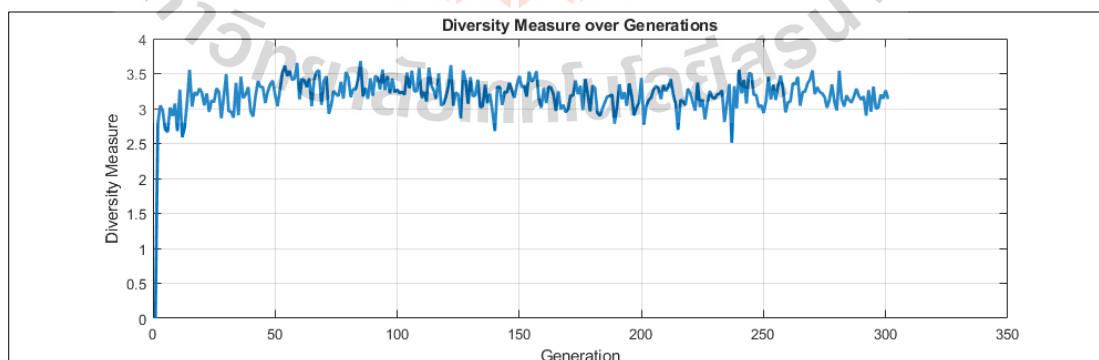
รูปที่ 6.8 ภาพแสดงการตรวจสอบไข้วสมการจำลองการถดถอยเชิงเส้นกับค่าความสิ้นเปลืองเส้นใยคาร์บอน

ค่าจากตารางที่ 4.4 แสดงถึงค่าจากการเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพความแม่นยำต่าง ๆ ของสมการจำลองที่ใช้ในการวิจัยส่วนที่ 2 โดยประกอบด้วยเกณฑ์ ได้แก่ เกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE) เกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Mean Square Error: MSE) และ เกณฑ์ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error: MAE) โดยพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนทุกเกณฑ์ของสมการจำลองคริกกิ้งมีค่าต่ำกว่าสมการจำลองการถดถอยเชิงเส้น ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการทำนายที่ดีกว่าของสมการจำลองคริกกิ้ง

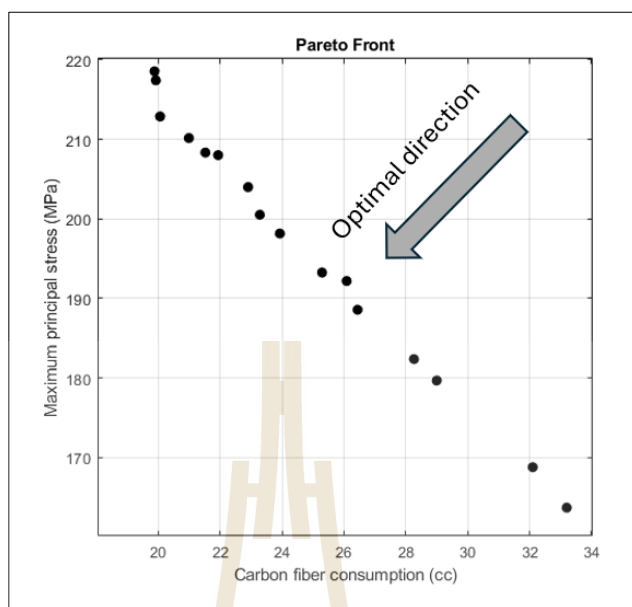
ตารางที่ 6.3 ค่าจากการเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพความแม่นยำต่าง ๆ ของสมการจำลอง ส่วนที่ 2

เกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพ	สมการจำลอง ริกกิ้ง	สมการจำลองการถดถอยเชิง เส้น
RMSE for Carbon fiber consumption	0.0189	0.0474
RMSE for Maximum principal stress	2.452	5.3972
MSE for Carbon fiber consumption	0.0004	0.0022
MSE for Maximum principal stress	6.0122	29.1293
MAE for Carbon fiber consumption	0.0124	0.0363
MAE for Maximum principal stress	1.5394	4.2783

รูปที่ 6.9 แสดงการลู่เข้าของค่าความหลากหลายของคำตอบในแต่ละรุ่นของประชากรที่ได้จากการหาคำตอบด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด พบว่าในช่วงรุ่น 0 ถึง 50 จะมีความหลากหลายคำตอบที่สูงมาก (0 ถึง 3.5) และจากนั้นจึงเริ่มลู่เข้าและความหลากหลายในการทำนายคำตอบจึงอยู่ในช่วง 2.5 – 3.5 ของค่าการวัดความหลากหลาย และจึงสรุปได้ว่าค่าจากคำตอบของจำนวนรุ่นประชากรที่ 100 เป็นต้นไปมีความหลากหลายที่น้อยกว่าช่วงแรก และสามารถนำคำตอบมาใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ เนื่องจากการทำนายด้วยจำนวนรุ่นประชากรที่ 100 เป็นต้นไป ไม่แสดงถึงความหลากหลายของคำตอบ



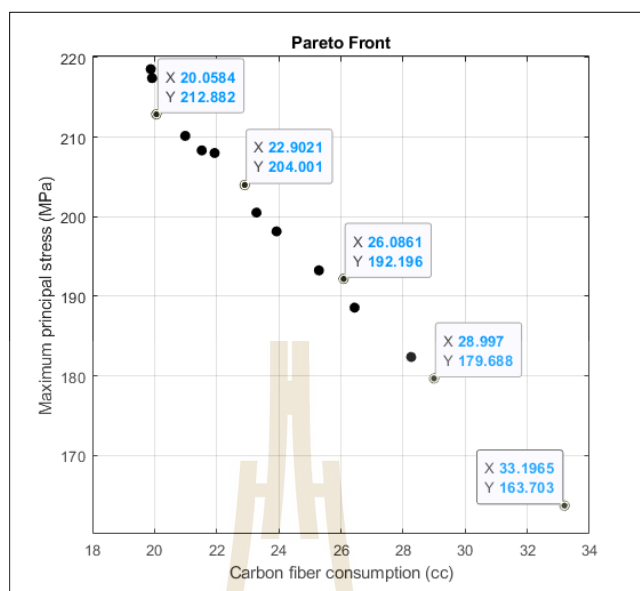
รูปที่ 6.9 การลู่เข้าของค่าวัดความหลากหลายคำตอบในแต่ละรุ่นประชากรในการวิจัยส่วนที่ 2



รูปที่ 6.10 ขอบหน้าพारेโตของคำตอบจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดในส่วนที่ 2

เมื่อพิจารณาจากขอบหน้าพारेโต (Pareto front) รูปที่ 6.10 ซึ่งได้จากการใช้สมการจำลองคริกกิ้งโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมการจัดลำดับที่ไม่ครอบงำในการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยทิศทางของคำตอบที่ดีที่สุดที่ถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือทิศทางที่ผลคำตอบมีค่าความเค้นหลักสูงสุดต่ำที่สุดและค่าความสิ้นเปลืองเส้นใยคาร์บอนต่ำที่สุดจะพบว่าขอบหน้าพारेโตที่ได้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับความเป็นสมการเส้นตรง

ค่าจากตารางที่ 6.4 คือการแสดงตัวอย่างของผลการทำนายและข้อมูลนำเข้าจากรูป 6.11แสดงให้เห็นแนวโน้มของผลคำตอบทั้งหมด และตัวแปรการออกแบบการปรับตั้งค่าการพิมพ์ โดยแสดงให้เห็นแนวโน้มผลคำตอบที่มีค่าความเค้นหลักสูงสุดต่ำที่สุดที่ 163.703 MPa มีค่าความสิ้นเปลืองในการพิมพ์เส้นใยคาร์บอนที่ 33.1965 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีการปรับองค์การพิมพ์เป็นแบบ 45 องศา และมีจำนวนชั้นที่พิมพ์เส้นใยคาร์บอนมากที่สุด ซึ่งค่าความเค้นหลักสูงสุดมีค่าแปรผกผันกับจำนวนชั้นที่พิมพ์เส้นใยคาร์บอน เนื่องจากค่าสมบัติทางกลในการต้านทานแรงดึงของเส้นใยคาร์บอนดีกว่าโณนิกซ์



รูปที่ 6.11 ภาพแสดงผลข้อมูลออกของตัวอย่างจากขอบหน้าพาเรโตจากการหาค่าเหมาะสมที่สุด ส่วนที่ 2

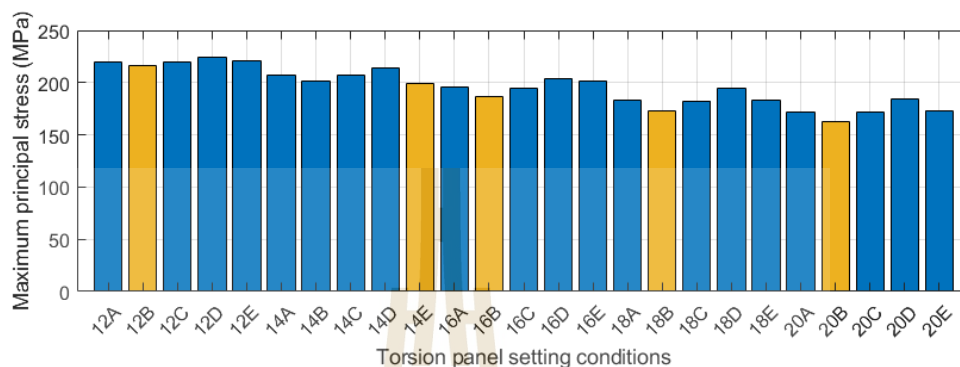
ตารางที่ 6.4 ข้อมูลเข้าและขาออกของกลุ่มตัวอย่างจากขอบหน้าพาเรโต ในการวิจัยส่วนที่ 1

จำนวนชั้นที่ พิมพ์เส้นใย	องศาการพิมพ์ (°)	ความสิ้นเปลืองเส้นใย คาร์บอน (cc)	ค่าความเค้นหลักสูงสุด (MPa)
12	45°	20.0584	212.882
14	0°	22.9021	204.001
16	0°	26.0861	192.196
18	0°	28.997	179.688
20	45°	33.1965	163.703

6.3.2 การวิเคราะห์ค่าเหมาะสมสุดโดยตรงจากผลการทดสอบ

เมื่อนำตารางผลการทดลองที่ 6.2 มาวิเคราะห์ค่าความเค้นหลักสูงสุดจะได้กราฟแสดงดังรูปที่ 6.12 ซึ่งแสดงถึงการตั้งค่าวัสดุคอมโพสิตทั้งหมดและเปรียบเทียบผลความเค้นหลัก

สูงสุด แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มว่าจำนวนชั้นไฟเบอร์ที่มากกว่า จะให้ค่าความเค้นหลักที่น้อยกว่าซึ่งหมายถึงวัสดุคอมโพสิตได้รับความเสียหายน้อยกว่า



รูปที่ 6.12 กราฟเปรียบเทียบผลความเค้นหลักสูงสุดซึ่งได้จากการทดลอง

รูปที่ 6.12 แสดงให้เห็นว่าการตั้งค่าชั้นวัสดุเสริมแรงส่วนกลางเป็น 45 องศาทั้งหมด (ชั้นงาน 12B 16B 18B และ 20B) แสดงดังกราฟแท่งสีเหลือง ทำให้ความเค้นหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งตรงตามทฤษฎีเมื่อวัสดุเสริมแรงรับแรงตรงกับแนวแกนการวางตัว แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลที่เกิดจากโมเมนต์ของมอเตอร์ไฟฟ้ารวมกับแรงฉุดที่เกิดจากใบพัดว่ามีอิทธิพลมากที่สุดในขณะที่การวางตัวเส้นใยเสริมแรงที่ 45 องศา สลับกับ -45 องศา เกิดความเค้นหลักน้อยเมื่อจำนวนชั้นเส้นใยคาร์บอน 14 ชั้น

และเมื่อพิจารณาจากกราฟพื้นผิวแสดงดังรูปที่ 6.3 และ 6.4 พบว่าองศาการวางเส้นใยของวัสดุ มีผลน้อยมากต่อความสิ้นเปลืองของการพิมพ์เส้นใยไฟเบอร์ ดังนั้นในการเลือกการตั้งค่าการพิมพ์ที่เหมาะสมที่สุดจึงควรพิจารณาความสิ้นเปลืองจากจำนวนชั้นในการพิมพ์เป็นหลัก แล้วจึงเลือกองศาการวางตัวที่เหมาะสมกับการรับแรง (45 องศา)

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

การออกแบบการตั้งค่าการพิมพ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบสามมิติ เพื่อให้ได้วัตถุประสงค์การออกแบบที่ต้องการ ได้แก่ สมบัติทางกลในด้านความแข็งแรงและความแข็งแรงของวัสดุ การออกแบบรูปร่างและการพิมพ์ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน หรือการลดความสิ้นเปลืองของการผลิต สามารถลดต้นทุนการทดลองได้ด้วยการใช้เทคนิคการสร้างสมการทดแทนข้อมูลการทดลอง ผสมผสานกับการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ยังสามารถใช้การทดลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อจำลองการเสียหายของโครงสร้างเมื่อรับภาระแรงให้เหมาะสมกับการใช้งานได้เช่นกัน งานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้เทคนิค และขั้นตอนวิธีทั้งหมดเพื่อเป็นกรณีศึกษาสำหรับการออกแบบวัสดุ และออกแบบวัสดุคอมโพสิต โดยแบ่งย่อยออกเป็น 2 ส่วนของการดำเนินการวิจัย และทั้ง 2 ส่วนของการดำเนินการวิจัยจะใช้วัสดุคอมโพสิตเป็นชนิดโณนิกซ์/เส้นใยคาร์บอน

ส่วนที่ 1 ได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาการปรับค่าการพิมพ์ที่ดีที่สุด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาการออกแบบการพิมพ์ที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Ultimate Tensile strength) และค่าโมดูลัสการยืดของวัสดุ (Modulus of elasticity) มีค่าสูงสุด โดยการกำหนดตัวแปรการออกแบบได้แก่ เพอร์เซ็นต์ความหนาแน่นในการเติม (Infill density) และจำนวนวงแหวนไฟเบอร์ (Concentric Fiber ring) ในส่วนที่ 1 มีการดำเนินการทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต ASTM D3039 โดยมีชิ้นงานการทดลองทั้งหมด 9 รูปแบบ ทดลองซ้ำรูปแบบละ 5 ครั้ง รวมเป็นชิ้นงานทดสอบ 45 ชิ้นงาน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างเป็นสมการจำลองทดแทนด้วยวิธีคริกกิง (Kriging) และนำสมการทดแทนข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมการจัดลำดับที่ไม่ครอบงำ (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) ผลจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดพบว่าวัสดุคอมโพสิตที่ตั้งค่าการพิมพ์ด้วยเงื่อนไขการออกแบบในส่วนที่ 1 จะมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เมื่อตั้งค่าให้มีจำนวนวงแหวนไฟเบอร์จำนวน 3 ถึง 4 วงแหวน และค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุที่ขอบหน้าพาเรโตมีค่าใกล้เคียงกันและมีเปอร์เซ็นต์การเติมที่ 50 เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกันโดยผลจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดนี้สามารถนำไปใช้ในการกำหนดค่าการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตเบื้องต้น โดย

ต้องพิจารณาถึงรูปร่างรูปทรงของชิ้นงานที่นำไปใช้ และคำนึงความเสี่ยงของการพิมพ์เส้นใยวัสดุเสริมแรงร่วมด้วย

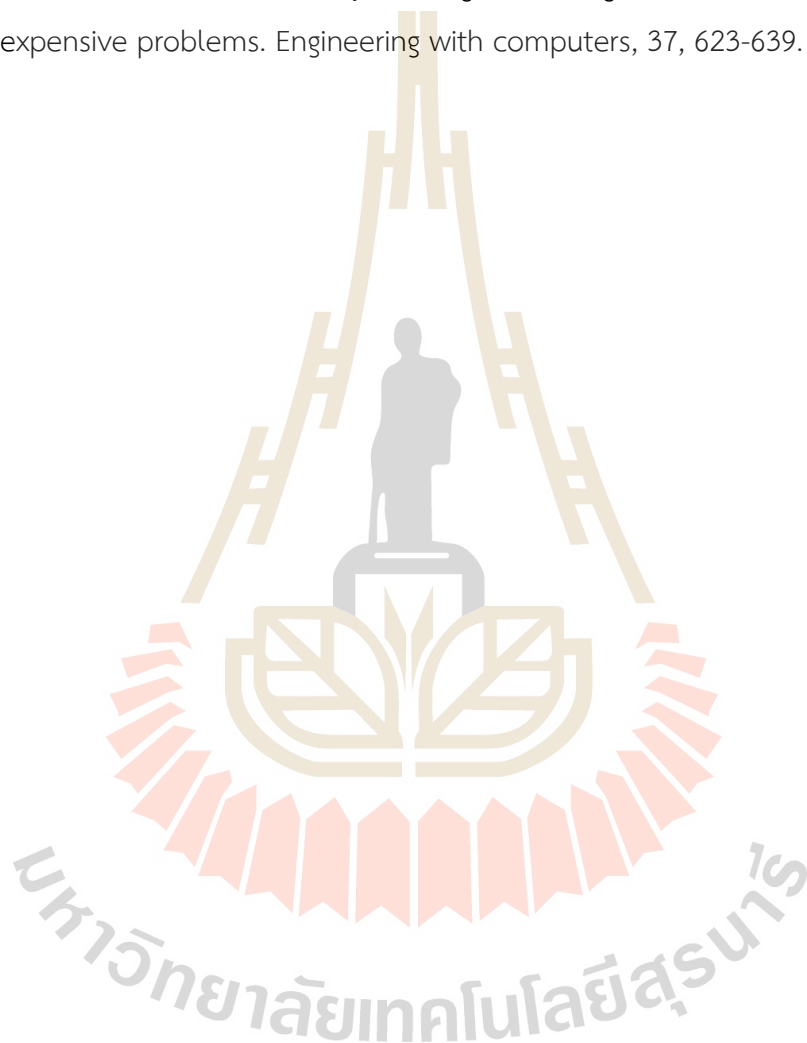
ตอนที่ 2 เป็นการออกแบบการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตซึ่งใช้เป็นกล่องต้านแรงบิดสำหรับใช้ในแท่นทดสอบแรงขับถึงพัฒนาโดยหน่วยวิจัยของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทราชภัฏตราครีธาฯ แท่นทดสอบดังกล่าวประกอบไปด้วยขาตั้งของแท่นทดสอบ มอเตอร์ไฟฟ้ากำลังขับ 36 กิโลกรัม ใบพัดสำหรับใช้ในแท่นทดสอบ อุปกรณ์ Load cell และกล่องต้านแรงบิดซึ่งได้จากการออกแบบการทดลองในส่วนนี้ ซึ่งในการออกแบบจะออกแบบจากชิ้นส่วนย่อยเป็นแผ่นต้านแรงบิดขนาด $95 \times 168.3 \times 6$ มิลลิเมตร โดยการทดลองในส่วนที่ 2 นี้จะทดลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดลองดังกล่าวดำเนินการด้วยซอฟต์แวร์แอนซิส จากโมดูล ANSYS ACP ซึ่งเป็นโมดูลที่ใช้ในการขึ้นรูปและวิเคราะห์วัสดุคอมโพสิตจากแอนซิสโดยเฉพาะ ในการทดสอบได้กำหนดให้มีแรงในแนวแกนตั้งขนาด 500 นิวตัน และความเร็วเชิงมุมจากการหมุนของมอเตอร์ที่ 370 เรเดียนต่อวินาที ซึ่งคำนวณมาจากแรงขับสูงสุดที่มอเตอร์ไฟฟ้าทำได้ และแรงบิดสูงสุดที่สร้างจากมอเตอร์ไฟฟ้า โดยผลการทดสอบถูกนำไปหาค่าเหมาะสมสุด 2 วิธี ได้แก่ การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการวิเคราะห์โดยตรงจากผลของการทดสอบ จากการวิเคราะห์พบว่าจำนวนชั้นไฟเบอร์ที่เยอะขึ้น มีผลต่อความแข็งแรงทางกลของวัสดุอย่างชัดเจน แต่ในทางกลับกันทำให้สิ้นเปลืองปริมาตรเส้นใยวัสดุเสริมแรงที่ใช้ในการพิมพ์ ในขณะที่องศาการวางตัวของเส้นใยมีผลน้อยมากในด้านความเสี่ยงของวัสดุ แต่มีผลกระทบอย่างชัดเจนในด้านความแข็งแรงในแนวแกนรับแรงของวัสดุคอมโพสิต โดยในชิ้นงานแผ่นต้านแรงบิด พบว่าการพิมพ์ให้ส่วนกลางของชิ้นงานมีการวางตัวของเส้นใยเสริมแรงเป็น 45 องศา จะมีประสิทธิภาพในการเสริมสร้างความแข็งแรง ทำให้ในการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ามีค่าความเค้นหลักสูงสุด (Maximum Principal Stress) ต่ำที่สุดโดยที่จำนวนชั้นการพิมพ์เส้นใยเสริมแรง 20 ชั้น มีค่าความเค้นหลักสูงสุดที่ 162.54 MPa และในการพิมพ์เส้นใยเสริมแรง 12 ชั้น มีค่าความเค้นหลักสูงสุดที่ 215.81 MPa ในขณะที่รายงานของ Markforged พบว่าเส้นใยคาร์บอนที่ทดสอบด้วยมาตรฐาน ASTM D3039 จะมีความแข็งแรงถึง 800 MPa แสดงให้เห็นว่าวัสดุอยู่ในจุดที่ห่างไกลกับความเสียหายต่อโครงสร้าง

รายการอ้างอิง

- ปราโมทย์ เตชะอำไพ และ เสฏฐวรรธ สุจริตวาทสกุล. (2560). การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ด้วยโต๊ะช่างแอนซีส. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ASTM COMMITTEE D-30 ON COMPOSITE MATERIALS. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. ASTM international, 2008.
- Ariyarat, A., & Kanazaki, M. (2015). Multi-modal distribution crossover method based on two crossing segments bounded by selected parents applied to multi-objective design optimization. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29, 1443-1448
- Ariyarat, A., Sugiura, M., Tanabe, Y., & Kanazaki, M. (2018). Hybrid surrogate-model-based multi-fidelity efficient global optimization applied to helicopter blade design. *Engineering Optimization*, 50(6), 1016-1040.
- Arriaga, A., Lazkano, J. M., Pagaldai, R., Zaldua, A. M., Hernandez, R., Atxurra, R., & Chrysostomou, A. (2007). Finite-element analysis of quasi-static characterisation tests in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS. *Polymer Testing*, 26(3), 284-305.
- Bellary, S. A. I., Samad, A., Couckuyt, I., & Dhaene, T. (2016). A comparative study of kriging variants for the optimization of a turbomachinery system. *Engineering with Computers*, 32, 49-59.
- Booker, L. B., Goldberg, D. E., & Holland, J. H. (1989). Classifier systems and genetic algorithms. *Artificial intelligence*, 40(1-3), 235-282.
- Chang, C. L., & Yang, S. H. (2009). Simulation of wheel impact test using finite element method. *Engineering Failure Analysis*, 16(5), 1711-1719.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.

- El Essawi, B., Abdallah, S., Ali, S., Mohammed, A. N. A., Susantyoko, R. A., & Pervaiz, S. (2024). Optimization of infill density, fiber angle, carbon fiber layer position in 3D printed continuous carbon-fiber reinforced nylon composite. *Results in Engineering*, 21, 101926.
- Leusink, D., Alfano, D., & Cinnella, P. (2015). Multi-fidelity optimization strategy for the industrial aerodynamic design of helicopter rotor blades. *Aerospace Science and Technology*, 42, 136-147.
- Li, L., Liu, W., & Sun, L. (2022). Mechanical characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*, 227, 109618.
- Moore, R. (1999). Geostatistics in hydrology: Kriging interpolation. Mathematics Department, Macquarie University, Sydney., Tech. Rep.
- Markforged (2022). Onyx and Carbon Fiber Material Datasheet (REV 5.2). Retrieved December 20, 2022, from (<https://markforged.cm/datasheets>).
- Phiboon, T., Khankwa, K., Petcharat, N., Phoksombat, N., Kanazaki, M., Kishi, Y., ... & Ariyarit, A. (2021). Experiment and computation multi-fidelity multi-objective airfoil design optimization of fixed-wing UAV. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(9), 4065-4072.
- RAMALINGAM, P. Sethu, et al. Effect of 3D printing process parameters on the impact strength of onyx–Glass fiber reinforced composites. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45: 6154-6159.
- SANEI, Seyed Hamid Reza, et al. Draft: Mechanical Properties of 3D Printed Fiber Reinforced Thermoplastic. In: *Proceedings of the ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2019*, Salt Lake City, UT, USA. 2019. p. 8-14. Suchat, S., Lanna, A., Chotikhun, A., & Hiziroglu, S. (2020). Some Properties of Composite Drone Blades Made from Nanosilica Added Epoxidized Natural Rubber. *Polymers*, 12(6), 1293.
- Shahani, A. R., Setayeshi, S., Nodamaie, S. A., Asadi, M. A., & Rezaie, S. (2009). Prediction of influence parameters on the hot rolling process using finite element method and neural network. *Journal of materials processing technology*, 209(4), 1920-1935.

- Velmurugan, G., Vadivel, D., Arravind, R., Vengatesan, S. P., Mathiazhagan, A., & Mohamed Rijuvan, R. (2012). Tensile test analysis of natural fiber reinforced composite. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2(2), 56- 60.
- Zhou, Q., Wu, J., Xue, T., & Jin, P. (2021). A two-stage adaptive multi-fidelity surrogate model-assisted multi-objective genetic algorithm for computationally expensive problems. *Engineering with computers*, 37, 623-639.



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, stylized emblem. It features a central figure of a person sitting on a throne, surrounded by a circular border with a scalloped edge. The entire logo is rendered in a light gray color.

ภาคผนวก ก

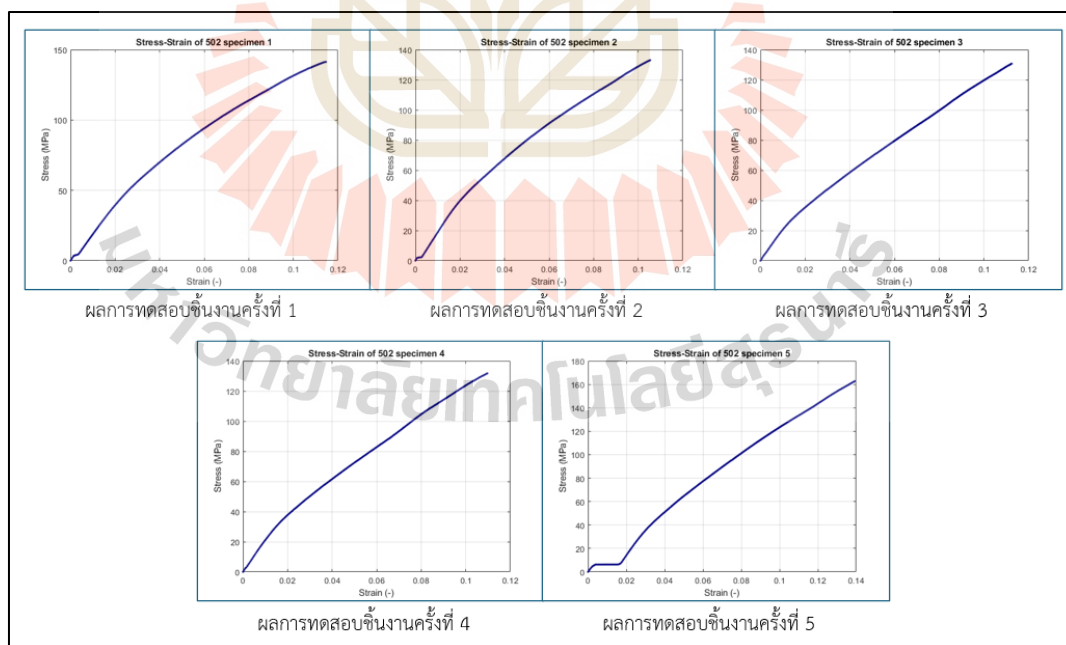
ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงจากส่วนที่ 1 ของการดำเนินการวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

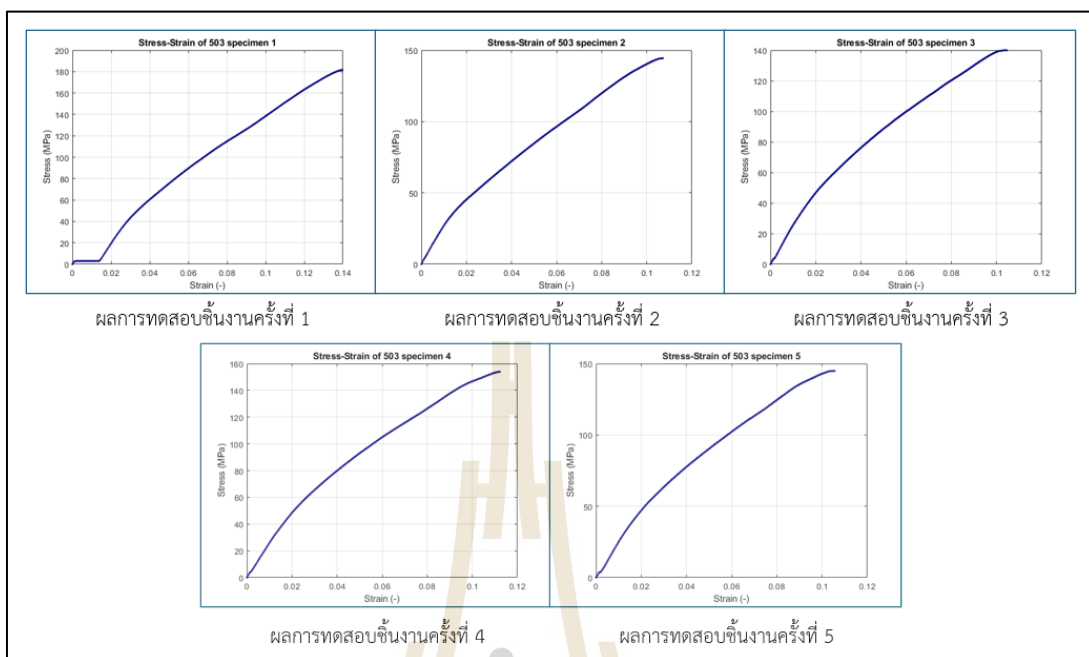
จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต ตามมาตรฐาน ASTM D3039 จากส่วนที่ 1 ของการดำเนินการวิจัยงานวิจัย ได้ผลทดสอบออกมาเป็นค่าของภาระแรงที่เครื่องทดสอบกระทำ (Load) และระยะการเลื่อนของคานทดสอบ (Machine extension) ซึ่งเมื่อนำค่าทั้งสอง ร่วมกับ ระยะขนาดของวัสดุที่วัดได้ มาคำนวณดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 จะทำให้ได้ค่าของความเค้นและความเครียด ซึ่งสามารถนำพล็อตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดัง รูปที่ ก.1 ถึง ก.9.

ทุกการทดสอบของการทดสอบความแข็งแรงดึง ได้รูปแบบของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด คล้ายคลึงกับภาพจากทฤษฎีการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุเปราะ (รูปที่ 2.8 จากบทที่ 2) เนื่องจากเมทริกซ์ของวัสดุคอมโพสิตซึ่งพิมพ์จากโณนิกซ์ที่ปกคลุมอยู่ภายนอกชิ้นงาน เกิดความเสียหายก่อน วัสดุเสริมแรงที่อยู่ภายใน และเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์หยุดทำงานอัตโนมัติ ซึ่งความเสียหายเช่นนี้มีค่าเท่ากับชิ้นงานได้เสียหายไปแล้วจึงทำให้วัสดุไม่มีช่วงการเกิดคอคอด

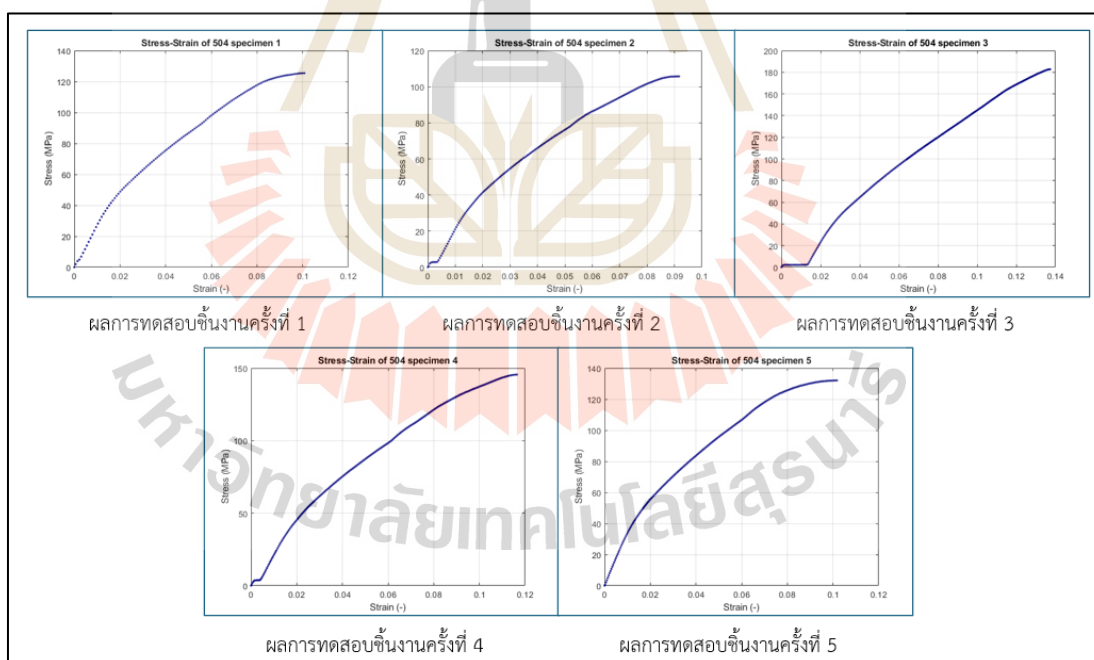
ในบางรูปจากผลการทดสอบ พบว่ามีช่วงที่ความเค้นมีค่าคงที่ในขณะที่ความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบ สามารถสังเกตได้ชัดในผลการทดสอบชิ้นที่ 5 รูปที่ ก.1 ซึ่งช่วงการเพิ่มขึ้นของความเค้นดังกล่าวไม่ใช่ช่วงระยะคราก แต่เกิดจากปากกาจับชิ้นงานเกิดการครูดกับชิ้นงาน แต่ไม่ส่งผลต่อการทดสอบเนื่องจากการจับชิ้นงานยังอยู่ในช่วงระยะการจับ (Grip length)



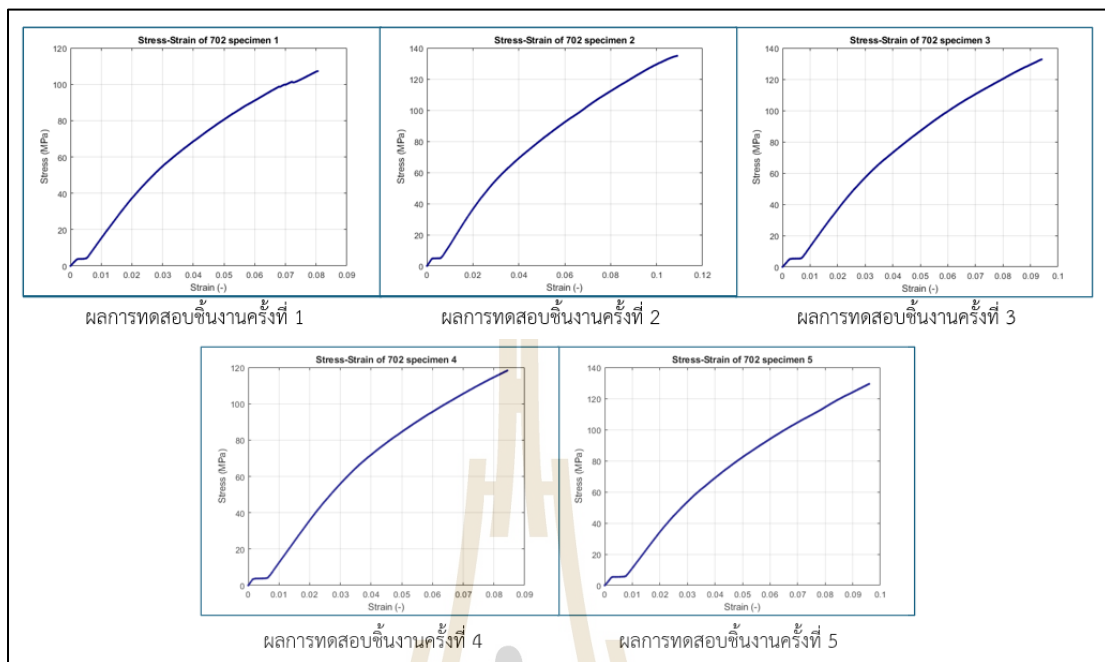
รูปที่ ก.1 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 50 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 2 วง



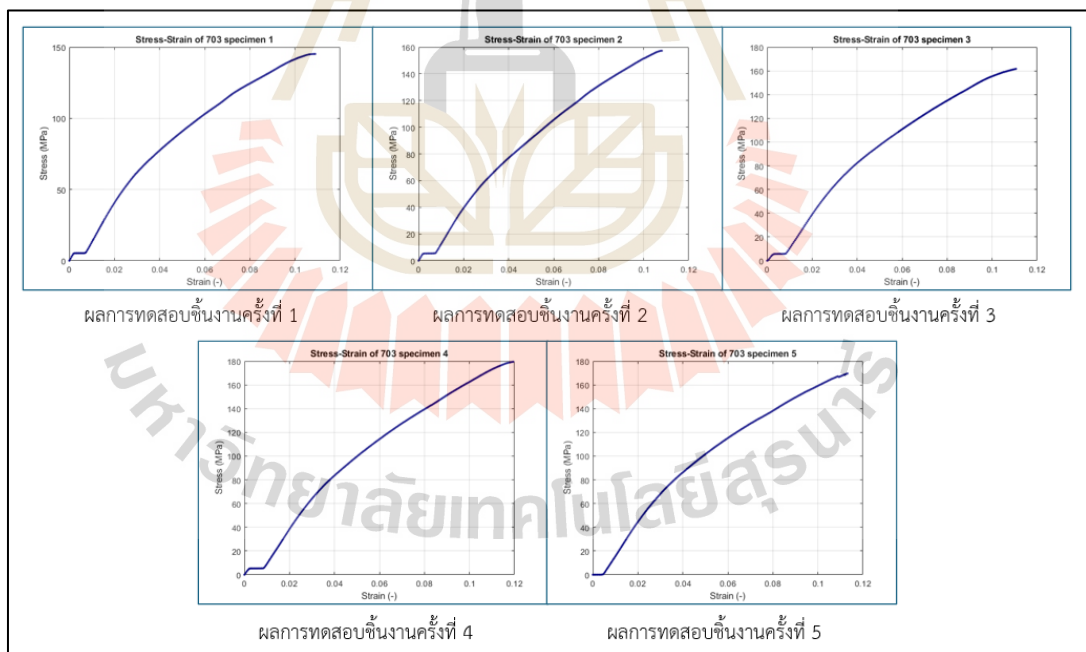
รูปที่ ก.2 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 50 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 3 วง



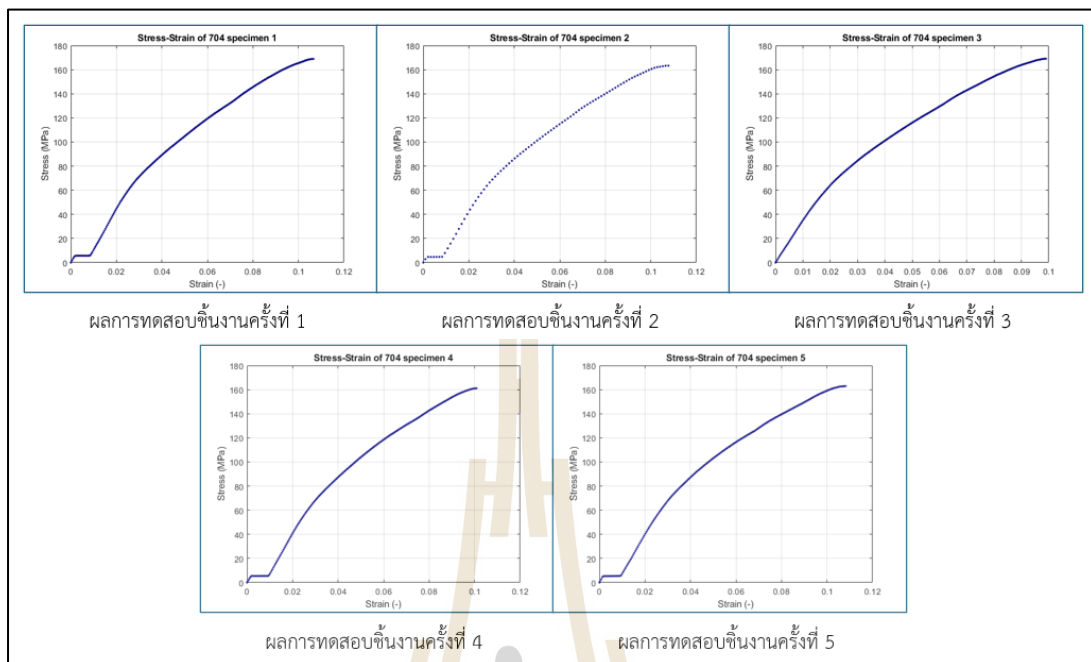
รูปที่ ก.3 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 50 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 4 วง



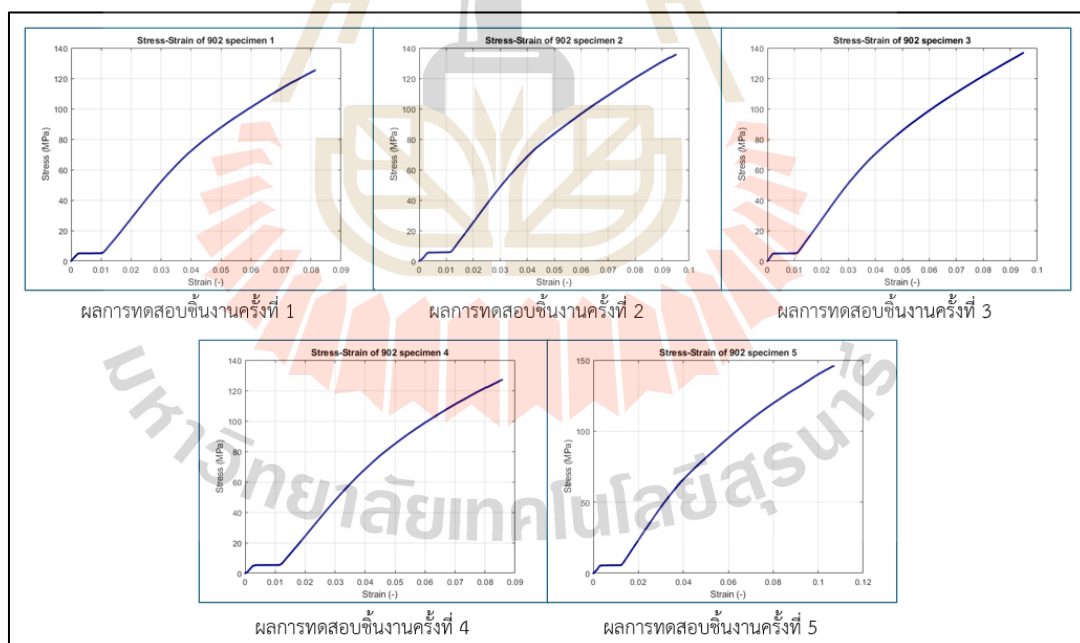
รูปที่ ก.4 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 70 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 2 วง



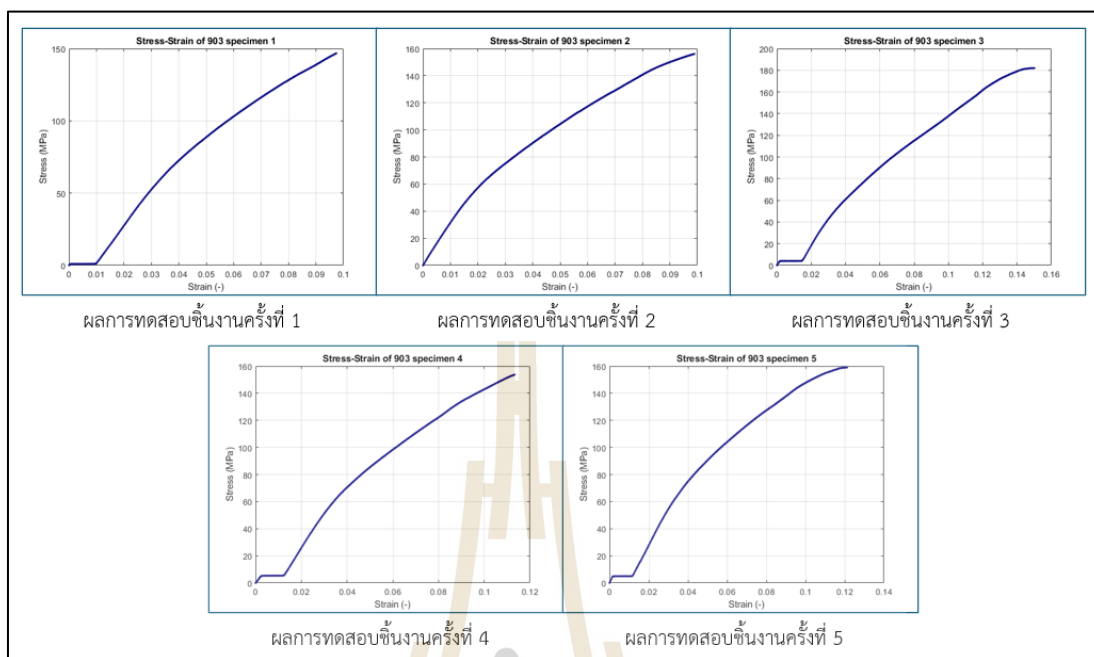
รูปที่ ก.5 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 70 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 3 วง



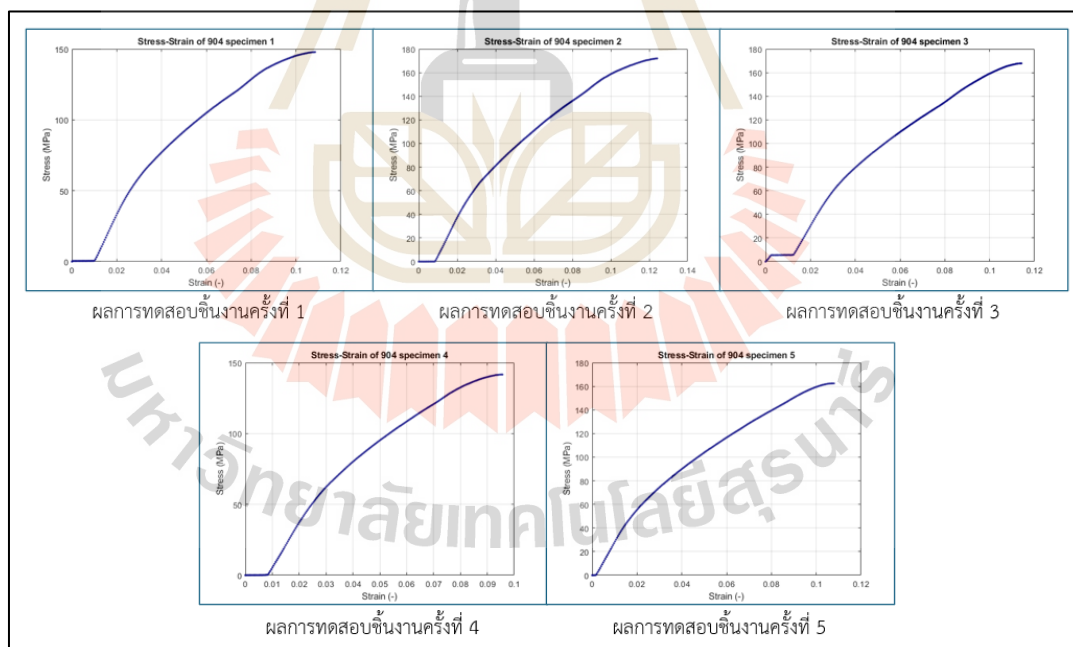
รูปที่ ก.6 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 70 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 4 วง



รูปที่ ก.7 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 90 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 2 วง



รูปที่ ก.8 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 90 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 3 วง



รูปที่ ก.9 ผลการทดสอบชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยความหนาแน่น 90 เปอร์เซ็นต์ และวงแหวนไฟเบอร์ 4 วง

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a circular emblem with a book and a sunburst. The entire logo is rendered in a light gray color.

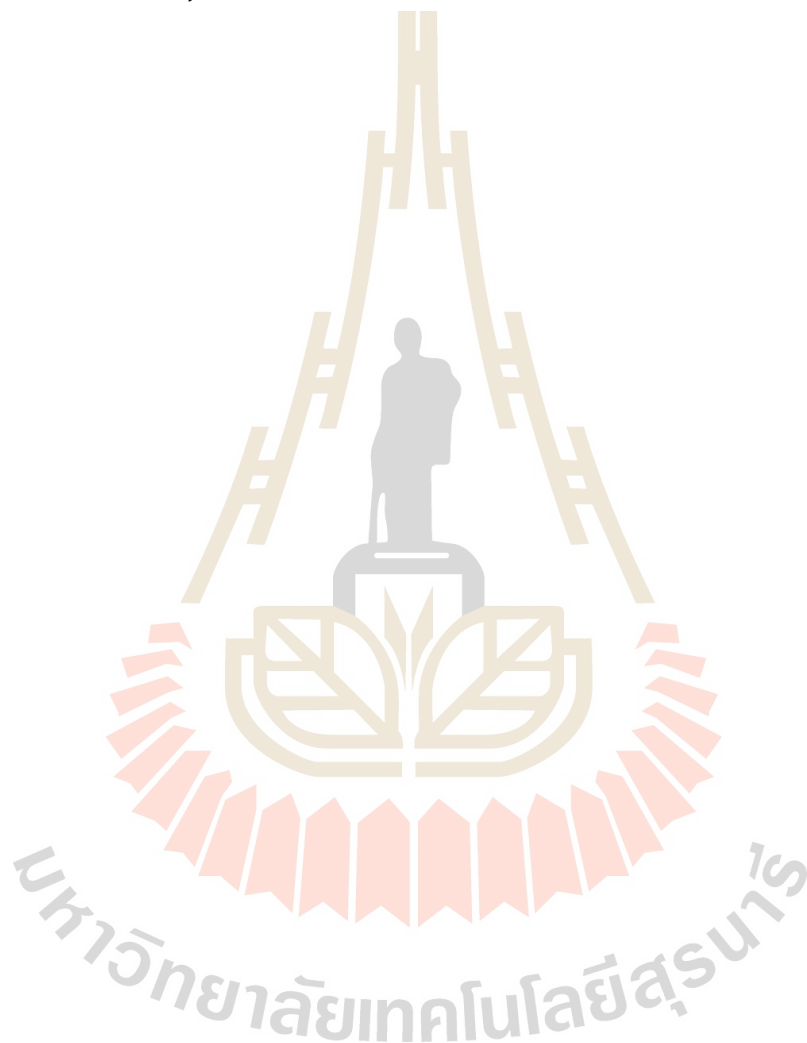
ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งได้รับการเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการเผยแพร่ระหว่างการศึกษา

Petcharat, N., Wiangkham, A., Pichitkul, A., Tantrairatn, S., Aengchuan, P., Bureerat, S., ... & Ariyarat, A. (2023). **The multi-objective optimization of material properties of 3D print onyx/carbon fiber composites via surrogate model.** *Materials Today Communications*, 37, 107362.





The multi-objective optimization of material properties of 3D print onyx/carbon fiber composites via surrogate model

Nuchanan Petcharat^a, Attasit Wiangkham^b, Auraluck Pichitkul^a, Suradet Tantrairatn^a, Prasert Aengchuan^c, Sujin Bureerat^d, Suwatjanee Banpap^a, Piyanat Khunthongplatprasert^a, Atthaphon Ariyarat^{a,*}

^a School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111, MahaWithayalai Rd, Suranari, Muang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

^b Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Ongkharak, Nakhon Nayok 26120, Thailand

^c School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111, MahaWithayalai Rd, Suranari, Muang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

^d Sustainable and Infrastructure Research and Development Center, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, 123, Mitaphap Rd., Nai Muang, Muang District, Khon Kaen 40002, Thailand

ARTICLE INFO

Keywords:

3D printing
Composite material
Multi objective optimization
Surrogate model
Tensile test

ABSTRACT

Composite materials play a prominent role in modern engineering. The emergence of composite material technology has brought about a profound impact on almost, if not all industries. The aerospace industry, for instance, benefits greatly from composite materials. With composites, aircraft weight can be reduced while the structural strength is maintained. As with other classes of materials, 3D printing technique allows composite parts of high complexity to be fabricated with great precision. Additionally, with 3D printing, mechanical properties of the resulted part can be accurately customized and controlled by means of varying matrix-reinforcement proportions. As the composite material can be indefinitely customized in 3D printing, it is crucial to evaluate the mechanical properties of the printed specimen. While testing of printed specimens is usually possible, endless production and testing of specimens not only takes time and resources but also leads to extensive experimental waste. In this study, an optimization-based technique is proposed to determine the optimal 3D printing material proportion in order to reduce the need of unwarranted experimental waste and improve the efficiency of composite material selection process. The study aims to investigate the properties of Onyx/Carbon fiber composite material and the optimization of the 3D printing configuration to achieve desirable mechanical properties. The effects of the number of carbon concentric fiber rings and the percentage of infill density of Onyx used in 3D printing were examined. ASTM D3039 tensile tests were performed to obtain mechanical properties of the printed specimen. Considering the values of tensile strength and modulus of elasticity of the printed material, the printing configurations were optimized using a multi-objective non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) with the Kriging model for objective function estimation. From the proposed optimization technique, it has been found that the maximum tensile strength is attained when the number of concentric fiber rings is equal to 3 while the percentage of Onyx infill density falls in the range of 86–90. Contrarily, the modulus of elasticity is maximized when the number of concentric fiber rings is equal to 4 with the percentage of Onyx infill density in the range of 70–75.

1. Introduction

Composite materials have become a prevalent material option in various engineering applications owing to their high strength-to-weight ratio, versatility, and customizability to fit certain needs, aerospace and

aviation industries are among examples where composite materials are extensively used to cater stringent requirements for lightweight materials with yet exceptional mechanical properties. Seilak [1] has presented the comparative characterization of the structural materials including composite material used in aviation structure and showed the

* Corresponding author.

E-mail address: ariyarat@stn.tu.ac.th (A. Ariyarat).

<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107362>

Received 4 July 2023; Received in revised form 22 September 2023; Accepted 17 October 2023

Available online 18 October 2023

2352-4928/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

example of aluminum-composite structure which prevents delamination and strongly propagating cracks in structure. Suchat [2] used the epoxidized natural rubber and nanosilica to improve the impact strength of epoxy nanocomposite as reinforced materials that composite material showed the great potential to be used as raw material for propeller blades of unmanned aerial vehicles (UAVs) based on physical properties evaluated within the scope of the study.

Composite material 3D printer is a composite-material specimen fabricating machine in which the type of materials, the geometry and the ratio of the material compositions can be configured, allowing the mechanical properties of the printed specimen to be controlled to meet diverse demands. Studies have been conducted in the recent years to explore various means to control mechanical properties of the printed materials as well as to explore potential applications of 3D printing technology. Li et al. [3] suggests that the geometry and fiber filament fill pattern significantly affect the tensile properties of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composite material. The experiment performed by Ramalingam [4] shows that the hexagonal infill pattern possesses the optimum energy absorption over other patterns while inappropriate setting could lead to the unfitting properties. Experiment conducted by Sanei [5] demonstrates that 3D printed continuous carbon fiber onyx composite samples possess inferior mechanical properties to conventional carbon fiber reinforced epoxy specimens due to lower volume fraction of fiber and poorer properties of matrix. Nevertheless, the 3D printed composites hold great potential in various applications owing to rapid advancement in printing technology that allows the fiber direction to be precisely controlled.

Fabricating composite material with 3D printing offers a notable advantage of combining the flexibility of 3D-printing technique in which complex design can be easily handled with the customizable nature of composite materials where proportion of reinforcement and matrix can be controlled to achieve desirable properties. However, an inherent challenge of composite material 3D printing is to adjust the printing condition and to calibrate the proportion of matrix-reinforcement to achieve the optimum of mechanical properties in the printed components, aligning them to be suitable with their application, while minimizing material wastage.

In determining the optimal printing configuration, a combined optimization technique with a surrogate model is shown to provide satisfactory results. Surrogate models are used in various engineering applications including optimization problems where experiments are complex, expensive, or time-consuming. Such models are used for estimating a fitness or objective function landscape given that a set of training data is provided. In optimization, different surrogate models can be employed, including a radial basis function (RBF) interpolation [6], a response surface model (RSM) [7], a Kriging surrogate model [8], etc. Optimization techniques with surrogate model have been studied and proposed by a number of researchers. Bellary [9] used several Kriging variants along with a response surface approximation function to optimize the performance of a turbomachinery system. Leusink [10] used genetic algorithm and surrogate model based on CFD to design helicopter rotor blade with multi-fidelity optimization.

The Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) [11] is among the most prevalent algorithms used in optimization owing to its high level of scalability and capacity in handling large-scale and complex optimization problems with multiple decision variables and objectives. Studies have been conducted to incorporate NSGA-II in optimization. Ariyarat used NSGA-II is used in airfoil design optimization [12] and later in optimization of helicopter rotor blade design [13]. Zhou et al. [14] applied NSGA-II with multi-fidelity surrogate model to solve computationally expensive problems. Phiboon [15] also employed NSGA-II for multi-fidelity multi-objective airfoil design for fixed-wing UAVs. In order to ensure applicability and validity of the mechanical properties of the optimal composite, a standardized tensile test must be performed to precisely obtain the tensile properties of the material specimens. Among the standardized tests available, the test designated

Table 1

The mechanical properties of Onyx as composite based [20].

Properties	Test (ASTM)	Onyx
Tensile modulus (GPa)	D638	2.4
Tensile stress at Yield (MPa)	D638	40
Tensile stress at Break (MPa)	D638	37
Tensile strain at Break (%)	D638	25
Flexural strength (MPa)	D790	71
Flexural modulus (GPa)	D790	3.6
Izod impact notch (J/m)	D256 10A	330
Density (g/cubic meter)	-	1.2

Table 2

The mechanical properties of Carbon as continuous fiber [20].

Properties	Test (ASTM)	Carbon
Tensile strength (MPa)	D3039	800
Tensile modulus (GPa)	D3039	60
Tensile strain at Break (%)	D3039	1.5
Flexural strength (MPa)	D790	540
Flexural modulus (GPa)	D790	51
Flexural strain at break (%)	D790	1.2
Compressive strength (MPa)	D6641	62
Compressive Modulus (GPa)	D6641	0.7
Compressive strain at break (%)	D6641	105
Izod impact notch (J/m)	D256 10A	960
Density (g/cubic meter)	-	1.4

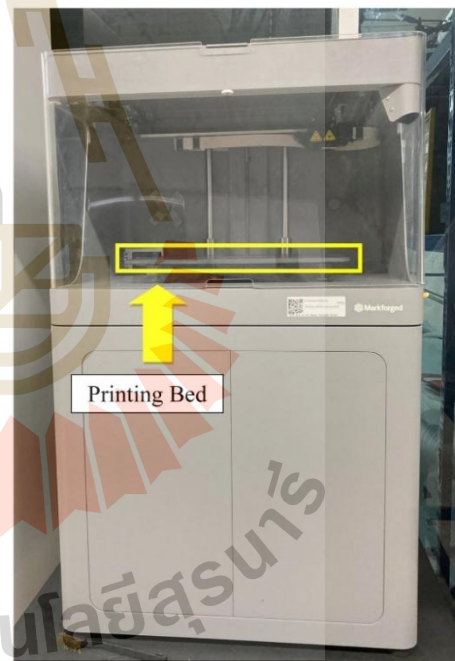


Fig. 1. Markforged X7 3D printer printing specimens.

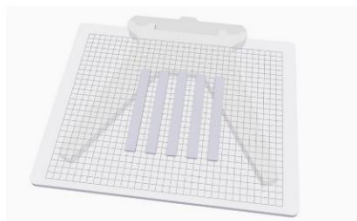


Fig. 2. Visualization of laying specimen on Markforged X7 printing bed.

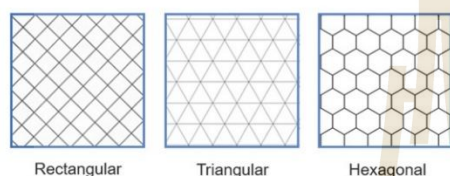


Fig. 3. The fill pattern example: (a) Rectangular pattern, (b) Triangular pattern, and (c) Hexagonal pattern.

by the American Society of Testing and Materials (ASTM) offers a systematic and easily repeatable testing procedure and hence is commonly used in research community. In Velmurugan experiment [16] the ASTM D638 has chosen to determine the tensile properties of reinforced and non-reinforced plastics, whereas in the 3D printed composite researches [3] and [5] the ASTM D3039 standard [17] for polymer composite is employed.

In this study, a pioneer method based on multi-objective optimization is proposed to determine the optimal 3D printing configuration of Onyx/Carbon fiber composite. The integration of the Kriging surrogate model and the NSGA-II optimization algorithm, aimed at optimizing both tensile strength and modulus of elasticity is performed. This combination has never been explored before in the field of composite material 3D printing design.

2. Multi-objective optimization

2.1. Specimen preparation and testing

2.1.1. Material

A composite material is a material consisting of 2 compositions referred to as Matrix and Reinforcement. In this study, Onyx, the fusion of engineering nylon and chopped carbon fibers, is selected as a matrix while Carbon fiber is used as a reinforcement. The mechanical properties of Onyx and Carbon, from the datasheet provided by Markforged [18], are shown in Tables 1 and 2, respectively. The combination of strength and lightweight of the two materials is the reason for the material option used in this study.

2.1.2. Printer specification

The experiment was conducted based on the capabilities of the Markforged X7. The composite material 3D printer is designed to meet the demand of using continuous fiber to reinforce the part of matrix as well as composite material whereas the model could be openly fabricated by 3D printing under the constraint of model dimension. Markforged X7 features printing bed which has the building volume of $330 \times 270 \times 200$ millimeter as shown in Fig. 1. Along with this build volume, it is capable of printing 5 specimens per one printing order at the same

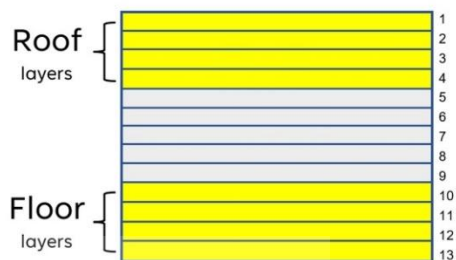


Fig. 4. Example of specimens has 4 roof layers, 4 floor layers and a total of 13 layers.

time as shown in Fig. 2.

2.1.3. Printing configuration

To investigate the effects of the matrix infill density and the number of concentric fiber rings of the reinforcement on the mechanical properties of the resulting composite, the printing configurations are controlled by adjusting the following settings: infill settings and reinforcement settings.

2.1.3.1. Infill settings. The matrix infill setting comprises of selections of infill pattern, infill density, roof & floor layers, and wall layers. Fig. 3 shows different infill patterns, each of which offers distinct advantages in the resulting specimen. According to the work done by RAMALINGAM [4], it was found that the hexagonal infill pattern possesses decent characteristics in terms of impact load or energy absorption. However, the rectangular pattern provides the widest range option to custom the fill density (0–92 %) when the triangular and the hexagonal pattern can be customized between 18 % and 62 % and 36–72 % respectively. The setting for roof & floor layers refers to the layers of total number of upper and lower matrix layer as depicted in Fig. 4. The wall layer setting refers to the number of solid matrices that are printed along the wall part.

2.1.3.2. Reinforcement settings. The isotropic fiber pattern routes fiber back and forth in a zig-zag manner accurately to simulate the layering found in traditional laminated composites, it can resist the bending force that results in tension load and compression load along the fiber direction which applied the tensile or compression loads in the right direction as shown in Fig. 5 demonstrates how the fiber resists the load in its right direction. The fiber orientation can be described by fiber angle as shown in Figs. 6 and 7. The fiber angle can be manually configured angle for each layer of fiber.

If the isotropic fiber filling option is selected, two concentric fiber rings are formed around the exterior of the specimens by default to ensure smoothly reinforced external surface. Nevertheless, the number of fiber rings can be adjusted to obtain desired reinforcement capability. The isotropic fiber filling option with different numbers of concentric fiber rings is shown in Fig. 8. The printing conditions for both Infill and Reinforcement settings are shown in Table 3.

2.1.4. Tensile testing configurations

In this study, a tensile test is performed to determine tensile properties of the printed composite including stress-strain response, tensile strength, and modulus of elasticity.

2.1.4.1. Shape of specimens and dimensions. It is a common practice to use a rectangular cross section specimen for ASTM D3039 standard test. According to the standard [3], it is advisory that the minimum length of

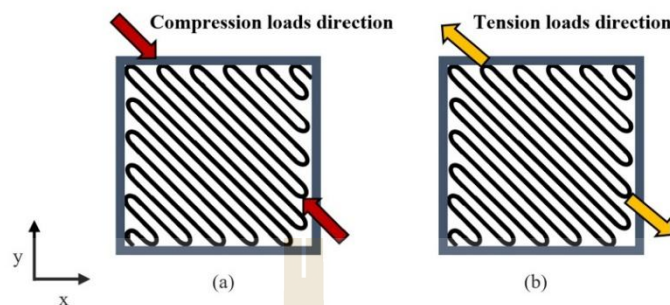


Fig. 5. Bending force in direction which can be resisted by fibers. (a) Compression loads (b) Tension load.

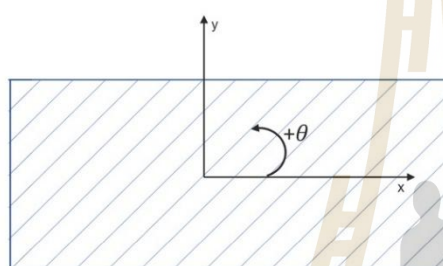


Fig. 6. Isotropic pattern specimens with concentric fiber rings.

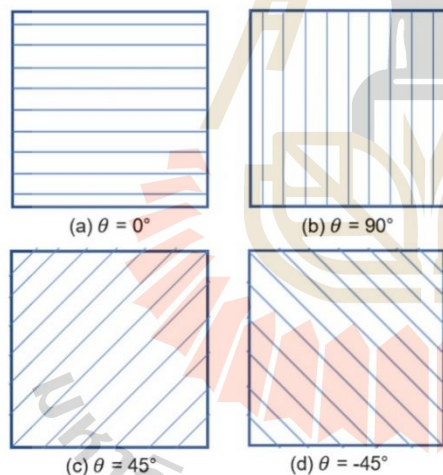


Fig. 7. Isotropic pattern with different fiber orientation.

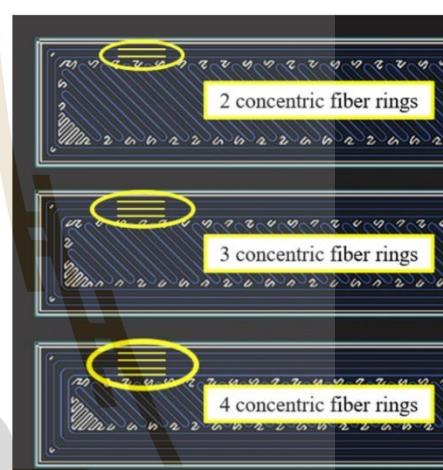


Fig. 8. Isotropic pattern specimens with concentric fiber rings.

Table 3

Printing customization for specimen.

Infill settings	
Fill pattern	Rectangular pattern
Fill density	50 %, 70 %, and 90 %
Roof & Floor layers	4
Wall layers	2
Reinforcement settings	
Total fiber layers	10
Fiber fill type	Isotropic fiber
Concentric fiber ring	2,3, and 4
Fiber angles (Degree)	45, -45

the specimen is computed using the following expression: In all experiments, 150 mm-long, 15 mm-wide specimens with 15-mm gripping length for each side, and 70-mm gauge length is used as shown in Fig. 8.

2.1.4.2. *Tensile testing procedure.* As shown in Fig. 9, all specimens are marked with lines to indicate the gage length and the gripping length.

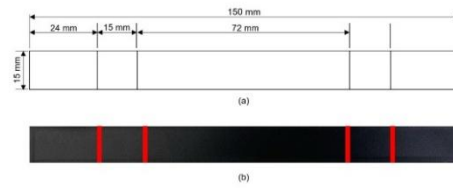


Fig. 9. Standard rectangular tensile specimens: (a) tensile specimen size and (b) tensile specimens.

Table 4

The tensile test design factors.

Factor	Level of factor		
	Low	Medium	High
Infill density (%)	50 %	70 %	90 %
Concentric fiber ring	2	3	4

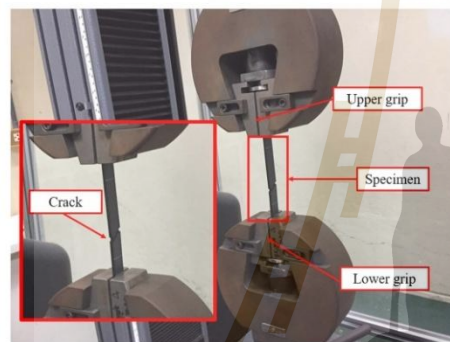


Fig. 10. Tensile testing specimen is tested in the universal testing machine (UTM).

The gage length is used to ensure that the test result is valid while the grip length is used to indicate the clamping distance between the grips. After the specimen is attached to the Universal Testing Machine (UTM) and is firmly gripped, an upward load is applied at the upper while the end of the lower grip is fixed. During the test, the upward load at the upper grip is gradually increased until the specimen breaks. The test is performed using 100 kN Lloyd UTM with a 2 mm/min loading rate.

2.1.5. Design of experiment

The full factorial design is selected to design the tensile testing experiment as the method allows estimation of the main effects as well as the interactions between factors. By testing all possible combinations of factors and levels, the full factorial design provides the relationship between the factors and the design variables. The experimental design was carried out using a general full factorial design with 2 factors and 3 levels, as listed in Table 4. Each of the 9 specimen conditions is subjected to 5 tensile tests, resulting in the total of 45 experiments being conducted. Fig. 10.

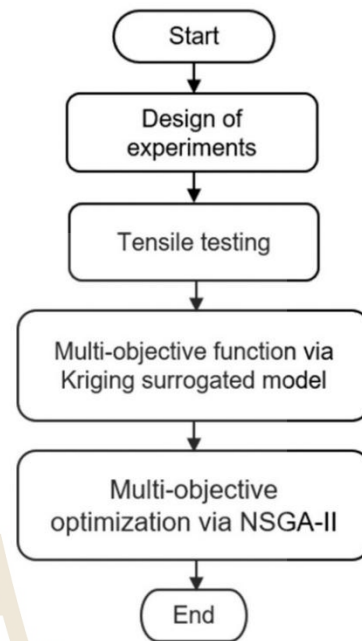


Fig. 11. Operation process of Multi-objective optimization for tensile properties of 3D print Onyx/carbon fiber.

2.2. Multi-objective optimization for tensile properties of 3D print Onyx/carbon fiber

In this study, the multi-objective optimization process involved designing the tensile testing experiments using a full factorial design. A surrogate model is then constructed using kriging model based on the experimental design variables. The NSGA-II algorithm is employed to obtain the Pareto solution and to maximize both the tensile strength and the modulus of elasticity of the specimens. The process of optimization is presented in the Fig. 11.

2.3. Multi-objective function via Kriging surrogate model

Surrogate models are utilized in multi-objective optimization to approximate the values of objective functions and constraints as exact evaluations of these functions are often computationally expensive. Kriging is considered one of the most practical surrogate models to be used in multi-objective optimization since the model offers fast yet accurate approximation of objective functions and constraints. This greatly reduces the computational cost and improves optimization efficiency, leading to improvement in solution quality especially for computationally expensive problems. In order to train the kriging surrogate model, input-output data is necessary. In this work, the input consists of the design variables obtained from experiment whereas the output the response variables, i.e., the objective functions.

The ordinary kriging method predicts the unknown function as shown in following

$$\hat{y}(x) = \mu(x) + \epsilon(x) \quad (1)$$

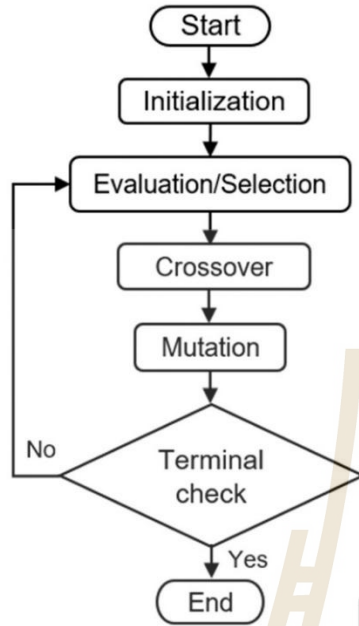


Fig. 12. Operation process of genetic algorithm.

Where $\mu(x)$ denotes a global model and $\epsilon(x)$ denotes a local model.

In Eq. (1), the unknown function can be predicted using an ordinary kriging method as described in [8]. Using Gaussian random function, the sample points x can be interpolated. The correlation between $Z(x_i)$ and $Z(x_j)$ is related to the distance between the two corresponding points, x_i and x_j . The distance function between points x_i and x_j is described using the following equation.

$$d(x_i, x_j) = \sum_{k=1}^m \theta^k |x_i^k - x_j^k|^2 \quad (2)$$

where $\theta^k (0 \leq \theta^k \leq \infty)$ is the k^{th} element of the correlation vector parameter, θ . The correlation between points x_i and x_j is defined as

$$\text{Corr}[Z(x_i), Z(x_j)] = \exp[-d(x_i, x_j)] \quad (3)$$

The kriging prediction can be described as follows

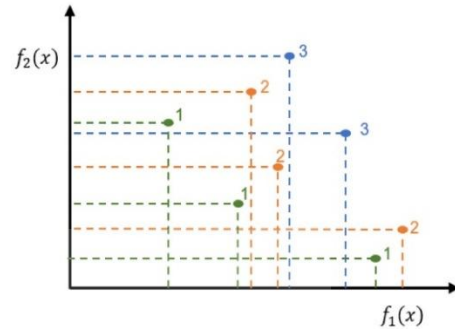
$$\hat{y}(x) = \mu(x) + r^T R^{-1} (F - \mu) \quad (4)$$

where $Z(x_i)$ represents a local deviation from the global model [19], $F = [f(x_1), f(x_2), f(x_3), \dots, f(x_n)]^T$ is the value of the evaluated function value at $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, R denotes the $n \times n$ matrix in which the (i, j) entry is $\text{Corr}[Z(x_i), Z(x_j)]$, n is the number of sample points, and r is the vector in which the i^{th} element is

$$r_i(x) = \text{Corr}[Z(x), Z(x_i)] \quad (5)$$

In the original kriging model, it is assumed that $\mu(x)$ is constant, and the estimate for $\mu(x)$, denoted as $\bar{\mu}$, is given by

$$\bar{\mu} = [\mu(x), \mu(x), \mu(x), \dots, \mu(x)] \quad (6)$$

Fig. 13. Ranking by NSGA-II (Minimization f_1 and f_2).

It is defined as

$$\mu(x) = \frac{1^T R^{-1} F}{1^T R^{-1} 1} \quad (7)$$

The parameter, θ , in the kriging model can be determined using maximum likelihood estimation (MLE) given by the following equation

$$\ln(\mu, \sigma^2, \theta) = -\frac{n}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{1}{2} \ln(|R|) \quad (8)$$

Maximum Likelihood Estimation (MLE) is an m-dimensional nonlinear optimization problem without any constraints, which can be solved using a genetic algorithm (GA) as proposed by Goldberg and Holland [20]. For a given θ , the variance σ^2 can be calculated from

$$\sigma^2 = \frac{(F - \bar{\mu})^T R^{-1} (F - \bar{\mu})}{n} \quad (9)$$

The mean squared error, $s^2(x)$ at point x of this function can be calculated using the following equation

$$s^2(x) = \sigma \left[1 - r^T R^{-1} r + \frac{(1 - 1^T R^{-1} r)^2}{1^T R^{-1} 1} \right] \quad (10)$$

where 1 denotes an n -dimensional unit vector.

2.4. Multi-objective optimization via non-dominated sorting genetic algorithm II

NSGA-II is a powerful and widely used algorithm for multi-objective optimization that has several key advantages. It handles multiple conflicting objectives by generating a set of non-dominated solutions and maintains diversity among solutions using a crowding distance measure. NSGA-II can also handle problems with constraints is capable of handling large-scale problems. Additionally, it is a robust algorithm that quickly converges to the Pareto front. These features make NSGA-II a versatile and effective algorithm for solving a wide range of optimization problems.

The ordinary genetic algorithm (GA) is a searching algorithm that uses the genetic operators such as the selection, crossover and mutation. The simple genetic algorithm flowchart is shown in Fig. 12.

The Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) is an improved version of NSGA and is widely employed in solving multi-objective problems. NSGA-II is represented by nondominated points and crowding distance sorting. Elitism is used to select the individuals for the next generation, and the new generation is filled sequentially with each front until the population size is increased, as depicted in Fig. 13.

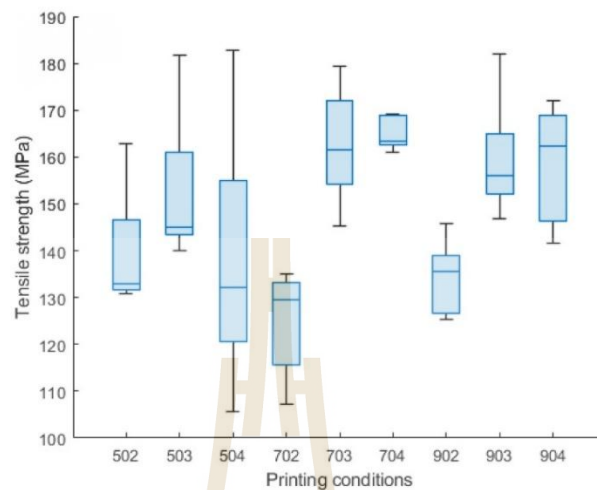


Fig. 14. Results of Tensile strength from various 3D Onyx/carbon fiber printing conditions.

In this work, The NSGA-II is selected to find the pareto solution to maximize the tensile strength and modulus of elasticity of the specimens.

3. Design problems for multi-objective optimization

The 2 objectives of the optimization problem are to maximize the value of tensile strength as well as the modulus of elasticity. The optimization problem can be expressed as.

Maximize: Tensile strength.

Maximize: Modulus of elasticity.

The 2 parameters in this optimization problem are the percentage of Onyx infill density and the number of concentric fiber rings. Each of the parameters has 3 levels for optimization as given below:

Infill density: 50 %, 70 % and 90 %.

Concentric fiber ring: 2, 3 and 4.

The design space is defined by the percent infill represented as continuous data with the upper and the lower bounds of 90 % and 50 %,

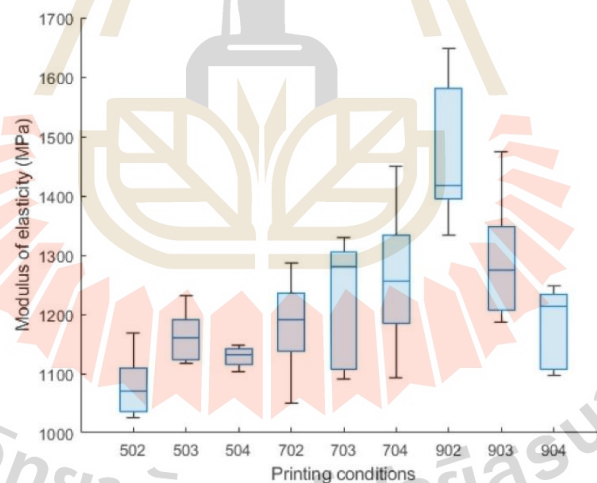


Fig. 15. Results of Modulus of elasticity from various 3D Onyx/carbon fiber printing conditions.

Table 5
Analysis of variance of tensile strength of specimens.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	8562.4	1070.3	4.94	0.000
Linear	4	5856.4	1464.1	6.76	0.000
Infill density	2	366.7	183.3	0.85	0.437
Concentric Fiber ring	2	5489.8	2744.9	12.67	0.000
2 Way Interactions	4	2706	676.5	3.12	0.026
Infill density*Concentric fiber ring	4	2706	676.5	3.12	0.026
Error	36	7800.1	216.7		
Total	44	16362.5			

Table 6
Analysis of variance of Modulus of elasticity of specimens.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	509404	63676	7.18	0.000
Linear	4	265557	66389	7.48	0.000
Density	2	250034	125017	14.09	0.000
Concentric Fiber ring	2	15523	7762	0.87	0.426
2 Way Interactions	4	243847	60962	6.87	0.000
Infill density*Concentric fiber ring	4	243847	60962	6.87	0.000
Error	36	319482	8875		
Total	44	828887			

respectively. The quantity of concentric fiber ring is represented as discrete data with the upper and the lower bounds of 4 rings and 2 rings, respectively. The surrogate model is then constructed through the Kriging method.

4. Result and discussion

4.1. Tensile properties of onyx/carbon fiber composite

The printed specimens are tested for tensile properties as designated by ASTM D3039. Each specimen is named using a 3-digit number. The first 2 digits refer to the percent infill and the last digit refer to the number of concentric fiber rings. The results of the tensile tests indicate that the tensile strength of the composite increases with the number of concentric fiber rings. A similar trend is observed for the modulus of elasticity, which also increases with the infill density. However, at the infill density of 90 %, the result shows that a smaller quantity of concentric fiber rings results in a higher value of the modulus of elasticity. The maximum values of tensile strength and modulus of elasticity are obtained by the optimum proportion of matrix together with the optimum quantity of concentric fiber rings. The maximum tensile strength is obtained with 70 % infill (Matrix density). While the tensile strength at 90 % infill is less than the value at 70 % infill as noted from Fig. 14, the observation is likely due to large experiment variance. For the modulus of elasticity, the highest value is attained at 90 % infill with 2 concentric fiber rings as observed from Fig. 15. The higher modulus of elasticity indicates that the 90 % infill specimen has a superior strain-to-elongation ratio compared to other specimens.

The results obtained from the experiment show that both percent infill density and the number of concentric fiber rings individually affects the tensile strength and the modulus of elasticity. Fig. 14 shows that the tensile strength value is increased with the trend of increasing the number of concentric fiber rings. The tensile strength being increased is due to the increasing of the volume fraction of the reinforcement fibers that has more value tensile strength than Onyx according to datasheet in Tables 1 and 2.

Additionally, the modulus of elasticity value increases with percent of infill density as shown in Fig. 15. As infill density increases, the

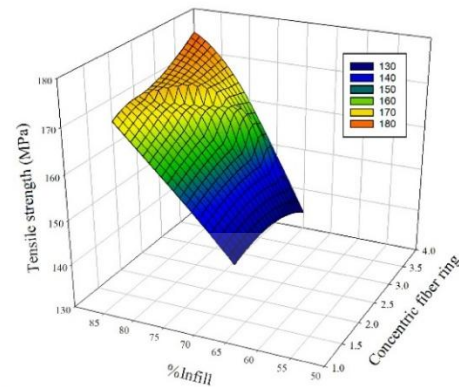


Fig. 16. Effect of parameters to Tensile strength of the optimal specimens.

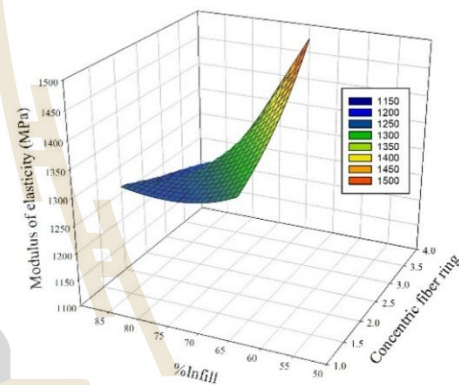


Fig. 17. Effect of parameters to Modulus of elasticity of the optimal specimens.

material filaments are more closely packed together, resulting in a more rigid structure. Moreover, the greater density reduces the presence of gaps within a specimen, affecting the increased stiffness of the specimen.

The results of the tensile strength and the modulus of elasticity from the experiment, considered by the analysis of variance at the 0.05 level of significance, are shown in Tables 5 and 6, respectively. For the Tensile strength analysis from Table 5, It found that the value of P-value for the analysis of infill density was found to be 0.437 and it is greater than alpha level. However, the analysis for two-way interaction, P-value was found to be 0.026 with the F-value of 3.12, indicating that the interaction of the infill density and the number of concentric fiber ring has a significant impact on the tensile strength of the specimens. Despite the fact that the null hypothesis for individual factors was not rejected by the statistical analysis, the statistical significance of interaction of two factors is worth a mention. Similar to the analysis of variance of the Modulus of elasticity from Table 6, it is also found the P-value for the analysis of the number of concentric fiber rings to be 0.426 whereas all others P-value were found to be zero including the two-way interaction of the infill density and the number of concentric fiber rings. The results suggest that the interaction of these two factors is significantly

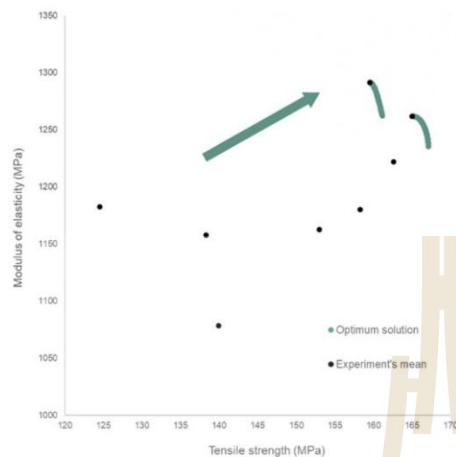


Fig. 18. Pareto frontier and optimal direction.

influenced by the modulus of elasticity.

In summary, while the analysis of variance does not provide the conclusive evidence against the null hypothesis for individual factor, the interaction between the infill density and the number of concentric fiber rings appeared to have a significant impact on both the tensile strength and the modulus of elasticity.

4.2. Multi-objective function via Kriging

The influence of parameters (Percent infill and number of concentric fiber rings) on the tensile strength of the solutions and on the modulus of elasticity of the solution constructed via Kriging surrogate model are represented by the three-dimensional surfaces as shown in Figs. 16 and 17, respectively. Since both infill density and concentric fiber ring affect the tensile strength and modulus of elasticity individually, a multi-objective optimization design technique was applied in order to find the optimum configurations.

4.3. Optimization results via NSGA-II

The results of multi-objective optimization are shown as pareto frontier in Fig. 18. The relationship of the design variables (parameters) and the objective functions are shown with the Parallel Coordinate Plot in Fig. 19. It is observed that the maximum tensile strength is achieved when the specimens contain 3–4 concentric fiber rings as demonstrated with red lines from Fig. 19 that the tensile strength of the optimized data are maximized around 180 MPa when the specimens contain 3–4 concentric fiber rings. Additionally, it is found that the maximum modulus of elasticity is achieved when the specimens infill density is 90 % as demonstrated with the green lines in Fig. 19. Further increase in the percent infill does not lead to improvement in modulus of elasticity due to a higher volume of onyx.

4.4. The reliability of optimization

The reliability of the multi-objective optimization is evaluated by cross validation method. Fig. 19 shows the tensile strength result with the R-Square value of 0.95716. The plot of the modulus of elasticity is given in Fig. 20 with the R-Square value of 0.90289 indicating that the data is less distributed compared to the case of the tensile strength. Fig. 21.

5. Conclusions

This study presents the optimum solution of Onyx/Carbon fiber 3D composite material printing condition obtained from Multi-objective single fidelity optimization using NSGA-II algorithm and kriging surrogate model. The design variables of the optimization are the percent infill (matrix density) and the quantity of concentric fiber rings. The objectives of the optimization are to maximize tensile strength and modulus of elasticity. The specimens were manufactured with 3D composite material printer and were tested with the procedure designated by ASTM D3039 standards. The tested results are used in the optimization procedure as well as to provide the optimum solution represented as the pareto frontier with the optimal direction. The PCP plot that provides the information of optimum proportion between the percent infill and the quantity of concentric fiber ring is also presented. Using previously described methodology, it is observed that

- an increase in the number of concentric fiber rings led to a corresponding increase in the material tensile strength.

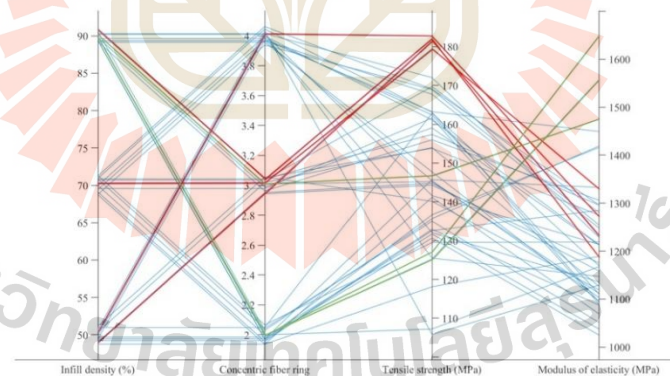


Fig. 19. The Parallel Coordinate Plot of non-dominated solution.

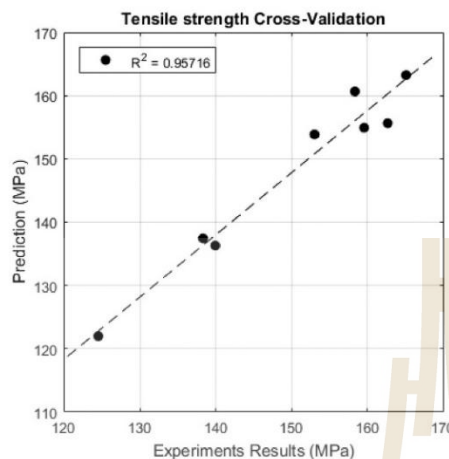


Fig. 20. Tensile strength cross validation.

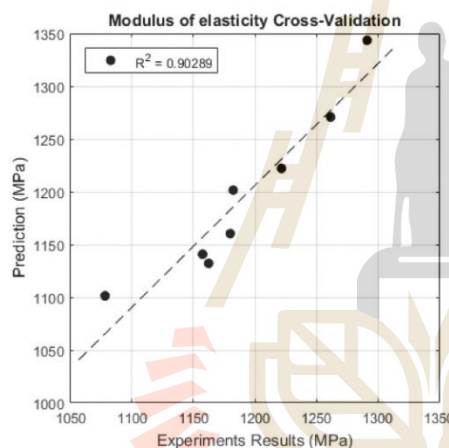


Fig. 21. Modulus of elasticity cross validation.

- The modulus of elasticity increases with both the number of concentric rings as well as the infill density. However, when the infill density is 90 %, a lower quantity of concentric fiber rings leads to a higher modulus of elasticity value.
- The maximum tensile strength is attained when the number of concentric fiber rings is 3 and the percent infill is in the range of 86–90.
- The maximum modulus of elasticity is reached when the number of concentric fiber rings is 4 and the infill density is between 70 % and 75 %.

- The R-Square values of cross validation between the results from experiment and the prediction model of tensile strength and modulus of elasticity are 0.95716 and 0.90289, respectively.

Declaration of Competing Interest

The authors declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests: Sujin Bureerat reports financial support was provided by National Research Council of Thailand.

Data availability

No data was used for the research described in the article.

Acknowledgments

The authors are grateful for the support from the National Research Council of Thailand (NRCT), Grant No. N42A650549.

References

- [1] L. Setlak, R. Kowalik, T. Lusiak, Practical use of composite materials used in military aircraft, *Materials* 14 (17) (2021) 4812.
- [2] S. Suchat, A. Launa, A. Chutikham, S. Hizioglu, Some properties of composite drone blades made from nanosilica added epoxidized natural rubber, *Polymers* 12 (6) (2020) 1293.
- [3] L. Li, W. Liu, L. Sun, Mechanical characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites, *Compos. Sci. Technol.* 227 (2022), 109618.
- [4] P. Serhu Ramalingam, et al., Effect of 3D printing process parameters on the impact strength of onyx-Glass fiber reinforced composites, *Mater. Today: Proc.* 45 (2021) 6154–6159.
- [5] Suneel, Seyed Hamid Reza, et al. Draft: Mechanical Properties of 3D Printed Fiber Reinforced Thermoplastic. In: Proceedings of the ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2019, Salt Lake City, UT, USA, 2019, p. 8–14.
- [6] S. Chen, C.F.N. Cowan, P.M. Grant, Orthogonal least squares learning algorithm for radial, *IEEE Trans. Neural Netw.* 2 (2) (1991) 303.
- [7] A.I. Khuri, S. Mukhopadhyay, Response surface methodology, *Wiley Interdiscip. Rev.: Comput. Stat.* 2 (2) (2010) 128–149.
- [8] G. Matheron, Principles of geostatistics, *Econ. Geol.* 58 (8) (1963) 1246–1266.
- [9] S.A.I. Bellary, A. Samad, I. Conckuyt, T. Dhaene, A comparative study of kriging variants for the optimization of a turbomachinery system, *Eng. Comput.* 32 (2016) 49–59.
- [10] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T.A.M.T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Trans. Evolut. Comput.* 6 (2) (2002) 182–197.
- [11] D. Lessink, D. Alfano, P. Cinnella, Multi-fidelity optimization strategy for the industrial aerodynamic design of helicopter rotor blades, *Aerosp. Sci. Technol.* 42 (2015) 136–147.
- [12] A. Ariyarat, M. Kanazaki, Multi-modal distribution crossover method based on two crossing segments bounded by selected parents applied to multi-objective design optimization, *J. Mech. Sci. Technol.* 29 (2015) 1443–1448.
- [13] A. Ariyarat, M. Sugiura, Y. Tanabe, M. Kanazaki, Hybrid surrogate-model-based multi fidelity efficient global optimization applied to helicopter blade design, *Eng. Optim.* 50 (6) (2018) 1016–1040.
- [14] Q. Zhou, J. Wu, T. Xue, P. Jin, A two-stage adaptive multi-fidelity surrogate model-assisted multi-objective genetic algorithm for computationally expensive problems, *Eng. Comput.* 37 (2021) 623–639.
- [15] T. Phiboon, K. Khankua, N. Petcharat, N. Phoksombat, M. Kanazaki, Y. Kishi, A. Ariyarat, Experiment and computation multi-fidelity multi objective airfoil design optimization of fixed wing UAV, *J. Mech. Sci. Technol.* 35 (9) (2021) 4065–4072.
- [16] G. Velumuran, D. Vadivel, R. Aravind, S.P. Vengatesan, A. Mathiaszhagan, R. Mohamed Rijuvan, Tensile test analysis of natural fiber reinforced composite, *Int. J. Mech. Ind. Eng.* 2 (2) (2012) 56–60.
- [17] ASTM COMMITTEE D.30 ON COMPOSITE MATERIALS, Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, ASTM international, 2008.
- [18] Markforged. (2022). Onyx and Carbon Fiber Material Datasheets (REV 5.2). Retrieved December 20, 2022, from <https://markforged.com/datasheets/>.
- [19] R. Moore, Geostatistics in hydrology, Kriging, interpolation, Mathematics Department, Macquarie University, Sydney, 1999 (Tech. Rep.).
- [20] L.B. Bolkor, D.E. Goldberg, J.B. Holland, Classifier systems and genetic algorithms, *Artif. Intell.* 40 (1–3) (1989) 235–282.

ประวัติผู้เขียน

นายณัชนันท์ เพชรรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 19 เมษายน พ.ศ.2542 ณ โรงพยาบาลสินแพทย์ รามอินทรา แขวงรามอินทรา เขตคันนายาว กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนเรืองศรีวิทยา ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนปากช่อง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา และในปี พ.ศ. 2560 ได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิศวกรรมอากาศยาน สำเร็จการศึกษาปี พ.ศ. 2563

ปี พ.ศ. 2564 เข้ารับการศึกษาคือในระดับปริญญาโท ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ได้รับการสนับสนุนทุนผู้มีผลการเรียนดีเด่นเป็นระยะเวลา 2 ปี โดยมีหัวข้อการวิจัยเกี่ยวกับ การพิมพ์วัสดุคอมโพสิตแบบสามมิติ การหาค่าเหมาะสมที่สุด และปัญญาประดิษฐ์ ในระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาโท ได้รับมอบหมายให้เป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชา สถิติสำหรับวิศวกร อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับงานวิศวกรรม การโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับงานประยุกต์ทางวิศวกรรม ความรู้เบื้องต้นปัญญาประดิษฐ์ การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการเขียนแบบวิศวกรรม มีโอกาสร่วมทำวิจัยกับคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิ จนได้รับการเผยแพร่ผลงานจำนวนทั้งสิ้น 2 งาน แบ่งเป็น ผลงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 1 ฉบับ และผลงานวิชาการระดับนานาชาติ 1 ฉบับ

Petcharat, N., Lawongkerd, C., Pukaew, R., Saengthong, T., Ariyarat, A., Kasemsri, R., Tanaiutchawoot, N., ... & Sae-tang, W. (2021, December). An Evaluation of Accuracy in Autonomous Parking Application by Using Jetbot Comparing ResNet-18 and AlexNet Model. In 2021 14th ATRANS Annual conference: ATRANS Young researcher's forum 2021 special session (pp.2-8)

Petcharat, N., Wiangkham, A., Pichitkul, A., Tantrairatn, S., Aengchuan, P., Bureerat, S., ... & Ariyarat, A. (2023). The multi-objective optimization of material properties of 3D print onyx/carbon fiber composites via surrogate model. Materials Today Communications, 37, 107362.