

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัยส่วนที่ 1

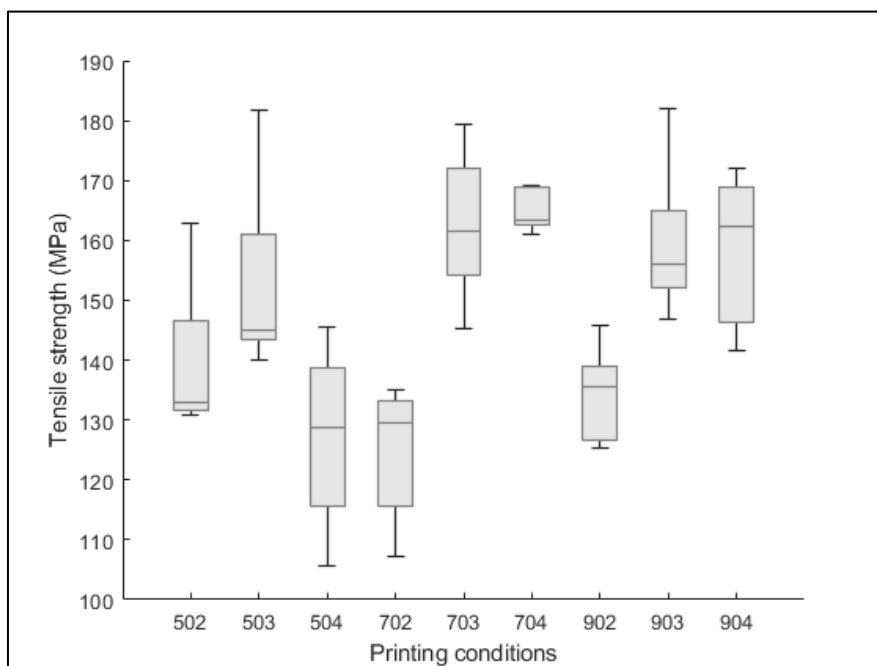
4.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต

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

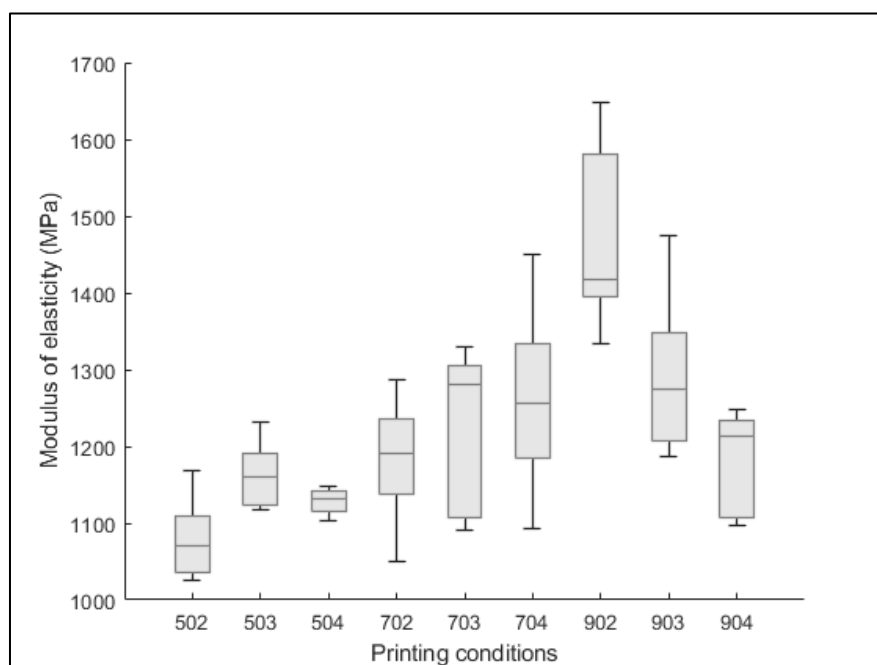
เมื่อนำผลการทดสอบของตัวแปรออกแบบไปหาค่าเฉลี่ยจากการทดสอบทั้ง 5 ครั้ง จะได้ผลสรุปความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม แสดงดังตารางที่ 4.1 และเมื่อนำค่าดังกล่าวมาพล็อตกราฟแท่งเทียนจะได้กราฟแสดงผลการหาความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

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 แต่เมื่อวิเคราะห์ค่าอิทธิพลร่วม P-Value จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 จะมีค่า 0.026 และ 0 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นทั้งสอง (เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นการเติมและจำนวนวงแหวนไฟเบอร์)

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด

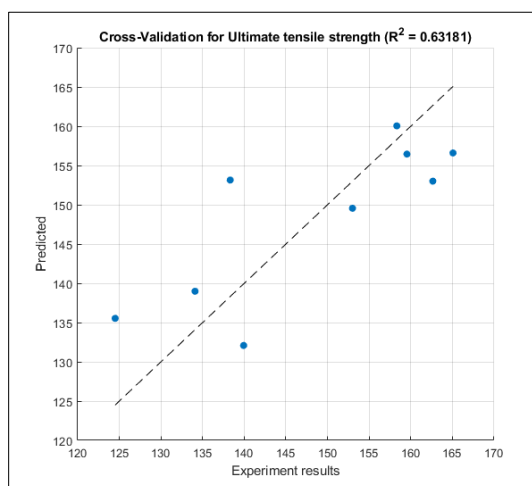
Source	Df	Adj Ss	Adj Ms	F-Value	P-Value
Model	8	8,562.4	1,070.3	4.94	0
Linear	4	5,856.4	1,464.1	6.76	0
Density	2	366.7	183.3	0.85	0.437
Cfr	2	5,489.8	2,744.9	12.67	0
2-Way Interactions	4	2,706	676.5	3.12	0.026
Density*CFR	4	2,706	676.5	3.12	0.026
Error	36	7,800.1	216.7		
Total	44	16,362.5			

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าโมดูลัสการยืดของวัสดุ

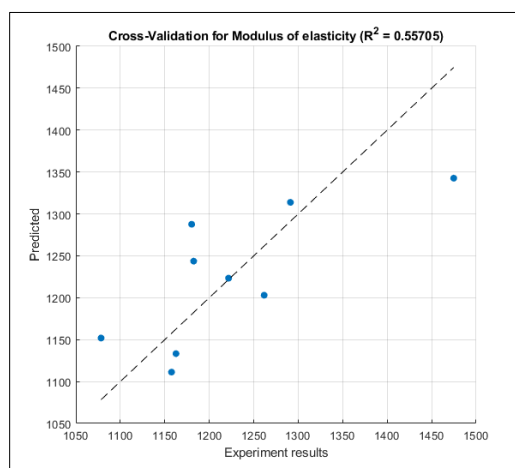
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	509,404	63,676	7.18	0
Linear	4	265,557	66,389	7.48	0
Density	2	250,034	125,017	14.09	0
CFR	2	15,523	7,762	0.87	0.426
2-Way Interactions	4	243,847	60,962	6.87	0
Density*CFR	4	243,847	60,962	6.87	0
Error	36	319,482	8,875		
Total	44	828,887			

4.2 ความน่าเชื่อถือของการสร้างสมการจำลองทดแทน

ฟังก์ชันของสมการจำลองทดแทนข้อมูลผลการทดลอง สามารถตรวจสอบความน่าเชื่อถือได้โดยวิธีการตรวจสอบแบบไขว้ (Cross validation) โดยการนำผลที่ได้จากการทดลองออกบางส่วนแล้วให้ฟังก์ชันทำการทำนายผลเพื่อวัดผลความแม่นยำ โดยในรูปที่ 4.5 และ 4.6 จะเป็นการตรวจสอบแบบไขว้เมื่อเทียบผลการทำนายจากสมการจำลองทดแทนซึ่งสร้างจากวิธีคริกกกับผลการทดสอบความแข็งแรงดึงซึ่งเป็นตัวแปรตาม โดยพบว่าค่า R^2 ของการตรวจสอบเมื่อเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และเมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุอยู่ที่ 0.63181 และ 0.55705 ตามลำดับ

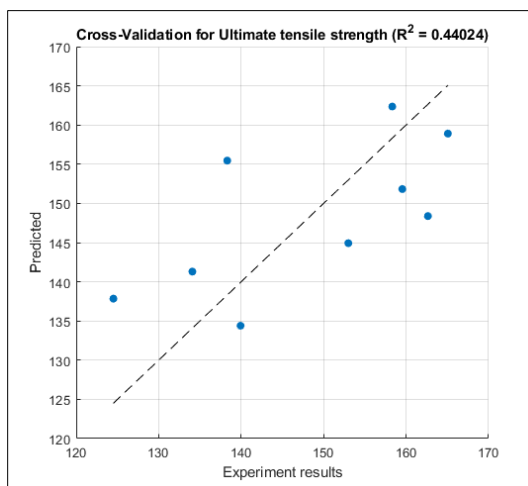


รูปที่ 4.3 ภาพแสดงการตรวจสอบไข้วสมการจำลองคริกกิ้งกับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดจากผลการทดลอง

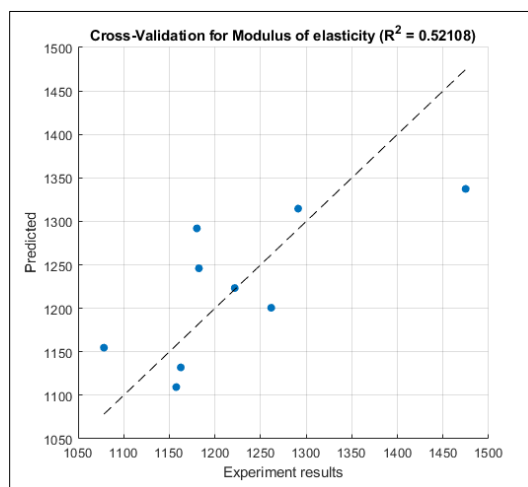


รูปที่ 4.4 ภาพแสดงการตรวจสอบไข้วสมการจำลองคริกกิ้งกับค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุ

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



รูปที่ 4.5 ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองการถดถอยเชิงเส้นกับค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด



รูปที่ 4.6 ภาพแสดงการตรวจสอบไขว้สมการจำลองการถดถอยเชิงเส้นกับค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุ

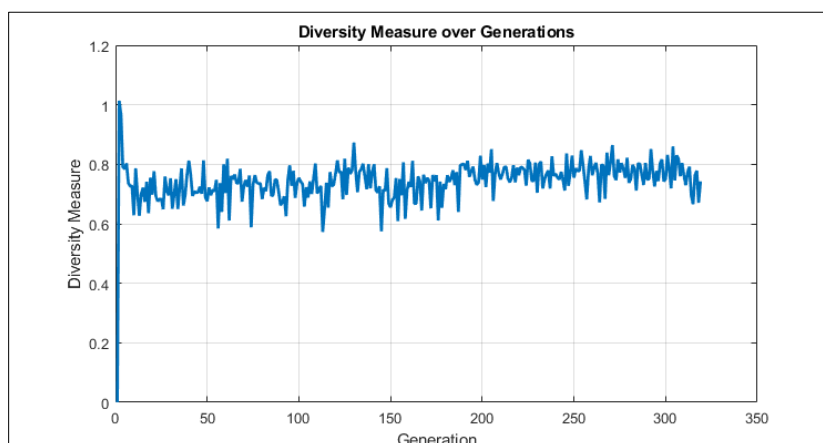
ค่าจากตารางที่ 4.4 แสดงถึงค่าจากการเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพความแม่นยำต่าง ๆ ของสมการจำลองที่ใช้ในการวิจัยส่วนที่ 1 โดยประกอบด้วยเกณฑ์ ได้แก่ เกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE) เกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Mean Square Error: MSE) และ เกณฑ์ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (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 พบว่าที่ช่วงรุ่น 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

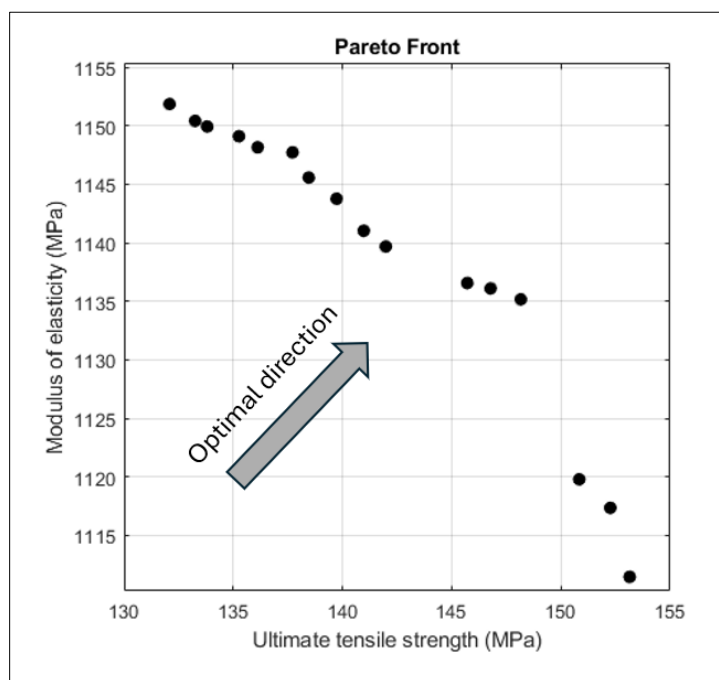
4.4 ผลของการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการพิมพ์ชิ้นงานคอมโพสิตแบบสามมิติ

ผลของการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมการจัดลำดับที่ไม่ครอบงำ แสดงดังรูปที่ 4.8 พร้อมทั้งขอบหน้าพาเรโต โดยทิศทางของคำตอบที่ดีที่สุดที่ถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือทิศทางที่ผลคำตอบมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและค่าโมดูลัสการยืดของวัสดุสูงสุด

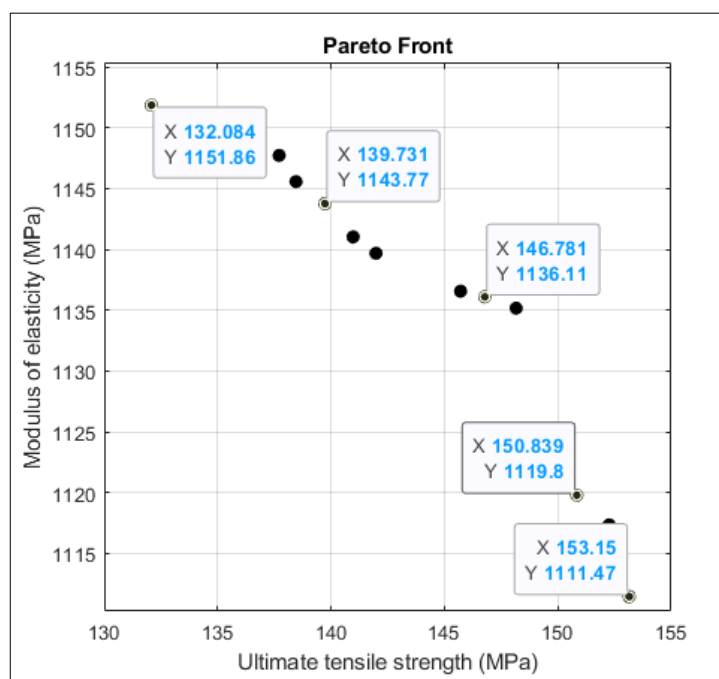
ค่าจากตารางที่ 4.5 คือการแสดงตัวอย่างของผลการทำนายและข้อมูลนำเข้าจากรูป 4.9 แสดงให้เห็นแนวโน้มของผลคำตอบทั้งหมด และตัวแปรการออกแบบการปรับตั้งค่าการพิมพ์ โดยแสดงให้เห็นว่าจากผลคำตอบวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมากที่สุดจะมีจำนวนวงแหวนไฟเบอร์ที่ 3 ถึง 4 วงแหวน และผลคำตอบของค่าโมดูลัสความยืดของวัสดุจากกลุ่มตัวอย่างจากขอบหน้าพาเรโตมีค่าใกล้เคียงกัน 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 ภาพแสดงผลข้อมูลออกของตัวอย่างจากขอบหน้าพาเรโตจากการหาค่าเหมาะสมที่สุด