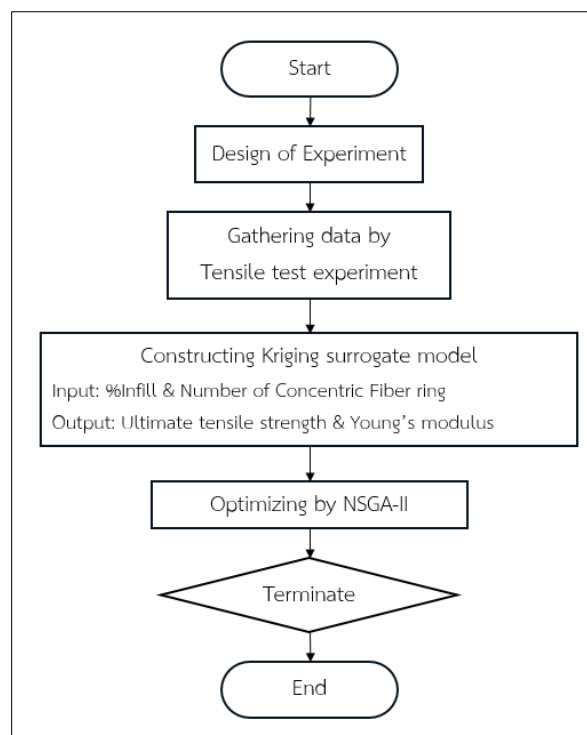


บทที่ 3

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

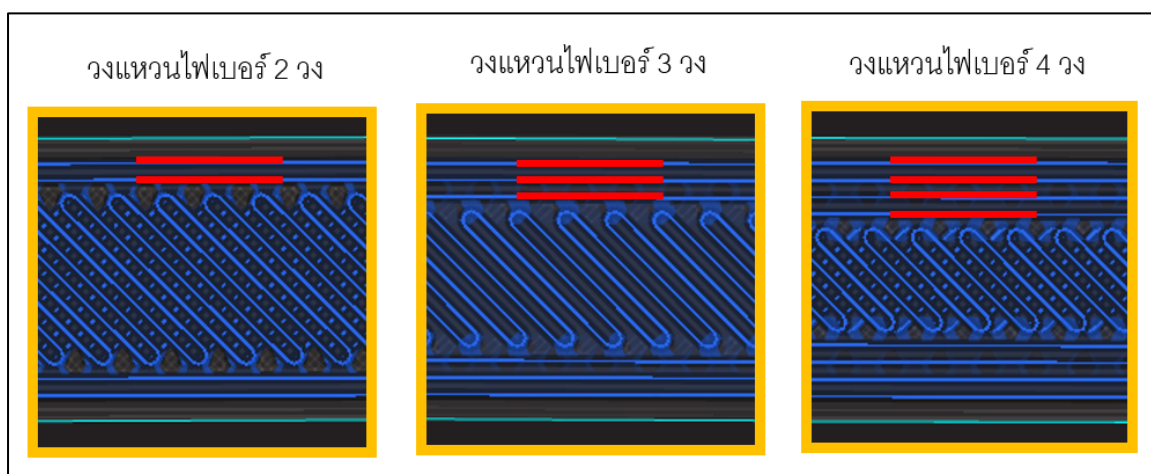
3.2.1 การกำหนดตัวแปรออกแบบ

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 และในส่วนการปรับตั้งค่าในการพิมพ์วัสดุคอมโพสิตและการปรับตั้งค่าการพิมพ์ในส่วนวัสดุรับแรง 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 เนื่องจากในส่วนที่ 1 ของการดำเนินการวิจัยเป็นการทดสอบความแข็งแรงดึง ดังนั้นจึงได้ตั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงและความแข็งแกร่งที่ดีที่สุด 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

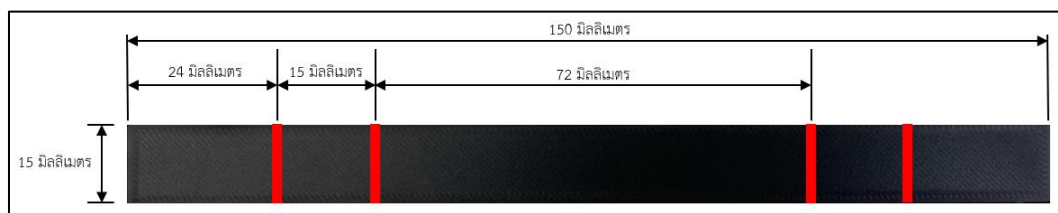
ชื่อชิ้นงาน	เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นการเติม	จำนวนวงแหวนไฟเบอร์ (วง)
502	50%	2
503	70%	3
504	90%	4
702	50%	2
703	70%	3
704	90%	4
902	50%	2
903	70%	3
904	90%	4

3.4 การทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต

การดำเนินการทดสอบความแข็งแรงดึงในการดำเนินงานวิจัยส่วนที่ 1 มีมาตรฐานการทดสอบรองรับในการทดสอบเป็นมาตรฐานการทดสอบ ASTM D3039 ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบแรงดึงที่ใช้กับวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต จึงนำมาตรฐานดังกล่าวมาใช้ในการทดสอบวัสดุคอมโพสิตซึ่งขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

3.4.1 รูปร่างและขนาดของการสร้างชิ้นงานทดสอบ

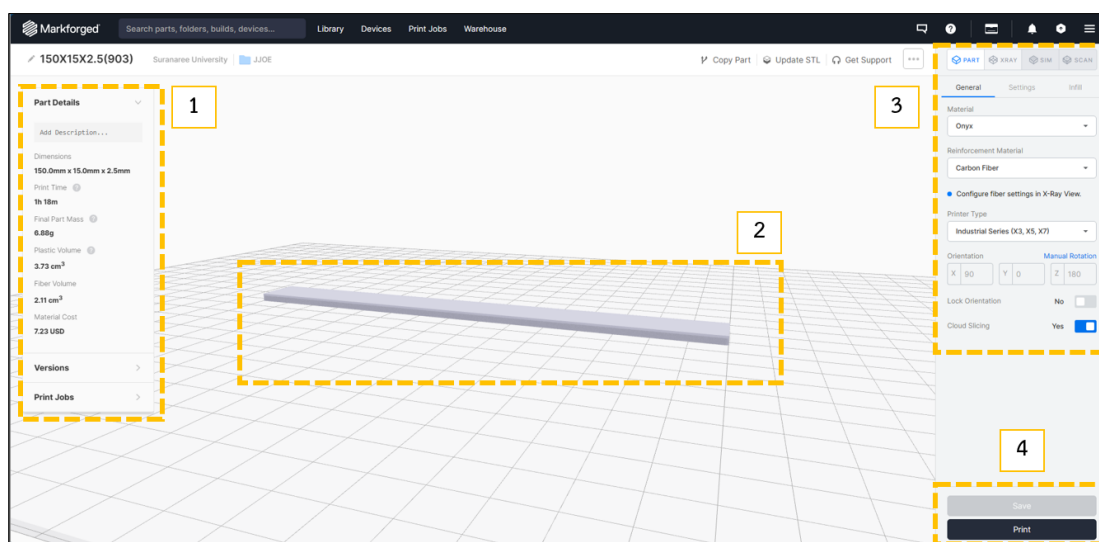
การสร้างชิ้นงานตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงดึงพอลิเมอร์คอมโพสิต มีข้อกำหนดของรูปร่างโดยให้ใช้ชิ้นงานทดสอบเป็นรูปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยกำหนดความหนาของชิ้นงานเพียงพอที่จะมีการพิมพ์เส้นใยของวัสดุเสริมแรงอยู่ภายใน ในการวิจัยนี้เลือกเป็น 2.5 มิลลิเมตร มีการกำหนดของระยะความยาวชิ้นงานขั้นต่ำ (Minimum length) 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

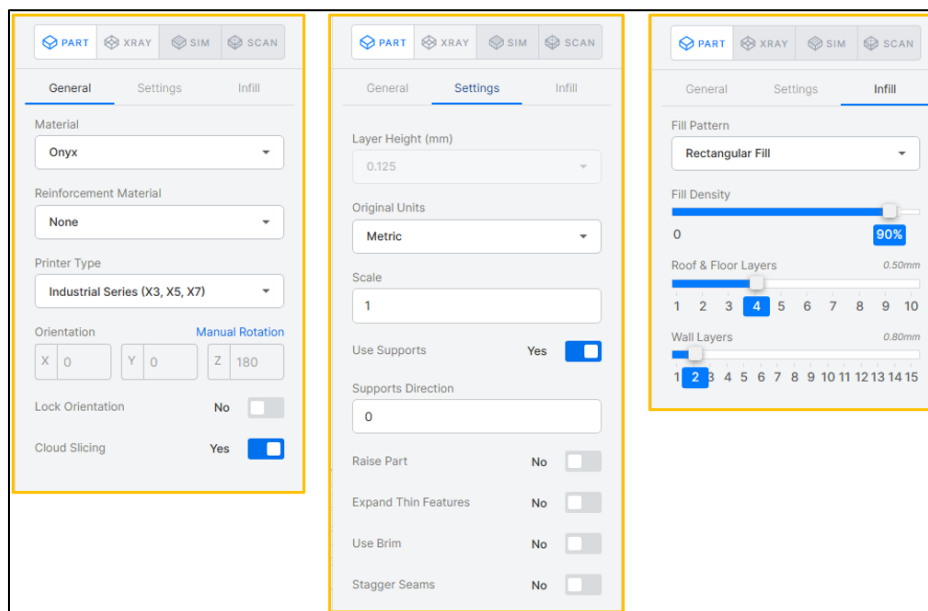
การปรับตั้งค่าในแท็บ XRAY จะทำให้หน้าต่างของโปรแกรมเปลี่ยนไป โดยจะมีการแสดงรายละเอียดของการพิมพ์เส้นใยที่ชัดเจน มีทางเลือกการแสดงผลเออร์ต่าง ๆ ของการพิมพ์ และมีหน้าต่างในการปรับตั้งค่าการพิมพ์เส้นใยปรากฏขึ้นมา โดยแสดงดังรูปที่ 3.6 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

หมายเลข 5 คือส่วนที่สามารถกดเปิด-ปิดเลเยอร์ต่าง ๆ ที่แสดงการวางตัวของเส้นใย ช่วยให้เห็นรายละเอียดการพิมพ์ทั้งเมทริกซ์ และวัสดุเสริมแรง

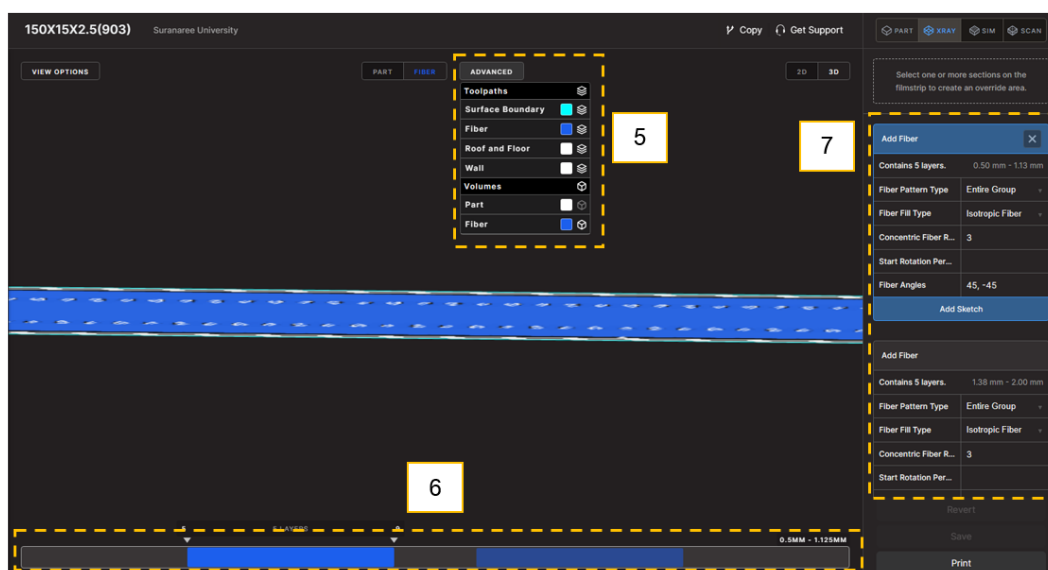
หมายเลข 6 เป็นส่วนการปรับว่าจะพิมพ์วัสดุเสริมแรงในชั้นใดบ้าง โดยซ้ายสุดคือชั้นแรกของการพิมพ์ชิ้นงาน ไปจนถึงขวาสุดของชั้นสุดท้ายของการพิมพ์

หมายเลข 7 เป็น ส่วนของการปรับตั้งค่าเฉพาะในส่วน of เส้นใยวัสดุเสริมแรง 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)

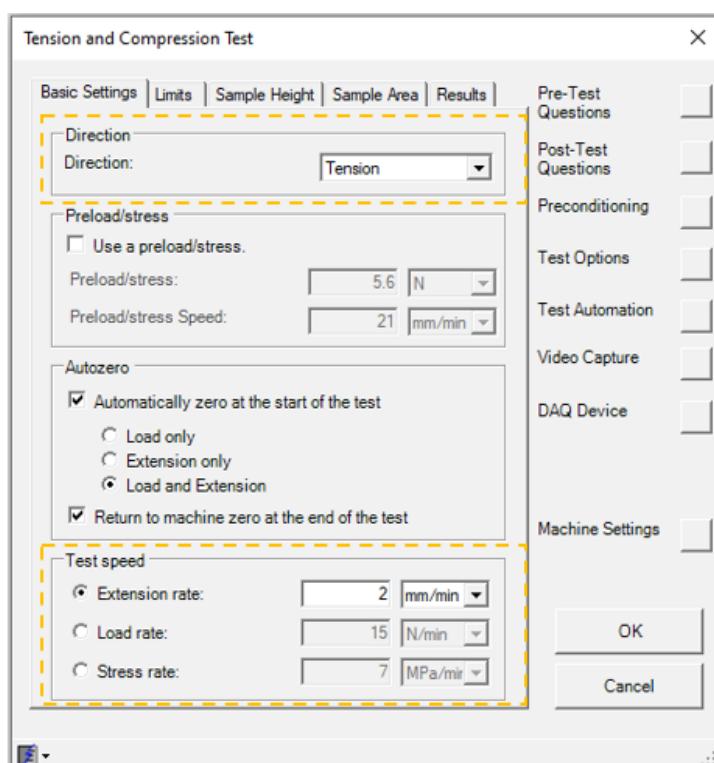
หมายเลข 1 ปากกาจับชิ้นงาน

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