



วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์
เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการเชื่อมต่อแบบกวน
ของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12

ศุภชัย ชัยณรงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



MULTI-OBJECTIVE VARIABLE NEIGHBORHOOD STRATEGY ADAPTIVE
SEARCH FOR TUNING OPTIMAL PARAMETERS OF SEMI-SOLID METAL
ADC12 ALUMINUM FRICTION STIR WELDING

SUPPACHAI CHAINARONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
MAJOR IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2021
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY

กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จล่วงไปได้ถ้าหากไม่ได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากท่าน ศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ให้คำปรึกษา เป็นอย่างดีตลอดมา นอกจากนี้ท่านยังให้คำแนะนำการเขียนรายงานการวิจัย บทความวิจัย เพื่อนำออกไปเผยแพร่ในงานวารสารทางวิชาการทั้งในประเทศและต่างประเทศ การสร้าง และการใช้วิธีการฮิวริสติกในการแก้ปัญหการประยุกต์วิธีการต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา จึงขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ และให้โอกาสเข้ารับการศึกษาคณิสถานแห่งนี้ ขอขอบพระคุณท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่าของท่านมาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ศุภชัย ชัยณรงค์
ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง : วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการเชื่อมต่อแบบกวนของ อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12

ผู้วิจัย : ศุภชัย ชัยณรงค์

ชื่อปริญญา : ปรัชญาคุณบัณฑิต

สาขาวิชา : วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส

คำสำคัญ : การเชื่อมต่อแบบกวน, หลายวัตถุประสงค์, อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12

งานวิจัยนี้นำเสนออัลกอริทึมใหม่ในการค้นหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของการเชื่อมต่อแบบกวน เพื่อให้ได้ความแข็งแรงดึงและแรงดัดสูงสุดของรอยเชื่อมต่อชนที่ทำมาจากอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12 โดยมีพารามิเตอร์ในการเชื่อมที่สนใจ ได้แก่ ความเร็วรอบเครื่องมือกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม ทิศทางการหมุนของเครื่องมือกวน มุมเอียงของเครื่องมือกวน และรูปทรงของเครื่องมือกวน ซึ่งใช้วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด โดยเลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ D-optimal ในการสร้างแบบจำลองของสมการถดถอยของทั้งสองวัตถุประสงค์ หลังจากนั้นนำวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ใช้หา Pareto front ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และนำวิธีการ TOPSIS ใช้หาพารามิเตอร์ที่มีแนวโน้มดีที่สุด ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ของความต้านทานและแรงดัด ซึ่งมีค่าความแตกต่างจากการทดลองจริงร้อยละ 2.13-10.27 ซึ่งดีกว่าของวิธีทางพันธุกรรม (GA) วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) และวิธีแบบ D-optimal พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ได้รับจากวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ คือ ความเร็วรอบเครื่องมือกวน 1469.44 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 80.35 มิลลิเมตร/นาที มุมเอียงของเครื่องมือกวน 1.01° รูปทรงของเครื่องมือกวน แบบทรงกระบอก และทิศทางการหมุนของเครื่องมือกวนแบบหมุนตามเข็มนาฬิกา

ABSTRACT

TITLE : MULTI-OBJECTIVE VARIABLE NEIGHBORHOOD STRATEGY ADAPTIVE
SEARCH FOR TUNING OPTIMAL PARAMETERS OF SEMI-SOLID METAL
ADC12 ALUMINUM FRICTION STIR WELDING

AUTHOR : SUPPACHAI CHAINARONG

DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY

MAJOR : INDUSTRIAL ENGINEERING

ADVISOR : PROF. RAPEEPAN PHITAKHASO, Ph.D.

KEYWORDS : FRICTION STIR WELDING, MULTI-OBJECTIVE, SSM-ADC12

This research presents a new algorithm for finding the most promising parameters of friction stir welding to maximize the ultimate tensile strength (UTS) and maximum bending strength (MBS) of a butt joint made of the semi-solid metal (SSM) ADC12 aluminum. The relevant welding parameters are rotational speed, welding speed, tool tilt, tool pin profile, and rotation direction. The researcher used the multi-objective variable neighborhood strategy adaptive search (MOVaNSAS) to find the optimal parameters. The D-optimal is used to find the regression model to predict for both objectives subjected to the given range of parameters. Subsequently, MOVaNSAS is used to find the Pareto front of the objective functions, and the Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution (TOPSIS) is used to find the most promising set of parameters. The computational results show that the UTS and MBS of MOVaNSAS generate a 2.13 to 10.27% better solution than those of the genetic algorithm (GA), differential evolution algorithm (DE), and D-optimal solution. The optimal parameters obtained from MOVaNSAS are a stirring tool rotation speed of 1469.44 rpm, a welding speed of 80.35 mm/min, a tool tilt of 1.01°, a tool pin profile as cylindrical, and a clockwise rotational direction.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	4
1.4 สมมติฐานการวิจัย	4
1.5 กรอบแนวคิดของงานวิจัย	5
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.8 คำนิยามศัพท์เฉพาะ	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	7
2.2 ทฤษฎีของการทดสอบผลของการทดลอง	15
2.3 ทฤษฎีของการหาคำตอบ	17
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย	35
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง	37
3.3 การออกแบบการทดลอง	39
3.4 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	40
3.5 ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	41
3.6 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกล	43
3.7 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา	45
3.8 การใช้การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลาย วัตถุประสงค์ (MOVaNSAS) เพื่อค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด	47
3.9 การเปรียบเทียบเมตาฮีริสติกส์	76

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย	
4.1 ผลการทดลอง	78
4.2 การตรวจสอบผลลัพธ์โดยการทดสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับตัวอย่างจริง	88
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	89
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	96
5.2 ข้อเสนอแนะ	97
เอกสารอ้างอิง	98
ประวัติผู้วิจัย	105

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	คำศัพท์เฉพาะและความหมาย	5
2.1	สมบัติทางฟิสิกส์ของอะลูมิเนียม	8
2.2	ส่วนประกอบของเหล็กเครื่องมือ H13	14
2.3	การออกแบบการทดลองแบบ D-Optimal	18
2.4	กำหนดค่าต่าง ๆ ในโปรแกรม D-Optimal	19
2.5	ผลการออกแบบการทดลอง 10 จุด 3 ปัจจัย	19
2.6	รายละเอียดของแต่ละปัจจัย	20
2.7	ส่วนประกอบของสมการถดถอย	20
2.8	ตัวอย่างการออกแบบการทดลองแบบ 10 จุด 3 ปัจจัย	21
2.9	ค่าสเกลของปัจจัย A	21
2.10	ค่า 20 อันดับของการวนซ้ำ	22
2.11	จำนวนของการทดลองรวมของทั้ง 3 ปัจจัย	23
2.12	วิธีการพยากรณ์และพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการทบทวนวรรณกรรม	28
2.13	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแข็งแรงดึงระหว่างวิธีเดียวและแบบผสม	31
3.1	คุณสมบัติทางเคมีของอะลูมิเนียม SSM-ADC12	37
3.2	พารามิเตอร์ในการทดลอง	39
3.3	การออกแบบการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	39
3.4	การสร้างแทรีคของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอย่างง่าย	47
3.5	กระบวนการเปลี่ยนแทรีคของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอย่างง่าย	48
3.6	ค่าความแข็งแรงดึง	49
3.7	ค่าความแข็งแรงดัด	49
3.8	เลขสุ่มของแต่ละแทรีค	50
3.9	วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างของแทรีคที่ 1 รอบย่อยที่ 1	52
3.10	วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างของแทรีคที่ 1 รอบย่อยที่ 2	52
3.11	วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างของแทรีคที่ 1 รอบย่อยที่ 3	52
3.12	ค่าความแข็งแรงดึงของแทรีคที่ 1 ทั้ง 3 รอบย่อย	53
3.13	ค่าความแข็งแรงดัดของแทรีคที่ 1 ทั้ง 3 รอบย่อย	53
3.14	ผลรวมของน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์รอบที่ 1 ของวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง	54
3.15	ค่ามากที่สุดของผลรวมน้ำหนัก	54
3.16	แทรีคที่ 1 และ 5 ถูกอัปเดตในรอบที่ 1 ด้วยวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง	55
3.17	วิธีการเปลี่ยนแทรีคแบบสุ่มของแทรีคที่ 2 รอบย่อยที่ 1	56
3.18	วิธีการเปลี่ยนแทรีคแบบสุ่มของแทรีคที่ 2 รอบย่อยที่ 2	56
3.19	วิธีการเปลี่ยนแทรีคแบบสุ่มของแทรีคที่ 2 รอบย่อยที่ 3	56

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3.20	ค่าความแข็งแรงดึงของแท่งที่ 2 ทั้ง 3 รอบย่อย	57
3.21	ค่าความแข็งแรงดัดของแท่งที่ 2 ทั้ง 3 รอบย่อย	57
3.22	ผลรวมของน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงครอบที่ 1 ของวิธีการเปลี่ยนแท่งแบบสุ่ม	57
3.23	ค่ามากที่สุดของผลรวมน้ำหนัก	58
3.24	แท่งที่ 2 และ 7 ถูกอัปเดตในรอบที่ 1 ด้วยวิธีการเปลี่ยนแท่งแบบสุ่ม	59
3.25	วิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการของแท่งที่ 4 รอบย่อยที่ 1	59
3.26	วิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการของแท่งที่ 4 รอบย่อยที่ 2	60
3.27	วิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการของแท่งที่ 4 รอบย่อยที่ 3	60
3.28	ค่าความแข็งแรงดึงของแท่งที่ 4 ทั้ง 3 รอบย่อย	60
3.29	ค่าความแข็งแรงดัดของแท่งที่ 4 ทั้ง 3 รอบย่อย	61
3.30	ผลรวมของน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงครอบที่ 1 ของวิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการ	61
3.31	ค่ามากที่สุดของผลรวมน้ำหนัก	62
3.32	แท่งที่ 4 และ 6 ถูกอัปเดตในรอบที่ 1 ด้วยวิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการ	62
3.33	แท่งที่ดีที่สุด	63
3.34	วิธีการเปลี่ยนแท่งที่ดีที่สุดของแท่งที่ 3 รอบย่อยที่ 1	64
3.35	แท่งที่ดีที่สุดหลังจากอัปเดตรอบย่อยที่ 1	64
3.36	วิธีการเปลี่ยนแท่งที่ดีที่สุดของแท่งที่ 3 รอบย่อยที่ 2	64
3.37	แท่งที่ดีที่สุดหลังจากอัปเดตรอบย่อยที่ 2	65
3.38	วิธีการเปลี่ยนแท่งที่ดีที่สุดของแท่งที่ 3 รอบย่อยที่ 3	65
3.39	แท่งที่ดีที่สุดหลังจากอัปเดตรอบย่อยที่ 3	65
3.40	ค่าความแข็งแรงดึงของแท่งที่ 3 ทั้ง 3 รอบย่อย	66
3.41	ค่าความแข็งแรงดัดของแท่งที่ 3 ทั้ง 3 รอบย่อย	66
3.42	ผลรวมของน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงครอบที่ 1 ของวิธีการเปลี่ยนแท่งที่ดีที่สุด	67
3.43	ค่ามากที่สุดของผลรวมน้ำหนัก	67
3.44	แท่งที่ 3 ถูกอัปเดตในรอบที่ 1 ด้วยวิธีการเปลี่ยนแท่งที่ดีที่สุด	68
3.45	เลขสุ่มของแต่ละแท่งที่ผ่านการปรับปรุงในรอบที่ 1 ใช้ในรอบที่ 2	68
3.46	ความน่าจะเป็นในการเลือกกล่องมาปรับปรุงรอบที่ 2	69
3.47	ความถี่สะสมของแต่ละวิธีการปรับปรุงหลังจากรอบที่ 1	69
3.48	วิธีการปรับปรุงในแต่ละแท่งของรอบที่ 2	70
3.49	ค่าที่ได้มาจากกราฟพาเรโตในรอบที่ 1	71
3.50	เมทริกซ์การตัดสินใจ	72
3.51	เมทริกซ์การตัดสินใจที่ถ่วงน้ำหนัก	73

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3.52	หาคำตอบของเมตริกซ์ในอุดมคติทางบวก	73
3.53	หาคำตอบของเมตริกซ์ในอุดมคติทางลบ	74
3.54	คำนวณการวัดการแยกสำหรับคำตอบในอุดมคติทางบวก	74
3.55	คำนวณการวัดการแยกสำหรับคำตอบในอุดมคติทางลบ	74
3.56	ความใกล้ชิดสัมพันธ์กับคำตอบในอุดมคติ	75
3.57	ข้อมูลการปรับปรุงของฮิวริสติก	75
4.1	สมบัติทางกลอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12	78
4.2	การออกแบบการทดลองแบบ D-Optimal	79
4.3	ANOVA ของค่าความแข็งแรงดึง	80
4.4	ANOVA ของค่าความแข็งแรงดัด	81
4.5	อัตราส่วนพาเรโตของวิธีการต่าง ๆ	85
4.6	เปรียบเทียบค่าของตัวแปรในแต่ละวิธีการ	87
4.7	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลลัพธ์ของ MOVaNSAS	89

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	การแตกตัวของกิ่งหรือแขนของเดนไดรต์ทำให้มีอนุภาคหรือเกรนเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ	8
2.2	เส้นทางการเติบโต (growth) และการ coarsening ของอนุภาคของแข็ง	10
2.3	ขั้นตอนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี Semi-Solid Rheocasting (SSR)	11
2.4	การผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว	12
2.5	การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน	13
2.6	ลักษณะขึ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน	15
2.7	เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ รุ่น NRI-TS501-300	16
3.1	ลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	36
3.2	อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด ADC12	37
3.3	เครื่องกัดอัตโนมัติ	37
3.4	หัวกวน ชนิด AISI H13	38
3.5	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุทดสอบสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	41
3.6	การปรับมุมเอียงของเครื่องมือกวน	42
3.7	กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	42
3.8	ลักษณะการตัดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM	43
3.9	ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8-04	44
3.10	การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง	44
3.11	การทดสอบค่าความแข็งแรงดัด	45
3.12	เข้าหล่อเรือนหุ้มชิ้นงาน	46
3.13	ชิ้นงานการหล่อเรซิง	46
3.14	กราฟพาเรโตในรอบที่ 1	71
3.15	Pseudocode ของการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่า ได้หลายวัตถุประสงค์	76
4.1	ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	80
4.2	เงื่อนไขที่คาดการณ์ของทั้งสองวัตถุประสงค์	82
4.3	Pareto Front ของ GA	83
4.4	Pareto Front ของ DE	84
4.5	Pareto Front ของ MOVaNSAS	84
4.6	ค่าความแข็งแรงดึงในแต่ละวิธี	86
4.7	ค่าความแข็งแรงดัดในแต่ละวิธี	87
4.8	ค่าเปรียบเทียบของแต่ละวิธีของความแข็งแรงดึงและแรงดัด	88
4.9	โครงสร้างทางจุลภาคของสภาวะการเชื่อมด้วยวิธี MOVaNSAS (a และ f) BM, (b และ c) SZ, (e) TMAZ-AS และ (d) TMAZ-RS	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.10	โครงสร้างทางจุลภาคของสภาวะการเชื่อมด้วยวิธี D-optimal (a และ f) BM, (b และ c) SZ, (e) TMAZ-AS และ (d) TMAZ-RS	91
4.11	โครงสร้างทางจุลภาคของสภาวะการเชื่อมด้วยวิธีแบบการทดลอง (a และ f) BM, (b และ c) SZ, (e) TMAZ-AS และ (d) TMAZ-RS	91
4.12	โครงสร้างทางจุลภาค(SEM)ของสภาวะการเชื่อมด้วยวิธี MOVaNSAS (a และ f) BM, (b และ c) SZ, (e) TMAZ-AS และ (d) TMAZ-RS	92
4.13	โครงสร้างทางจุลภาค(SEM)ของสภาวะการเชื่อมด้วยวิธี D-optimal (a และ f) BM, (b และ c) SZ, (e) TMAZ-AS และ (d) TMAZ-RS	92
4.14	โครงสร้างทางจุลภาค(SEM)ของสภาวะการเชื่อมด้วยวิธีแบบการทดลอง (a และ f) BM, (b และ c) SZ, (e) TMAZ-AS และ (d) TMAZ-RS	93
4.15	EDX-ray spectroscopy ชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องมือกวน 1469.44 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 80.35 มิลลิเมตร/นาที มุมเอียงของเครื่องมือกวน 1.01° รูปทรงของเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก และทิศทางการหมุนของเครื่องมือกวนแบบตามเข็มนาฬิกา	94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อะลูมิเนียมมีความสำคัญต่อชิ้นส่วนประกอบในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ต้องการวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูง เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ ทางทะเล และการบิน อุตสาหกรรมเหล่านี้ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมหล่อ (Jirang and Roven, 2010) เนื่องจากความแข็งแรง ความสามารถในการเชื่อม ความสามารถในการแปรรูป ความต้านทานการกัดกร่อน และความสามารถในการขึ้นรูป (Heinz et al., 2000; Miller et al., 2011) ปัจจุบันอะลูมิเนียมหล่อ ADC12 ด้วยวิธีการ Die casting ถูกขึ้นรูปมาเพื่อใช้เป็นชิ้นส่วนยานยนต์ และอากาศยานค่อนข้างมาก แต่โครงสร้างทางโลหะวิทยายังมีจุดด้อยจากการเย็นตัวทำให้เกิดเกรนกิ่งไม้ (dendrite) ที่มีขนาดใหญ่ หลังจากการหล่อส่งผลให้ความแข็งแรงที่ได้ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน การใช้กระบวนการหล่อทิ้งของแข็งเป็นวิธีการที่พัฒนามาเพื่อลดจุดด้อยและความบกพร่องทางโลหะวิทยาในการหล่ออะลูมิเนียม ADC12 ซึ่งเรียกว่า SSM-ADC12 ซึ่งมีจุดเด่นทางโลหะวิทยาที่ดีกว่าอะลูมิเนียมหล่อทั่วไป ดังนั้น อะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็งจึงถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้เป็นชิ้นส่วนประกอบด้วยกระบวนการเชื่อมสำหรับการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

ในกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลายซึ่งใช้อุณหภูมิสูงในการหลอมละลาย และในกระบวนการเชื่อมนี้เป็นกระบวนการเชื่อมที่ยากต่อการเชื่อมต่อวัสดุประเภทอะลูมิเนียม เนื่องจากปัญหาความแตกต่างที่เกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนและจุดหลอมเหลวที่ต่ำของวัสดุอะลูมิเนียมแต่ละชนิด ทำให้รอยเชื่อมเกิดปัญหา ข้อบกพร่อง และคุณสมบัติทางกลลดลง รวมถึงด้านโลหะวิทยา ส่งผลให้ความแข็งแรงต่ำ เกิดการบิดเบี้ยว เกิดการหดตัว และเกิดรูพรุนในแนวเชื่อม (Guo, Hu and Tsai, 2009; Da Silva and Scotti, 2006; Fang and Zhang, 2014) การใช้วิธีการเชื่อมด้วยสถานะของแข็งเป็นการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างด้านโลหะวิทยา และคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน มีการเชื่อมต่อด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมละลาย (Thomas, Johnson and Wiesner, 2003; Thomas and Nicholas, 1997) โดยอาศัยแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวของชิ้นงานและเครื่องมือกวนในการสร้างความร้อนสำหรับการเชื่อมต่อ อีกทั้งการกวนของเครื่องมือกวนส่งผลให้การผสมของเนื้อวัสดุได้ดี (Threadgill et al., 2009; Lakshminarayanan, Malarvizhi and Balasubramanian, 2011; Guo et al., 2014)

จากที่ผ่านมามีงานวิจัยที่หลากหลายในด้านของการนำไปสู่การศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่มีผลกระทบต่อการเชื่อมอะลูมิเนียม โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการควบคุมการกำเนิดความร้อน การเสียดของพลาสติก การไหลของวัสดุ การผสมวัสดุ การเปลี่ยนแปลงของโลหะวิทยา ความแข็งแรง และการลดข้อบกพร่อง ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Hoyos et al., 2021; Giraud et al., 2016; Bisadi et al., 2013; Kadaganchi, Gankidi,

and Gokhale, 2015; Lotfi and Nourouzi, 2014; Khan, Khan and Siddiquee, 2015; Liu et al., 2012; Elangovan and Balasubramanian, 2008; Li et al., 2014; Ilangovan, Boopathy and Balasubramanian, 2015; Ghaffarpour et al., 2013; RajKumar et al., 2014; Kasman and Yenier, 2014) โดยพบว่าพารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมอะลูมิเนียม ประกอบด้วย ความเร็วรอบเครื่องมือกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางปากกวนต่อหัวกวน และรูปทรงของเครื่องมือกวน สิ่งเหล่านี้ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิการเชื่อม ความแข็งแรง และข้อบกพร่องในแนวเชื่อม (Uematsu et al., 2012; Ji et al., 2016; Kesharwani, Panda and Pal, 2014)

อย่างไรก็ตามมีวิธีการที่หลากหลายเพื่อให้การเชื่อมเสียดทานแบบกวน มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยใช้วิธีการหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในการเชื่อมอะลูมิเนียมให้เกิดความเหมาะสม ด้วยวิธีการดังเช่น การออกแบบแฟกทอเรียล (Meengam and Sillapasa, 2020) การออกแบบ Taguchi (Koilaraj et al., 2012) วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Srichok et al., 2020) เป็นต้น ด้วยวิธีการเหล่านี้ทำให้ควบคุมความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า มีพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของแนวเชื่อม คือ ความเร็วรอบเครื่องมือกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม รูปทรงของเครื่องมือกวน และมุมเอียงของเครื่องมือกวน (Kadaganchi, Gankidi and Gokhale, 2015; Mao et al., 2015) อย่างไรก็ตามแรงในแนวแกน และอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางปากกวนต่อหัวกวน มีอิทธิพลต่อการเชื่อมในช่วงเริ่มต้นแต่จะมีผลกระทบลดลงเมื่อหัวกวนเคลื่อนที่ เนื่องจากการเชื่อมในช่วงเริ่มต้นจะเกิดความร้อนสูงและการเปลี่ยนรูปของเนื้อวัสดุเป็นแบบพลาสติก ทำให้เกิดความอ่อนตัว หลังจากนั้นการเสียรูปของเนื้อวัสดุในแนวเชื่อมจากความร้อน จะถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์ความเร็วรอบเครื่องมือกวน และความเร็วในการเดินเชื่อม ซึ่งจากการอ่อนตัวของเนื้อวัสดุในช่วงเริ่มต้นก่อนการเดินเชื่อมทำให้แรงในแนวแกนลดลง (Zimmer et al., 2009) นอกจากนี้พารามิเตอร์ด้านทิศทางการหมุนเครื่องมือกวน ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผสมและเติมเต็มของเนื้อวัสดุทั้งในด้านของ retreating และ ด้านของ advancing

จากที่กล่าวมาเห็นได้ว่าพารามิเตอร์การเชื่อมที่มีอิทธิพลมีหลายพารามิเตอร์ ซึ่งยากต่อการควบคุมความสัมพันธ์เพื่อให้เกิดความเหมาะสม หลากหลายวิธีการในการออกแบบการทดลองเพื่อควบคุมความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในการเชื่อมมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดในด้านของจำนวนการทดลองและความแม่นยำในการทำนาย การออกแบบวิธีการทดลองด้วยวิธีการ D-optimal เป็นหนึ่งในวิธีการที่ใช้ลดจำนวนการทดลองให้น้อยลง แต่ยังให้ความแม่นยำค่อนข้างสูง (Kuram et al., 2013; Jones, Allen-Moyer and Goos, 2020; Ba-Abbad et al., 2013) ด้วยเหตุนี้วิธีการ D-optimal จึงถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อลดจำนวนการทดลองที่มีปัจจัยจำนวนมากในการเชื่อม ถึงแม้ว่าวิธีการ D-optimal จะให้ความแม่นยำในการทำนายความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การเชื่อมได้ดี แต่ความละเอียดในการหาคำตอบนั้นยังมีข้อจำกัดในการทำนายเพื่อให้ได้คำตอบตามเป้าประสงค์ แนวทางในการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจึงมีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองให้แม่นยำมากยิ่งขึ้นไปอีก การใช้วิธีการฮิวริสติกจึงเป็นวิธีการที่ถูกนำมาใช้ในการเพิ่มความแม่นยำให้กับการทำนายผล มีหลากหลายวิธีการทางฮิวริสติกในการพยากรณ์ความสัมพันธ์

ของพารามิเตอร์ให้เกิดความเหมาะสม นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ เช่น การกำหนดเส้นทางการเดินทาง การขนส่ง เกษตรกรรม และกระบวนการผลิต (Theeraviriya, Sirirak and Praseeratasang, 2020; Theeraviriya, Ruamboon and Praseeratasang, 2021; Kusoncum et al., 2021; Khamsing et al., 2012; Jirasirilerd et al., 2020; Pitakaso, Sethanan and Theeraviriya, 2020) จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำวิธีการทางฮิวริสติกมาใช้ในการแก้ปัญหาหลากหลายวิธีการ เช่น การค้นหาเส้นทางใกล้เคียงแบบปรับตัว (ALNS) อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA) วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) การเพิ่มประสิทธิภาพกลุ่มอนุภาค (PSO) การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ (VaNSAS) เป็นต้น วิธีการฮิวริสติกเหล่านี้ประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหาและนำไปสู่การได้คำตอบที่แม่นยำมากขึ้น (Kadaganchi, Gankidi and Gokhale, 2015; Mao et al., 2015; Zimmer et al., 2009; Kuram et al., 2013; Jones, Allen-Moyer and Goos, 2020) โดยเฉพาะอัลกอริทึมของวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ ให้ความแม่นยำที่สูงกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ โดยมีความแม่นยำของคำตอบโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 99.92% (Zimmer et al., 2009; Kuram et al., 2013; Jones, Allen-Moyer and Goos, 2020; Theeraviriya, Sirirak and Praseeratasang, 2020) ตัวอย่างเช่น ปัญหาความสมดุลของสายการประกอบในกระบวนการผลิตและปัญหาการกำหนดเส้นทางสถานที่ในการขนส่งสามารถแก้ไขได้โดยใช้อัลกอริทึมของวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ เพื่อลดเวลาและต้นทุนในการขนส่ง นอกจากนี้ยังได้ใช้วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการเชื่อมต่อเสียดทานแบบกวน เพื่อที่จะหาค่าของแรงดึงสูงสุด อย่างไรก็ตาม กระบวนการของวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ ยังสามารถที่จะทำให้มีประสิทธิภาพในการทำนายผลตอบเพิ่มสูงขึ้นได้อีก โดยเฉพาะในกระบวนการเชื่อมต่อเสียดทานแบบกวนที่ต้องการให้แนวเชื่อมมีคุณสมบัติที่ดีใกล้เคียงกับตัววัสดุเนื้อพื้นมากที่สุดซึ่งถือเป็นประเด็นสำคัญสำหรับการใช้งานแนวเชื่อม การประยุกต์วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ด้วยแนวคิดใช้อัลกอริทึมที่หลากหลายวิธีการเข้าด้วยกัน ซึ่งเรียกว่า การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ (MOVaNSAS) เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12 ซึ่งเป็นวัสดุใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมทางทะเลและยานยนต์ อย่างไรก็ตาม พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเชื่อมต่อเสียดทานแบบกวน ของวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12 ยังไม่พบการศึกษาเพื่อค้นหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งมีขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนแรกเป็นวิธีการออกแบบ D-optimal สำหรับการสร้างการทดลองและการสร้างความสัมพันธ์ให้กับพารามิเตอร์กระบวนการ เพื่อนำข้อมูลเข้าสู่การหาค่าการทำนายผลตอบสนองที่ดีที่สุดด้วยวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ โดยมีผลตอบสนองในด้าน ความแข็งแรงดึง กับความแข็งแรงดัด สำหรับพารามิเตอร์ที่หาความสัมพันธ์ประกอบด้วย ความเร็วรอบเครื่องมือกล ความเร็วในการเดินเชื่อม ทิศทางการหมุนของเครื่องมือกล มุมเอียงของเครื่องมือกล และรูปทรงของเครื่องมือกล นอกจากนี้

แนวเชื่อมที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อให้ได้คุณลักษณะของโครงสร้างทางโลหะวิทยา

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีเมตาฮิวริสติกในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากออกแบบการทดลองด้วยวิธีการ D-Optimal กับวิธีการร่วมระหว่าง D-Optimal กับ การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ในการหาคำตอบ

1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วรอบเครื่องมือกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม ทิศทางการหมุนของเครื่องมือกวน มุมเอียงของเครื่องมือกวน และรูปทรงของเครื่องมือกวน โดยออกแบบการทดลอง สร้างสมการถดถอยด้วยวิธีการ D-Optimal และเปรียบเทียบการหาคำตอบด้วยวิธีการ D-Optimal กับวิธีการร่วมระหว่าง D-Optimal กับ การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ในการหาคำตอบ สำหรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12 โดยมุ่งศึกษาด้วยวัตถุประสงค์ดังนี้

1.3.1 ศึกษาการเชื่อมวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12 ด้วยการเชื่อมต่อแบบต่อชน (Butt Joint) ที่มีความหนาของชิ้นงาน 6 มิลลิเมตร ด้วยผลตอบสนองในด้านความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงดัดของแนวเชื่อม

13.2 ออกแบบการทดลองด้วยวิธีการ D-Optimal เพื่อสร้างสมการถดถอยสำหรับการทำนายผลตอบ

1.3.3 ใช้วิธีการร่วมระหว่าง D-Optimal กับ การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพและปรับปรุงอัลกอริทึมสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ของค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12

1.4 สมมติฐานการวิจัย

ข้อสมมติฐานจะเป็นการวัดประสิทธิภาพในการหาผลลัพธ์คำตอบระหว่างวิธีการ D-Optimal กับ วิธีการร่วมระหว่าง D-Optimal กับ การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ เพื่อหาคำตอบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งคาดว่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายผลตอบได้ดีกว่าวิธีการ D-Optimal เพียงอย่างเดียว

1.5 กรอบแนวคิดของงานวิจัย

ศึกษาปัญหาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12 ด้วยพารามิเตอร์ที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลในด้านความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงดัดประกอบด้วย ความเร็วรอบเครื่องมือกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม ทิศทางการหมุนของเครื่องมือกวน มุมเอียงของเครื่องมือกวน และรูปทรงของเครื่องมือกวน โดยใช้วิธีการร่วมระหว่าง D-Optimal กับ การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ในการหาคำตอบเพื่อแก้ปัญหาการหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้โครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อมที่ดี

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานมีดังนี้

- 1.6.1 ศึกษารูปแบบปัญหาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- 1.6.2 กำหนดกรอบการวิจัย
- 1.6.3 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- 1.6.4 พัฒนาวิธีการร่วมระหว่าง D-Optimal กับ การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน
- 1.6.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบ
- 1.6.6 สรุปและเสนอแนะ
- 1.6.7 จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์และนำเสนองานวิจัย

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 ได้แนวทางพัฒนาวิธีการร่วมระหว่าง D-Optimal กับ การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่เหมาะสม
- 1.7.2 ได้ค่าพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน
- 1.7.3 ได้แนวเชื่อมที่มีคุณภาพโดยที่มีประสิทธิภาพความแข็งแรงดึงและแรงดัดสูง สำหรับการขึ้นรูปชิ้นส่วนประกอบในงานอุตสาหกรรม

1.8 คำนิยามศัพท์เฉพาะ

ตารางที่ 1.1 คำศัพท์เฉพาะและความหมาย

ลำดับ	คำศัพท์เฉพาะ	ความหมาย
1	SSM-ADC12 Aluminum	อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12
2	Friction Stir Welding	การเชื่อมเสียดทานแบบกวน
3	D-optimal Design	การออกแบบการทดลองแบบ D-optimal

ตารางที่ 1.1 คำศัพท์เฉพาะและความหมาย (ต่อ)

ลำดับ	คำศัพท์เฉพาะ	ความหมาย
4	Heuristic	วิธีการหาคำตอบซึ่งอาจจะได้หรือไม่ได้คำตอบแต่ใช้ระยะเวลาในการคำนวณสั้นกว่าแบบวิธีการหาคำตอบที่ดี
5	Meta-Heuristics	วิธีการที่ออกแบบมาเพื่อหาคำตอบที่ดี สำหรับปัญหาที่ต้องการค่าที่ดีที่สุดที่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการแก้ปัญหา
6	VaNSAS	การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้
7	MOVaNSAS	การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์
8	MOGA	วิธีทางพันธุกรรมหลายวัตถุประสงค์
9	MODE	วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างหลายวัตถุประสงค์
10	TOPSIS	เทคนิคสำหรับการกำหนดลักษณะในการเลือกโดยใกล้เคียงกับคำตอบในอุดมคติ
11	Advancing side	ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวถ่วงเป็นทิศทางเดียวกันกับการเดินแนวเชื่อม
12	Retreating side	ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวถ่วงสวนทางกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม
13	TMAZ	บริเวณที่ได้ผลกระทบร้อน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของทฤษฎี วรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ทางผู้วิจัยนำทฤษฎีต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของงานวิจัยเพื่อหาค่าพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อมโยงเสียดทานแบบกวน ซึ่งมีทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมีอยู่ด้วยกันหลายทฤษฎี และยังทบทวนวรรณกรรมรวมถึงเอกสารที่เกี่ยวข้อง อีกหลายเรื่อง ที่มีความใกล้เคียงหรือมีความสัมพันธ์กับงานวิจัยนี้ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง ในการดำเนินงานวิจัย

2.1 ทฤษฎีของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

2.1.1 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่สำคัญได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (light metals) ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติที่เด่นหลายประการ ดังนี้

ประการที่ 1 มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา และมีกำลังวัสดุต่อน้ำหนักสูง จึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้ตลอดจนชิ้นส่วนบางอย่าง ในเครื่องบิน จรวด ชีปนาอูทและอุปกรณ์ในรถยนต์ เพื่อลดน้ำหนักของยานพาหนะให้น้อยลงทำให้ประหยัดเชื้อเพลิง ตลอดจนชิ้นส่วนอากาศยาน เป็นต้น

ประการที่ 2 มีความเหนียว สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ได้ง่าย โดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก มีจุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ค่าการนำไฟฟ้าคิดเป็น 64.94% IACS (International Association of Classification Societies) ซึ่งไม่สูงนัก และเนื่องจากมีน้ำหนักเบา ดังนั้นจึงใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าในกรณีที่ต้องการน้ำหนักเป็นสำคัญ

ประการที่ 3 เป็นโลหะที่ไม่มีพิษต่อร่างกาย และมีค่าการนำความร้อนสูง ใช้ทำภาชนะหุงต้มอาหารและห่อหุ้มอาหาร

ประการที่ 4 ผิวหน้าของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ มีดัชนีการสะท้อนแสงสูงมาก จึงใช้ทำแผ่นสะท้อน ในแฟลชถ่ายภาพ งานสะท้อนแสงในโคมไฟ และไฟหน้ารถยนต์ทนทานต่อการผุกร่อนในบรรยากาศที่ใช้งานทั่วไปได้ดี แต่ไม่ทนทาน ต่อการกัดกร่อนของกรดเข้มข้น และด่างทั่ว ๆ ไป ซื้อหาได้ง่ายในท้องตลาด และราคาไม่แพงนัก

2.1.2 สมบัติทางฟิสิกส์ของอะลูมิเนียม

สมบัติทางฟิสิกส์ของอะลูมิเนียมเป็นค่าสมบัติเฉพาะเพื่อใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาสมบัติทางโลหะวิทยาหรือเชิงกลในการนำไปใช้งานของอะลูมิเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ มีสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งอะลูมิเนียมมีจุดหลอมละลายที่ 660 องศาเซลเซียส เป็นโลหะที่มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา รับภาระน้ำหนักได้สูง สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ไม่เสี่ยงต่อการย่นราวและการแตกหัก ไม่เป็นสนิม ทนต่อการกัดกร่อน และไม่เป็นพิษต่อมนุษย์ โดยเฉพาะการนำมาผสมกับโลหะอื่น ๆ แล้วจะทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ เพิ่มขึ้น เช่น จุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมผสมจะอยู่ที่ 1,140-1,205 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าเดิมเกือบ 2 เท่าตัว จึงนิยมนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ

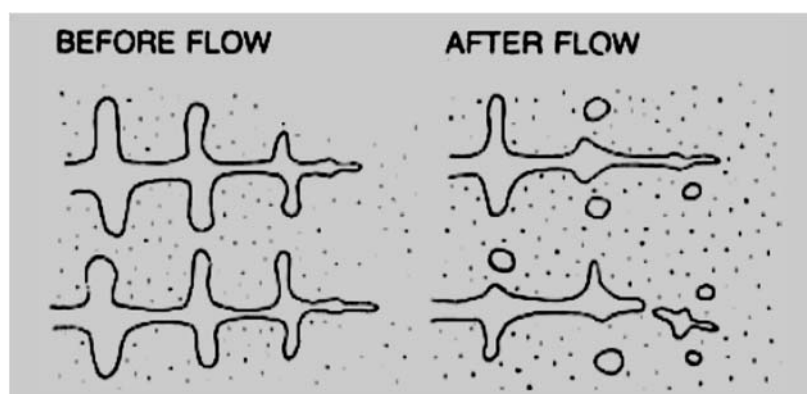
โดยเฉพาะวัสดุที่เรามักใช้ในชีวิตประจำวัน และภาคอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนหนึ่งก็เป็นเพราะน้ำหนักที่เบาของอะลูมิเนียม และราคาที่ถูกลงมากจนช่วยลดต้นทุนในการผลิต

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของอะลูมิเนียม

ลำดับ	สมบัติทางฟิสิกส์	ค่า	หน่วย
1	หมายเลขอะตอม	13	-
2	น้ำหนักอะตอม	26.97	-
3	วาเลนซ์	3	-
4	โครงสร้างผลึก	F.C.C	-
5	ความหนาแน่นที่ 20°C	2.6989	g/mm ³
6	จุดหลอมเหลว	660.2	°C
7	จุดเดือด	2450	°C
8	การหดขณะแข็งตัว	6.6	%
9	ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	94.5	cal/g
10	ความร้อนจำเพาะที่ 100°C	0.224	cal/g

2.1.3 กลไกการเกิดโลหะกิ่งของแข็งในการหล่ออะลูมิเนียม

แม้ว่าจะมีผู้พยายามอธิบายถึงกลไกในการเกิดโลหะกิ่งของแข็ง แต่จนกระทั่งปัจจุบันก็ยังไม่สามารถหาข้อสรุปที่ชัดเจนเกี่ยวกับกลไกการเกิดโลหะกิ่งของแข็งได้ โดยทฤษฎีการเกิดโลหะกิ่งของแข็งที่สำคัญมีดังต่อไปนี้ คือการแตกตัวของกิ่งหรือแขนของเดนไดรต์ (dendrite fragmentation) ทฤษฎีนี้ได้อธิบายว่าการเกิดขึ้นของโครงสร้างโลหะกิ่งของแข็ง เกิดจากการแตกตัวของกิ่งเดนไดรต์ทำให้อนุภาคที่แตกออกมามีปริมาณเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ (grain multiplication) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การแตกตัวของกิ่งหรือแขนของเดนไดรต์ทำให้อนุภาคหรือเกรนเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ
ที่มา: Flemings (1974)

จากรายงานของ Flemings ได้เสนอถึงความเป็นไปได้ของสาเหตุที่กิ่งของเดนไดรต์เกิดการแตกตัว โดยแบ่งออกเป็นสามสาเหตุหลัก คือ

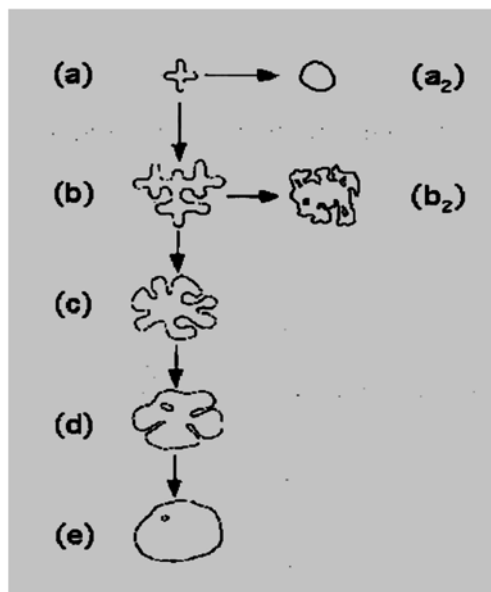
2.1.3.1 แขนของเดนไดรต์หักออกจากบริเวณโคน (roots) เนื่องจากแรงเฉือน (shear forces) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะซึ่งเป็นการยากที่จะประมาณค่าของแรงที่ทำให้แขนของเดนไดรต์เกิดการหักออก และด้วยข้อจำกัดหลายประการ กล่าวคือ เดนไดรต์เริ่มต้นจะต้องเป็นผลึกที่สมบูรณ์ปราศจากข้อบกพร่อง เช่น ช่องว่าง (void) หรือ ดิสโลเคชัน (dislocation) เป็นต้น ซึ่งหากเดนไดรต์เริ่มต้นมีข้อบกพร่องดังกล่าวจะทำให้ยากแก่การหักออกจึงทำให้ทฤษฎีนี้เกิดข้อโต้แย้งมากมายและไม่ได้รับการยอมรับเท่าที่ควร

2.1.3.2 แขนของเดนไดรต์หลอมออกจากบริเวณโคนเนื่องจากกระบวนการ Ripening ทำให้ปริมาณตัวถูกละลาย (solute) บริเวณโคนมีความเข้มข้นมากขึ้น เป็นสาเหตุทำให้จุดหลอมเหลวบริเวณนั้นลดต่ำลง จึงเป็นสาเหตุให้เกิดแขนของเดนไดรต์ถูกหลอมออกจากบริเวณโคน และหลุดออกมา

2.1.3.3 อีกกลไกที่นำเสนอโดย Vogel (Vogel, Doherty and Carton, 1979) ซึ่งอธิบายเพิ่มเติมโดย Doherty (Doherty, Lee and Feest, 2013) พวกเขาได้นำเสนอกลไกที่แตกต่างออกไปคือ พวกเขาเชื่อว่าแขนของเดนไดรต์จะเกิดการบิด (bend) และมีการเสียรูปแบบพลาสติกด้วยแรงเค้น (stress) ซึ่งความเครียดแบบพลาสติก (plastic strain) ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของดิสโลเคชัน โดยที่อุณหภูมิหลอมเหลวดิสโลเคชันสามารถปีน (climb) และรวมกันจนเกิดเป็นขอบเขตของเกรน โดยเมื่อมุมที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่า 20 องศา จะทำให้พลังงานตรงขอบของเกรนมีค่ามากกว่าพลังงานบริเวณอินเตอร์เฟซระหว่างของแข็งและของเหลว 2 เท่า ซึ่งจะทำให้ขอบของเกรนเกิดการเปียกด้วยน้ำโลหะทำให้แขนหรือกิ่งของเดนไดรต์หลุดออกมา

2.1.4 กลไกการผลิตโลหะกิ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี Rheocasting

แม้ว่าในขั้นตอนการเกิดอนุภาคกิ่งของแข็งยังไม่เป็นที่สรุปแน่นอน แต่เป็นที่ยอมรับกันว่าการสร้างจำนวน “นิวเคลียส” เริ่มต้นที่มีขนาดเล็กและมีจำนวนมาก จะใช้ระยะเวลาในการเกิดเกรนแบบก้อนกลมที่สั้นเพราะการเกิดจะเกิดได้โดยตรงจากเกรนแบบ Equiaxed ซึ่งแสดงตามเส้นทาง (a)-(a₂) ในภาพที่ 2.2 ในทางตรงกันข้ามหากขนาด “นิวเคลียส” เริ่มต้นที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดจากอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะที่ช้าจะทำให้เกิดโครงสร้างแบบก้อนกลมที่มีขนาดใหญ่ ดังแสดงตามเส้นทาง (a) ไปยัง (e) โดยเส้นทางนี้จะใช้เวลาในการเกิดที่ยาวนานกว่าและหากจำนวน “นิวเคลียส” ที่เกิดขึ้นมีจำนวนไม่เพียงพอโครงสร้างที่ได้ก็จะไม่เป็นก้อนกลมแม้จะใช้เวลาตามที่ตามแสดงตามเส้นทาง (a) ไปยัง (b₂)



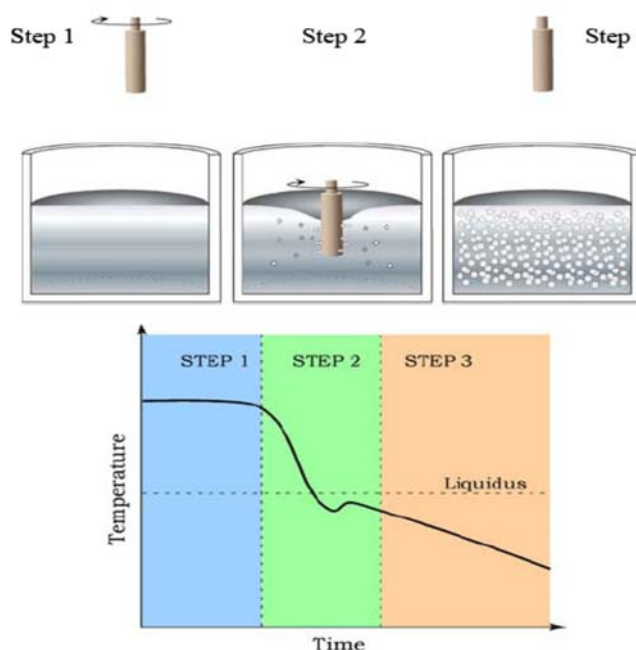
ภาพที่ 2.2 เส้นทางการเติบโต (growth) และการ coarsening ของอนุภาคของแข็ง
ที่มา: Flemings and Johnson (2002)

2.1.5 กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยการหล่อแบบรีโอคาสติ้ง (Rheocasting)

เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal: SSM) ได้มีการพัฒนาและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ แต่ก็ยังไม่มีการใช้อย่างแพร่หลายทำให้ข้อได้เปรียบและประโยชน์ของการหล่อโลหะกึ่งของแข็งไม่ได้นำมาใช้อย่างเต็มที่ การพัฒนากระบวนการผลิตแบบ Rheocasting เป็นการลดต้นทุนในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง และเพื่อให้เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง ได้มีการใช้อย่างแพร่หลายในการหล่อ Die casting ทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้นอกจากการเพิ่มคุณภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ โดยการลดต้นทุนการผลิตได้มาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่นการลดเวลาในการผลิตต่อชิ้น (cycle time) การลดของเสีย (reject) การเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และการลดต้นทุนในการอบชุบ เป็นต้น

ในปัจจุบันกระบวนการที่สามารถทำให้โครงสร้างสุดท้ายมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบไม่เป็นกิ่งไม้ เช่น กรรมวิธีการกวนทางกล (mechanical stirring) การกวนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic stirring) การสั่นด้วยอัลตราโซนิก (ultrasonic vibrations) ซึ่งกรรมวิธีดังกล่าวล้วนต้องอาศัยตัวกลางเพื่อให้เกิดการไหลวน (agitation) ทั้งสิ้นโดยในกรรมวิธีการกวนทางกลจะใช้ใบพัดหรือแท่งทรงกระบอกเพื่อให้เกิดการไหลวน กรรมวิธีการกวนด้วยแม่เหล็ก ไฟฟ้าอาศัยแรงทางไฟฟ้าเป็นตัวพาให้เกิดการไหลวนของของเหลว ส่วนการสั่นก็เป็นวิธีการทำให้เกิดการไหลวนด้วยเช่นกันแต่กระบวนการดังที่กล่าวมาข้างต้นก็มีข้อเสียหลายประการ เช่น ราคาที่สูงและการเกิดโมโครเซกริเกรชันเนื่องจากการกวนที่สัดส่วนของแข็งสูง ๆ หากมองย้อนไปดูหลักการเกิดโครงสร้างแบบไม่เป็นกิ่งไม้ เป็นที่ชัดเจนว่าหากต้องการให้เกิดการแตกตัวของกิ่งเดนไดรต์จะต้องทำให้เกิดการไหลวนในช่วงก่อนที่จะมีการแข็งตัวเท่านั้น ซึ่งเป็นช่วงที่กิ่งของเดนไดรต์มีขนาดเล็กมากและอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรเนื่องจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมีค่าสูง

ด้วยหลักการดังกล่าวทำให้ Flemings และ Martinez ได้แสดงให้เห็นว่าหากจุ่มและหมุนแท่งโลหะเย็นลงไปในน้ำโลหะที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลว โดยใช้เวลาในการหมุนแท่งโลหะเพียงเล็กน้อยจนเริ่มมีสัดส่วนของแข็งเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย จึงยกแท่งโลหะขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.3 จะพบว่าโครงสร้างของโลหะภายหลังการเย็นตัวจะมีลักษณะเป็นแบบก้อนกลม โดยพวกเขาเรียกกระบวนการผลิตนี้ว่า Semi-Solid Rheocasting (SSR)



ภาพที่ 2.3 ขั้นตอนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธี Semi-Solid Rheocasting (SSR)
ที่มา: Martinez (2004)

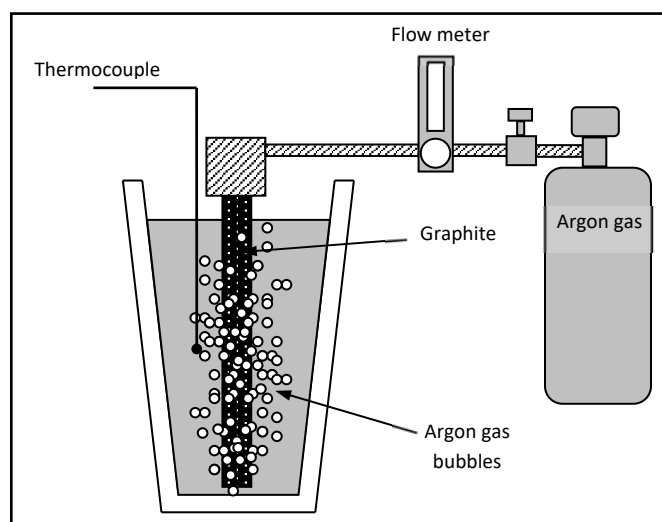
ซึ่งต่อมา Martinez ได้แสดงให้เห็นว่าการสร้างโลหะกึ่งของแข็งสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพจากการกวนน้ำโลหะเฉพาะจุดและเกิดจากการระบายความร้อนจากน้ำโลหะเฉพาะจุดอย่างรวดเร็ว (rapid localized heat extraction)

แม้ว่ากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีดังกล่าวจะสามารถผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็ประสบปัญหาหลายประการในขั้นตอนของการผลิต เช่น การต่อระบบให้ความเย็นด้วยน้ำและระบบเซ็นเซอร์เข้ากับแท่งที่หมุนซึ่งเป็นวิธีที่สลับซับซ้อนและยากต่อการติดตั้ง นอกจากนี้ระหว่างที่วัตถุหมุนจะทำให้เกิดการไหลวนของน้ำโลหะ ซึ่งอาจเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นได้ในขั้นตอนนี้

2.1.6 การผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว

กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิคการปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัวโดย (Jessada and Sangop, 2008) เป็นกระบวนการสร้างโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการพ่นฟองแก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราฟไฟต์พูน (แก๊สอาร์กอน) ซึ่งเป็นกรรมวิธีแบบใหม่สำหรับการผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีหลักการคล้ายกับวิธีการหล่อแบบ Rheocasting ที่ให้โครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (spheroidal

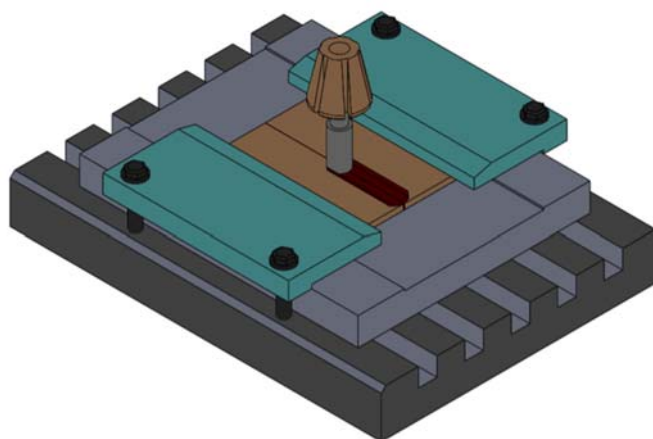
grain) คุณสมบัติของโลหะกึ่งของแข็งมีหลายประการเช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโลหะเหลว โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะที่ใส่แม่พิมพ์มีความหนืดที่สูงกว่าน้ำโลหะ มีความเค้นขณะไหลต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้าและลดการเกิดโพรงหดตัว (shrinkage) อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว
ที่มา: Jessada and Sangop (2008)

2.1.7 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน

กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เป็นการเชื่อมจำพวกโลหะซึ่งอยู่สถานะของแข็ง (Solid State Welding) มีการนำไปใช้เชื่อมชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ ในงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ใช้กระบวนการเชื่อมแบบเดิม (การเชื่อมแบบหลอมละลาย) เช่น อะลูมิเนียมผสม การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนนี้ได้มีการประยุกต์ใช้อย่างมีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบิน รถยนต์ เรือเดินสมุทร และปัจจุบันเป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้รับความสนใจในการทำวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง ลักษณะกระบวนการเชื่อมแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

จากภาพที่ 2.5 ทิศทางการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน โดยเครื่องมือจะทำการหมุนจนกระทั่งได้ระดับความเร็วรอบที่เหมาะสมซึ่งจะทำการกดลงไประหว่างรอยต่อของวัสดุอะลูมิเนียมทั้ง 2 ชิ้น จากนั้นตัวกวนจะทำการเคลื่อนที่ไปตามทิศทางการเดินแนวเชื่อม ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของตัวกวนและป่าของเครื่องมือกับเนื้อวัสดุรอบ ๆ ตัวกวน จะทำให้วัสดุอะลูมิเนียมเกิดการอ่อนตัวและเกิดสภาวะคล้ายของไหล (Plastic Fluid-like State) และเคลื่อนที่รอบตัวกวนภายใต้ป่าของเครื่องมือเชื่อม โดยลักษณะที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นตลอดแนวเชื่อมตามทิศทางการเชื่อม

2.1.7.1 ปัจจัยของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

ปัจจัยการเชื่อม ได้แก่ ความเร็วรอบ ความเร็วเดินแนวเชื่อม และมุมเอียงของตัวกวน ตัวแปรเหล่านี้ส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุบริเวณแนวเชื่อม ความเร็วรอบที่แตกต่างกันทำให้เกิดการกวนและการผสมของวัสดุในแนวเชื่อมที่แตกต่าง ขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายวัสดุจากด้านหน้าของตัวกวนไปสู่ด้านหลังและทำให้เกิดแนวเชื่อมที่สมบูรณ์ที่แตกต่างกัน ความเร็วรอบที่สูงทำให้เกิดอุณหภูมิที่สูงในแนวเชื่อม ความเอียงของตัวกวนที่ทำมุมกับแกนตั้งฉากของเครื่องกัดที่มีค่าเหมาะสมทำให้ป่าด้านหลังของเครื่องมือเชื่อมกดและกวนวัสดุรอบ ๆ ตัวกวนให้มีการผสมรวมกันได้มากขึ้น

2.1.7.2 ลักษณะการทำงานของเครื่องเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

หลักการทำงานของกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน โดยเครื่องมือเชื่อมจะหมุนด้วยความเร็วสูง และให้อัตราการป้อนตามรอยต่อแนวเชื่อมของวัสดุลักษณะการทำงานของเครื่องเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนนั้นเครื่องมือเชื่อมจะทำการหมุนรอบตัวเองที่ระดับความเร็วรอบที่สูง โดยระดับความเร็วรอบที่เกิดขึ้นจะถูกกำหนดจากขนาดของตัวกวนรวมถึงขนาดของวัสดุที่นำมาใช้ในการเชื่อมด้วย ตัวหมุนกวนจะถูกขับเคลื่อนให้หมุนโดยเครื่องกัดอัตโนมัติ โดยลักษณะหมุนรอบตัวเอง เมื่อได้ระดับความเร็วรอบจากการกำหนดโดยส่วนควบคุมแล้ว ตัวกวนจะถูกกดลงระหว่างวัสดุ จากนั้นตัวกวนจะเริ่มเดินแนวเชื่อมตามระดับความเร็วในการเดินแนวที่ได้กำหนดไว้ ตัวกวนจะมีส่วนประกอบสองส่วนคือ ป่า (Shoulder) และตัวกวน (Pin) สองส่วนนี้จะทำ

หน้าที่คือ ตัวกวนจะทำการกวนวัสดุที่ได้รับความร้อนจะเกิดการอ่อนตัวแล้วจึงทำการกวนให้วัสดุทั้งสองเกิดการกวนประสานเนื้อเข้าด้วยกัน ในส่วนของบ่าเครื่องมือจะทำหน้าที่กัดและอัดวัสดุให้เกิดการรวมตัวของวัสดุเป็นแนวเชื่อม ในส่วนนี้บ่าจะยังทำหน้าที่เกลี่ยผิวหน้างานด้วย

2.1.7.3 ความร้อนจากการเสียดทานแบบกวน

ความร้อนจากการเสียดทานทางกล และข้อบกพร่องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จากความสัมพันธ์ของความเร็วรอบในการหมุนหัวกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม และแรงกดก่อให้เกิดความร้อน และข้อบกพร่องในงานเชื่อม กล่าวได้ว่า ชนิดของเครื่องมือกวนและความเร็วในการเดินเชื่อมสูงเป็นสาเหตุทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิบริเวณผิวด้านบน และส่วนที่ถูกกวน เพราะผลของข้อบกพร่องขึ้นอยู่กับสภาวะของการเสียดทาน ครีบกาวที่เกิดขึ้นในบริเวณด้านข้างรอยเชื่อมเกิดจากความร้อนที่มากเกินไป ช่องว่างที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมเกิดจากความร้อนที่ไม่สมดุล จากการกวนที่ผิดปกติข้อบกพร่องเพียงเล็กน้อยแรงกดของเครื่องมือสามารถทำให้ช่องว่างลดลงโดยการเพิ่มแรงกดซึ่งมีสมการความร้อนที่เกิดขึ้นกับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนดังนี้

$$Q = \frac{4}{3} \pi^2 \frac{\alpha \mu F N R^3}{V} \quad (2.1)$$

เมื่อ	Q	คือ ปริมาณความร้อนที่ชิ้นงานได้รับ (J/mm)
	μ	คือ สัมประสิทธิ์ของการเสียดทานทางกล
	α	คือ ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายความร้อน
	F	คือ แรงกด (N)
	N	คือ ความเร็วรอบในการหมุนหัวกวน (rpm)
	R	คือ รัศมีของบ่า (mm)
	V	คือ ความเร็วในการเดินเชื่อม (mm/min)

2.1.8 เหล็กเครื่องมือ H13

H13 (UNS T20813) เป็นเหล็กชุบแข็งแบบเครื่องมืองานร้อนที่มีส่วนผสมของโครเมียม-โมลิบดีนัม และวานาเดียม ซึ่งมีคาร์บอนและวาเนเดียมสูงทำให้มีความทนทานต่อการช็อกความร้อน การแตกความร้อน และความแข็งที่อุณหภูมิสูง เหล็กเครื่องมือ H13 ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับอะลูมิเนียมแมกนีเซียม สังกะสีแบบหล่อตาย และส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น หมุดหัวฉีด ตัวยึดอุปกรณ์ และหมุดพืดที่ต้องทนต่อความเหนียวล้าในอุณหภูมิสูง มีความหนาแน่น 7.8 g/cc ความแข็ง 34-55 HRC โมดูลัสความยืดหยุ่น 210 GPa เป็นต้น ASTM H13 เป็นทางเลือกที่ยอดเยี่ยมสำหรับการใช้งานเครื่องมืองานที่หลากหลาย การประยุกต์ใช้ทั่วไปรวมทั้งเครื่องมือสำหรับการอัดขึ้นรูป ฆ่าเครื่องเป่า ผู้ถืออุปกรณ์ การเจาะเย็นอย่างรุนแรง เศษเหล็ก แหวนหด และชิ้นส่วนที่สึกหรออื่น ๆ คุณสมบัติหลักของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 คือ ความสามารถในการชุบแข็งและความต้านทานต่อการแตกร้าวด้วยความร้อนได้สูงลักษณะทางกลที่ดีและความเหนียวในสภาพร้อนโดยเฉพาะคุณสมบัติเชิงกลที่ครอบคลุมที่ยอดเยี่ยมและเสถียรภาพในการแบ่งอุณหภูมิ โดยมีส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 2.2

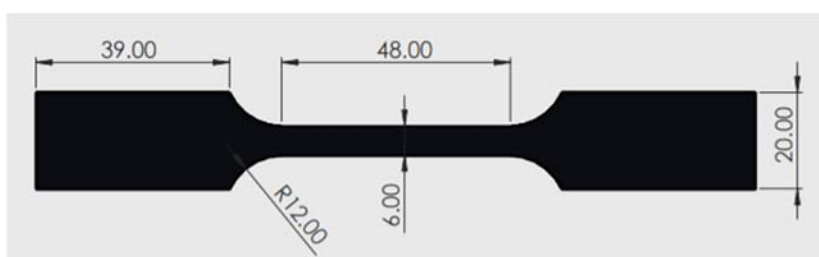
ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของเหล็กเครื่องมือ H13

ส่วนผสมทางเคมี	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Chemical	0.30	0.80	0.20	4.75	1.25	0.80

2.2 ทฤษฎีของการทดสอบผลการทดลอง

2.2.1 การทดสอบสมบัติทางกล

2.2.1.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ทดสอบให้เกิดการยืดและเสียรูปชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงรูปทรงตามแรงที่กระทำ เป็นการทดสอบพื้นฐานที่สุดอย่างหนึ่งที่ใช้ทดสอบสมบัติของวัสดุต่าง ๆ ปกติการทดสอบแรงดึงจะใช้ชิ้นทดสอบตามแบบมาตรฐาน แต่ขณะเดียวกันก็สามารถใช้ชิ้นทดสอบแบบอื่นที่ทราบค่าพื้นที่หน้าตัด และความยาวเริ่มต้น โดยการทดสอบแรงดึงใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุภายใต้แรงดึงหรือการยืดในแนวแกน ข้อมูลและการคำนวณในการทดสอบแรงดึงโดยทั่วไป ได้แก่ ขีดจำกัดการยืดหยุ่น (Elastic Limit) ร้อยละการยืด (Percent Elongation) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ขีดจำกัดแบบสัดส่วน (Proportional Limit) ร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Percent Reduction in Area) ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) จุดคราก (Yield Point) และความแข็งแรงคราก (Yield Strength) เป็นต้น สำหรับการทดสอบแรงดึงนี้จะวัดค่าแรงที่กระทำกับชิ้นงาน หรือความเค้นที่เกิดขึ้น เมื่อมีการให้ภาระกรรมกับวัสดุ โดยภาระกรรมที่ไม่มีหลายลักษณะด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นการให้อัตราความเครียด (Strain rate) คงที่หรือความเร็วในการดึงคงที่ สำหรับการทดสอบแรงดึงของโลหะ นั้นมีมาตรฐานในการทดสอบที่นิยมใช้กันคือมาตรฐาน ASTM E8 เป็นมาตรฐานสำหรับการทดสอบโลหะ โดยลักษณะของชิ้นทดสอบตามมาตรฐานดังแสดงตามภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ลักษณะชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน

การทดสอบแรงดึงนิยมใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ดังแสดงในภาพที่ 2.7 การทดสอบโดยจะติดตั้งชิ้นทดสอบเข้ากับชุดจับยึด โดยมีระยะห่างระหว่างจุดจับยึดทั้งสองข้างตามมาตรฐานที่กำหนด หลังจากนั้นจะให้แรงดึงคงที่โดยเครื่องมือจะมีการวัดค่าความเครียดที่ใช้อ่านค่าอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจำนวนการอ่านจะขึ้นอยู่กับเวลาการเปลี่ยนแปลงที่แรงกระทำการเปลี่ยนแปลงของความเครียดหรือการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการทดสอบ



ภาพที่ 2.7 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ รุ่น NRI-TS501-300

2.2.1.2 การทดสอบความแข็งแรงดัด (Bending Test) เป็นการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปของวัสดุหลังจากใช้แรงกดลงบนชิ้นงาน โดยพิจารณาดูว่าที่ผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบ ตรงบริเวณที่ทำการกดเกิดรอยแตกขึ้นหรือไม่ หลังจากทำการกดขึ้นทดสอบด้วยรัศมีความโค้งที่ กำหนด จนได้มุมตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการทดสอบ

หลักการในการทดสอบความแข็งแรงดัด คือ ใช้วิธีใดก็ได้ในการดัดขึ้นวัสดุ ทดสอบซึ่งอาจมีหน้าตัดเป็นวงกลม สี่เหลี่ยม หรือรูปทรงหลายเหลี่ยม ให้ได้รัศมีความโค้งตามที่ กำหนดไว้ หรือให้ได้มุมตามที่กำหนด โดยทิศทางของแรงกดที่สำหรับในการดัดแต่ละครั้ง ในส่วนของการ ให้แรงต้องเพิ่มแรงอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการเลื่อนของชิ้นงานที่นำมาทดสอบบริเวณแนวด้านข้าง หลังจากชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามแรงที่กระทำ โดยทำการดูบริเวณผิวของชิ้นงานที่มีแรง กระทำว่ามีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นหรือไม่ ซึ่งในการทดสอบใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) เช่นเดียวกับการทดสอบแรงดึง

2.2.1.3 โครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallurgy Structures)

1) โครงสร้างทางมหภาค (Macrostructure) เป็นการตรวจสอบทางกายภาพ หรือใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า จุดประสงค์ของการทดสอบเพื่อดูความสมบูรณ์ ของรอยต่อ การเชื่อมลักษณะบริเวณที่ได้อธิพลกระทบบร้อน ตลอดจนลักษณะจุดบกพร่องต่าง ๆ ของรอยเชื่อม โดยสามารถนำชิ้นงานมาทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E304

2) โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) สามารถใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มี กำลังขยายที่สูงกว่าการดูโครงสร้างทางมหภาค ซึ่งโครงสร้างทางจุลภาคเป็นการตรวจสอบเพื่อดูการ กระจายตัวของอนุภาค รวมไปถึงขนาดและลักษณะเกรนในบริเวณรอยต่อบริเวณที่ได้รับอิทธิพล กระทบบร้อน และบริเวณเนื้อโลหะเดิม สำหรับการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ได้ กำหนดตามมาตรฐาน ASTM E407

2.3 ทฤษฎีของการหาคำตอบ

2.3.1 การทดลองแบบ D-Optimal

การออกแบบ D-optimal เป็นรูปแบบหนึ่งของการออกแบบการทดลองที่แตกต่างกับการออกแบบทั่วไป เช่น แฟกทอเรียลและแฟกทอเรียลแบบเศษส่วน โดยเมทริกซ์ของการออกแบบ D-optimal จะมีความสัมพันธ์ในลักษณะไม่เป็นมุมฉาก การออกแบบประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงประเภทของแบบจำลอง หรือวัตถุประสงค์ที่ระบุไว้สำหรับการทดลอง เช่น การคัดกรอง พื้นผิวการตอบสนอง เป็นต้น เหตุผลในการใช้การออกแบบ D-optimal แทนการออกแบบโดยทั่วไปแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ (1) การออกแบบแฟกทอเรียลมาตรฐานหรือแฟกทอเรียลแบบเศษส่วนมีจำนวนการทดลองมากเกินไป และใช้จำนวนทรัพยากรหรือเวลามากตามไปด้วย (2) การออกแบบการทดลองมีข้อจำกัดในด้านการตั้งค่าปัจจัยที่ไม่สามารถทำได้หรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลอง เช่น กระบวนการทางอุตสาหกรรมมีปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบ 3 ปัจจัย ($k = 3$) และการพิจารณาทางวิศวกรรมจะระบุรูปแบบต่อไปนี้เป็นตัวแทนที่เหมาะสมของกระบวนการในการทดลอง การออกแบบ D-optimal สำหรับการทดลองแบบหลายปัจจัยที่มีทั้งปัจจัยเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ แต่ละปัจจัยสามารถมีได้หลายระดับ ดังนั้นสามารถใช้วิธีการนี้เพื่อออกแบบการทดลองด้วยปัจจัยเชิงปริมาณสองตัวแต่ละตัวมีสามระดับและปัจจัยเชิงคุณภาพที่มีเจ็ดระดับ การออกแบบ D-optimal ถูกสร้างขึ้นเพื่อลดความแปรปรวนทั่วไปของการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ในการตั้งค่าการถดถอยพหุคูณ เมทริกซ์ X มักใช้แทนเมทริกซ์ข้อมูลของตัวแปรอิสระ การออกแบบ D-optimal ลดความแปรปรวนโดยรวมของการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยโดยการเพิ่มดีเทอร์มิแนนต์ของ $X'X$ ให้ได้มากที่สุด การออกแบบที่มี D-optimal นั้นแสดงให้เห็นว่าเหมาะสมที่สุดแล้วสำหรับเกณฑ์อื่น ๆ อีกหลายประการที่ได้รับการเสนอเช่นกัน จะใช้การออกแบบ D-optimal เมื่อมีงบประมาณจำกัดและไม่สามารถเรียกใช้การออกแบบแฟกทอเรียลที่จำลองแบบได้ทั้งหมด ตัวอย่างเช่น สมมติว่าต้องการศึกษาการตอบสนองต่อปัจจัยสามประการ: A มีสามระดับ B มีสี่ระดับ และ C มีแปดระดับ การจำลองแบบสมบูรณ์หนึ่งครั้งของการทดสอบนี้ต้องใช้ $3 \times 4 \times 8 = 96$ การทดลอง สมมติว่าสามารถจ่ายได้เพียง 20 การทดลอง ซึ่งทำการทดลอง 20 การทดลองจาก 96 การทดลอง อัลกอริธึมการออกแบบ D-optimal เป็นทางเลือกที่เหมาะสม

ภาพรวมโดยย่อเกี่ยวกับวิธีการทำงานของอัลกอริธึมการออกแบบ D-optimal จะให้ความเข้าใจทั่วไปเกี่ยวกับสิ่งที่อัลกอริธึมพยายามทำให้สำเร็จ เพื่อสามารถเลือกตัวเลือกต่าง ๆ ได้อย่างชาญฉลาด สมมติว่ากำลังศึกษาอิทธิพลของส่วนสูงและน้ำหนักที่มีต่อความดันโลหิต หากเชื่อว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้น (เส้นตรง) จะต้องดูเฉพาะค่าความสูงสองค่าและค่าน้ำหนักสองค่า การทดลองที่ออกแบบมาต้องมีความสัมพันธ์ร่วมของตัวแปรทั้ง 4 อย่างไรก็ตาม หากตัดสินใจว่าความสัมพันธ์อาจเป็นเส้นโค้ง จะต้องใส่อย่างน้อย 3 ระดับสำหรับแต่ละปัจจัยซึ่งส่งผลให้มีค่าความสัมพันธ์ร่วม เห็นได้ชัดว่าการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์เชิงหน้าที่ที่คาดไว้ระหว่างตัวแปรการตอบสนองและปัจจัยที่น่าสนใจ

อัลกอริธึม D-optimal ทำงานดังนี้ (1) ระบุแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยประมาณซึ่งกำหนดรูปแบบการทำงานของความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนอง (Y) และตัวแปรอิสระ (ปัจจัย) (2) สร้างชุดความเป็นไปได้ตามแบบจำลองนี้ (3) จากตัวเลือกเหล่านี้ ให้เลือกเซตย่อยที่เพิ่ม

ดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ $X'X$ สูงสุด นี่คือการออกแบบ D-optimal รายละเอียดของอัลกอริทึมนี้มีไว้ใน Atkinson and Donev (1992) จำนวนการออกแบบที่เป็นไปได้จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความซับซ้อนของแบบจำลองเพิ่มขึ้น ตามปกติจำนวนการออกแบบการทดลองนี้จะมากในการออกแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมด การออกแบบ D-optimal เริ่มต้นด้วยชุดการสุ่มเลือกจุดเข้าและออกจากการออกแบบล่าสุดมีการแลกเปลี่ยนจนกว่าจะไม่พบการแลกเปลี่ยนที่เพิ่มดีเทอร์มิแนนต์ของ $X'X$ เพื่อลดเวลาดำเนินการ จำนวนจุดที่พิจารณาในระหว่างการทำซ้ำแต่ละครั้งอาจถูกจำกัด วิธีนี้ไม่รับประกันว่าจะพบค่าที่ดีที่สุด เพื่อที่จะลดความผิดพลาดนี้ อัลกอริทึมจะถูกทำซ้ำหลายครั้งด้วยความหวังว่าอย่างน้อยหนึ่งการวนซ้ำจะนำไปสู่ค่าที่ดีที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีชุดเริ่มต้นแบบสุ่ม 50 หรือ 100 ชุด (ระหว่างการทดสอบอัลกอริทึม พบว่าการออกแบบบางอย่างจำเป็นต้องมีการเริ่มต้น 500 ครั้งเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุด)

อัลกอริทึมนี้เกี่ยวข้องกับปัจจัยทั้งเชิงปริมาณ (ต่อเนื่อง) และเชิงคุณภาพ (ไม่ต่อเนื่อง) ระดับของปัจจัยเชิงปริมาณได้รับการปรับขนาดเพื่อให้ค่าต่ำสุดคือ -1 และค่าสูงสุดคือ 1 ปัจจัยเชิงคุณภาพจะรวมเป็นชุดของตัวแปร ตัวอย่างเช่น สมมติว่าตัวแปรเชิงคุณภาพมีค่าสี่ค่า ตัวแปรอิสระสามตัวถูกสร้างขึ้นเพื่อแสดงปัจจัยนี้ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การออกแบบการทดลองแบบ D-Optimal

ตัวแปร	X_1	X_2	X_3
1	-1	0	0
2	0	-1	0
3	0	0	-1
4	1	1	1

อย่างที่เห็นตัวแปรแต่ละตัวเปรียบเทียบกับกลุ่มที่แยกจากกันกับกลุ่มสุดท้าย นอกจากนี้จำนวนของตัวแปรที่สร้างขึ้นจะน้อยกว่าจำนวนของการออกแบบการทดลองเสมอ

การเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมนั้น บ่อยครั้งจะรู้เพียงเล็กน้อยเกี่ยวกับการทำงานที่แท้จริง รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองและตัวแปรปัจจัย แนวทางทั่วไปคือการสันนิษฐานว่าการประมาณอนุกรมเทย์เลอร์อันดับสองจะได้ผลค่อนข้างดี กำลังสมมติว่าฟังก์ชันที่แท้จริงอาจถูกประมาณโดยพื้นผิวพาราโบลาในบริเวณที่สนใจ การลดความซับซ้อนของแบบจำลองจะลดจำนวนจุดที่ต้องเพิ่มลงในการออกแบบทดลอง ในบางครั้งต้องการเพิ่มจะเพิ่มจุดให้กับการออกแบบทดลองที่มีอยู่ซึ่งสามารถทำได้โดยการบังคับให้อัลกอริทึมรวมจุดที่อ่านจากสเปรดชีต อัลกอริทึม D-optimal จะเลือกจุดเพิ่มเติมที่มีประโยชน์ที่สุดจากชุดการออกแบบการทดลองเบื้องต้น หนึ่งในคุณสมบัติที่น่าสนใจของอัลกอริทึมการออกแบบ D-optimal คือสามารถปรับแต่งโมเดลได้เมื่อความรู้เพิ่มขึ้น

ตัวอย่างวิธีสร้างการออกแบบ D-optimal โดยใช้โปรแกรมนี้ในตัวอย่างนี้ จะแสดงวิธีสร้างการออกแบบ 10 จุดสำหรับการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับสามปัจจัยเชิงปริมาณ และต้องการการ

จากตารางที่ 2.5 คอลัมน์ที่ 1, 2 และ 3 คือ ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยมีการแทนค่าเป็น 1 คือ ค่าสูงสุดของปัจจัย ส่วน -1 คือ ค่าต่ำสุดของปัจจัย และ 0 คือ ค่าเฉลี่ยของทั้งสองปัจจัย คอลัมน์จาก Ax ถึง C_C มีเมทริกซ์การออกแบบที่ขยายตัวแปรแต่ละตัวถูกสร้างขึ้นโดยการคูณค่าตัวประกอบที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น ในแถวแรก พบ A_B โดยการคูณค่าของ A ซึ่งก็คือ -1 ด้วยค่าของ B ซึ่งก็คือ -1 ด้วย ผลลัพธ์คือ 1 เมทริกซ์แบบขยายมักจะถูกบันทึกเพื่อให้สามารถวิเคราะห์การออกแบบได้โดยใช้สมการการถดถอยแบบพหุคูณ ในการออกแบบนี้จะต้องสุ่มการทดลองสิบจุดเหล่านี้ให้กับการทดลอง 10 ครั้ง ซึ่งรายละเอียดของปัจจัยแสดงตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 รายละเอียดของแต่ละปัจจัย

ชื่อ	ระดับ	ชนิด	ค่า 1	ค่า 2	ค่า 3
A	3	เชิงปริมาณ	-1	0	1
B	3	เชิงปริมาณ	-1	0	1
C	3	เชิงปริมาณ	-1	0	1

จากตารางที่ 2.6 สรุปปัจจัยต่าง ๆ ในการออกแบบการทดลอง จำนวน 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ พบว่าจำนวนการทดลองในการทำ 1 ซ้ำ ได้มาจาก ผลคูณของระดับในการทดลอง คือ $3 \times 3 \times 3 = 27$ การทดลอง ซึ่งความหมายของแต่ละคอลัมน์ คือ ชื่อ หมายถึง ปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง ระดับ คือ จำนวนของระดับในแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ชนิด คือ ปัจจัยที่ศึกษามี 2 ประเภท เช่น เชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพ ค่า 1-3 คือ เป็นคอมลัมน์ที่บอกค่าที่ใช้ในการทดลองในแต่ละครั้งที่ทำการทดลอง สังเกตว่า ค่าน้อยสุด เป็น -1 ค่ามากที่สุด เป็น 1 เสมอ ในส่วนของโมเดลในการหาสมการถดถอยประกอบไปด้วย ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ส่วนประกอบของสมการถดถอย

องศาอิสระ	ตัวแปร
1	A
1	B
1	C
1	A*A
1	A*B
1	A*C
1	B*B
1	B*C
1	C*C
9	แบบจำลองทั้งหมด

จากตารางที่ 2.7 เป็นเงื่อนไขที่เกิดขึ้นจากการสร้างแบบจำลองสมการถดถอย ต้องดูให้แน่ใจว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาตรงตามความต้องการของนักวิจัยหรือไม่ โดยในบรรทัดสุดท้ายเป็นจำนวนองศาอิสระทั้งหมด ตัวอย่างแสดงการออกแบบการทดลองแบบ D-Optimal ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างการออกแบบการทดลองแบบ 10 จุด 3 ปัจจัย

ลำดับ	ปัจจัย A	ปัจจัย B	ปัจจัย C
1	-1	-1	-1
3	1	-1	-1
5	0	0	-1
7	-1	1	-1
9	1	1	-1
11	0	-1	0
15	1	0	0
21	1	-1	1
22	-1	0	1
27	1	1	1

จากตารางที่ 2.8 ลำดับ คือ ตำแหน่งของการทดลองแต่ละครั้ง เช่น การทดลองครั้งที่ 15 ใช้ปัจจัย A=1 B=0 และ C=0 เป็นต้น ในส่วนของปัจจัยทั้ง 3 ตัว สามารถหาค่าที่ใช้ในการทดลองได้ดังนี้

$$\text{Original} = (\text{Scaled} (\text{Max} - \text{Min}) + \text{Max} + \text{Min}) / 2 \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.2 ยกตัวอย่างในการหา โดยกำหนดให้ ปัจจัย A มีค่าต่ำสุด คือ 10 สูงสุด คือ 20 สามารถหาค่าระดับต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองได้ ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ค่าสเกลของปัจจัย A

ระดับ	สูตร	ค่า
-1	$(-1 * (20 - 10) + 20 + 20) / 2$	10
0	$(0 * (20 - 10) + 20 + 20) / 2$	15
1	$(1 * (20 - 10) + 20 + 20) / 2$	20

จากตารางที่ 2.9 ค่าที่ได้ คือ 10, 15 และ 20 เป็นตัวแทนของระดับ 3 ระดับ ในปัจจัย A ที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ และนำมาแทนที่ -1, 1 และ 0 ในตารางการออกแบบการทดลองของ D - Optimal

ตารางที่ 2.10 ค่า 20 อันดับของการวนซ้ำ

ลำดับ	ผลของเมตริกซ์ X'X	ความสัมพันธ์ของแต่ละ การทดลอง	เปอร์เซ็นต์ของค่าสูงสุด
1	1327140	40.95	100.00
2	1327140	40.95	100.00
3	1327140	40.95	100.00
4	1327140	40.95	100.00
5	1327140	40.95	100.00
6	1327140	40.95	100.00
7	1327140	40.95	100.00
8	1048576	40.00	79.01
9	1048576	40.00	79.01
10	1048576	40.00	79.01
11	1048576	40.00	79.01
12	1048576	40.00	79.01
13	1048576	40.00	79.01
14	921600	39.49	69.44
15	802816	38.95	60.49
16	802816	38.95	60.49
17	802816	38.95	60.49
18	802816	38.95	60.49
19	802816	38.95	60.49
20	802816	38.95	60.49

จากตารางที่ 2.10 ตารางแสดงตัวกำหนด 20 ตัวของการหาค่า วัตถุประสงค์หลักของตารางนี้คือเพื่อให้ตัดสินใจว่ามีการเรียกใช้การวนซ้ำเพียงพอหรือไม่ เพื่อให้พบค่าที่ดีที่สุดแล้วแต่จะได้ค่าสูงสุดในการวนซ้ำอย่างน้อยห้าครั้ง (จากตารางที่ 2.9 ค่าสูงสุดซ้ำกัน 7 ครั้ง) ในตัวอย่างนี้ค่าบนสุดเกิดขึ้นจากการวนซ้ำสองครั้งเท่านั้น ในทางปฏิบัติอาจลองทำซ้ำอีก 200 ครั้งเพื่อดูว่าเป็นค่าสูงสุดจริงหรือไม่ ค่าของดีเทอร์มิแนนต์ของ X'X ซึ่งเป็นสถิติที่กำลังขยายให้ใหญ่ที่สุด ค่านี้บางครั้งเรียกว่าความแปรปรวนทั่วไปของสัมประสิทธิ์การถดถอย เนื่องจากค่านี้เกิดขึ้นในส่วนของความแปรปรวนของสัมประสิทธิ์การถดถอยแต่ละตัว การเพิ่มสูงสุดจะมีผลในการลดความแปรปรวนของการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ในส่วนของ D-efficiency คือ ความสัมพันธ์ของแต่ละการทดลอง (แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์) กำหนดโดยการตั้งสมมติฐานเพื่อให้ได้ค่าดีเทอร์มิแนนต์เท่ากันเป็นวิธีการเปรียบเทียบการออกแบบในขนาดตัวอย่างต่าง ๆ โดยมีสูตรตามสมการที่ 2.3

$$DE = 100 \left(\frac{|X'X|^{1/p}}{N} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ p = จำนวนทั้งหมดขององศาอิสระในโมเดล

N = จำนวนของการทดลอง

ในตารางที่ 2.11 แสดงจำนวนการออกแบบการทดลองแบบ D – Optimal ทั้งหมดใน 1 ซ้ำ ของจำนวนปัจจัยทั้ง 3 ตัว โดยมีทั้งหมด 27 การทดลอง รวมถึงในเทอมที่มีความสัมพันธ์ร่วมของแต่ละปัจจัยที่จะเกิดขึ้นในการทดลองครั้งนี้ ทั้ง ปัจจัย A ร่วมกับ ปัจจัย B และ C อีกทั้ง ปัจจัย B ร่วมกับ ปัจจัย C ด้วย

ตารางที่ 2.11 จำนวนของการทดลองร่วมของทั้ง 3 ปัจจัย

แถว	A	B	C	A*A	A*B	A*C	B*B	B*C	C*C
1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
2	0	-1	-1	0	0	0	1	1	1
3	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
4	-1	0	-1	1	0	1	0	0	1
5	0	0	-1	0	0	0	0	0	1
6	1	0	-1	1	0	-1	0	0	1
7	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1
8	0	1	-1	0	0	0	1	-1	1
9	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1
10	-1	-1	0	1	1	0	1	0	0
11	0	-1	0	0	0	0	1	0	0
12	1	-1	0	1	-1	0	1	0	0
13	-1	0	0	1	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1	0	0	1	0	0	0	0	0
16	-1	1	0	1	-1	0	1	0	0
17	0	1	0	0	0	0	1	0	0
18	1	1	0	1	1	0	1	0	0
19	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1
20	0	-1	1	0	0	0	1	-1	1
21	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1
22	-1	0	1	1	0	-1	0	0	1
23	0	0	1	0	0	0	0	0	1

ตารางที่ 2.11 จำนวนของการทดลองร่วมของทั้ง 3 ปัจจัย (ต่อ)

แถว	A	B	C	A*A	A*B	A*C	B*B	B*C	C*C
24	1	0	1	1	0	1	0	0	1
25	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1
26	0	1	1	0	0	0	1	1	1
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1

2.3.2 วิธีการหาคำตอบ

ปัจจุบันปัญหาการตัดสินใจมีความยากและซับซ้อนมากขึ้น การประยุกต์วิทยาการทางด้านเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการประมวลผลโดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์จึงมีความจำเป็นมากขึ้น ขั้นตอนวิธีการคอมพิวเตอร์หรือเราเรียกว่าอัลกอริทึมที่จะต้องเรียนรู้ถึงบริบทปัญหาก่อนเพื่อกำหนดรูปแบบขั้นตอนของอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา (Solution Approach) อย่างเช่น พิจารณาการลงทุนภาคเอกชนและการส่งเสริมจากหน่วยงานรัฐบาล โดยบางกรณีไม่สามารถแก้ปัญหาด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ได้ การนำวิธีการฮิวริสติกและเมตาฮิวริสติกเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหาดังกล่าว

2.3.2.1 วิธีฮิวริสติก (Heuristic Method)

การหาผลเฉลยในแต่ละปัญหาได้นำวิธีฮิวริสติกส์มาใช้ในการแก้ปัญหา ซึ่งรูปแบบของปัญหาที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน โดยต้องทำความเข้าใจในรูปแบบของปัญหานั้น ๆ เพื่อที่จะแก้ไขปัญหานั้นได้ ดังนั้นปัญหาแต่ละอย่างจะใช้วิธีฮิวริสติกที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ปัญหานั้น ๆ แต่อย่างไรก็ตามวิธีฮิวริสติกได้ถูกนำมาใช้ในการหาคำตอบเนื่องจากมีความเหมาะสม

1) ข้อดีของการหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก

1.1) ง่ายในการทำความเข้าใจและง่ายในการนำไปใช้งานและการอธิบายถึงลักษณะการแก้ปัญหาและผลลัพธ์ที่ได้

1.2) ระบบจริง (Real practice) มีความซับซ้อนมากจนกระทั่งไม่สามารถเขียนในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ หรืออาจจะเป็นปัญหาที่ใช้เวลาในการคำนวณมากเกินไป

1.3) เป็นปัญหาที่ซับซ้อนไม่คุ้มค่ากับการใช้วิธีหาคำตอบแบบแม่นยำตรง (Exact method)

1.4) ประหยัดเวลาในการสร้างตัวแบบ (Model) รวมทั้งการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาคำตอบ อย่างไรก็ตาม สำหรับบางปัญหาก็อาจจะไม่มีความจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย หากปัญหานั้นมีวิธีฮิวริสติกที่ไม่ซับซ้อนและต้องการทำการตัดสินใจอย่างรวดเร็ว

2) ประเภทของวิธีฮิวริสติก

วิธีฮิวริสติกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของวิธีในการสร้างคำตอบ ได้แก่

2.1) วิธีการสร้างผลเฉลย (Constructive method) เป็นการนำข้อมูลของปัญหาที่เกิดขึ้นมาสร้างเป็นขั้นตอนในการหาผลเฉลย ซึ่งเป็นที่ได้รับการยอมรับและนิยมนำมาใช้ได้แก่วิธี (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure: GRASP) ซึ่งฮิวริสติกนี้ประกอบไปด้วย 2 ระยะคือ ระยะการสร้างคำตอบเริ่มต้น (Initial solution- development) และระยะการปรับปรุงคำตอบ (Solution improvement) ซึ่งอาจจะใช้วิธีการต่าง ๆ เช่น การแลกเปลี่ยนตำแหน่ง (Swap operator) และการเคลื่อนย้ายตำแหน่ง (Move exchange) การค้นหาเฉพาะที่ (Local search) หรือวิธีการ Saving หรือการแทรก (Saving or Insertion)

2.2) วิธีฮิวริสติกแบบค้นหาคำตอบใกล้เคียง (Neighborhood search heuristic) เป็นการสร้างคำตอบขึ้นมาคำตอบหนึ่ง ที่ไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไขแล้วนำคำตอบนั้นมาทำการสลับตำแหน่งไปเรื่อย ๆ เพื่อหาคำตอบที่ดีกว่าคำตอบเดิม ตามรอบที่กำหนดที่ได้ออกแบบไว้ เช่น วิธี Matching base, Nearest insertion, Nearest neighbor และวิธีค้นหาเฉพาะที่ (Local search)

2.3.2.2 วิธีเมตาฮิวริสติก (Meta-Heuristic Method)

เป็นวิธีที่ได้จากการพัฒนาและดัดแปลงมาจากวิธีฮิวริสติกให้มีความยืดหยุ่นในการหาผลเฉลยของปัญหาที่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรจำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการหาคำตอบที่รวดเร็ว ถึงคำตอบที่ได้อาจจะไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามคำตอบที่ได้จะถูกยอมรับภายในเวลาอันเหมาะสมโดย Blum and Fouldm (2003) ได้เสนอหลักการและประเภทของเมตาฮิวริสติกไว้ดังนี้ (1) เมตาฮิวริสติกมีขั้นตอนในการค้นหาคำตอบที่ดีภายในพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Region) (2) เมตาฮิวริสติกวัตถุประสงค์ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้เวลาน้อย (3) วิธีการทางเมตาฮิวริสติกอาจจะมีทั้งแบบง่ายไม่ซับซ้อน เช่น การค้นหาเฉพาะที่ (Local search) หรือแบบที่ยุ่งยากซับซ้อนมากกว่า เช่น วิธีระบบมด วิธีเชิงพันธุกรรม วิธีการค้นหาต้องห้าม วิธีเลียนแบบการอบอ่อน เป็นต้น (4) เมตาฮิวริสติกเป็นการประมาณคำตอบตามขั้นตอนของแต่ละวิธี (5) เมตาฮิวริสติก อาจเกิดจากการรวมหลากหลายเทคนิค เพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดภายในพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้ (6) เมตาฮิวริสติกมีระเบียบขั้นตอนมาตรฐานที่แน่นอน แม้ว่าเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในปัญหาที่แตกต่างกันจะมีรายละเอียดของขั้นตอนย่อยที่แตกต่างกัน แต่ฮิวริสติกสำหรับปัญหาแต่ละปัญหามักต้องดำเนินการตามขั้นตอนหลักของเมตาฮิวริสติกดั้งเดิม เช่น การประยุกต์ใช้วิธีระบบมด (Ant System) ในปัญหาที่แตกต่างกัน จะมีระเบียบหลัก ๆ ที่เหมือนกัน เช่น การมีทัศนคติ (Bias) ก่อนตัดสินใจ หลังจากตัดสินใจต้องใช้คำตอบมาเพิ่มหรือลดปริมาณทัศนคตินั้น วิธีการตัดสินใจจากการใช้ระดับทัศนคติในแต่ละปัญหาอาจจะไม่เหมือนกัน และวิธีการเลือกคำตอบมาเพิ่มหรือลดระดับทัศนคติในแต่ละปัญหาอาจจะแตกต่างกัน เป็นต้น (7) เมตาฮิวริสติกต้องสามารถใช้ได้กับปัญหาที่หลากหลาย (8) เมตาฮิวริสติกอาจจะมีลักษณะเป็นคำบรรยายโดยย่อก็ได้ หรือไม่จำเป็นต้องมีหลักการทางคณิตศาสตร์ (9) ปัจจุบันนี้ เมตาฮิวริสติกใช้ความจำชั่วคราวมากขึ้นในการจำคำตอบเดิม เพื่อค้นหาคำตอบที่ไม่ซ้ำเดิมหรือแตกต่างไปจากเดิม เช่น วิธีการค้นหาต้องห้าม วิธีระบบมด

อย่างไรก็ตามวิธีการเมตาฮิวริสติกมีอยู่หลายแบบให้เลือกใช้ แต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน บางวิธีการให้ผลลัพธ์ดีแต่ใช้เวลาในการคำนวณนาน บางวิธีการคำนวณรวดเร็วแต่ให้ผลลัพธ์แย่กว่าวิธีอื่น การแบ่งวิธีการเมตาฮิวริสติกมีหลายวิธี Blum and Fouldm (2003) ได้เสนอวิธีการดังนี้ (1) แบบที่เกิดและไม่เกิดแรงบันดาลใจจากธรรมชาติ วิธีที่เกิดจากแรง

บันดลใจจากธรรมชาติ ได้แก่ วิธีระบบมด วิธีการเชิงพันธุกรรม วิธีการลอกแบบ วิธีการเลียนแบบการอบอุ่น ส่วนวิธีการที่ไม่ได้เลียนแบบธรรมชาติ เช่น วิธีการค้นหาต้องห้าม การค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบวนซ้ำ (Iterated Local Search) วิธีการค้นหาจากคำตอบใกล้เคียงแบบมีเงื่อนไข (Variable Neighborhood Search) เป็นต้น (2) แบบใช้ประชากรหรือแบบไม่ใช้ประชากร (Population on non-Population Based) แบบใช้ประชากรคือในหนึ่งรอบของการคำนวณจะมีคำตอบมากกว่าหนึ่งคำตอบให้เลือก ส่วนแบบไม่ใช้ประชากร ในหนึ่งรอบของการคำนวณจะมีคำตอบเพียงคำตอบเดียว วิธีแบบใช้ประชากร เช่น วิธีระบบมด วิธีเชิงพันธุกรรม วิธีการลอกแบบ วิธีแบบไม่ใช้ประชากร เช่น วิธีการเลียนแบบการอบอุ่น วิธีการค้นหาต้องห้าม วิธีการค้นหาคำตอบใกล้เคียงแบบมีเงื่อนไข (3) แบบสมการเป้าหมายคงที่หรือไม่คงที่ (Dynamics or Static Objective Function) ในหนึ่งรอบของการคำนวณอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงสมการเป้าหมาย เพื่อให้ได้คำตอบใหม่ ๆ เกิดขึ้นหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมการเป้าหมาย ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงสมการเป้าหมาย เช่น การค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบมีการชี้นำ (Guided Local Search) กรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมการเป้าหมาย เช่น วิธีระบบมด วิธีการเชิงพันธุกรรม วิธีการลอกแบบ วิธีเลียนแบบการอบอุ่น วิธีการค้นหาต้องห้าม วิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบวนรอบซ้ำ วิธีการค้นหาจากคำตอบใกล้เคียงแบบมีเงื่อนไข (4) แบบเปลี่ยนวิธีการหาคำตอบใกล้เคียงคำตอบปัจจุบัน (Neighborhood) คงที่และไม่คงที่ กรณีที่วิธีการหาคำตอบใกล้เคียงคงที่ ได้แก่ วิธีระบบมด วิธีการเชิงพันธุกรรม วิธีการลอกแบบ วิธีเลียนแบบการอบอุ่น วิธีการค้นหาต้องห้าม วิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบวนรอบซ้ำ ส่วนกรณีที่มีการเปลี่ยนวิธีการหาคำตอบที่ใกล้เคียง ได้แก่ วิธีการค้นหาจากคำตอบใกล้เคียงแบบมีเงื่อนไข (5) แบบมีและไม่มีหน่วยความจำ ถ้ามีการใช้หน่วยความจำ จะจำว่ามีคำตอบใดบ้างที่ผ่านมาแล้วนำมาเพื่อเป็นข้อมูลในการหาคำตอบรอบถัดไป ซึ่งกรณีที่ใช้หน่วยความจำที่ปรากฏชัด ได้แก่ วิธีระบบมด วิธีการค้นหาต้องห้าม ส่วนวิธีที่ไม่ใช้หน่วยความจำ เช่น วิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่แบบวนรอบซ้ำ

นอกจากนี้ยังมีวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของหลักการทำงานของกลุ่มประชากรในการแก้ปัญหาทางวิจัยในสาขาวิชาต่าง ๆ ที่ถูกสร้างขึ้นในรูปแบบวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีการเลียนแบบธรรมชาติและวิธีการการประยุกต์ใช้วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ (Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: VaNSAS) โดยผลงานวิจัยวิธีการเหล่านี้ เริ่มได้รับความสนใจมากขึ้นจนถึงปัจจุบัน

2.2.3.3 การประยุกต์ใช้วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ (Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: VaNSAS)

วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ (Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: VaNSAS) เป็นวิธีการเมตาฮิวริสติกรูปแบบใหม่ที่มีจุดมุ่งหมาย เพื่อช่วยค้นหาคำตอบในพื้นที่ต่าง ๆ ให้กว้างและเหมาะสมมากขึ้น โดยเป็นการใช้กลยุทธ์ของการค้นหาพื้นที่ใกล้เคียงโดยเป็นการนำวิธีการต่าง ๆ มาช่วยค้นหาคำตอบเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ (Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: VaNSAS) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและเข้าใจง่าย โดยมีขั้นตอนการค้นหาคำตอบ 5 ขั้นตอน (1) สร้างชุดคำตอบเริ่มต้น (2) การเลือกใช้กล่องดำที่จะดำเนินการหาคำตอบของชุดคำตอบเริ่มต้น (3) การทำงานของกล่องดำ (4) การอัปเดตคำตอบ และ

(5) การทำซ้ำขั้นตอนที่ (2) ถึง (4) จากนั้นทำซ้ำจนกว่าจะครบรอบที่กำหนด และรายงานคำตอบที่ดีที่สุด วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นหาวารามิเตอร์กระบวนการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเชื่อมแบบกวนด้วยแรงเสียดทานเป็นสิ่งสำคัญสำหรับคุณภาพของแนวเชื่อมที่สูง ชนิดของวัสดุมีผลต่อวารามิเตอร์กระบวนการและคุณสมบัติของแนวเชื่อม การเพิ่มประสิทธิภาพวารามิเตอร์มีความสำคัญต่อค่าความแข็งแรงและคุณภาพของแนวเชื่อม มีงานวิจัยของ Meengam and Sillapasa (2020) ในการหาวารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 6063 โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลในการทำทดลอง ซึ่งวารามิเตอร์ที่นำมาศึกษาทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุน ความเร็วในการเดินเชื่อม และลักษณะของเครื่องมือกวน โดยหาคำตอบสนองคือค่าความแข็งแรงดึงที่เหมาะสม พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 123.59 MPa ในส่วนของโครงสร้างโลหะวิทยาบริเวณรอยเชื่อมมีลักษณะเป็นเกรนหยาบ และบริเวณที่รับอิทธิพลจากความร้อนส่งผลให้อนุภาคของเกรนมีขนาดลดลง โครงสร้างที่เกิดขึ้นบริเวณเฟสของสารประกอบระหว่างโลหะ: ข้อบกพร่องที่นำไปสู่การลดความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามความแปรผันของวารามิเตอร์การเชื่อมส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความร้อนระหว่างกระบวนการเชื่อม นำไปสู่การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแข็งแรง โครงสร้างทางโลหะวิทยา และ/หรือ ข้อบกพร่องในโครงสร้างการเชื่อม

Shanavas and Dhas (2017) นำเสนอวิธี RSM สำหรับใช้ในการออกแบบการทดลองของกระบวนการเชื่อม เพื่อหาค่าวารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อม และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของความแข็งแรงดึงและการยึดตัวของเนื้อวัสดุ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อมทำให้เกิดความแข็งแรงดึงสูงสุดและมีข้อบกพร่องน้อยที่สุดบริเวณรอยเชื่อม การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเชื่อมส่งผลต่อด้านทานแรงดึงและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของบริเวณรอยเชื่อม Lakshminarayanan et al. (2008) ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Taguchi และวิเคราะห์ผลการทดลองโดย ANOVA ในการทดลองเชื่อมอะลูมิเนียมที่ต่างชนิด เพื่อหาวารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อมอะลูมิเนียมต่างชนิดที่ส่งผลให้เกิดความยึดตัวที่ดี และมีความแข็งแรงในการใช้งาน นอกจากนี้วารามิเตอร์ในการเชื่อมมีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ Tehyo, Muangjunburee and Chuchom (2011) ศึกษาวารามิเตอร์การเชื่อมของอะลูมิเนียมต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 356 และอะลูมิเนียมหล่อ 6061 ที่ผ่านการทำ T6 มาแล้ว โดยศึกษาหาวารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อม ส่งผลต่อความแข็งแรงดึง อิทธิพลของวารามิเตอร์ในการเชื่อมแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกิดขึ้น พฤติกรรมการไหลของวัสดุ และการผสมวัสดุในแนวเชื่อม ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องมีการใช้วารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 วิธีการพยากรณ์และพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการทบทวนวรรณกรรม

ผู้วิจัย	วิธีการ	วัสดุ	เชื่อมแบบต่อชน		พารามิเตอร์ที่เหมาะสม							
			เหมือนกัน	ต่างชนิดกัน	ความเร็วรอบ	ความเร็วเดินเชื่อม	มุมของเครื่องมือ	ลักษณะของตัว	อัตราส่วน D/d	แรงกด	ชนิดของเครื่องมือ	ทิศทาง
This work	Hybrid method D-optimal experimental design and VaNSAS	SSM-ADC 12	✓		✓	✓	✓	✓				✓
Meengam and Sillapasa (2020)	Factorial design	SSM-AI 6063	✓		✓	✓		✓				
Srichok et al. (2020)	Combination of RSM and MDE	AA 6061-T6	✓		✓	✓		✓		✓	✓	
Hartl et al. (2020)	Gaussian Process Regression	EN AW 6082-T6	✓		✓	✓						
Prasad and Namala (2018)	Taguchi method and Anova	AA5083 and AA6061		✓	✓	✓	✓					
Shanayas and Edwin Raja Dhas (2017)	RSM	AA 5052-H32	✓		✓	✓	✓	✓				
Kadaganchi et al. (2015)	RSM	AA2014-T6	✓		✓	✓	✓	✓				
Hartl et al. (2020)	ANN	AA 6082-T6	✓		✓	✓						
Bayazid et al. (2015)	Taguchi method	AA 6063-7075		✓	✓	✓						
Shojaeefard et al. (2014)	Combination of FEM and ANN	AA 5083	✓		✓	✓						

ตารางที่ 2.12 วิธีการพยากรณ์และพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการทบทวนวรรณกรรม (ต่อ)

ผู้วิจัย	วิธีการ	วัสดุ	เชื่อมแบบต่อชน		พารามิเตอร์ที่เหมาะสม							
			เหมือนกัน	ต่างชนิดกัน	ความเร็วรอบ	ความเร็วเดินเชื่อม	มุมของเครื่องมือกลาน	ลักษณะของตัวกลาน	อัตราส่วน D/d	แรงกด	ชนิดของเครื่องมือกลาน	ทิศทางการหมุนเครื่องมือกลาน
Teimouri and Baseri (2013)	Combination of ABC and ICA	aluminum	✓	✓	✓	✓						
Roshan et al. (2013)	Combination of RSM, ANFIS and SA	AA 7075	✓		✓	✓		✓		✓		
Aydin et al. (2010)	Combination of Taguchi method and GRA	AA 1050	✓		✓	✓			✓			
Tansel et al. (2010)	Combination of ANN and GA	AA 1080	✓		✓	✓						
Lakshminarayanan and Balasubramanian (2008)	Taguchi method	AA RDE-40	✓		✓	✓				✓		
Yousif et al. (2008)	ANN	Al alloy	✓		✓	✓						

RSM = Response surface method, MDE= Modified differential evolution, FEM = Finite element method, ANN = Artificial neural networks, SA = Simulated annealing algorithm, ANFIS = Adaptive neuro-fuzzy inference systems, GRA = Grey relation analysis, GA = Genetic algorithm, ABC = Artificial bee colony algorithm, ICA = Imperialistic competitive algorithm

จากตารางที่ 2.12 แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์หลักในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน คือ ความเร็วรอบเครื่องมือกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม มุมของเครื่องมือกวน และรูปทรงของเครื่องมือกวน ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมสามารถกำหนดได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงดังตารางที่ 2.13 อิทธิพลของพารามิเตอร์เหล่านี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแนวเชื่อม และเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่อาจละทิ้งได้ นอกจากนี้วิธีการสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งหลาย ๆ งานวิจัยได้ใช้วิธีการที่หลากหลาย

ตารางที่ 2.13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแข็งแรงดึงระหว่างวิธีเดียวและแบบผสม

วิธีการ	วัสดุ	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม							ความต้านทานแรงดึง (MPa)		% ความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงดึง
		ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเดินเชื่อม (mm/mim)	มุมเครื่องมือ กวน (°)	ลักษณะตัวกวน	อัตราส่วน D/d	แรงกด (kN)	วัสดุของตัวกวน	ค่าความต้านทานแรงดึงหลังเชื่อม	ค่าความต้านแรงดึงพื้นฐาน	
Single	SSM-6063	1320	60	3	cylindrical	3.84	-	H13 tool steel	120.7	149	18.99
	EN AW-6082-T6	1700	1500	2	conical thread and three flats	-	-	SK 50	255	332.97	23.41
	AA 2099-T83	800	450	1.5	tapered triangular and thread	-	15	H13 tool steel	390	558	30.1
	AA5052-H32 J	600	65	1.5	tapered square pin	-	-	H13 tool steel	202.58	216.58	6.47
	SSM 356-AA6061-T651	2000	80	3	cylindrical	4	4.4	JIS-SKH 57 tool steel	197.1	290 of AA6061	32.06 of AA6061

ตารางที่ 2.13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแข็งแรงดึงระหว่างวิธีเดียวและแบบผสม (ต่อ)

วิธีการ	วัสดุ	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม							ความต้านทานแรงดึง (MPa)		% ความแตกต่างของค่าความต้านทานแรงดึง
		ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วเดินเชื่อม (mm/min)	มุมเครื่องมือ กวน (°)	ลักษณะตัวกวน	อัตราส่วน D/d	แรงกด (kN)	วัสดุของตัวกวน	ค่าความต้านทานแรงดึงหลังเชื่อม	ค่าความต้านทานแรงดึงพื้นฐาน	
Hybrid	AA6061-T6	1417	60.21	-	Hexagonal-taper	-	8.44	SKD11	294.84	310	4.89
	AA7075	1400	105	-	Square	-	7.5	High carbon	227	241	5.80
	AA 1080	500	6.25	-	-	-	-	-	112	115	2.60
	Aluminum alloy	509.35	10.10	-	Straight cylindrical	-	7	high carbonic steel	110.26	112	1.15

ดังเช่นการใช้วิธีฮิวริสติกสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เพื่อให้ได้โซลูชันการปรับพารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมตามความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ในปี 2020 Hartl et al. (2020) ทำนายความแข็งแรงดึงสูงสุดเมื่อทำการเชื่อมวัสดุ AW 6082-T6 การคาดการณ์ความแข็งแรงดึงสูงสุดคือ 255 MPa พร้อมสถานะการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุด อัลกอริทึมการถดถอยแบบเกาส์เซียนมีความแม่นยำในการทำนายถึง 96% เมื่อเร็ว ๆ นี้ Hartl, Praehofer and Zaeh (2020) ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) เพื่อทำนายสถานะการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ AW-6082-T6 พบว่าอัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียมให้คำตอบที่แน่นอนในการคาดการณ์ 88% Yousif, Daws and Kazem (2008) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนใช้อัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียม ทำนายค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงดัด และการยึดตัวของบริเวณรอยเชื่อม ความเร็วในการหมุนและความเร็วในการเดินเชื่อมเป็นตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ข้อผิดพลาดเฉลี่ยที่คาดการณ์ไว้ของอัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียม คือ 0.84% สำหรับความแข็งแรงดึง 7.6% สำหรับความแข็งแรงดัด และ 13.29% สำหรับการยึดตัว

Palani and Elanchezhian (2018) ใช้การออกแบบการทดลองแบบ D-optimal บนพื้นฐานของ RSM เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน พบว่าการเพิ่มขึ้นของความแข็งบริเวณของรอยเชื่อมนั้นขึ้นอยู่กับควบคุมอุณหภูมิในการเชื่อม สถานะการเชื่อมที่เหมาะสมจะรักษาอุณหภูมิให้คงที่และโครงสร้างที่มีคุณภาพดีในรอยเชื่อม ซึ่งนำไปสู่ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงที่ดีด้วย โมเดลการทำนายมีความแม่นยำเฉลี่ย 97.30%

การเพิ่มประสิทธิภาพพารามิเตอร์กระบวนการที่ทำนายโดยใช้วิธีการค้นหาเฉพาะที่และวิธีฮิวริสติกจากการทบทวนวรรณกรรมแสดงให้เห็นถึงข้อผิดพลาดที่คาดการณ์ไว้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้วิธีการเดียว ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้วิธีการแบบผสมผสานเพื่อเพิ่มความแม่นยำ Srichok et al. (2020) นำเสนอการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียม 6061 ที่ผ่านการทำ T6 มาแล้ว ด้วยการนำวิธีการออกแบบการทดลองแบบ RSM มาผสมผสานกับอัลกอริทึม modified differential evolution (MDE) ซึ่งการนำ RSM มาใช้เพื่อระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงดึง และ MDE สำหรับใช้ในการทำนายปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุน ความเร็วในการเดินเชื่อม รูปทรงของเครื่องมือกวน แรงตามแนวแกน และวัสดุเครื่องมือ พารามิเตอร์กระบวนการที่เหมาะสมที่สุดให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 95.10% สำหรับวัสดุฐานเนื่องจากความเป็นเนื้อเดียวกันและไม่มีข้อบกพร่อง วิธีนี้ให้ความแม่นยำในการทำนาย 98.52% ดังนั้นนำเสนอวิธีการเชื่อมสำหรับอะลูมิเนียมหล่อ 7075 ที่รวม RSM, ANFIS และ SA มาใช้สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของความแข็งแรงและความแข็งแรง ปัจจัยหลักในกระบวนการเชื่อม ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุน ความเร็วในการเดินเชื่อม แรงในแนวแกน และเครื่องมือกวน สถานะที่เหมาะสมนำไปสู่ความแข็งแรงดึงสูงสุด โดยโครงสร้างต้องมีข้อบกพร่องเล็กน้อยในแนวเชื่อม

Shojaefard et al. (2013) ปรับปรุงกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ขั้นตอนแรกใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และขั้นตอนที่สองใช้อัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อทำนายการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด การเชื่อมนำไปสู่การเกิดความร้อนที่เพิ่มขึ้น ด้วยการเพิ่มความเร็วยรอบในการหมุนและลดความเร็วในการเดินเชื่อมลง นอกจากนี้ อุณหภูมิการเชื่อมที่สูงถูกลดโดยแรงในแนวแกนของเครื่องมือกวน ซึ่งทำให้เพิ่มอายุการใช้

งานของเครื่องมือกวน บริเวณรอยเชื่อมมีประสิทธิภาพสูงถึง 91% Tansel et al. (2010) ใช้ อัลกอริทึม GONNS ตามแนวทางแบบรวม ANN-GA สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพพารามิเตอร์ ปัจจัย ในกระบวนการเชื่อม ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนและความเร็วในการเดินเชื่อม คุณสมบัติทางกลที่ วิเคราะห์โดยอัลกอริทึม GONNS ได้แก่ ความแข็งแรงดึง การยึดตัว และความแข็ง และอัลกอริทึม GONNS มีความแม่นยำ 97.4% สำหรับการทำนายคุณสมบัติทางกล

การทบทวนวรรณกรรมพบว่าวิธีการรวมกันมีประสิทธิภาพในการทำนายถึง 96% วิธีแบบ ขั้นตอนเดียวให้ช่วงความแข็งแรงดึงแตกต่างกัน 6-32% แต่วิธีผสมแสดงให้เห็นความต้านแรงดึง 1-6% ซึ่งต่ำกว่าวิธีขั้นตอนเดียวดังที่แสดงในตารางที่ 2.13 อย่างไรก็ตาม การคาดคะเนที่แม่นยำนั้น ขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละตัว ซึ่งอัลกอริทึมฮิวริสติกมีหลากหลายแบบ และมีอัลกอริทึมฮิวริสติก หนึ่งที่มีค่าความแม่นยำในการทำนายสูง คือ วิธีอัลกอริทึมการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบ ไกล่เคียงแบบปรับค่าได้ เป็นอัลกอริทึมฮิวริสติกที่ใช้ในการทำนายผลอย่างแม่นยำ ความถูกต้องในการ แก้ปัญหาของอัลกอริทึมการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ ได้รับการพิสูจน์ โดยผู้ค้นคว้าซ้ำหลายราย Jirasirilerd et al. (2020); Pitakaso, Sethanan and Theeraviriya (2020) ใช้อัลกอริทึมการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ สำหรับการแก้ปัญหาการวางแผนการผลิต ซึ่งมีอัลกอริทึมที่สามารถใช้ในกระบวนการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบ ปรับค่าได้ อาจเป็นอัลกอริทึมวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์, การค้นหาในพื้นที่แบบวนซ้ำ วิธีการสลับ อัลกอริทึมวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์ที่ปรับเปลี่ยน การค้นหาพื้นที่ใกล้เคียงขนาดใหญ่ หรือการสลับเวลา การประมวลผลที่สั้นที่สุด อัลกอริทึมการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้ มีความแม่นยำในการทำนายผลสูงถึง 99.99% ดังนั้น อัลกอริทึมการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบ ไกล่เคียงแบบปรับค่าได้ จึงเหมาะสำหรับการทำนายพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเชื่อม เสียตทานแบบกวน ปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแนวเชื่อม ได้แก่ ความเร็วรอบในการ หมุนและความเร็วในการเดินเชื่อม ซึ่งส่งผลต่อการสร้างความร้อนและโครงสร้างทางโลหะวิทยา รูปทรงของเครื่องมือกวน และมุมเอียงของเครื่องมือยังเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพ ของแนวเชื่อมและลดจำนวนข้อบกพร่องได้ ปัจจัยทั้งสี่นี้ไม่ควรละเลยในกระบวนการเชื่อมเสียตทานแบบกวน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย วิธีการหาคำตอบการหาค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่เหมาะสม โดยสร้างเป็นสมการทำนายความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงดัด ในรูปแบบของสมการถดถอย (regression equation) และสร้างวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน แสดงดังภาพที่ 3.1 ซึ่งในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียด ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและรวบรวมข้อมูล โดยศึกษาข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

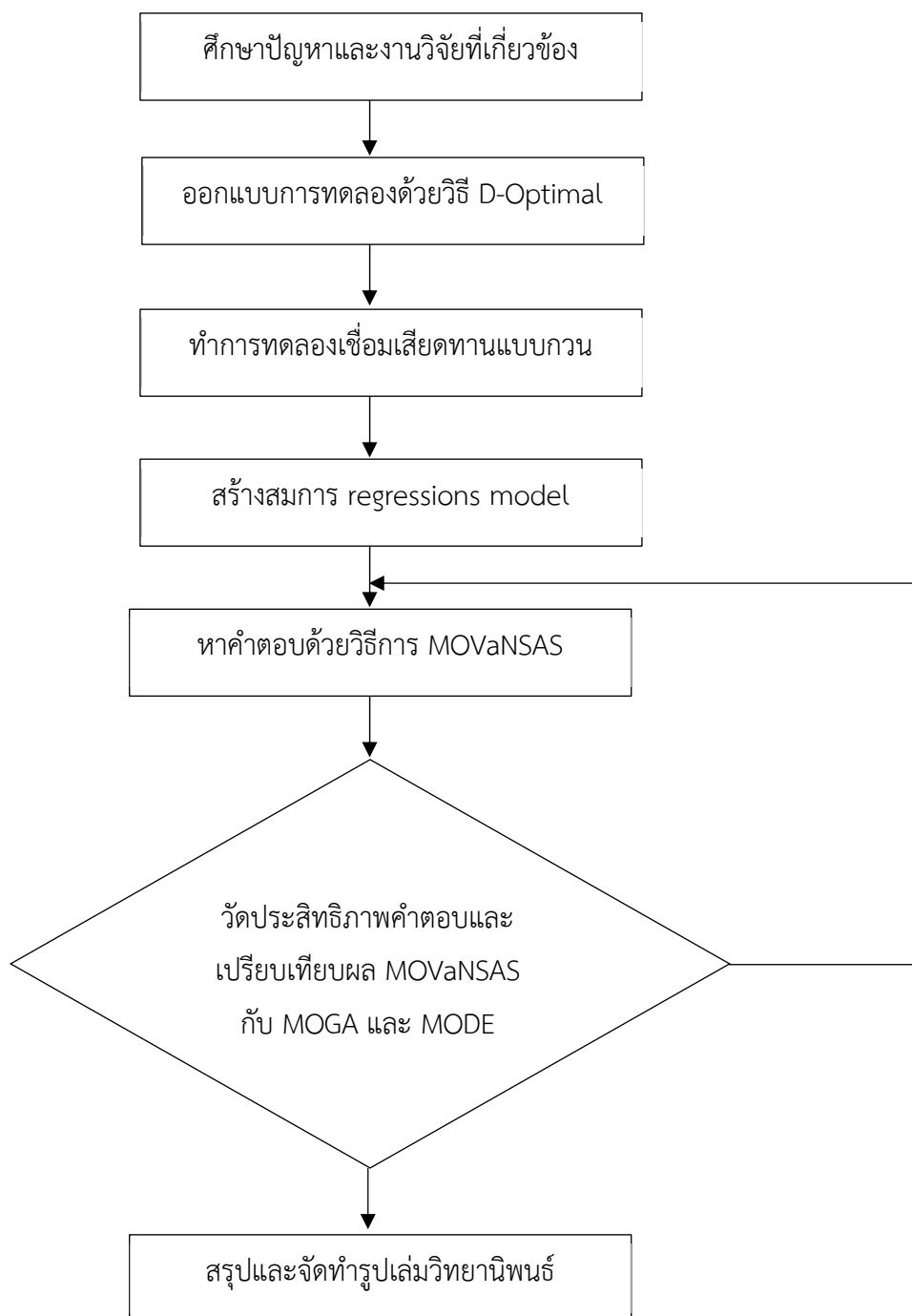
ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบการทดลองและทดสอบด้วยวิธีการออกแบบ D-Optimal

ขั้นตอนที่ 3 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในรูปแบบของสมการถดถอย (Regression modeling) ที่มีจุดประสงค์เพื่อให้มีค่าสูงสุดของความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงดัด

ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบและทดสอบอัลกอริทึมการหาค่าพารามิเตอร์ สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ด้วยวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์

ขั้นตอนที่ 5 เปรียบเทียบผลการหาคำตอบระหว่างวิธีทางพันธุกรรมหลายวัตถุประสงค์ วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างหลายวัตถุประสงค์ และวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์

ขั้นตอนที่ 6 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง พร้อมทั้งส่งบทความตีพิมพ์ในวารสารวิชาการที่เป็นที่ยอมรับ และจัดทำรูปเล่มรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์



ภาพที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.2.1 อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด ADC12

อะลูมิเนียมหล่อสามารถนำมาใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง เช่น โลหะผสมอะลูมิเนียมโลหะผสม Al-Si-Cu (ADC 12) ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์ ดังภาพที่ 3.2 เนื่องจากมีความสามารถในการหล่อที่ดีมีความแข็งแรงสูง และความหนาแน่นต่ำสมบัติเชิงกลของโลหะผสม Al-Si-Cu (ADC 12) โดยมีส่วนผสมทางด้านเคมี ดังตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.2 อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด ADC12

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางเคมีของอะลูมิเนียม SSM-ADC12

คุณสมบัติทางเคมี	Al	Cu	Mg	Fe	Sn	Ni	Zn	Mn	Si	Other
SSM-ADC 12	Bal.	2.0-3.0	0.1	1.3	0.15	0.3	3.0	0.5	9.5-11.5	0.5

3.2.2 เครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling Machine)

เป็นเครื่องที่ใช้ในการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด ADC 12 ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เครื่องกัดอัตโนมัติ

3.2.3 เครื่องมือกวน ชนิด AISI H13

ในการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด ADC 12 ครั้งนี้ได้ทำการออกแบบรูปแบบหัวกวนเป็นตัวแปรในการศึกษา โดยองค์ประกอบของหัวกวนสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังแสดงในภาพที่ 3.4 ประกอบไปด้วย

3.2.3.1 ตัวกวน (Stirrer) เป็นส่วนที่หมุนอยู่ในเนื้อของวัสดุและทำการกวนเนื้อของวัสดุให้เคลื่อนที่มารวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน

3.2.3.2 บ่า (Shoulder) เป็นส่วนที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานจนเกิดความร้อนที่ขึ้นงานจนเนื้อของวัสดุเกิดการเปลี่ยนสภาพ

3.2.3.3 ก้านจับยึด เป็นส่วนที่สวมเข้าไปในหัวจับยึดของเพลางานหมุน (Spindle) ของเครื่องกัดแนวตั้ง



ภาพที่ 3.4 หัวกวน ชนิด AISI H13

3.2.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

จากการทบทวนวรรณกรรมในบทที่ 2 พบว่า ปริมาณความร้อนมีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม และคุณลักษณะทางโลหะวิทยา ปัจจัยที่ก่อให้เกิดความร้อนของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ได้แก่ ความเร็วรอบในการกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม มุมในการเชื่อมของเครื่องมือกวน ลักษณะของเครื่องมือกวน และทิศทางของการหมุนของเครื่องมือกวน ซึ่งที่กล่าวมาข้างต้นส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อม โดยได้มีการออกแบบการทดลองตามปัจจัยต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ	
	-1	1
ปัจจัยต่อเนื่อง		
ความเร็วรอบในการกววน (rpm)	1100	2200
ความเร็วในการเดินเชื่อม (mm/min)	80	200
มุมในการเชื่อมของเครื่องมือกววน (Deg)	0	6
ปัจจัยไม่ต่อเนื่อง		
ลักษณะของเครื่องมือกววน	ทรงกระบอกเรียว	ทรงหกเหลี่ยม
ทิศทางการหมุนของเครื่องมือกววน	หมุนตามเข็มนาฬิกา	หมุนทวนเข็มนาฬิกา

หมายเหตุ: ซิดจำกัดบนและล่างของพารามิเตอร์ในซอฟต์แวร์สถิติ De-sign-Expert (Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN, USA) ถูกตั้งค่าเป็น -1 และ 1

3.3 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองแบบ D-optimal (D-opt) D-opt ถูกนำมาใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมในการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกววน ซึ่งมีจำนวนการทดลองขั้นต่ำ 19 การทดลอง อีก 5 การทดลอง เป็นการทดสอบการประมาณค่าของสมการถดถอย และมีการทำซ้ำอีก 5 การทดลอง รวมทั้งหมด 29 การทดลอง ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกววน

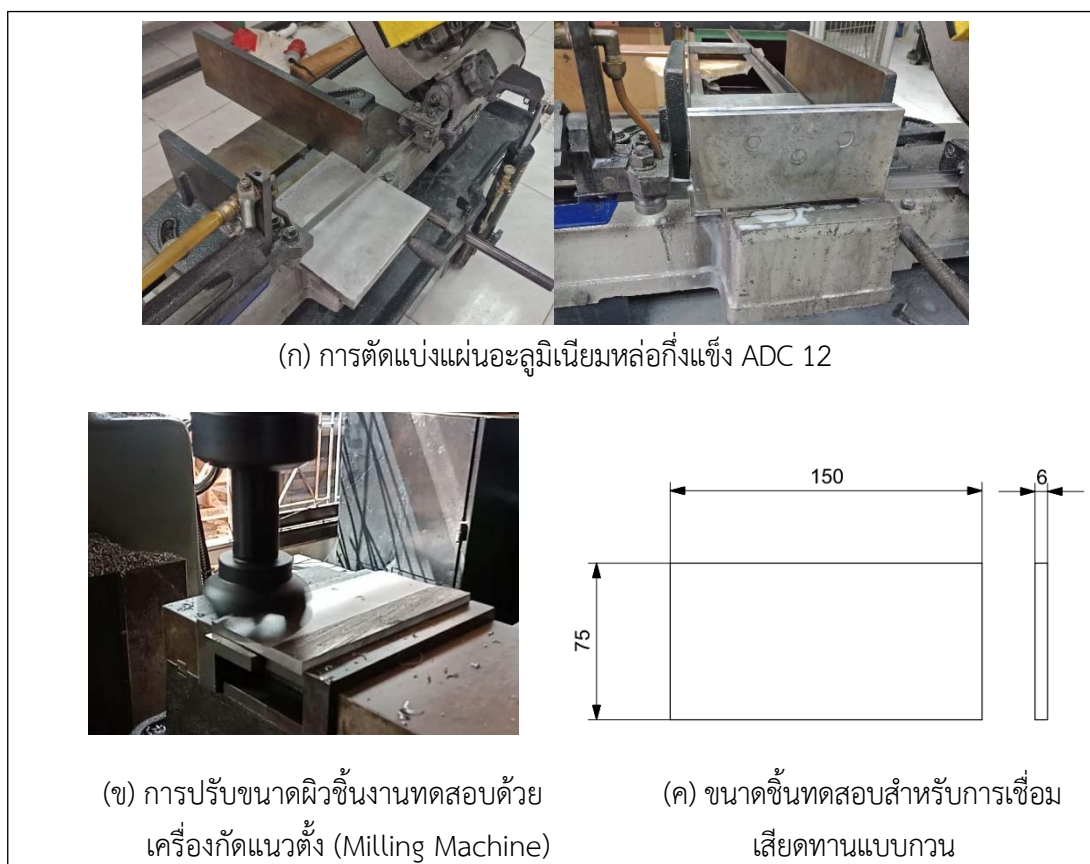
ลำดับ	ความเร็วรอบเครื่องมือกววน	ความเร็วในการเดินเชื่อม	มุมเอียงของเครื่องมือ	รูปทรงเครื่องมือกววน	ทิศทางการหมุนของเครื่องมือ
1	2062.92	142.75	3.41	Hexagon	ccw
2	1110.00	80.00	6.00	Hexagon	ccw
3	2023.17	168.30	4.03	Cylindrical	ccw
4	1803.75	200.00	6.00	Cylindrical	cw
5	1110.00	80.00	0.00	Cylindrical	ccw
6	2220.00	80.00	6.00	Cylindrical	cw
7	1110.00	80.00	6.00	Hexagon	ccw
8	1371.09	151.66	2.51	Cylindrical	ccw
9	1110.00	200.00	6.00	Hexagon	cw
10	1654.93	148.96	3.67	Hexagon	cw
11	2216.02	95.19	1.34	Cylindrical	ccw

ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (ต่อ)

ลำดับ	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวน	ความเร็วใน การเดินเชื่อม	มุมเอียงของ เครื่องมือ	รูปทรง เครื่องมือกวน	ทิศทางการหมุน ของเครื่องมือ
12	1110.00	200.00	6.00	Hexagon	cw
13	1484.65	96.41	2.72	Hexagon	cw
14	2220.00	80.00	6.00	Cylindrical	cw
15	1705.76	134.87	2.91	Hexagon	cw
16	1715.48	141.78	3.18	Hexagon	ccw
17	1827.64	128.46	1.71	Cylindrical	cw
18	1110.00	80.00	0.00	Cylindrical	ccw
19	1395.44	112.16	3.28	Hexagon	cw
20	1307.14	164.53	2.04	Cylindrical	cw
21	1338.46	200.00	1.61	Cylindrical	ccw
22	1896.10	168.39	3.46	Hexagon	cw
23	1688.31	152.64	4.57	Hexagon	ccw
24	1893.30	167.26	1.61	Cylindrical	cw
25	1445.26	142.86	3.42	Cylindrical	ccw
26	1863.64	147.26	3.56	Hexagon	ccw
27	1391.97	143.76	4.03	Cylindrical	cw
28	1717.21	140.79	1.22	Cylindrical	cw
29	2062.92	142.75	3.41	Hexagon	ccw

3.4 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ทำการเตรียมแผ่นอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็งของแข็งเกรด ADC12 ที่จะนำมาทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวน เริ่มต้นด้วยการตัดแบ่งแผ่นอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด ADC12 ให้ได้เป็น 4 ชิ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.5 (ก) จากนั้นนำชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นที่ตัดไว้ไปทำการปรับขนาดผิวชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง (Milling Machine) ดังภาพที่ 3.5 (ข) การปรับผิวชิ้นงานทดสอบให้มีขนาด 75×150×6 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.5 (ค) และหลังการกัดชิ้นงานทดสอบเสร็จแล้วทำการตะไบลบครีบทที่เกิดขึ้นจากการกัด



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุทดสอบสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

3.5 ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นกระบวนการเชื่อมที่อาศัยแรงเสียดทานทำให้เกิดความร้อนกับวัสดุ จากการสัมผัสกันของผิวชิ้นงานระหว่างป่าของหัวกวนกับชิ้นทดสอบ ผลจากความร้อนจะทำให้วัสดุอยู่ในภาวะกึ่งของแข็ง และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะอยู่ในสภาพเสียรูปถาวร โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยในการเชื่อม เช่น ชนิดของวัสดุ ความหนาของวัสดุ ความเร็วรอบ ความเร็วเดินเชื่อม เป็นต้น ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีขั้นตอนดังนี้

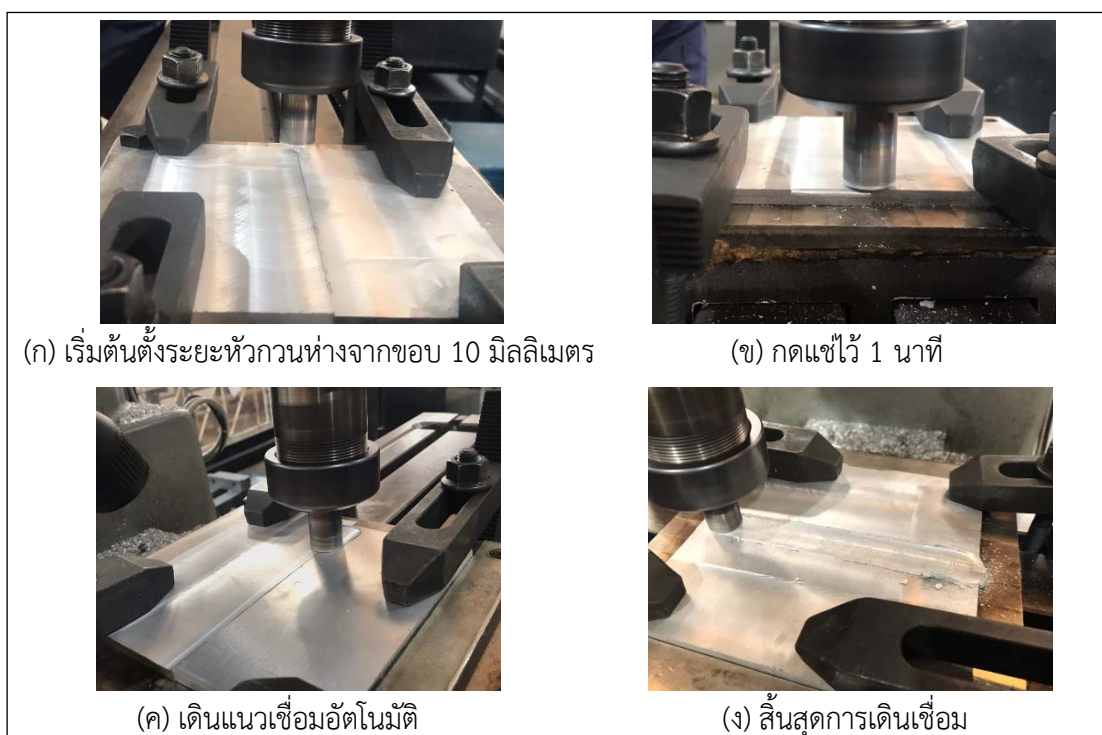
3.5.1 การติดตั้งเครื่องมืออุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบ (Fixture) ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จะทำการจับยึดชิ้นทดสอบกับแผ่นรองชิ้นทดสอบโดยใช้ตัวจับยึด (Fixture) กดทับชิ้นทดสอบให้แน่นหนา ขณะเดียวกันตัวจับยึดชิ้นทดสอบจำเป็นต้องยึดติดกับโต๊ะของเครื่องกัดด้วย เพื่อไม่ให้ชิ้นทดสอบเกิดการเคลื่อนที่ในขณะที่ทำการเชื่อม และหัวกวนจะยึดติดกับเพลากวน

3.5.2 การปรับมุมเอียงของเครื่องมือกวน (Tool) โดยการประยุกต์เอาเครื่องกัดอัตโนมัติมาเชื่อมเสียดทานแบบกวนซึ่งปรับหัวเครื่องกัดให้เอียงทำมุมตามแผนการทดลองแต่ละชิ้นทดสอบตามที่ออกแบบการทดลอง ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 การปรับมุมเอียงของเครื่องมือกล

3.5.3 ทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบต่อชน ซึ่งตัวกวนจะทำการเคลื่อนที่เข้ามาจากขอบชิ้นทดสอบ 10 มิลลิเมตร จากนั้นหัวกวน (Pin) จะทำการกดเข้าไปในรอยต่อชน จนกระทั่งปากของเครื่องมือเชื่อม (Tool) สัมผัสกับแผ่นชิ้นทดสอบ และกดแช่ไว้ 1 นาที เพื่อให้เกิดการกระจายความร้อนไปยังแผ่นชิ้นทดสอบ เมื่อกดครบ 1 นาที จะทำการเริ่มเดินแนวเชื่อมอัตโนมัติ ตามตัวแปรที่กำหนดไว้ของแต่ละชิ้นทดสอบ เมื่อเครื่องมือเชื่อมเคลื่อนที่ ปากเครื่องมือจะกดและอัดวัสดุให้เกิดการรวมตัวของวัสดุในแนวเชื่อม เมื่อสิ้นสุดแนวเชื่อมให้กดแช่ไว้ 1 นาที เพื่อให้การเสียดทานที่เกิดจากหัวกวน (Pin) คงที่และป้องกันการหักของหัวกวน ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

3.6.1 การทดสอบสมบัติทางกลโดยทดสอบแรงดึง เพื่อให้สามารถทราบถึงความแข็งแรงของชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมตามปัจจัยต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ โดยการเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงจะเริ่มจากการตัดชิ้นงานที่ทำการเชื่อมแต่ละปัจจัย ๆ ละ 3 ชิ้น และทำการกัดปรับขนาดให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM E8-04 ดังแสดงในภาพที่ 3.9 จากนั้นนำมาทดสอบค่าความแข็งแรงดึงโดยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์แสดงดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.9 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8-04



ภาพที่ 3.10 การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง

3.6.2 การทดสอบสมบัติทางกลโดยทดสอบแรงดัด เพื่อพิจารณาดูว่าที่ผิวด้านนอกของชิ้นงานทดสอบตรงบริเวณที่ทำการดัดโค้งเกิดรอยแตกหรือไม่ โดยทำการดัดตามขนาด และรูปร่างของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E190-14 ซึ่งจะทำการดัดชิ้นงานที่ทำการเชื่อมแต่ละสภาวะสภาวะละ 2 ชิ้น

คือ ขั้นที่ต้องการทดสอบด้านหน้าและด้านหลังแนวเชื่อม โดยนำมาทดสอบแรงดัดโค้ง โดยเครื่องทดสอบเบเนกประสงค์ แสดงดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 การทดสอบค่าความแข็งแรงดัด

3.7 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

หลังจากทำการเชื่อมแต่ละตัวแปรแล้ว จะนำชิ้นส่วนมาทำการศึกษาคูณสมบัติทางโลหะวิทยา เพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมโครงสร้างทางในระดับมหภาค (Macrostructure) และจุลภาค (Microstructure) โดยจะทำการศึกษาตัวแปรของการเชื่อมที่ผ่านการทดสอบแรงดึงที่มีค่าสูงที่สุด และต่ำที่สุดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

การตัดชิ้นงานที่ได้จากการทดลองหลังจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนำมาตัดเพื่อให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเพื่อป้องกันการเปลี่ยนโครงสร้างโดยใช้เลื่อยมือในการตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ที่มีขนาด 30 มิลลิเมตร โดยวัดจากตรงกลางแนวเชื่อมออกมาข้างละ 15 มิลลิเมตร เพื่อนำไปทำเรื่อนหุ้มชิ้นงานต่อไป

การทำเรื่อนหุ้มชิ้นงาน (Mounting) เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดเล็กไม่สามารถจำด้วยมือได้จะต้องใช้อุปกรณ์จับยึดเพื่อช่วยให้มีผิวหน้าเรียบโดยมีวิธีการดังนี้

3.7.1 ตัดท่อ PVC ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38.1 มิลลิเมตร สูง 20 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นเป้าหมายชิ้นงาน จากนั้นทำการขีดบริเวณที่เป็นครีปที่เกิดจากการเลื่อยตัดด้วยกระดาษทรายจากนั้นติดเทปกาวบริเวณบริเวณฐานล่างเพื่อไม่ให้เรซินไหลออก ทำการวางชิ้นงานบริเวณตรงกลางของฐานเป้าหมาย ดังแสดงในภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 เบ้าหล่อเรซินหุ้มชิ้นงาน

3.7.2 ผสมเรซินโดยมีสารตัวเร่งปฏิกิริยา และโคบอลต์เป็นตัวทำให้เรซินแข็งตัว มีอัตราส่วนผสม คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา 10 หยด ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (Methyl Ethyl Ketone Peroxide หรือ MEKP) และโคบอล 3 หยด ซึ่งมีความเข้มข้น 3% ใช้สำหรับโพลีเอสเตอร์เรซินงานหล่อใส่ต่อปริมาณเรซิน 100 มิลลิเมตร จากนั้นเทลงเบ้าหล่อดังแสดงในภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 ชิ้นงานการหล่อเรซิน

3.7.3 ทำการกลึงปาดหน้าเพื่อความเรียบผิวชิ้นงาน และลดขนาดให้เหลือ 13-14 มิลลิเมตร เพื่อทำการขัดผิวชิ้นงานและส่องกล้อง นำชิ้นทดสอบที่ผ่านการกลึงลดขนาดแล้ว มาทำการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80, 320, 400, 600, 800, 1,000 และ 1,500 ตามลำดับเมื่อขัดด้วยกระดาษทรายน้ำจนผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบเรียบตามต้องการแล้วจากนั้นก็ทำการขัดสักหลาดด้วยผงอะลูมิเนียมขนาด 0.5, 0.3 และ 0.1 ตามลำดับเพื่อเพิ่มคุณภาพของผิวหน้าชิ้นทดสอบให้ดีขึ้น แล้วจึงนำชิ้นทดสอบไปล้างด้วยแอลกอฮอล์และนำ ชิ้นทดสอบไปเป่าให้แห้ง เพื่อป้องกันการเกิดคราบน้ำบนผิวชิ้นทดสอบ จากนั้นก็นำไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา คือ โครงสร้างมหภาค และโครงสร้างจุลภาค ซึ่งอยู่ในหัวข้อการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในบทที่ 4

3.8 การใช้การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ (MOVaNSAS) เพื่อค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ (MOVaNSAS) เป็นวิธีการใหม่ในการค้นหาคำตอบในพื้นที่ที่มีการค้นหาขนาดใหญ่ หลายวิธีถูกรวบรวมเป็นหนึ่งวิธีในกล่องการปรับปรุงเพื่อค้นหาทางออกที่ดีที่สุด การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ ประกอบด้วยสี่ขั้นตอน ดังนี้

3.8.1 สร้างชุดของแทร็คเริ่มต้น

ชุดเริ่มต้นของแทร็คคือจำนวนจริงที่สร้างแบบสุ่มอย่างสม่ำเสมอจากสมการ 3.1

$$Y_{ij1} = U(0,1) \quad (3.1)$$

โดยที่ Y_{ij1} คือ ค่าในแทร็ค i ตำแหน่ง j เมื่อวนซ้ำ 1 รอบ
 J คือ จำนวนพารามิเตอร์ที่น่าสนใจ
 I คือ จำนวนแทร็ค ซึ่งเป็นตัวเลขที่กำหนดไว้ล่วงหน้า

วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ จากตัวอย่างมีทั้งหมด 3 ตัวแปร โดยได้สร้างคำตอบเริ่มต้นโดยกำหนดให้มีคำตอบของแทร็ค (Track) ทั้งหมด 7 แทร็ค ตามสมการที่ 3.1 แล้วนำแทร็คทั้ง 7 แทร็ค มาเป็นชุดคำตอบเริ่มต้นในการพัฒนาคำตอบ สามารถแสดงตัวอย่างลักษณะของตารางตัวเลขสุ่ม ได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การสร้างแทร็คของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอย่างง่าย

ตัวแปร แทร็ค	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวน (S)	ความเร็วในการ เดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของเครื่องมือ กวน (T)
1	0.36	0.18	0.69
2	0.24	0.78	0.53
3	0.73	0.93	0.32
4	0.29	0.19	0.57
5	0.77	0.85	0.95
6	0.42	0.49	0.69
7	0.58	0.23	0.06

จากตารางที่ 3.4 ขั้นตอนการสร้างคำตอบเริ่มต้น เมื่อได้ชุดคำตอบเริ่มต้นจากการสุ่มเลข 0 ถึง 1 แล้วได้ค่าคำตอบเลขสุ่มดังภาพข้างต้น จากนั้นผู้วิจัยเลือกชุดคำตอบเริ่มต้น 1 ชุด

เพื่อยกตัวอย่างการค้นหาคำตอบโดยใช้วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ในขั้นตอนถัดไป

$$R = L + e(U - L) \quad (3.2)$$

โดยที่ R คือ ค่าของพารามิเตอร์

L คือ ค่าต่ำสุดของพารามิเตอร์

U คือ ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์

e คือ ค่าในตำแหน่ง (Y_{ijt})

Y_{ijt} คือ ถูกถอดรหัสเป็นค่าของความเร็วรอบในการหมุน ความเร็วในการเดินเชื่อมมุมในการเชื่อมของเครื่องมือกล ลักษณะของเครื่องมือกล และทิศทางของการหมุนของเครื่องมือกล โดยใช้สมการ 3.2

กระบวนการเปลี่ยนแทรีคของหมายเลขสุมที่แสดงในตารางที่ 3.4 เพื่อใช้หาตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยการนำสมการ 3.2 มาใช้แปลงเลขสุม ตัวอย่างเช่น หาก Y_{111} (ความเร็วรอบเครื่องมือกล) คือ 0.36 ค่าของความเร็วในการหมุนจริง คือ $1100 + [(0.36) \times (2200 - 1100)] = 1496$ แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 กระบวนการเปลี่ยนแทรีคของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอย่างง่าย

ตัวแปร แทรีค	ความเร็วรอบ เครื่องมือกล (S)	ความเร็ว ในการเดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกล (T)
1	1496	101.6	4.14
2	1364	173.6	3.18
3	1903	191.6	1.92
4	1419	102.8	3.42
5	1947	182	5.7
6	1562	138.8	4.14
7	1738	107.6	0.36

จากตารางที่ 3.5 เมื่อได้ค่าของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนทั้ง 3 ตัว คือ ความเร็วรอบเครื่องมือกล ความเร็วในการเดินเชื่อม และมุมเอียงของเครื่องมือกล สามารถนำค่าที่ได้ไปใส่ในสมการถดถอยที่ 4.1-4.8 เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงดัด ดังแสดงตารางที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.6 ค่าความแข็งแรงดึง

สมการ แท่ง	หมุนตาม ทรงกระบอก	หมุนทวน ทรงกระบอก	หมุนตาม หกเหลี่ยม	หมุนทวน หกเหลี่ยม
1	159.78	114.13	132.06	102.40
2	126.70	49.38	199.65	138.32
3	159.08	72.79	241.38	171.09
4	163.26	93.34	150.25	96.34
5	93.71	117.02	113.40	152.72
6	127.41	86.10	138.36	113.05
7	184.20	42.85	200.43	75.08

ตารางที่ 3.7 ค่าความแข็งแรงดัด

สมการ แท่ง	หมุนตาม ทรงกระบอก	หมุนทวน ทรงกระบอก	หมุนตาม หกเหลี่ยม	หมุนทวน หกเหลี่ยม
1	107.62	486.81	119.65	126.83
2	112.07	564.27	49.14	129.35
3	141.69	591.31	31.75	109.37
4	108.95	504.56	101.15	124.76
5	96.94	480.75	94.09	105.89
6	97.94	499.01	84.17	113.24
7	133.16	557.62	40.01	92.47

3.8.2 ขั้นตอนการเลือกใช้กล่องที่จะดำเนินการหาคำตอบของชุดคำตอบเริ่มต้น

การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ จะเลือกใช้กล่องในการปรับปรุงคำตอบในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้ออกแบบวิธีการในกล่องทั้งหมด 4 วิธีที่จะดำเนินการหาคำตอบในกล่อง ดังนี้

3.8.2.1 วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DEM)

3.8.2.2 วิธีเปลี่ยนแท่งที่ดีที่สุด (B-TTM)

3.8.2.3 วิธีการเปลี่ยนแท่งแบบสุ่ม (R-TTM)

3.8.2.4 ติดตามการเปลี่ยนวิธีการ (TTM)

สำหรับการเลือกใช้กล่องจะดำเนินการเลือกใช้กล่องโดยใช้สูตรดังสมการที่ 3.3

$$P_{bt} = \frac{FN_{bt-1} + (1-F)A_{bt-1} + KI_{bt-1}}{\sum_{bt=1}^n W_{bt}} \quad (3.3)$$

- โดยที่ P_{bt} คือ ความน่าจะเป็นของการเลือกกล่องมาปรับปรุงในการวนซ้ำแต่ละรอบ
- N_{bt-1} คือ จำนวนแตร็คที่เลือกกล่องการปรับปรุงในการทำซ้ำก่อนหน้านี้
- A_{bt-1} คือ ค่าวัตถุประสงค์เฉลี่ยของแตร็คทั้งหมดที่เลือกกล่อง ในการวนซ้ำก่อนหน้านี้
- I_{bt-1} คือ คะแนนสะสม; เป็นไบนารี 0 และ 1
- 1 คือ กล่องหาทางออกที่ดีที่สุดในการทำซ้ำครั้งล่าสุด
- 0 คือ อื่น ๆ
- W_{bt} คือ ค่าน้ำหนักของกล่องการปรับปรุง
- F คือ Scale Factor เป็นจำนวนจริงที่มีค่าคงที่ระหว่าง 0 ถึง 1
(กำหนดให้ค่า $F = 0.5$)
- K คือ Parameter Factor เป็นจำนวนจริงที่มีค่าคงที่ระหว่าง 0 ถึง 1
(กำหนดให้ค่า $K = 0.3$) [72]

งานวิจัยนี้ในการคำนวณหาค่าตอบรอบที่ 1 จึงกำหนดค่าความน่าจะเป็นของการเลือกกล่องให้มีค่าเท่ากันคือ 0.25 จากนั้นคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นสะสมของแต่ละกล่องดังนี้

- (1) วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DEM) มีช่วงของความน่าจะเป็นสะสมอยู่ระหว่าง 0.01-0.25
- (2) วิธีการเปลี่ยนแตร็คแบบสุ่ม (R-TTM) มีช่วงของความน่าจะเป็นสะสมอยู่ระหว่าง 0.26-0.50
- (3) ติดตามการเปลี่ยนวิธีการ (TTM) มีช่วงของความน่าจะเป็นสะสมอยู่ระหว่าง 0.51-0.75
- (4) วิธีเปลี่ยนแตร็คที่ดีที่สุด (B-TTM) มีช่วงของความน่าจะเป็นสะสมอยู่ระหว่าง 0.76-1.00

จากนั้นทำการสุ่มเลข 0-1 ของแต่ละแตร็คจากตารางที่ 3.4 เพื่อเลือกการทำงานของกล่องดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 เลขสุ่มของแต่ละแตร็ค

ตัวแปร แตร็ค	ความเร็วรอบ เครื่องมือกว (S)	ความเร็วใน การเดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกว (T)	เลขสุ่ม	กล่อง
1	0.36	0.18	0.69	0.03	วิธี DEM
2	0.24	0.78	0.53	0.43	วิธี R-TTM
3	0.73	0.93	0.32	0.87	วิธี B-TTM
4	0.29	0.19	0.57	0.53	วิธี TTM
5	0.77	0.85	0.95	0.20	วิธี DEM
6	0.42	0.49	0.69	0.72	วิธี TTM
7	0.58	0.23	0.06	0.27	วิธี R-TTM

ตารางที่ 3.8 แสดงผลการของการเลือกกล่องเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำงานของกล่องโดยแทรีคที่ 1 และ 5 เลือกกล่องวิธีการ DEM เนื่องจากมีค่าเลขสุ่มอยู่ในช่วงของความน่าจะเป็นสะสมระหว่าง 0.01-0.25 แทรีคที่ 2 และ 7 เลือกกล่องวิธีการ R-TTM เนื่องจากมีค่าเลขสุ่มอยู่ในช่วงของความน่าจะเป็นสะสมระหว่าง 0.26-0.50 ส่วนแทรีคที่ 4 และ 6 เลือกกล่องวิธีการ TTM เนื่องจากมีค่าเลขสุ่มอยู่ในช่วงของความน่าจะเป็นสะสมระหว่าง 0.51-0.75 และแทรีคที่ 3 เลือกกล่องวิธีการ B-TTM เนื่องจากมีค่าเลขสุ่มอยู่ในช่วงของความน่าจะเป็นสะสมระหว่าง 0.76-1.00 เมื่อเลือกกล่องจนครบทุกแทรีคแล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

3.8.3 ปรับปรุงการทำงานของกล่อง

สำหรับขั้นตอนการทำงานของกล่องเป็นขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธีการทั้ง 4 วิธี สำหรับดำเนินการหาคำตอบ ซึ่งการทำงานในกล่อง มีวิธีการดังนี้

3.8.3.1 วิวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DEM)

วิธีนี้ใช้แนวคิดพื้นฐานของอัลกอริทึมวิวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง การอัปเดต Y_{ijt} สามารถทำได้โดยสมการ 3.4

$$Y_{ijq} = Y_{rjq} + F(Y_{mjt} - Y_{njt}) \quad (3.4)$$

เมื่อ Y_{ijt} เป็นค่าในองค์ประกอบของแทรีค i ตำแหน่ง j การวนซ้ำย่อย q การวนซ้ำย่อย q เป็นการวนซ้ำที่ใช้ในวิวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างที่การวนซ้ำ t (เป็นหลักการหลักของการแปรผันกลุยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์) หลังจากนั้นแบ่งแทรีคออกเป็นสองชุด ชุดแรกตั้งค่า Z และชุดอื่น ๆ ตั้งค่า A และตั้งค่า $I = Z \cup A$ เมื่อ I คือ จำนวนแทรีคทั้งหมด โดยที่ Z คือชุดของแทรีคที่เลือกวิวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างเป็นกล่องการปรับปรุง โดยปกติ Z จะมีเพียงหนึ่งแทรีค แต่ยังสามารถสุ่มเลือกได้มากกว่าหนึ่งแทรีคในการวนซ้ำแต่ละรอบ ส่วน A คือชุดของแทรีคที่ไม่เลือกวิวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างเป็นช่องปรับปรุง $Y_{njt} \in A$ และ $Y_{mjt} \in A$ ขณะที่ $Y_{ijt} \in Z$ เวกเตอร์เหล่านี้สุ่มเลือกจากชุดของแทรีค จากตารางที่ 3.5 ทำการสุ่มเลือก แทรีคที่ 1 และ 5 มาปรับปรุงการทำงานของกล่องโดยใช้วิวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง และสุ่มแทรีคที่ไม่เลือกวิวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างมาใช้ในรอบของการปรับปรุงย่อยในแต่ละรอบของการปรับปรุงย่อยสุ่มมารอบละ 2 แทรีค โดยใช้สมการที่ 3.4 ในการปรับปรุงรอบย่อยของแต่ละครั้ง โดยมีขั้นตอนดังนี้ นำแทรีคที่สุ่มทั้ง 2 แทรีคในแต่ละรอบย่อยของการปรับปรุงมาลบกัน แล้วนำค่าที่ได้มาคูณด้วยค่า F หลังจากนั้นนำค่าที่ได้มารวมกับแทรีคที่เลือกมาใช้กับวิวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง ซึ่งคำตอบในแต่ละรอบย่อยนั้น ถ้าพบว่าเลขสุ่มที่ได้มีค่าติดลบให้ปรับเป็นศูนย์ ถ้าเป็นบวกให้ใช้เลขสุ่มนั้นได้เลย และถ้าเลขสุ่มเกิน 1 ให้ปรับมาเป็น 1 ในการปรับปรุงรอบย่อยแต่ละรอบย่อย โดยแสดงตัวอย่างจำนวน 3 รอบย่อยของการปรับปรุงในแทรีคที่ 1 แสดงดังตารางที่ 3.9-3.11

ตารางที่ 3.9 วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างของแตร็คที่ 1 รอบย่อยที่ 1

วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง ของแตร็คที่ 1	ความเร็วรอบ เครื่องมือกลวน (S)	ความเร็วในการ เดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกลวน (T)
Y_{rjq}	0.36	0.18	0.69
Y_{mjt}	0.29	0.19	0.57
Y_{njt}	0.77	0.85	0.95
$Y_{mjt} - Y_{njt}$	-0.48	-0.66	-0.38
$F(Y_{mjt} - Y_{njt})$	-0.24	-0.33	-0.19
$Y_{rjq} + F(Y_{mjt} - Y_{njt})$	0.12	-0.15	0.5
Y_{ijq} รอบย่อยที่ 1	0.12	0	0.5
แปลงค่าจากสมการ 3.2	1,232	80	3

ตารางที่ 3.10 วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างของแตร็คที่ 1 รอบย่อยที่ 2

วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง ของแตร็คที่ 1	ความเร็วรอบ เครื่องมือกลวน (S)	ความเร็วในการ เดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกลวน (T)
Y_{rjq}	0.36	0.18	0.69
Y_{mjt}	0.24	0.78	0.53
Y_{njt}	0.73	0.93	0.32
$Y_{mjt} - Y_{njt}$	-0.49	-0.15	0.21
$F(Y_{mjt} - Y_{njt})$	-0.245	-0.075	0.105
$Y_{rjq} + F(Y_{mjt} - Y_{njt})$	0.115	0.105	0.795
Y_{ijq} รอบย่อยที่ 2	0.115	0.105	0.795
แปลงค่าจากสมการ 3.2	1,226.5	92.6	4.77

ตารางที่ 3.11 วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างของแตร็คที่ 1 รอบย่อยที่ 3

วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง ของแตร็คที่ 1	ความเร็วรอบ เครื่องมือกลวน (S)	ความเร็วในการ เดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกลวน (T)
Y_{rjq}	0.36	0.18	0.69
Y_{mjt}	0.77	0.85	0.95
Y_{njt}	0.42	0.49	0.69
$Y_{mjt} - Y_{njt}$	0.35	0.36	0.26
$F(Y_{mjt} - Y_{njt})$	0.175	0.18	0.13
$Y_{rjq} + F(Y_{mjt} - Y_{njt})$	0.535	0.36	0.82
Y_{ijq} รอบย่อยที่ 3	0.535	0.36	0.82
แปลงค่าจากสมการ 3.2	1,688.5	123.2	4.92

หลังจากมีการปรับปรุงในแต่ละรอบย่อยแล้ว จะได้ค่าเลขคู่ในแต่ละรอบย่อย ซึ่งนำเลขคู่ในแต่ละรอบย่อยไปแปลงค่าในสมการ 3.2 หลังจากได้ค่าความเร็วรอบเครื่องมือ ความเร็วในการเดินเชื่อม และมุมเอียงของเครื่องมือกวนในแต่ละรอบย่อยแล้ว นำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการ 4.1-4.8 เพื่อที่จะได้ค่าของตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ค่า คือ ค่าความแข็งแรงดึงและแรงดัด ดังแสดงในตารางที่ 3.12 และ 3.13

ตารางที่ 3.12 ค่าความแข็งแรงดึงของแท่งที่ 1 ทั้ง 3 รอบย่อย

สมการ รอบย่อยที่	หมุนตาม ทรงกระบอก	หมุนทวน ทรงกระบอก	หมุนตาม หกเหลี่ยม	หมุนทวน หกเหลี่ยม
1	193.38	101.65	169.65	93.92
2	168.50	127.32	136.10	110.92
3	132.25	118.90	108.90	111.55

ตารางที่ 3.13 ค่าความแข็งแรงดัดของแท่งที่ 1 ทั้ง 3 รอบย่อย

สมการ รอบย่อยที่	หมุนตาม ทรงกระบอก	หมุนทวน ทรงกระบอก	หมุนตาม หกเหลี่ยม	หมุนทวน หกเหลี่ยม
1	113.29	110.98	110.43	136.11
2	74.84	55.32	110.38	118.86
3	96.81	67.36	114.29	112.85

วิธีการถดถอยหาค่าดำเนินการทุก ๆ Y_{ijq} ผลรวมของน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ถูกนำมาใช้ในการเลือกแท่ง ดังสมการ 3.5 $f^v(y_i)$ เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยที่ $v \in (1, 2, 3, \dots, V)$ ของแท่ง Y_{ijq} เมื่อ V คือ จำนวนวัตถุประสงค์ของโมเดล w_v คือ น้ำหนักที่แสดงไว้ของวัตถุประสงค์ v

$$f_{iq} = \sum_{v=1}^V w_v f^v(y_i) \quad (3.5)$$

จากนำเลขคู่ที่ได้ในแต่ละรอบย่อยของการปรับปรุงในรอบที่ 1 มาทำการแปลงเป็นค่าตัวแปร และแทนค่าในสมการที่ 4.1-4.8 เรียบร้อยแล้ว จะได้ค่าความแข็งแรงดึงทั้งหมด 12 ค่า และค่าความแข็งแรงดัดทั้งหมด 12 ค่า เช่นกัน หลังจากนั้นนำมาถดถอยหาค่าตามสมการที่ 3.5 โดยตัวแปรที่ตอบสนองของการวิจัยมี 2 ตัว ดังนั้นต้องมีการแบ่งสัดส่วนน้ำหนัก ซึ่งให้ w_1 เป็นสัดส่วนน้ำหนักของตัวตอบสนองที่ 1 คือ ค่าความแข็งแรงดึง ส่วน w_2 เป็นสัดส่วนน้ำหนักของตัวตอบสนองที่ 2 คือ ค่าความแข็งแรงดัด โดยทำการสุ่ม w_1 ในแต่ละรอบของการปรับปรุงกล่อง ซึ่งในการยกตัวอย่างทางผู้วิจัยได้สุ่ม $w_1=0.3$ ดังนั้น w_2 จึงเท่ากับ 0.7 เพราะ $w_1+w_2=1$ ดังตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 ผลรวมของน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์รอบที่ 1 ของวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง

ลำดับ ที่	ความแข็งแรงดึง (UTS)	ความแข็งแรงดัด (MBS)	$w_1=0.3$	$w_2=0.7$	ผลรวมของน้ำหนัก
1	193.37	113.29	58.01	79.31	137.32
2	101.65	110.98	30.49	77.68	108.18
3	169.65	110.43	50.89	77.30	128.20
4	93.92	136.11	28.17	95.28	123.45
5	168.50	74.84	50.55	52.39	102.94
6	127.32	55.32	38.20	38.72	76.92
7	136.10	110.38	40.83	77.26	118.09
8	110.92	118.85	33.28	83.20	116.47
9	132.25	96.81	39.68	67.76	107.44
10	118.90	67.36	35.67	47.15	82.82
11	108.90	114.29	32.67	80.00	112.68
12	111.55	112.47	33.47	78.99	112.46

การอัปเดต Y_{ijq+1} จะดำเนินการโดยใช้สมการที่ 3.6

$$Y_{ijq+1} = \begin{cases} Y_{ijq} & \text{if } f^v(y_r) \leq f_{iq} \text{ and update } f^v(y_r) = f_{iq} \\ Y_{rjq} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.6)$$

จากตารางที่ 3.14 ได้ผลรวมของน้ำหนักโดยการแบ่งสัดส่วนของน้ำหนักของตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ค่า ในรอบที่ 1 หลังจากนั้นนำมาอัปเดตแตร็คหลังจากการปรับปรุงกล่องในรอบที่ 1 โดยการนำมาคำนวณน้ำหนักที่มากที่สุดในรอบที่ 1 เพื่อนำไปเป็นตัวแทนในการปรับปรุงกล่องโดยวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างในรอบที่ 1 ต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 ค่ามากที่สุดของผลรวมน้ำหนัก

ลำดับที่	ผลรวมของน้ำหนัก	สมการ
1	137.32	หมุนตามทรงกระบอก
2	108.18	หมุนทวนทรงกระบอก
3	128.20	หมุนตามหกเหลี่ยม
4	123.45	หมุนทวน หกเหลี่ยม
5	102.94	หมุนตามทรงกระบอก
6	76.92	หมุนทวนทรงกระบอก
7	118.09	หมุนตามหกเหลี่ยม

ตารางที่ 3.15 ค่ามากที่สุดของผลรวมน้ำหนัก (ต่อ)

ลำดับที่	ผลรวมของน้ำหนัก	สมการ
8	116.47	หมุนทวนหกเหลี่ยม
9	107.44	หมุนตามทรงกระบอก
10	82.82	หมุนทวนทรงกระบอก
11	112.68	หมุนตามหกเหลี่ยม
12	112.46	หมุนทวนหกเหลี่ยม

จากตารางที่ 3.15 เมื่อนำมาเรียงลำดับดูผลรวมของน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ พบว่า ผลรวมของน้ำหนัก 137.32 มีค่ามากที่สุด ซึ่งการปรับปรุงกล่องโดยวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างในรอบที่ 1 ของแทรีคที่ 1 มาจากการแทนค่าความเร็วรอบเครื่องมือกวน คือ 1,232 รอบ/นาที ความเร็วในการเดินเชื่อม คือ 80 มิลลิเมตร/นาที และมุมเอียงของเครื่องมือกวน คือ 3 องศา ซึ่งปรากฏอยู่ในการปรับปรุงรอบย่อยที่ 1 ดังนั้น จากการปรับปรุงกล่องของแทรีคที่ 1 ในรอบที่ 1 จะอัปเดตเลขสุ่มส่วนในแทรีคที่ 5 ทำตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.16 แทรีคที่ 1 และ 5 ถูกอัปเดตในรอบที่ 1 ด้วยวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง

ตัวแปร แทรีค	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวน (S)	ความเร็วใน การเดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวน (T)
1	0.12	0	0.5
5	0.68	0.995	0.87

3.8.3.2 วิธีการเปลี่ยนแทรีคแบบสุ่ม (R-TTM)

วิธีนี้ใช้แนวคิดพื้นฐานของอัลกอริทึมการเปลี่ยนแปลง R-TTM ใช้สมการ 3.7 ในการแปลง ในขณะที่ rand_i เป็นตัวเลขสุ่มตั้งแต่ 0 ถึง 1

$$Y_{ijq+1} = \begin{cases} Y_{ijq} & \text{if } \text{rand}_i \leq CR \\ Y_{hjt} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.7)$$

เมื่อ Y_{hjq} เป็นแทรีคสุ่มใหม่ (แทรีค h , ตำแหน่ง j , การวนซ้ำย่อย q) เมื่อ $Y_{hjq} = U(0,1)$ และ CR ถูกตั้งค่าเป็น 0.9 (Pitakaso et al., 2021) โดยในแทรีคที่ 2 และ 7 มีการปรับปรุงด้วยวิธีการเปลี่ยนแทรีคแบบสุ่ม ซึ่งนำแทรีคที่ 2 และ 7 มาเปรียบเทียบกับเลขสุ่ม ถ้าพบว่าเลขที่สุ่มขึ้นมานั้นมีค่ามากกว่าค่า CR จะทำการเปลี่ยนเลขสุ่มของแทรีคที่ 2 และ 7 เป็นเลขสุ่มตัวใหม่ แต่ถ้าเลขที่สุ่มขึ้นมานั้นมีค่าน้อยกว่าค่า CR จะไม่มีการเปลี่ยนเลขสุ่มของแทรีคที่ 2 และ 7 โดยทำการคำนวณใน 3 รอบย่อย ดังแสดงในตารางที่ 3.17-3.19

ตารางที่ 3.17 วิธีการเปลี่ยนแตร็คแบบสุมของแตร็คที่ 2 รอบย่อยที่ 1

วิธีการเปลี่ยนแตร็คแบบสุม ของแตร็คที่ 2	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวาน (S)	ความเร็วใน การเดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวาน (T)
แตร็ค 2	0.24	0.78	0.53
เลขสุมใหม่	0.96	0.88	0.91
เลือกจากสมการ 3.7	0.55	0.78	0.70
แปลงค่าจากสมการ 3.2	1704.13	173.6	0.70

ตารางที่ 3.18 วิธีการเปลี่ยนแตร็คแบบสุมของแตร็คที่ 2 รอบย่อยที่ 2

วิธีการเปลี่ยนแตร็คแบบสุม ของแตร็คที่ 2	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวาน (S)	ความเร็วใน การเดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวาน (T)
แตร็ค 2	0.24	0.78	0.53
เลขสุมใหม่	0.06	0.82	0.95
เลือกจากสมการ 3.7	0.24	0.78	0.83
แปลงค่าจากสมการ 3.2	1364	173.6	4.99

ตารางที่ 3.19 วิธีการเปลี่ยนแตร็คแบบสุมของแตร็คที่ 2 รอบย่อยที่ 3

วิธีการเปลี่ยนแตร็คแบบสุม ของแตร็คที่ 2	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวาน (S)	ความเร็วใน การเดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวาน (T)
แตร็ค 2	0.24	0.78	0.53
เลขสุมใหม่	0.89	0.17	0.26
เลือกจากสมการ 3.7	0.24	0.78	0.53
แปลงค่าจากสมการ 3.2	1364	173.6	3.18

หลังจากมีการปรับปรุงในแต่ละรอบย่อยแล้ว จะได้ค่าเลขสุมในแต่ละรอบย่อย ซึ่งนำเลขสุมในแต่ละรอบย่อยไปแปลงค่าในสมการ 3.2 หลังจากได้ค่าความเร็วรอบเครื่องมือกวาน ความเร็วในการเดินเชื่อม และมุมเอียงของเครื่องมือกวานในแต่ละรอบย่อยแล้ว นำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการ 4.1-4.8 เพื่อที่จะได้ค่าของตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ค่า คือ ค่าความแข็งแรงดึงและแรงตัด ดังแสดงในตารางที่ 3.20 และ 3.21

ตารางที่ 3.20 ค่าความแข็งแรงดึงของแท่งที่ 2 ทั้ง 3 รอบย่อย

รอบย่อยที่ \ สมการ	หมุนตาม ทรงกระบอก	หมุนทวน ทรงกระบอก	หมุนตาม หกเหลี่ยม	หมุนทวน หกเหลี่ยม
1	114.15	83.13	156.13	141.11
2	96.26	70.61	145.46	135.80
3	126.70	49.38	199.65	138.32

ตารางที่ 3.21 ค่าความแข็งแรงดัดของแท่งที่ 2 ทั้ง 3 รอบย่อย

รอบย่อยที่ \ สมการ	หมุนตาม ทรงกระบอก	หมุนทวน ทรงกระบอก	หมุนตาม หกเหลี่ยม	หมุนทวน หกเหลี่ยม
1	112.75	128.03	76.81	120.09
2	83.07	108.26	68.37	121.56
3	112.07	164.27	49.14	129.35

จากนำเลขคู่ที่ได้ในแต่ละรอบย่อยของการปรับปรุงในรอบที่ 1 มาทำการแปลงเป็นค่าตัวแปร และแทนค่าในสมการที่ 4.1-4.8 เรียบร้อยแล้ว จะได้ค่าความแข็งแรงดึงทั้งหมด 12 ค่า และค่าความแข็งแรงดัดทั้งหมด 12 ค่า เช่นกัน หลังจากนั้นนำมาถอดรหัสตามสมการที่ 3.5 โดยตัวแปรที่ตอบสนองของการวิจัยมี 2 ตัว ดังนั้นต้องมีการแบ่งสัดส่วนน้ำหนัก ซึ่งให้ w_1 เป็นสัดส่วนน้ำหนักของตัวตอบสนองที่ 1 คือ ค่าความแข็งแรงดึง ส่วน w_2 เป็นสัดส่วนน้ำหนักของตัวตอบสนองที่ 2 คือ ค่าความแข็งแรงดัด โดยทำการสุ่ม w_1 ในแต่ละรอบของการปรับปรุงกล่อง ซึ่งในการยกตัวอย่างทางผู้วิจัยได้สุ่ม $w_1=0.2$ ดังนั้น w_2 จึงเท่ากับ 0.8 เพราะ $w_1+w_2=1$ ดังตารางที่ 3.22

ตารางที่ 3.22 ผลรวมของน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์รอบที่ 1 ของวิธีการเปลี่ยนแท่งแบบสุ่ม

ลำดับที่	ความแข็งแรงดึง (UTS)	ความแข็งแรงดัด (MBS)	$w_1=0.2$	$w_2=0.8$	ผลรวมของน้ำหนัก
1	114.15	112.75	22.83	90.20	113.03
2	83.13	128.03	16.63	102.42	119.05
3	156.13	76.81	31.23	61.45	92.67
4	141.11	120.09	28.22	96.07	124.29
5	96.26	83.07	19.25	66.45	85.71
6	70.61	108.26	14.12	86.61	100.73
7	145.46	68.37	29.09	54.69	83.79
8	135.80	121.56	27.16	97.25	124.41

ตารางที่ 3.22 ผลรวมของน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์รอบที่ 1 ของวิธีการเปลี่ยนแตร็คแบบสุ่ม (ต่อ)

ลำดับ ที่	ความแข็งแรง ดึง (UTS)	ความแข็งแรง ดัด (MBS)	$w_1=0.2$	$w_2=0.8$	ผลรวมของ น้ำหนัก
9	126.70	112.07	25.34	89.65	114.99
10	49.38	164.27	9.88	131.42	141.29
11	199.65	49.14	39.93	39.31	79.24
12	138.32	129.35	27.66	103.48	131.14

จากตารางที่ 3.22 ได้ผลรวมของน้ำหนักโดยการแบ่งสัดส่วนของน้ำหนักของตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ค่า ในรอบที่ 1 หลังจากนั้นนำมาอัปเดตแตร็คหลังจากการปรับปรุงกล่องในรอบที่ 1 โดยการนำมาหาค่าน้ำหนักที่มากที่สุดในรอบที่ 1 เพื่อนำไปเป็นตัวแทนในการปรับปรุงกล่องโดยวิธีการเปลี่ยนแตร็คแบบสุ่มในรอบที่ 1 ต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 3.23

ตารางที่ 3.23 ค่ามากที่สุดของผลรวมน้ำหนัก

ลำดับที่	ผลรวมของน้ำหนัก	สมการ
1	113.03	หมุนตามทรงกระบอก
2	119.05	หมุนทวนทรงกระบอก
3	92.67	หมุนตามหกเหลี่ยม
4	124.29	หมุนทวน หกเหลี่ยม
5	85.71	หมุนตามทรงกระบอก
6	100.73	หมุนทวนทรงกระบอก
7	83.79	หมุนตามหกเหลี่ยม
8	124.41	หมุนทวนหกเหลี่ยม
9	114.99	หมุนตามทรงกระบอก
10	141.29	หมุนทวนทรงกระบอก
11	79.24	หมุนตามหกเหลี่ยม
12	131.14	หมุนทวนหกเหลี่ยม

จากตารางที่ 3.23 เมื่อนำมาเรียงลำดับดูผลรวมของน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ พบว่า ผลรวมของน้ำหนัก 141.29 มีค่ามากที่สุด ซึ่งการปรับปรุงกล่องโดยวิธีการเปลี่ยนแตร็คแบบสุ่มในรอบที่ 1 ของแตร็คที่ 2 มาจากการแทนค่าความเร็วรอบเครื่องมือกวน คือ 1,364 รอบ/นาที ความเร็วในการเดินเชื่อม คือ 173.6 มม./นาที และมุมเอียงของเครื่องมือกวน คือ 3.18 องศา ซึ่งปรากฏอยู่ในการปรับปรุงรอบย่อยที่ 3 ดังนั้น จากการปรับปรุงกล่องของแตร็คที่ 2

ในรอบที่ 1 จะอัปเดตเลขสุ่ม ส่วนในแทร์คที่ 7 ทำตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นตามลำดับ
ดังแสดงในตารางที่ 3.24

ตารางที่ 3.24 แทร์คที่ 2 และ 7 ถูกอัปเดตในรอบที่ 1 ด้วยวิธีการเปลี่ยนแทร์คแบบสุ่ม

ตัวแปร แทร์ค	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวน (S)	ความเร็วใน การเดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวน (T)
2	0.24	0.78	0.53
7	0.99	0.37	0.06

3.8.3.3 ติดตามการเปลี่ยนวิธีการ (TTM)

แทร์คที่มีอยู่จะใช้กับด้วย Y_{ijq} U Z ในขณะที่ Y_{mjq} U A ดังสมการ 3.8 ใช้เพื่อ
ดำเนินการ TTM

$$Y_{ijq+1} = \begin{cases} Y_{ijq} & \text{if } \text{rand}_i \leq CR \\ Y_{mit} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.8)$$

ในส่วนของแทร์คที่ 4 และ 6 ปรับปรุงโดยใช้การติดตามเปลี่ยนวิธีการ โดยมี
วิธีการปรับปรุง คือ นำแทร์คที่ไม่ใช่ 4 และ 6 มาเป็นตัวตั้งต้นเพื่อเปรียบเทียบกับแทร์คที่ 4 และ 6
แล้วกำหนดเลขสุ่มขึ้นมาอีกแทร์คเพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่า CR โดยกำหนดให้เท่ากับ 0.9 ถ้าเลขสุ่มที่
สุ่มขึ้นมาีค่ามากกว่า CR ให้เลือกใช้เลขสุ่มที่ไม่ใช่แทร์ค 4 และ 6 แต่ถ้าเลขที่สุ่มขึ้นมาีค่าน้อยกว่า
CR ให้เลือกใช้เลขสุ่มที่แทร์คที่ 4 และ 6 ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3.8 โดยสามารถคำนวณได้ 3 รอบ
ย่อย ดังแสดงในตารางที่ 3.25-3.27

ตารางที่ 3.25 วิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการของแทร์คที่ 4 รอบย่อยที่ 1

วิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการ ของแทร์คที่ 4	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวน (S)	ความเร็วในการ เดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวน (T)
แทร์คตัวตั้งต้น (แทร์ค 7)	0.58	0.23	0.06
แทร์ค 4 (ใช้ TTM)	0.29	0.19	0.57
เลขสุ่มใหม่	0.94	0.38	0.53
เลือกจากสมการ 3.8	0.58	0.19	0.57
แปลงค่าจากสมการ 3.2	1738	102.8	0.57

ตารางที่ 3.26 วิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการของแตร็คที่ 4 รอบย่อยที่ 2

วิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการ ของแตร็คที่ 4	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวาน (S)	ความเร็วในการ เดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวาน (T)
แตร็คตัวตั้งต้น (แตร็ค 1)	0.36	0.18	0.69
แตร็ค 4 (ใช้ TTM)	0.29	0.19	0.57
เลขสุมใหม่	0.87	0.96	0.99
เลือกจากสมการ 3.8	0.29	0.18	0.69
แปลงค่าจากสมการ 3.2	1419	101.6	4.14

ตารางที่ 3.27 วิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการของแตร็คที่ 4 รอบย่อยที่ 3

วิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการ ของแตร็คที่ 4	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวาน (S)	ความเร็วในการ เดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวาน (T)
แตร็คตัวตั้งต้น (แตร็ค 2)	0.24	0.78	0.53
แตร็ค 4 (ใช้ TTM)	0.29	0.19	0.57
เลขสุมใหม่	0.08	0.93	0.53
เลือกจากสมการ 3.8	0.29	0.78	0.57
แปลงค่าจากสมการ 3.2	1419	173.6	3.42

หลังจากมีการปรับปรุงในแต่ละรอบย่อยแล้ว จะได้ค่าเลขสุมในแต่ละรอบย่อย ซึ่งนำเลขสุมในแต่ละรอบย่อยไปแปลงค่าในสมการ 3.2 หลังจากได้ค่าความเร็วรอบเครื่องมือกวาน ความเร็วในการเดินเชื่อม และมุมเอียงของเครื่องมือกวานในแต่ละรอบย่อยแล้ว นำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการ 4.1-4.8 เพื่อที่จะได้ค่าของตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ค่า คือ ค่าความแข็งแรงดึงและแรงดัด ดังแสดงในตารางที่ 3.28 และ 3.29

ตารางที่ 3.28 ค่าความแข็งแรงดึงของแตร็คที่ 4 ทั้ง 3 รอบย่อย

สมการ รอบย่อยที่	หมุนตาม ทรงกระบอก	หมุนทวน ทรงกระบอก	หมุนตาม หกเหลี่ยม	หมุนทวน หกเหลี่ยม
1	155.47	101.19	126.19	87.91
2	160.35	110.92	136.55	103.12
3	123.68	55.89	190.68	138.89

ตารางที่ 3.29 ค่าความแข็งแรงดัดของแท่งที่ 4 ทั้ง 3 รอบย่อย

รอบย่อยที่ \ สมการ	หมุนตาม ทรงกระบอก	หมุนทวน ทรงกระบอก	หมุนตาม หกเหลี่ยม	หมุนทวน หกเหลี่ยม
1	126.07	101.58	117.64	121.14
2	100.84	84.88	113.02	125.06
3	112.54	157.71	55.89	129.06

จากนำเลขคู่ที่ได้ในแต่ละรอบย่อยของการปรับปรุงในรอบที่ 1 มาทำการแปลงเป็นค่าตัวแปร และแทนค่าในสมการที่ 4.1-4.8 เรียบร้อยแล้ว จะได้ค่าความแข็งแรงดัดทั้งหมด 12 ค่า และค่าความแข็งแรงดัดทั้งหมด 12 ค่า เช่นกัน หลังจากนั้นนำมาถอดรหัสตามสมการที่ 3.5 โดยตัวแปรที่ตอบสนองของการวิจัยมี 2 ตัว ดังนั้นต้องมีการแบ่งสัดส่วนน้ำหนัก ซึ่งให้ w_1 เป็นสัดส่วนน้ำหนักของตัวตอบสนองที่ 1 คือ ค่าความแข็งแรงดัด ส่วน w_2 เป็นสัดส่วนน้ำหนักของตัวตอบสนองที่ 2 คือ ค่าความแข็งแรงดัด โดยทำการสุ่ม w_1 ในแต่ละรอบของการปรับปรุงกล่อง ซึ่งในการยกตัวอย่างทางผู้วิจัยได้สุ่ม $w_1=0.5$ ดังนั้น w_2 จึงเท่ากับ 0.5 เพราะ $w_1+w_2=1$ ดังตารางที่ 3.30

ตารางที่ 3.30 ผลรวมของน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์รอบที่ 1 ของวิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการ

ลำดับ ที่	ความแข็งแรงดัด (UTS)	ความแข็งแรง ดัด(MBS)	$w_1=0.5$	$w_2=0.5$	ผลรวมของ น้ำหนัก
1	155.47	126.07	77.73	63.04	140.77
2	101.19	101.58	50.59	50.79	101.38
3	126.19	117.64	63.10	58.82	121.92
4	87.91	121.14	43.95	60.57	104.53
5	160.35	100.84	80.17	50.42	130.60
6	110.92	84.88	55.46	42.44	97.90
7	136.55	113.02	68.28	56.51	124.79
8	103.12	125.06	51.56	62.53	114.09
9	123.68	112.54	61.84	56.27	118.11
10	55.89	157.71	27.94	78.85	106.80
11	190.68	55.89	95.34	27.95	123.28
12	138.89	129.06	69.44	64.53	133.97

จากตารางที่ 3.30 ได้ผลรวมของน้ำหนักโดยการแบ่งสัดส่วนของน้ำหนักของตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ค่า ในรอบที่ 1 หลังจากนั้นนำมาอัปเดตแท่งหลังจากการปรับปรุงกล่องในรอบ

ที่ 1 โดยการนำมาหาค่าน้ำหนักที่มากที่สุดในรอบที่ 1 เพื่อนำไปเป็นตัวแทนในการปรับปรุงกล่องโดยวิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการในรอบที่ 1 ต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 3.31

ตารางที่ 3.31 ค่ามากที่สุดของผลรวมน้ำหนัก

ลำดับที่	ผลรวมของน้ำหนัก	สมการ
1	140.77	หมุนตามทรงกระบอก
2	101.38	หมุนทวนทรงกระบอก
3	121.92	หมุนตามหกเหลี่ยม
4	104.53	หมุนทวน หกเหลี่ยม
5	130.60	หมุนตามทรงกระบอก
6	97.90	หมุนทวนทรงกระบอก
7	124.79	หมุนตามหกเหลี่ยม
8	114.09	หมุนทวนหกเหลี่ยม
9	118.11	หมุนตามทรงกระบอก
10	106.80	หมุนทวนทรงกระบอก
11	123.28	หมุนตามหกเหลี่ยม
12	133.97	หมุนทวนหกเหลี่ยม

จากตารางที่ 3.31 เมื่อนำมาเรียงลำดับดูผลรวมของน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ พบว่า ผลรวมของน้ำหนัก 140.77 มีค่ามากที่สุด ซึ่งการปรับปรุงกล่องโดยวิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการในรอบที่ 1 ของแทร์คที่ 4 มาจากการแทนค่าความเร็วรอบเครื่องมือกวน คือ 1,738 รอบ/นาที ความเร็วในการเดินเชื่อม คือ 102.8 มิลลิเมตร/นาที และมุมเอียงของเครื่องมือกวน คือ 3.42 องศา ซึ่งปรากฏอยู่ในการปรับปรุงรอบย่อยที่ 1 ดังนั้น จากการปรับปรุงกล่องของแทร์คที่ 4 ในรอบที่ 1 จะอัปเดตเลขคู่ ส่วนในแทร์คที่ 6 ทำตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.32

ตารางที่ 3.32 แทร์คที่ 4 และ 6 ถูกอัปเดตในรอบที่ 1 ด้วยวิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการ

ตัวแปร แทร์ค	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวน (S)	ความเร็ว ในการเดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวน (T)
4	0.58	0.19	0.57
6	0.29	0.19	0.57

3.8.3.4 วิธีการเปลี่ยนแทร็คที่ดีที่สุด (B-TTM)

B-TTM ใช้สมการ 3.9 เพื่อเปลี่ยนจากคำตอบปัจจุบันเป็นคำตอบใหม่ Y_{pjt} คือ ตำแหน่งแทร็คที่ดีที่สุด (แทร็ค p) การวนซ้ำ t คำตอบที่ดีที่สุดจะได้รับการอัปเดตทุกครั้งที่มีการอัปเดต f_{iq}

$$Y_{ijq+1} = \begin{cases} Y_{ijq} & \text{if } \text{rand}_i \leq CR \\ Y_{pjt} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.9)$$

ในส่วนของแทร็คที่ 3 ปรับปรุงโดยใช้วิธีการเปลี่ยนแทร็คที่ดีที่สุด โดยมีวิธีการปรับปรุง คือ นำแทร็คที่ดีที่สุดมาเป็นตัวตั้งต้นเพื่อเปรียบเทียบกับแทร็คที่ 3 แล้วกำหนดเลขสุ่มขึ้นมาอีกแทร็คเพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่า CR โดยกำหนดให้เท่ากับ 0.9 ถ้าเลขสุ่มที่สุ่มขึ้นมามีค่ามากกว่า CR ให้เลือกใช้เลขสุ่มที่เป็นแทร็คที่ดีที่สุด แต่ถ้าเลขที่สุ่มขึ้นมามีค่าน้อยกว่า CR ให้เลือกใช้เลขสุ่มของแทร็คที่นำมาเปรียบเทียบ โดยแทร็คที่ดีที่สุดมีการเรียงลำดับจากค่ามากไปหาน้อยที่สุด ดังตารางที่ 3.33 โดยแทร็คที่ดีที่สุดที่นำมาเปรียบเทียบในแต่ละรอบย่อยนั้น นำมาเรียงลำดับค่าที่มากที่สุดก่อน แล้วนำลำดับที่น้อยที่สุดไปเปรียบเทียบเพื่อหาแทร็คที่ดีที่สุดในรอบย่อยนั้น ๆ ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3.9 สามารถคำนวณ รอบย่อยที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 3.34

ตารางที่ 3.33 แทร็คที่ดีที่สุด

ตัวแปร แทร็ค	ความเร็วรอบ เครื่องมือกว (S)	ความเร็วในการ เดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกว (T)	ผลรวมของ น้ำหนัก
1	0.68	1	0.87	147.79
2	0.29	0.19	0.57	146.97
3	0.42	0.85	0.95	143.21
4	0.24	0.78	0.53	141.29
5	0.58	0.19	0.57	140.77
6	0.12	0	0.5	137.32
7	0.99	0.37	0.06	131.06

ตารางที่ 3.34 วิธีการเปลี่ยนแตรค์ที่ดีที่สุดของแตรค์ที่ 3 รอบย่อยที่ 1

วิธีการเปลี่ยนแตรค์ที่ดีที่สุด ของแตรค์ที่ 3	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวน (S)	ความเร็วในการ เดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวน (T)
แตรค์ที่ดีที่สุด	0.99	0.37	0.06
แตรค์ 3 (ใช้ B-TTM)	0.73	0.93	0.32
เลขสุ่มใหม่	0.81	0.95	0.87
เลือกจากสมการ 3.9	0.73	0.37	0.32
แปลงค่าจากสมการ 3.2	1903	124.4	1.92

หลังจากทำรอบย่อยที่ 1 เสร็จแล้วนำค่าที่ได้ในรอบย่อยที่ 1 มาอัปเดตในตาราง
แตรค์ที่ดีที่สุดต่อไป เพื่อให้มีการจัดลำดับแตรค์ที่ดีที่สุดใหม่ ดังตารางที่ 3.35

ตารางที่ 3.35 แตรค์ที่ดีที่สุดหลังจากอัปเดตรอบย่อยที่ 1

ตัวแปร แตรค์	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวน (S)	ความเร็วในการ เดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวน (T)	ค่าฟังก์ชัน วัตถุประสงค์
1	0.68	1	0.87	147.79
2	0.29	0.19	0.57	146.97
3	0.42	0.85	0.95	143.21
4	0.24	0.78	0.53	141.29
5	0.58	0.19	0.57	140.77
6	0.73	0.37	0.32	139.38
7	0.12	0	0.5	137.32

ในรอบย่อยที่ 2 นำ แตรค์ที่ดีที่สุดในลำดับที่ 7 มาใช้เปรียบเทียบกับ แตรค์ที่ 3
ดังตารางที่ 3.36 แล้วก็ทำการอัปเดตตารางแตรค์ที่ดีที่สุดในรอบย่อยที่ 2 ดังตารางที่ 3.37

ตารางที่ 3.36 วิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการของแตรค์ที่ 3 รอบย่อยที่ 2

วิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการ ของแตรค์ที่ 3	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวน (S)	ความเร็วในการเดิน เชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวน (T)
แตรค์ที่ดีที่สุด	0.12	0	0.5
แตรค์ 3 (ใช้ B-TTM)	0.73	0.93	0.32
เลขสุ่มใหม่	0.98	0.09	0.85
เลือกจากสมการ 3.9	0.12	0.93	0.32
แปลงค่าจากสมการ 3.2	1232	191.6	1.92

ตารางที่ 3.37 แทร็คที่ดีที่สุดหลังจากอัปเดตรอบย่อยที่ 2

ตัวแปร แทร็ค	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวน (S)	ความเร็วในการ เดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวน (T)	ค่าฟังก์ชัน วัตถุประสงค์
1	0.12	0.93	0.32	170.06
2	0.68	1	0.87	147.79
3	0.29	0.19	0.57	146.97
4	0.42	0.85	0.95	143.21
5	0.24	0.78	0.53	141.29
6	0.58	0.19	0.57	140.77
7	0.73	0.37	0.32	139.38

ในรอบย่อยที่ 3 นำ แทร็คที่ดีที่สุดในลำดับที่ 7 มาใช้เปรียบเทียบกับ แทร็คที่ 3 ดังตารางที่ 3.38 แล้วก็ทำการอัปเดตตารางแทร็คที่ดีที่สุดในรอบย่อยที่ 2 ดังตารางที่ 3.39

ตารางที่ 3.38 วิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการของแทร็คที่ 3 รอบย่อยที่ 3

วิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการ ของแทร็คที่ 3	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวน (S)	ความเร็วในการเดิน เชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวน (T)
แทร็คที่ดีที่สุด	0.73	0.37	0.32
แทร็ค 3 (ใช้ B-TTM)	0.73	0.93	0.32
เลขสุ่มใหม่	0.85	0.62	0.18
เลือกจากสมการ 3.9	0.73	0.93	0.18
แปลงค่าจากสมการ 3.2	1903	191.6	1.92

ตารางที่ 3.39 แทร็คที่ดีที่สุดหลังจากอัปเดตรอบย่อยที่ 3

ตัวแปร แทร็ค	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวน (S)	ความเร็วในการ เดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวน (T)	ค่าฟังก์ชัน วัตถุประสงค์
1	0.73	0.93	0.18	175.73
2	0.12	0.93	0.32	170.06
3	0.68	1	0.87	147.79
4	0.29	0.19	0.57	146.97
5	0.42	0.85	0.95	143.21
6	0.24	0.78	0.53	141.29
7	0.58	0.19	0.57	140.77

หลังจากมีการปรับปรุงในแต่ละรอบย่อยแล้ว จะได้ค่าเลขคู่ในแต่ละรอบย่อย ซึ่งนำเลขคู่ในแต่ละรอบย่อยไปแปลงค่าในสมการ 3.2 หลังจากได้ค่าความเร็วรอบเครื่องมือ ความเร็วในการเดินเชื่อม และมุมเอียงของเครื่องมือในแต่ละรอบย่อยแล้ว นำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการ 4.1-4.8 เพื่อที่จะได้ค่าของตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ค่า คือ ค่าความแข็งแรงดึงและแรงดัด ดังแสดงในตารางที่ 3.40 และ 3.41

ตารางที่ 3.40 ค่าความแข็งแรงดึงของแท่งที่ 3 ทั้ง 3 รอบย่อย

สมการ รอบย่อยที่	หมุนตาม ทรงกระบอก	หมุนทวน ทรงกระบอก	หมุนตาม หกเหลี่ยม	หมุนทวน หกเหลี่ยม
1	147.92	59.62	154.29	81.99
2	153.04	33.87	269.56	166.40
3	159.08	72.79	241.38	171.09

ตารางที่ 3.41 ค่าความแข็งแรงดัดของแท่งที่ 3 ทั้ง 3 รอบย่อย

สมการ รอบย่อยที่	หมุนตาม ทรงกระบอก	หมุนทวน ทรงกระบอก	หมุนตาม หกเหลี่ยม	หมุนทวน หกเหลี่ยม
1	119.46	122.04	55.89	86.47
2	136.53	228.42	27.93	147.83
3	141.69	191.31	31.75	109.37

จากนำเลขคู่ที่ได้ในแต่ละรอบย่อยของการปรับปรุงในรอบที่ 1 มาทำการแปลงเป็นค่าตัวแปร และแทนค่าในสมการที่ 4.1-4.8 เรียบร้อยแล้ว จะได้ค่าความแข็งแรงดึงทั้งหมด 12 ค่า และค่าความแข็งแรงดัดทั้งหมด 12 ค่า เช่นกัน หลังจากนั้นนำมาถอดรหัสตามสมการที่ 3.5 โดยตัวแปรที่ตอบสนองของการวิจัยมี 2 ตัว ดังนั้นต้องมีการแบ่งสัดส่วนน้ำหนัก ซึ่งให้ w_1 เป็นสัดส่วนน้ำหนักของตัวตอบสนองที่ 1 คือ ค่าความแข็งแรงดึง ส่วน w_2 เป็นสัดส่วนน้ำหนักของตัวตอบสนองที่ 2 คือ ค่าความแข็งแรงดัด โดยทำการสุ่ม w_1 ในแต่ละรอบของการปรับปรุงกล่อง ซึ่งในการยกตัวอย่างทางผู้วิจัยได้สุ่ม $w_1=0.6$ ดังนั้น w_2 จึงเท่ากับ 0.4 เพราะ $w_1+w_2=1$ ดังตารางที่ 3.42

ตารางที่ 3.42 ผลรวมของน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์รอบที่ 1 ของวิธีการเปลี่ยนแตรคที่ดีที่สุด

ลำดับที่	ความแข็งแรงดึง	ความแข็งแรงดัด	$w_1=0.6$	$w_2=0.4$	ผลรวมของน้ำหนัก
1	147.92	119.46	88.75	47.78	136.54
2	59.62	122.04	35.77	48.82	84.59
3	154.29	55.89	92.57	22.35	114.93
4	81.99	86.47	49.19	34.59	83.78
5	153.04	136.53	91.82	54.61	146.43
6	33.87	228.42	20.32	91.37	111.69
7	269.56	27.93	161.74	11.17	172.91
8	166.40	147.83	99.84	59.13	158.97
9	159.08	141.69	95.45	56.67	152.12
10	72.79	191.31	43.67	76.52	120.20
11	241.38	31.75	144.83	12.70	157.53
12	171.09	109.37	102.66	43.75	146.41

จากตารางที่ 3.42 ได้ผลรวมของน้ำหนักโดยการแบ่งสัดส่วนของน้ำหนักของตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ค่า ในรอบที่ 1 หลังจากนั้นนำมาอัปเดตแตรคหลังจากการปรับปรุงกล่องในรอบที่ 1 โดยการนำมาหาค่าน้ำหนักที่มากที่สุดในรอบที่ 1 เพื่อนำไปเป็นตัวแทนในการปรับปรุงกล่องโดยวิธีการเปลี่ยนแตรคที่ดีที่สุดในรอบที่ 1 ต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 3.43

ตารางที่ 3.43 ค่ามากที่สุดของผลรวมน้ำหนัก

ลำดับที่	ผลรวมของน้ำหนัก	สมการ
1	136.54	หมุนตามทรงกระบอก
2	84.59	หมุนทวนทรงกระบอก
3	114.93	หมุนตามหกเหลี่ยม
4	83.78	หมุนทวน หกเหลี่ยม
5	146.43	หมุนตามทรงกระบอก
6	111.69	หมุนทวนทรงกระบอก
7	172.91	หมุนตามหกเหลี่ยม
8	158.97	หมุนทวนหกเหลี่ยม
9	152.12	หมุนตามทรงกระบอก
10	120.20	หมุนทวนทรงกระบอก
11	157.53	หมุนตามหกเหลี่ยม
12	146.41	หมุนทวนหกเหลี่ยม

จากตารางที่ 3.43 เมื่อนำมาเรียงลำดับดูผลรวมของน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ พบว่า ผลรวมของน้ำหนัก 172.91 มีค่ามากที่สุด ซึ่งการปรับปรุงกล่องโดยวิธีการเปลี่ยนแทรีคที่ดีที่สุดในรอบที่ 1 ของแทรีคที่ 3 มาจากการแทนค่าความเร็วรอบเครื่องมือกวน คือ 1,232 รอบ/นาทิต ความเร็วในการเดินเชื่อม คือ 191.6 มม./นาทิต และมุมเอียงของเครื่องมือกวน คือ 1.92 องศา ซึ่งปรากฏอยู่ในการปรับปรุงรอบย่อยที่ 1 ดังนั้น จากการปรับปรุงกล่องของแทรีคที่ 3 ในรอบที่ 1 จะอัปเดตเลขสุม ดังแสดงในตารางที่ 3.44

ตารางที่ 3.44 แทรีคที่ 3 ถูกอัปเดตในรอบที่ 1 ด้วยวิธีการเปลี่ยนแทรีคที่ดีที่สุด

ตัวแปร แทรีค	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวน (S)	ความเร็วในการเดิน เชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวน (T)
3	0.12	0.93	0.32

RTM, TTM และ B-TTM ใช้ผลรวมของน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อเลือกแทรีคสำหรับการวนซ้ำย่อย $q+1$ หลังจากการปรับปรุงแทรีคเริ่มต้นในรอบที่ 1 เรียบร้อยแล้ว จึงได้แทรีคใหม่ที่ผ่านการปรับปรุงในรอบที่ 1 โดยใช้วิธีการปรับปรุงทั้ง 4 แบบที่กล่าวข้างต้น ดังตารางที่ 3.45

ตารางที่ 3.45 เลขสุมของแต่ละแทรีคที่ผ่านการปรับปรุงในรอบที่ 1 ใช้ในรอบที่ 2

ตัวแปร แทรีค	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวน (S)	ความเร็วในการ เดินเชื่อม (F)	มุมเอียงของ เครื่องมือกวน (T)	ค่าวัตถุประสงค์ เฉลี่ย	กล่อง
1	0.12	0	0.5	137.32	วิธี DEM
2	0.24	0.78	0.53	141.29	วิธี R-TTM
3	0.12	0.93	0.32	172.91	วิธี B-TTM
4	0.58	0.19	0.57	140.77	วิธี TTM
5	0.68	0.995	0.87	147.9	วิธี DEM
6	0.29	0.19	0.57	146.97	วิธี TTM
7	0.99	0.37	0.06	135.58	วิธี R-TTM

จากตารางที่ 3.45 เป็นเลขสุมที่ได้รับการปรับปรุงแล้วในรอบที่ 1 เพื่อที่จะทำการปรับปรุงในรอบที่ 2 จึงต้องมีการเลือกแทรีคทั้ง 7 ลงในกล่องที่จะใช้ปรับปรุง โดยมีวิธีการเลือกตามสมการที่ 3.3. ดังแสดงในตารางที่ 3.46

ตารางที่ 3.46 ความน่าจะเป็นในการเลือกกล่องมาปรับปรุงรอบที่ 2

วิธีการปรับปรุง ในรอบที่ 1	จำนวนแท่งที่ เลือกรอบที่ 1	ค่าวัตถุประสงค์ เฉลี่ยของแท่ง ที่เลือกรอบที่ 1	คะแนนสะสม ในแต่ละรอบ ที่ทำการปรับปรุง	ความน่าจะเป็น ของการเลือกกล่อง ปรับปรุงในรอบที่ 2
DEM	2	142.61	0	0.24
R-TTM	2	138.44	0	0.23
B-TTM	1	172.91	1	0.29
TTM	2	143.87	0	0.24

จากตารางที่ 3.46 ความน่าจะเป็นของการเลือกกล่องในการปรับปรุงในรอบที่ 2 โดยแต่ละวิธีการมีโอกาส คือ ความน่าจะเป็นของการใช้วิธีพัฒนาการโดยใช้ผลต่าง คือ 0.24 ความน่าจะเป็นของการใช้วิธีการเปลี่ยนแท่งแบบสุ่ม คือ 0.23 ความน่าจะเป็นของการใช้วิธีการเปลี่ยนแท่งที่ดีที่สุดคือ 0.29 ความน่าจะเป็นของการใช้วิธีการติดตามเปลี่ยนวิธีการ คือ 0.24 และมีความถี่สะสมของแต่ละวิธีการในการเลือกที่จะปรับปรุงในรอบที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 3.47

ตารางที่ 3.47 ความถี่สะสมของแต่ละวิธีการปรับปรุงหลังจากรอบที่ 1

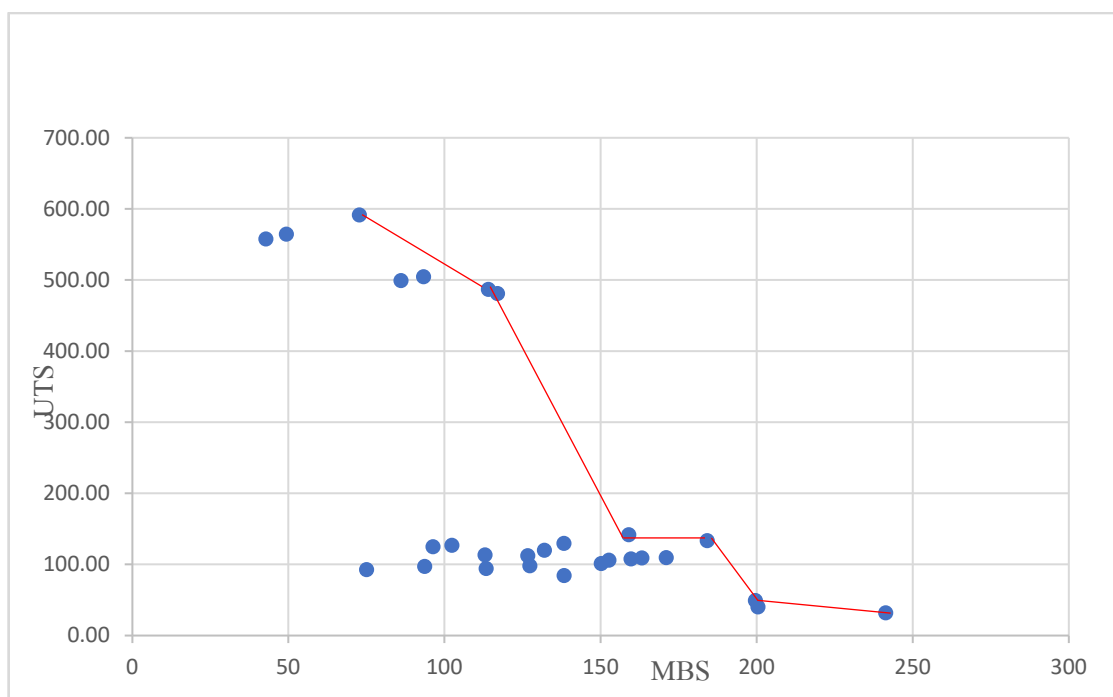
วิธีการปรับปรุง	ความน่าจะเป็นของ การเลือกกล่อง	ความน่าจะเป็นสะสมของ การเลือกกล่อง
DEM	0.24	0.24
R-TTM	0.23	0.47
B-TTM	0.29	0.76
TTM	0.24	1.00

จากตารางที่ 3.47 สามารถหาค่าความน่าจะเป็นสะสมในการเลือกของแต่ละวิธีในการปรับปรุงแท่งของรอบที่ 2 โดยในรอบที่ 2 ได้มีการสุ่มตัวเลขเพื่อที่จะเลือกกล่องของแต่ละแท่งที่ใช้ปรับปรุงในรอบที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 3.48

ตารางที่ 3.48 วิธีการปรับปรุงในแต่ละแพ็คเกจของรอบที่ 2

ตัวแปร แพ็คเกจ	ความเร็วรอบ เครื่องมือกวน	ความเร็วในการ เดินเชื่อม	มุมเอียงของ เครื่องมือกวน	เลขคู่	กล่อง
1	0.12	0	0.5	0.84	วิธี TTM
2	0.24	0.78	0.53	0.36	วิธี R-TTM
3	0.12	0.93	0.32	0.08	วิธี DEM
4	0.58	0.19	0.57	0.42	วิธี R-TTM
5	0.68	0.995	0.87	0.90	วิธี TTM
6	0.29	0.19	0.57	0.17	วิธี DEM
7	0.99	0.37	0.06	0.69	วิธี B-TTM

ในงานวิจัยนี้มีการนำเสนอวัตถุประสงค์สองประการ ดังนั้นจึงมีค่าน้ำหนักสองค่าที่จำเป็นสำหรับแต่ละวัตถุประสงค์ในการวนซ้ำแต่ละครั้ง w_1 เป็นตัวเลขสุ่มเลือกจาก 0 ถึง 1 และ w_2 คือ $(1-w_1)$ ส่วน q เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้าซึ่งตั้งค่าเป็น 100 การวนซ้ำ ส่วนกราฟ Pareto ใช้เพื่อการคัดเลือกของกระบวนการต่าง ๆ ทั้ง 4 วิธีการ ให้เราแสดงว่า $f^1(y_r)$ และ $f^2(y_r)$ เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวัตถุประสงค์ 1 และ 2 ของ track r ตามลำดับ ให้ R เป็นตัวแทนเซตของคำตอบที่เป็นไปได้ $y = (y_1, y_2, \dots, y_i)$ ซึ่งเป็นเซตของเวกเตอร์การตัดสินใจ และ $f'(y) = (f^1(y), f^2(y), \dots, f^V(y))$ เป็น เซตของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเวกเตอร์ y โดยที่ y ขึ้นอยู่กับ y' ถ้าหาก $f'(y) \leq f'(y')$ สำหรับทุกค่าของ $v=1, 2, 3, \dots, V$ และใช้กราฟ Pareto เพื่อรวบรวมคำตอบ จำนวน Q (จำนวนสูงสุดของการทำซ้ำย่อย) ถูกตั้งค่าเป็น 50-100 การวนซ้ำตามที่ Pitakaso et al. (2021) แนะนำจากภาพที่ 3.14 เป็นการพล็อตกราฟพาเรโตในรอบที่ 1 มีทั้งหมด 28 จุด โดยแกนนอนเป็นค่าของความแข็งแรงดัด ส่วนแกนตั้งเป็นค่าความแข็งแรงดึง ซึ่งผ่านการปรับปรุงมาจาก 4 วิธีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น หลังจากพล็อตกราฟพาเรโตจะพบค่าของพาเรโตพร้อม โดยใช้เส้นตรงลากเชื่อมต่อกัน ซึ่งพาเรโตพร้อม คือ ค่าที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละสถานการณ์ โดยหลังจากได้พาเรโตพร้อมในแต่ละรอบแล้วนำมารวมกัน เพื่อหาพาเรโตพร้อมที่ดีที่สุดต่อไป ซึ่งการหานั้นสามารถใช้หลักวิธีการของ TOPSIS เลือกชุดพารามิเตอร์ที่มีแนวโน้มดีที่สุดเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการวิเคราะห์พฤติกรรมเปรียบเทียบกับคำตอบของ D-optimal



ภาพที่ 3.14 กราฟพาเรโตในรอบที่ 1

หลังจากทำกราฟพาเรโตในรอบที่ 1 เรียบร้อยแล้ว สามารถพบจุดที่เป็นจุดที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการหาค่าตามวัตถุประสงค์ ซึ่งมีทั้งหมด 5 จุด แสดงดังตารางที่ 3.49

ตารางที่ 3.49 ค่าที่ได้มาจากราฟพาเรโตในรอบที่ 1

ลำดับ	ค่า UTS	ค่า MBS
1	184.20	133.16
2	72.79	591.31
3	117.02	480.75
4	199.65	49.14
5	241.38	31.75

หลังจากได้ค่าที่ได้มาจากราฟพาเรโต นำค่าที่ได้ไปใช้วิธี TOPSIS ในการเลือกคำตอบที่มีแนวโน้มดีที่สุดในการบรรดาคำตอบของกราฟพาเรโตทั้งหมด TOPSIS เริ่มต้นด้วยการสร้างเมทริกซ์การตัดสินใจปกติที่จะแปลงมิติแอตทริบิวต์ต่าง ๆ เป็นแอตทริบิวต์ที่ไม่ใช่มิติโดยใช้สมการ 3.10

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^I (x_{ij})^2}} \quad (3.10)$$

- เมื่อ I คือ จำนวนจุดในกราฟพาราไต์
 J คือ ชุดของฟังก์ชันเชิงวัตถุเชิงบวก
 J' คือ ชุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เชิงลบ

จากตารางที่ 3.45 สามารถแปลงเป็นตารางเมทริกซ์การตัดสินใจแบบ TOPSIS ตามสมการที่ 3.10 ได้ดังตารางที่ 3.50

ตารางที่ 3.50 เมทริกซ์การตัดสินใจ

ลำดับ	ค่า UTS	ค่า MBS
1	0.47	0.17
2	0.19	0.76
3	0.30	0.62
4	0.51	0.06
5	0.62	0.04

ขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณเมทริกซ์การตัดสินใจที่ทำให้เป็นมาตรฐานโดยใช้สมการ 3.11 ซึ่งน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้งของความต้านทานแรงดึง และความต้านทานแรงดัดทางผู้วิจัยได้ให้ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินสัดส่วนความสำคัญในการนำสมบัติทางกลของวัสดุไปใช้ในงานจริง ทั้งในส่วนของความต้านทานแรงดึง และความต้านทานแรงดัด ควรจะมีสัดส่วนในการนำไปใช้งานเท่าใด พบว่า เมื่อนำผลการประเมินของทางผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านมาวิเคราะห์ สรุปได้ว่าเสียงส่วนใหญ่เห็นว่า ในการนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรม คุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมทั้ง 2 ชนิด มีความสำคัญเท่ากัน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้กำหนดให้น้ำหนักในการทดลองครั้งนี้ของแต่ละตัว เท่ากับ 0.5 แล้วนำไปแทนค่าในสมการที่ 3.11 ซึ่งผลของการตัดสินใจแบบถ่วงน้ำหนักจะแสดงใน ดังตารางที่ 3.51

$$V_{ij} = w_j r_{ij} \quad (3.11)$$

เมื่อ w_j คือ พารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้าสำหรับน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละอย่าง

ตารางที่ 3.51 เมตริกซ์การตัดสินใจที่ถ่วงน้ำหนัก

ลำดับ	ค่า UTS	ค่า MBS
1	0.24	0.09
2	0.09	0.38
3	0.15	0.31
4	0.26	0.03
5	0.31	0.02

หลังจากได้เมตริกซ์การตัดสินใจแบบถ่วงน้ำหนักแล้ว ทำการหาคำตอบของเมตริกซ์ในอุดมคติทางบวกตามสมการที่ 3.12-3.13 จะได้ค่า A^* และคำตอบในอุดมคติทางลบตามสมการที่ 3.14-3.15 จะได้ค่า A' ดังตารางที่ 3.52 และ 3.53

$$A^* = \{V_1^*, V_2^*, \dots, V_n^*\}, \quad (3.12)$$

$$V_j^* = \{ \max_i V_{ij} \text{ if } j \in J ; \min_i V_{ij} \text{ if } j \in J' \}. \quad (3.13)$$

ตารางที่ 3.52 หาคำตอบของเมตริกซ์ในอุดมคติทางบวก

ลำดับ	ค่า UTS	ค่า MBS
1	0.24	0.09
2	0.09	0.38
3	0.15	0.31
4	0.26	0.03
5	0.31	0.02
A^*	0.31	0.38

$$A' = \{V_1', V_2', \dots, V_n'\}, \quad (3.14)$$

$$V_j^* = \{ \min_i V_{ij} \text{ if } j \in J ; \max_i V_{ij} \text{ if } j \in J' \}. \quad (3.15)$$

ตารางที่ 3.53 หาคำตอบของเมตริกซ์ในอุดมคติทางลบ

ลำดับ	ค่า UTS	ค่า MBS
1	0.24	0.09
2	0.09	0.38
3	0.15	0.31
4	0.26	0.03
5	0.31	0.02
A'	0.09	0.02

ขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณการวัดการแยกสำหรับแต่ละทางเลือกจากคำตอบในอุดมคติทางบวก ตามสมการที่ 3.16 และทางลบ ตามสมการ 3.17 ดังตารางที่ 3.54-3.55 ตามลำดับ

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^J (V_j^* - V_{ij})^2}. \quad (3.16)$$

ตารางที่ 3.54 คำนวณการวัดการแยกสำหรับคำตอบในอุดมคติทางบวก

ลำดับ	ค่า UTS	ค่า MBS	S*
1	0.00541141	0.09	0.304291279
2	0.04704193	0.00	0.216891527
3	0.02559467	0.01	0.17513337
4	0.00288224	0.12	0.353508952
5	0.00000000	0.13	0.360618322

$$S'_i = \sqrt{\sum_{j=1}^J (V'_j - V_{ij})^2}. \quad (3.17)$$

ตารางที่ 3.55 คำนวณการวัดการแยกสำหรับคำตอบในอุดมคติทางลบ

ลำดับ	ค่า UTS	ค่า MBS	S'
1	0.020543	0.0042710	0.157525389
2	0.000000	0.1300456	0.360618322
3	0.003239	0.0837321	0.294907902
4	0.026636	0.0001257	0.163589516
5	0.047042	0.0000000	0.216891527

สุดท้าย ความใกล้ชิดสัมพันธ์กับคำตอบในอุดมคติจะถูกคำนวณโดยใช้สมการ 3.18 และคำตอบที่ใกล้เคียงที่สุดกับ 1 จะถูกเลือกให้เป็นคำตอบที่มีแนวโน้มมากที่สุดจากแนวหน้าพาเรโต ดังแสดงในตารางที่ 3.56

$$C_i^* = \frac{s'_i}{s'_i + s'_i} \quad (3.18)$$

ตารางที่ 3.56 ความใกล้ชิดสัมพันธ์กับคำตอบในอุดมคติ

ลำดับ	S'	S*	C'
1	0.157525389	0.304291279	0.341099401
2	0.360618322	0.216891527	0.624436662
3	0.294907902	0.17513337	0.627408526
4	0.163589516	0.353508952	0.316360473
5	0.216891527	0.360618322	0.375563338

3.8.3 อัปเดตข้อมูลฮิวริสติก

ข้อมูลฮิวริสติกบางอย่างจำเป็นต้องได้รับการอัปเดตเพื่อที่จะนำไปใช้ในการปรับปรุงครั้งต่อไป กฎการอัปเดตแสดงในตารางที่ 3.57

ตารางที่ 3.57 ข้อมูลการปรับปรุงของฮิวริสติก

ตัวแปร	ความหมาย
N_{bt}	จำนวนแตร็คทั้งหมดที่เลือกช่องการปรับปรุงกล่อง b ตั้งแต่การวนซ้ำ 1 ไปจนถึงการวนซ้ำ t
A_{bt}	ค่าเฉลี่ยของคำตอบจากการปรับปรุงกล่อง b จากการวนซ้ำ 1 ไปจนถึงการวนซ้ำ t
I_{bt}	$I_{bt} = I_{bt-1} + G$. เมื่อ $G = \begin{cases} 1 & \text{ถ้ากล่อง } b \text{ เป็นคำตอบที่ดีที่สุดในรอบ } t \\ 0 & \end{cases}$
X_{ijt}^{best}	อัปเดตชุดแตร็คที่ดีที่สุดหากมีคำตอบที่ดีกว่า
X_{ijt}^{rand}	สุ่มเลือกค่าในตำแหน่งของแตร็คทั้งหมด ทุกตำแหน่ง

3.8.4 ทำซ้ำขั้นตอนในส่วน 3.8.2 และ 3.8.3 จนกว่าจะครบจำนวนเงื่อนไข เกณฑ์การหยุดคือ จำนวนสูงสุดของการวนซ้ำ ซึ่งตั้งไว้ที่ 1,000 (ผลจากการทดสอบเบื้องต้น) pseudocode ของการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ แสดงในอัลกอริทึม 1 ดังแสดงในภาพที่ 3.15

Algorithm 1: Multi Objectives Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search (MO-VaNSAS)

```

input : Number of tracks (NT), Number of parameters (D),
scaling factor (F), Improvement factor (K), Value of CR
Number of improvement box (IBPop)
output: Best_Track_Solution
begin
  Population = Initialize Population(NT, D)
  IBPop = Initialize InformationIB(NIB)
  encode Population to WP
  while the stopping criterion is not met do
    for i=1: NT
      // selected improvement box by
      RouletteWheelSelection
      selected_IB = RouletteWheelSelection(IBPop)
      If(selected_IB = 1) Then
        new_u = DEM (u)
        Perform DEM
      Else if(selected_IB = 2)
        new_u = R-TTM (u)
        Perform R-TTM
      Else if(selected_IB = 3)
        new_u = B_TTM (u)
        Perform B-TTM
      Else if(selected_IB = 4)
        new_u = TTM(u)
        Perform TTM
      Perform Decoding method, Weight Sum Method
      IF(CostFunction(new_u) = CostFunction(Vj)) Then
        Vi = new_u
      Update Pareto Front
    End For Loop//end update heuristics information
    Evaluate Pareto Using TOPSIS
  End For Loop
End
  Return Best_Vector_Solution
end

```

ภาพที่ 3.15 Pseudocode ของการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้
หลายวัตถุประสงค์
ที่มา: Suppachai and et al. (2021)

3.9 การเปรียบเทียบเมตาฮิวริสติกส์

ในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยได้นำวิธีการเมตาฮิวริสติกส์ที่รู้จักโดยทั่วไปมาเปรียบเทียบกับวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ คือ (1) วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) และ (2) วิธีทางพันธุกรรม (GA) เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการที่เสนอ ทางผู้วิจัยได้พัฒนาวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างที่เสนอโดย Srichok et al. (2020) ซึ่งประกอบด้วยสี่ขั้นตอนทั่วไป: (1) สร้างโซลูชันเริ่มต้น (2) ดำเนินการกระบวนการกลายพันธุ์ (3) ดำเนินการกระบวนการรวมใหม่ และ (4) ดำเนินการกระบวนการคัดเลือก ส่วนวิธีเปรียบเทียบวิธีที่สอง คือ วิธีทางพันธุกรรม ทางผู้วิจัยได้พัฒนาวิธีทางพันธุกรรมซึ่งเสนอโดย Metchell และ Melanie โดยทั่วไปวิธีทางพันธุกรรม ประกอบด้วยสี่ขั้นตอน: (1) สร้างโซลูชันเริ่มต้น (2) ดำเนินการขั้นตอนการกลายพันธุ์ (3) ดำเนินการขั้นตอนไขว้ และ (4) ดำเนินการขั้นตอนการเลือก มีการใช้วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง และวิธีทางพันธุกรรมกับวิธี

ผลรวมการซึ่งน้ำหนักสำหรับกระบวนการคัดเลือก และใช้ Pareto Front เพื่อรวบรวมชุดคำตอบที่ไม่ครอบคลุม และใช้ TOPSIS เพื่อเลือกชุดพารามิเตอร์ที่มีแนวโน้มจะเรียกว่า MODE และ MOGA ตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

เมื่อทำการออกแบบการทดลองแบบ D-optimal แล้ว ผู้วิจัยจึงได้นำผลที่ได้มาสร้างแบบจำลองสมการถดถอยหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการ MOVaNSAS, MODE และ MOGA ต่อไป ปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ คือ ความเร็วรอบในการกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม มุมในการเชื่อมของเครื่องมือกวน ลักษณะของเครื่องมือกวน และทิศทางของการหมุนของเครื่องมือกวน โดยมีวัตถุประสงค์ หาค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และค่าความแข็งแรงดัดสูงสุด

การทดลองด้วยวิธี D-optimal ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Design-Expert เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง โปรแกรมได้ทำการออกแบบการทดลองทั้งหมด 29 การทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกเป็นสามส่วน (1) ผลลัพธ์จากการออกแบบการทดลองแบบ D-optimal (2) ผลลัพธ์ที่ใช้การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์เข้ามาแก้ปัญหา (3) การเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น

4.1.1 การหาค่าที่เหมาะสมจากการออกแบบการทดลองแบบ D-Optimal

ออกแบบการทดลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ Design-Expert มีการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทำการศึกษา 5 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบในการกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม มุมในการเชื่อมของเครื่องมือกวน ลักษณะของเครื่องมือกวน และทิศทางของการหมุนของเครื่องมือกวน ซึ่งทำการทดสอบสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12 ทั้งสองของตัวตอบสนอง คือ ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งแรงดัด ดังตารางที่ 4.1

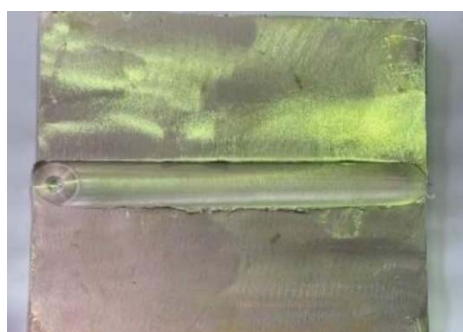
ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกลอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12

วัสดุ	ขนาด (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ความแข็งแรงดัด (MPa)
SSM-ADC12	75 x 150	6	208.53	153

ตารางที่ 4.2 การออกแบบการทดลองแบบ D-Optimal

ลำดับ	ความเร็วรอบ เครื่องมือกล	ความเร็ว ในการเดิน เชื่อม	มุมเอียง ของ เครื่องมือ	รูปทรง เครื่องมือ กล	ทิศทางการ หมุนของ เครื่องมือ	ความ แข็งแรง ดึง	ความ แข็งแรง ดัด
1	2062.92	142.75	3.41	Hexagon	ccw	96.28	83.56
2	1110.00	80.00	6.00	Hexagon	ccw	140.38	104.67
3	2023.17	168.30	4.03	Cylindrical	ccw	99.03	71.72
4	1803.75	200.00	6.00	Cylindrical	cw	91.02	110.31
5	1110.00	80.00	0.00	Cylindrical	ccw	43.65	42.01
6	2220.00	80.00	6.00	Cylindrical	cw	151.23	120.53
7	1110.00	80.00	6.00	Hexagon	ccw	134.11	117.65
8	1371.09	151.66	2.51	Cylindrical	ccw	53.49	45.42
9	1110.00	200.00	6.00	Hexagon	cw	137.95	103.91
10	1654.93	148.96	3.67	Hexagon	cw	166.65	122.85
11	2216.02	95.19	1.34	Cylindrical	ccw	44.85	56.84
12	1110.00	200.00	6.00	Hexagon	cw	131.38	100.34
13	1484.65	96.41	2.72	Hexagon	cw	159.49	122.32
14	2220.00	80.00	6.00	Cylindrical	cw	153.76	126.35
15	1705.76	134.87	2.91	Hexagon	cw	150.98	125.87
16	1715.48	141.78	3.18	Hexagon	ccw	126.76	113.28
17	1827.64	128.46	1.71	Cylindrical	cw	171.87	130.67
18	1110.00	80.00	0.00	Cylindrical	ccw	40.52	36.41
19	1395.44	112.16	3.28	Hexagon	cw	143.6	100.35
20	1307.14	164.53	2.04	Cylindrical	cw	155.18	117.82
21	1338.46	200.00	1.61	Cylindrical	ccw	49.51	35.91
22	1896.10	168.39	3.46	Hexagon	cw	162.96	125.98
23	1688.31	152.64	4.57	Hexagon	ccw	111.02	105.72
24	1893.30	167.26	1.61	Cylindrical	cw	130.02	112.65
25	1445.26	142.86	3.42	Cylindrical	ccw	51.59	54.29
26	1863.64	147.26	3.56	Hexagon	ccw	101.48	95.89
27	1391.97	143.76	4.03	Cylindrical	cw	121.32	88.65
28	1717.21	140.79	1.22	Cylindrical	cw	168.45	122.21
29	2062.92	142.75	3.41	Hexagon	ccw	97.46	65.27

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงดัดของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน พบว่า จากการทดลองลำดับที่ 17 ซึ่งความเร็วรอบเครื่องมือกวน 1827.64 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 128.46 มิลลิเมตร/นาที มุมเอียงของเครื่องมือกวน 1.71° รูปทรงของเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก และทิศทางการหมุนของเครื่องมือกวนแบบหมุนตามเข็มนาฬิกา ได้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 171.87 MPa โดยมีลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังภาพที่ 4.1 จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 ซอฟต์แวร์การออกแบบการทดลอง D-optimal ได้สร้างสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปร



ภาพที่ 4.1 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ผลลัพธ์ของ ANOVA สำหรับค่าความแข็งแรงดึง พบว่า รูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีค่า P-value = 0.0002 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆที่ทำให้เกิดค่าความแข็งแรงดึง โดยแบบจำลองมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยระดับนัยสำคัญ 0.05 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) จากอิทธิพลของตัวแปรเท่ากับ 95.26% และค่าสัมประสิทธิ์ที่ปรับปรุง (R^2) มีค่ามากกว่า 86.73% ซึ่งเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองของสมการถดถอยมีรูปแบบที่ถูกต้องสำหรับค่าความแข็งแรงดึง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยมี 4 แบบจำลองดังสมการ 4.1-4.4

ตารางที่ 4.3 ANOVA ของค่าความแข็งแรงดึง

Source of variation	Sum of squares	DF	Mean squares	F-Value	P-Value
Model	48619.12	18	2701.06	11.17	0.0002
Linear	13684.2	5	2736.83	11.31	0.001
Square	174.9	3	58.31	0.24	0.866
Interaction	8516.4	10	851.64	3.52	0.030
Residual Error	2418.8	10	241.88		
Lack-of-Fit	2368.79	5	473.76	47.34	0.0003
Pure Error	50.0	5	10.01		
Total	51037.9	28			
R-sq = 95.26% R-sq(adj) = 86.73%					

$$CW_{\text{Cylindrical}} = 318 + 0.081 S - 2.46 F - 9.6 T - 0.000055 S * S + 0.0065 F * F + 1.56 t * t + 0.000464 S * F + 0.0060 S * T - 0.162 F * T \quad (4.1)$$

$$CCW_{\text{Cylindrical}} = 78 + 0.130 S - 2.43 F + 18.9 T - 0.000055 S * S + 0.0065 F * F + 1.56 T * T + 0.000464 S * F + 0.0060 S * T - 0.162 F * T \quad (4.2)$$

$$CW_{\text{Hexagon}} = 306 + 0.030 S - 1.33 F - 22.7 T - 0.000055 S * S + 0.0065 F * F + 1.56 T * T + 0.000464 S * F + 0.0060 S * T - 0.162 F * T \quad (4.3)$$

$$CCW_{\text{Hexagon}} = 82 + 0.079 S - 1.30 F + 5.8 T - 0.000055 S * S + 0.0065 F * F + 1.56 T * T + 0.000464 S * F + 0.0060 S * T - 0.162 F * T \quad (4.4)$$

ผลลัพธ์ของ ANOVA สำหรับค่าความแข็งแรงดัด พบว่า รูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีค่า P-value = 0.000 ซึ่งมิต้าน้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดค่าความแข็งแรงดัด โดยแบบจำลองมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยระดับนัยสำคัญ 0.05 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) จากอิทธิพลของตัวแปรเท่ากับ 96.89% และค่าสัมประสิทธิ์ที่ปรับปรุง (R^2) มีค่ามากกว่า 91.29% ซึ่งเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองของสมการถดถอยมีรูปแบบที่ถูกต้องสำหรับค่าความแข็งแรงดัด ดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยมี 4 แบบจำลองดังสมการ 4.5-4.8

ตารางที่ 4.4 ANOVA ของค่าความแข็งแรงดัด

Source of variation	Sum of squares	DF	Mean squares	F-Value	P-Value
Model	27238.3	18	1513.24	17.31	0.000
Linear	5753.3	5	1150.66	13.16	0.000
Square	291.0	3	96.98	1.11	0.390
Interaction	4293.9	10	429.39	4.91	0.010
Residual Error	874.1	10	87.41		
Lack-of-Fit	583.8	5	116.77	47.34	0.0003
Pure Error	290.3	5	58.06		
Total	28112.4	28			
sq = 96.89% R-sq(adj) = 91.29%					

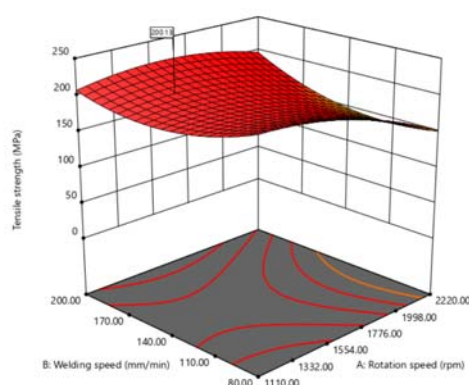
$$CW_{cylindrical} = -34 + 0.385 S - 2.19 F - 14.9 T - 0.000106 S * S + 0.01026 F * F - 1.44 T * T - 0.000350 S * F + 0.01149 S * T - 0.0288 F * T \quad (4.5)$$

$$CCW_{Cylindrical} = 30 + 0.322 S - 1.49 F - 29.8 T - 0.000106 S * S + 0.01026 F * F - 1.44 T * T - 0.000350 S * F + 0.01149 S * T - 0.0288 F * T \quad (4.6)$$

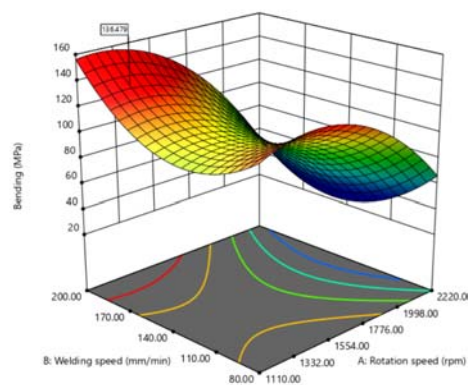
$$CW_{Hexagon} = -59 + 0.383 S - 2.88 F + 11.7 T - 0.000106 S * S + 0.01026 F * F - 1.44 T * T - 0.000350 S * F + 0.01149 S * T - 0.0288 F * T \quad (4.7)$$

$$CCW_{Hexagon} = 33 + 0.320 S - 2.18 F - 3.2 T - 0.000106 S * S + 0.01026 F * F - 1.44 T * T - 0.000350 S * F + 0.01149 S * T - 0.0288 F * T \quad (4.8)$$

โดยที่ S, F และ T คือ ความเร็วรอบเครื่องมือกล ความเร็วในการเดินเชื่อม และมุมเอียงของเครื่องมือกล ตามลำดับ การออกแบบการทดลอง D-optimal ถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดในการทำแบบจำลองของสมการถดถอย ดังสมการที่ 4.1-4.8 โดยมีค่าพารามิเตอร์ คือ ความเร็วรอบเครื่องมือกล 1374.07 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 167.68 มิลลิเมตร/นาที มุมเอียงของเครื่องมือกล 0.10° รูปทรงของเครื่องมือกลแบบทรงกระบอก และทิศทางการหมุนของเครื่องมือกลแบบหมุนตามเข็มนาฬิกา ได้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 200.13 MPa และค่าความแข็งแรงดัดสูงสุด 136.47 MPa ดังแสดงในภาพที่ 4.2a ส่วนในภาพที่ 4.2b มีค่าพารามิเตอร์ คือ ความเร็วรอบเครื่องมือกล 1893.30 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 167.26 มิลลิเมตร/นาที มุมเอียงของเครื่องมือกล 1.610° รูปทรงของเครื่องมือกลแบบทรงกระบอก และทิศทางการหมุนของเครื่องมือกลแบบหมุนตามเข็มนาฬิกา ได้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด 183.59 MPa และค่าความแข็งแรงดัดสูงสุด 141.71 MPa



(a) ค่าความแข็งแรงดึง



(b) ค่าความแข็งแรงดัด

ภาพที่ 4.2 เงื่อนไขที่คาดการณ์ของทั้งสองวัตถุประสงค์

4.1.2 การหาผลลัพธ์โดยวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ (MOVaNSAS)

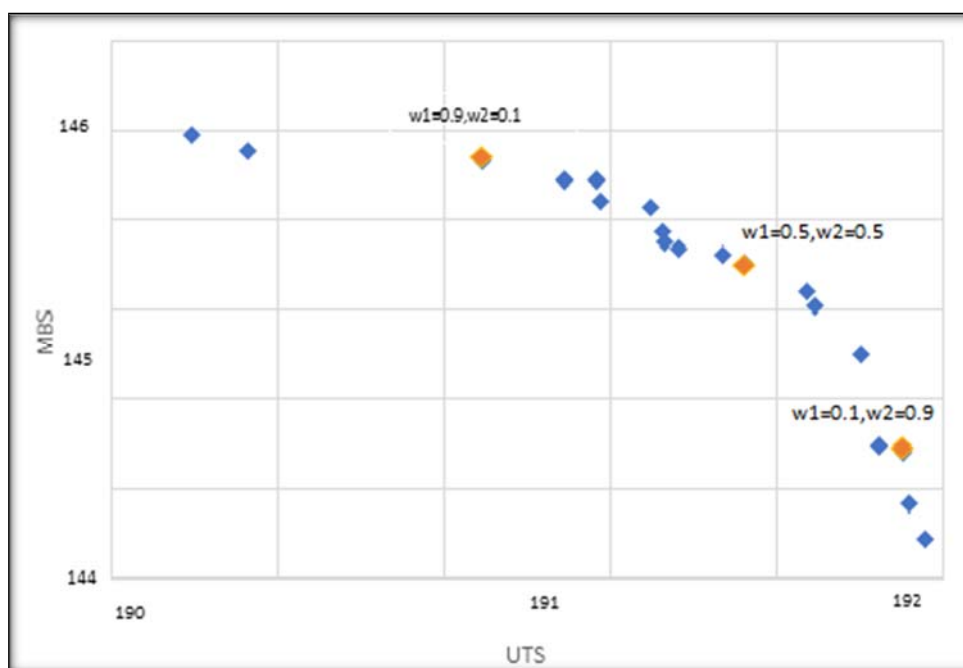
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแบบจำลองถูกออกแบบการทดลองแบบ D-optimal จากสมการ 4.1-4.4 และใช้วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้เพื่อหาวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดตามวัตถุประสงค์ จากสมการ 4.5-4.8 ช่วงของค่าพารามิเตอร์ที่สามารถประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง D-optimal ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ช่วงของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดไม่ถูกจำกัดเนื่องจากเป็นคำตอบสนองของพารามิเตอร์ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

$$1100 \text{ rpm} \leq S \leq 2200 \text{ rpm}, \quad (4.9)$$

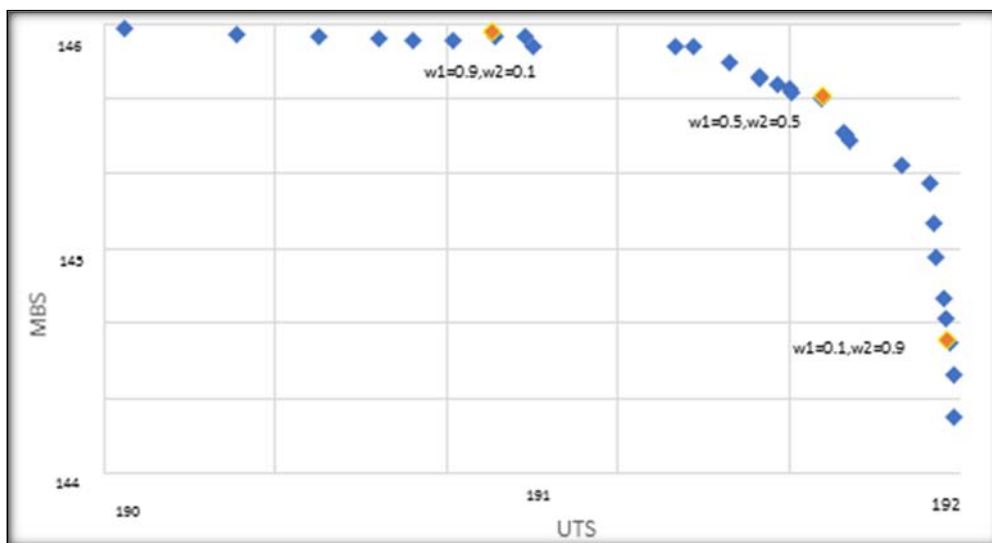
$$80 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \leq F \leq 200 \frac{\text{mm}}{\text{min}}, \quad (4.10)$$

$$0 \text{ degrees} \leq T \leq 6 \text{ degrees}. \quad (4.11)$$

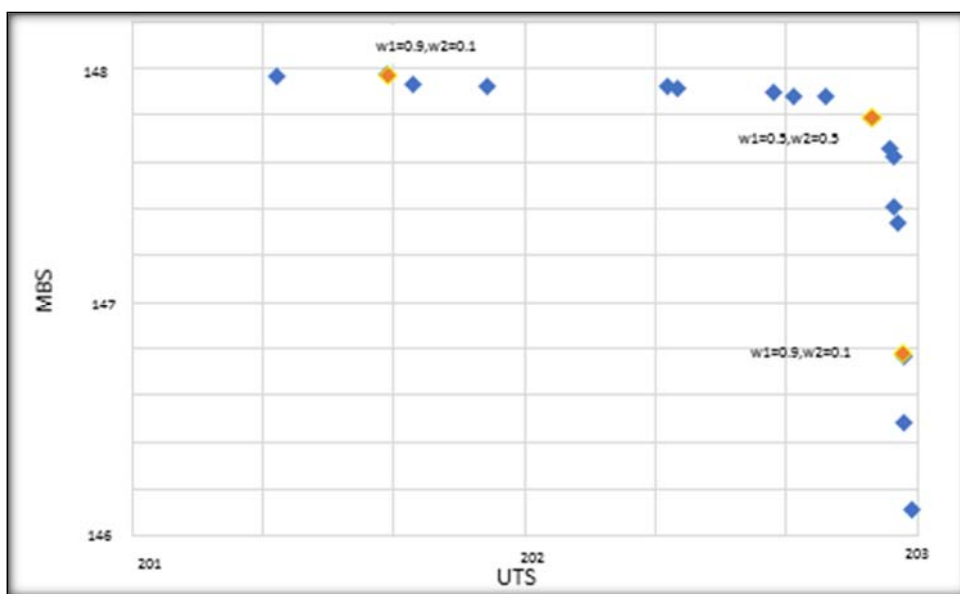
การทดลองได้กำหนดเวลาให้เป็นเงื่อนไขในการสิ้นสุด ตั้งค่าไว้ที่ 10 นาที สำหรับทุกวิธีการแก้ไขปัญหานั้นมาเปรียบเทียบกัน เช่น วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ เปรียบเทียบกับ วิธีการพันธุกรรม และวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างหน้า ส่วนพาเรโตฟรอนของฮิวริสติกทั้ง 3 แบบ แสดงในภาพที่ 4.3 (MOGA) ภาพที่ 4.4 (MODE) และภาพที่ 4.5 (MOVaNSAS)



ภาพที่ 4.3 Pareto Front ของ GA



ภาพที่ 4.4 Pareto Front ของ DE



ภาพที่ 4.5 Pareto Front ของ MOVaNSAS

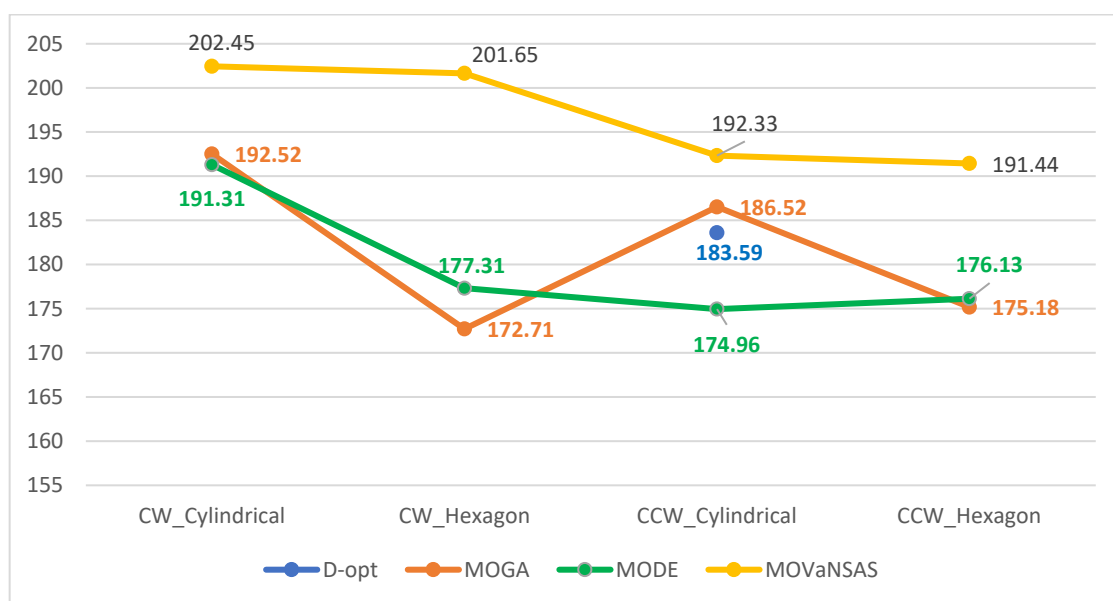
ตารางที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ของ MODE, MOGA และ MOVaNSAS ในการหา Pareto front ทดสอบโดยใช้วิธีการที่แตกต่างกันในแต่ละรอบของการวนซ้ำๆกันหลายรอบ ทุกวิธีการใช้จำนวนประชากรและการวนซ้ำเท่ากัน และจำนวนจุดใน Pareto front สามารถคำนวณเป็นอัตราส่วน เช่น อัตราส่วน = (จำนวนของจุดใน Pareto front) / (จำนวนการวนซ้ำ) ผลของการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนพาเรโตของวิธีการต่าง ๆ

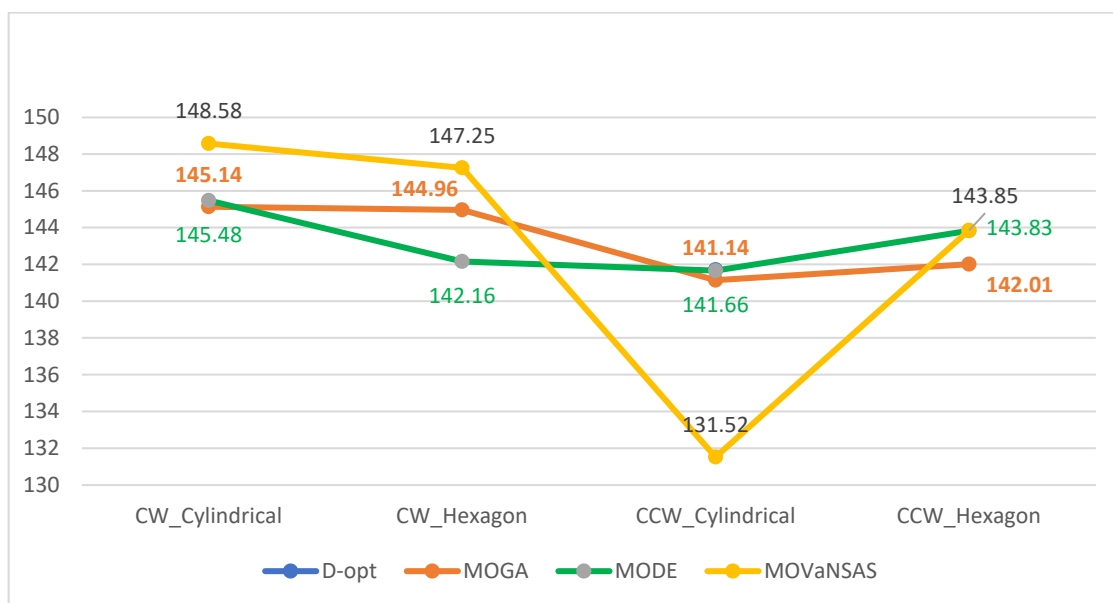
ลำดับ (1)	จำนวน (2)	MOGA		MODE		MOVaNSAS	
		จำนวนจุด พาเรโต้ (3)	อัตราส่วน (3)/(2)	จำนวนจุด พาเรโต้ (4)	อัตราส่วน (4)/(2)	จำนวนจุด พาเรโต้ (5)	อัตราส่วน (5)/(2)
1	200	184	0.92	412	2.06	818	4.09
2	200	238	1.19	813	4.065	411	2.055
3	200	383	1.915	638	3.19	549	2.745
4	200	153	0.765	777	3.885	491	2.455
5	200	141	0.705	680	3.4	961	4.805
6	400	128	0.32	487	1.2175	991	2.4475
7	400	109	0.2725	473	1.1825	717	1.7925
8	400	88	0.22	586	1.465	869	2.1725
9	400	97	0.2425	507	1.2675	648	1.62
10	400	146	0.365	790	1.975	530	1.325
11	600	266	0.4433	677	1.1283	442	0.7366
12	600	138	0.23	500	0.8333	404	0.673
13	600	103	0.1716	803	1.3383	753	1.255
14	600	233	0.3883	463	0.7716	883	1.471
15	600	250	0.4166	789	1.315	527	0.8783
16	800	158	0.1975	496	0.62	896	1.12
17	800	100	0.125	414	0.5175	629	0.7862
18	800	260	0.325	553	0.6912	657	0.8212
19	800	509	0.6362	644	0.805	777	0.9712
20	800	141	0.1752	635	0.79375	920	1.15
21	1000	181	0.181	843	0.843	418	0.418
22	1000	226	0.226	583	0.583	491	0.491
23	1000	169	0.169	811	0.811	803	0.803
24	1000	162	0.162	738	0.738	662	0.662
25	1000	206	0.206	700	0.7	450	0.45
26	1200	88	0.073	685	0.5708	931	0.7758
27	1200	186	0.155	683	0.5691	672	0.56
28	1200	139	0.1158	754	0.6283	892	0.743
29	1200	391	0.3258	417	0.3475	975	0.8125
30	1200	154	0.1283	490	0.4083	878	0.7316
อัตราส่วนเฉลี่ย			0.392	-	1.29	-	1.39

จากผลการคำนวณ พบว่า วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ ให้ค่าอัตราส่วนสูงสุด ซึ่งหมายความว่าเมื่อใช้การวนซ้ำที่เท่ากัน วิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์จะให้ค่าที่สูงสุดในพาเรโตฟรอน และค่าพาเรโตฟรอน ในตารางที่ 4.5 ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับ TOPSIS เพื่อหาค่าที่ดีที่สุด

TOPSIS ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าที่ดีที่สุด โดยกำหนดให้ w_1 และ $w_2 = 0.5$ (คำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ) ผลลัพธ์ของ TOPSIS สำหรับวิธีการทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4.6 และ 4.7 และเปรียบเทียบค่าของตัวแปรในแต่ละวิธีการ แสดงในตารางที่ 4.6



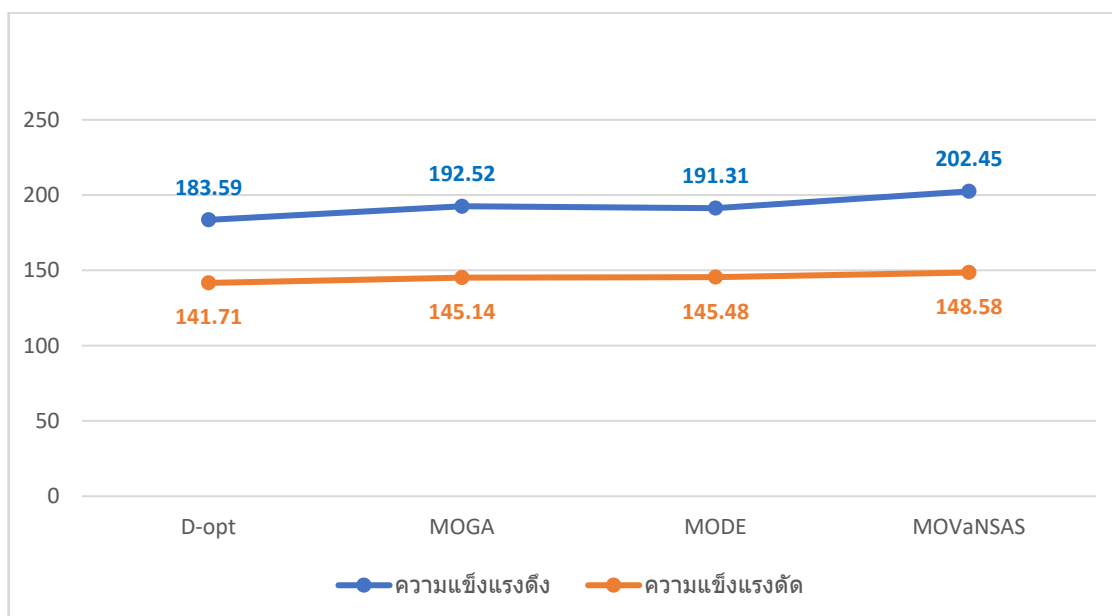
ภาพที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงถึงในแต่ละวิธี



ภาพที่ 4.7 ค่าความแข็งแรงตัดในแต่ละวิธี

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าของตัวแปรในแต่ละวิธีการ

วิธีหาคำตอบ	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม					ความแข็งแรงดึง	ความแข็งแรงตัด
	ความเร็วรอบเครื่องมือกล	ความเร็วในการเดินเชื่อม	มุมเอียงของเครื่องมือกล	รูปทรงของเครื่องมือกล	ทิศทางการหมุนของเครื่องมือกล		
D-optimal	1995.75	90.72	4.94	cylindrical	Counter clockwise	183.59	141.71
MODE	1534.11	84.28	0.502	cylindrical	clockwise	191.31	145.48
MOGA	1545.20	84.77	0.43	cylindrical	clockwise	192.52	145.14
MOVaNSAS	1469.44	80.35	1.01	cylindrical	clockwise	202.45	148.58



ภาพที่ 4.8 ค่าเปรียบเทียบของแต่ละวิธีของความแข็งแรงดึงและแรงดัด

จากภาพที่ 4.8 สามารถคำนวณค่าความแข็งแรงดึงและแรงดัด ของ MOVaNSAS เท่ากับ 202.45 และ 148.58 MPa ตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งแรงดึงดีกว่า MODE, MOGA และ D-opt 5.82, 5.15 และ 10.27% ตามลำดับ และค่าความแข็งแรงดัดดีกว่า MODE, MOGA และ D-opt 2.13, 2.37 และ 4.84% ตามลำดับ

4.2 การตรวจสอบผลลัพธ์โดยการทดสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับตัวอย่างจริง

หลังจากที่ได้พารามิเตอร์ที่เป็นไปได้จากวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ทางผู้วิจัยได้ทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลของการทดลองที่ยืนยันแล้วกับผลลัพธ์ของวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ที่คำนวณได้ เพื่อตรวจสอบว่าค่าพารามิเตอร์ที่สร้างโดยวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ สามารถนำมาใช้ในการหาพารามิเตอร์ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยมีวัตถุประสงค์ทั้งสองค่า คือ ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งแรงดัด ซึ่งมีการทำซ้ำสิบสองครั้งและหาค่าเฉลี่ยสูงสุดของทั้งสองวัตถุประสงค์ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลลัพธ์ของ MOVaNSAS

ตัวแปร	หน่วย	ผลลัพธ์	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)			ค่าความแข็งแรงดัด (MPa)		
			ผลจากการทดลอง	MOVaSAS	% ความแตกต่าง	ผลจากการทดลอง	MOVaSAS	% ความแตกต่าง
ความเร็วรอบ	rpm	1469.44	202.03 ± 0.251	202.45	0.208	148.10 ± 0.451	148.58	0.324
ความเร็วเดินเชื่อม	mm/min	80.35						
มุมของเครื่องมือกลึง	Deg	1.01						
ลักษณะของเครื่องมือกลึง	Cylindrical							
ทิศทางการหมุนของเครื่องมือกลึง	Clockwise							

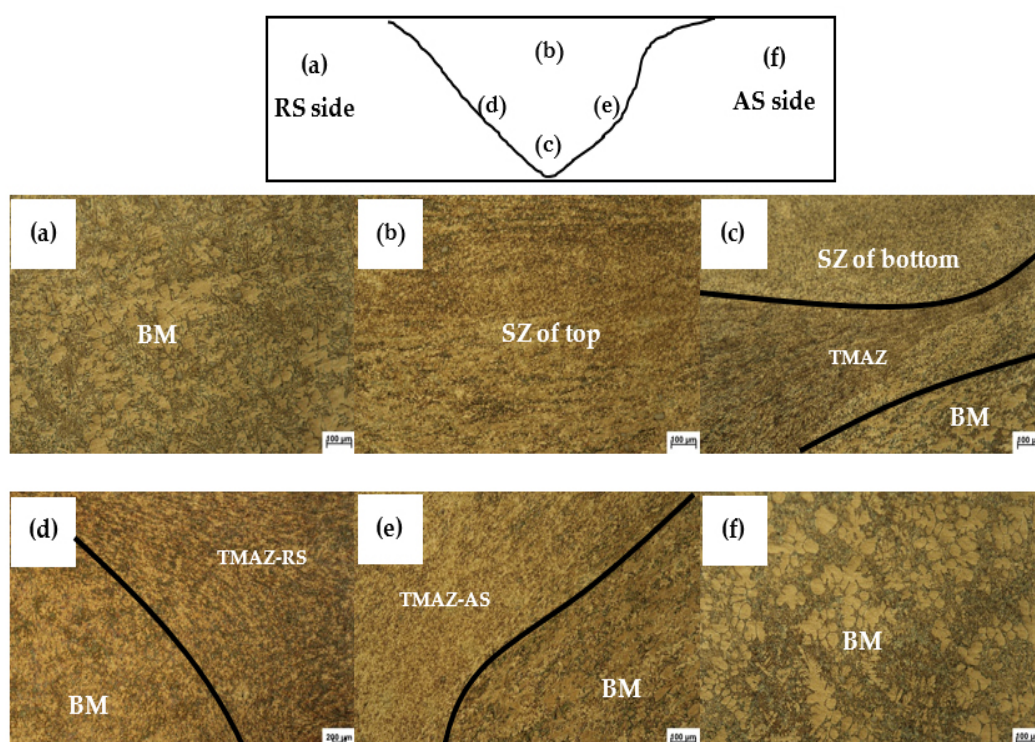
$$\%diff = \frac{UTS/MBT^{Exp} - UTS/MBT^{MOVaNSAS}}{UTS/MBT^{Exp}} \times 100\% \quad (4.12)$$

โดยที่ UTS/MBT^{Exp} คือ ค่าความแข็งแรงดึง หรือค่าความแข็งแรงดัดที่ได้จากการทดลองจริง และ $UTS/MBT^{MOVaNSAS}$ คือ ค่าความแข็งแรงดึง หรือค่าความแข็งแรงดัดที่ได้จาก MOVaNSAS ซึ่งค่าเฉลี่ยของทั้งความแข็งแรงดึงของการทดลองจริงเทียบกับวิธีการของ MOVaNSAS แตกต่างกัน 0.208% ในส่วนของความแข็งแรงดัดมีความแตกต่างกัน 0.324%

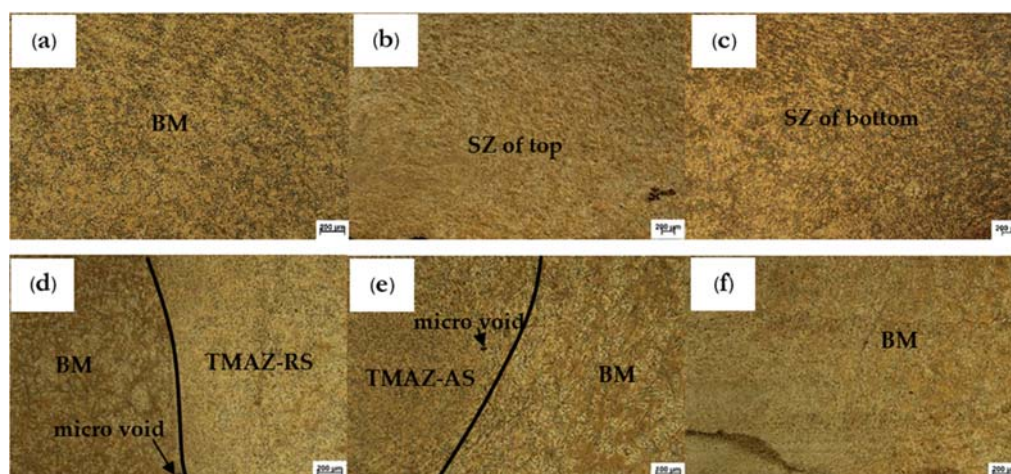
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ข้อบกพร่องและโครงสร้างจุลภาคถูกวิเคราะห์โดยสามวิธี คือ กล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัล (OM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ EDX-ray spectroscopy สำหรับเงื่อนไขพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ ความเร็วรอบเครื่องมือกลึง 1469.44 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 80.35 มิลลิเมตร/นาที มุมเอียงของเครื่องมือกลึง 1.01° รูปทรงของเครื่องมือกลึง แบบทรงกระบอก และทิศทางการหมุนของเครื่องมือกลึงแบบหมุนตามเข็มนาฬิกา ซึ่งส่งผลให้ไม่มีข้อบกพร่องหรือความไม่ต่อเนื่องบริเวณรอยเชื่อม โครงสร้างทางจุลภาคของพารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่เหมาะสมที่สุด มีการเปลี่ยนรูปโครงสร้างบริเวณพื้นที่รอยเชื่อมเนื่องมาจากการถ่ายโอนความร้อนจากระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนบนเนื้อวัสดุ อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12 โครงสร้างแนวเชื่อมแสดงความแตกต่างของการเสียรูปในด้าน retreating side และด้านadvancing side ดังแสดงในภาพที่ 4.6 บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (TMAZ) ส่งผลมาจากตัวกวนและความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อม ลักษณะ

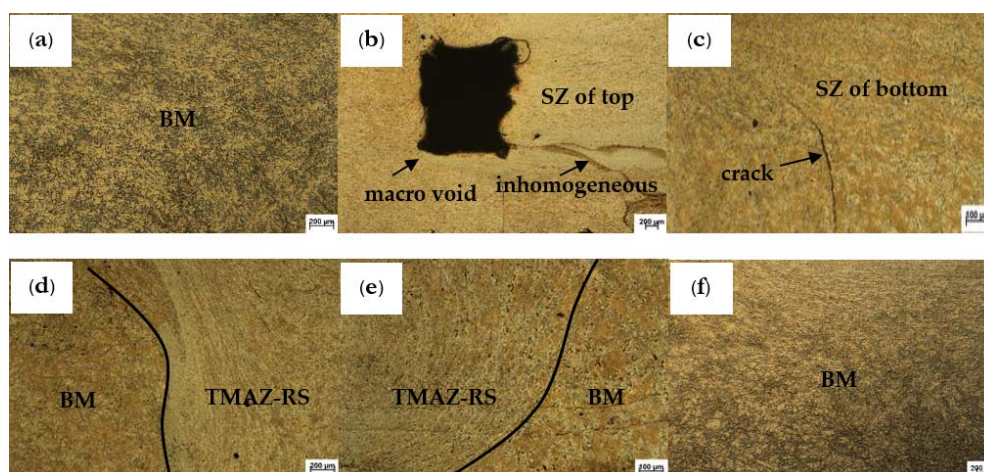
เฉพาะที่สังเกตได้ของโครงสร้างทางจุลภาคใน TMAZ-RS และ TMAZ-AS คือ การเสียรูปของวัสดุจากแรงทางกลของการหมุนเครื่องมือกล และความร้อนที่เกิดจากการเชื่อมแพร่ขยายออกมา การกลวนของเครื่องมือและผลกระทบจากความร้อนในกระบวนการเชื่อมทำให้เกิดการไหลของวัสดุในทิศทางการหมุนและการเสียรูปของโครงสร้าง ดังนั้น บริเวณ TMAZ-RS และ TMAZ-AS จึงแสดงความแตกต่างในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่แสดงในภาพที่ 4.9(d) ,4.9(e) ในขณะที่บริเวณกลวน (SZ) แสดงลักษณะรอยเชื่อมที่ดี การไหลของวัสดุที่ผสมผสานกัน และการผสมวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันนำไปสู่ความสมบูรณ์ของโครงสร้างโดยไม่มีข้อบกพร่องในรอยเชื่อม โครงสร้างบริเวณรอยกลวนของโซนด้านบนและด้านล่างแสดงในรูปที่ 4.9(b), 4.9(c) บริเวณเนื้อโลหะเดิมมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของการเติบโตของเกรนเนื่องจากความร้อนของกระบวนการเชื่อมที่ถูกสร้างขึ้นมาด้วยความร้อนสูงระหว่างการเชื่อมรอยต่อ และความร้อนขยายจาก TMAZ ไปยังบริเวณเนื้อโลหะเดิม ดังนั้นโครงสร้างทางจุลภาคบางตัวในเนื้อโลหะเดิม จึงเปลี่ยนไปในบริเวณที่ติดกับ TMAZ ลักษณะของโครงสร้างใกล้เคียงกับเนื้อวัสดุเดิม ดังภาพที่ 4.9(a), 4.9(f)



ภาพที่ 4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของสภาวะการเชื่อมด้วยวิธี MOVaNSAS (a และ f) BM, (b และ c) SZ, (e) TMAZ-AS และ (d) TMAZ-RS



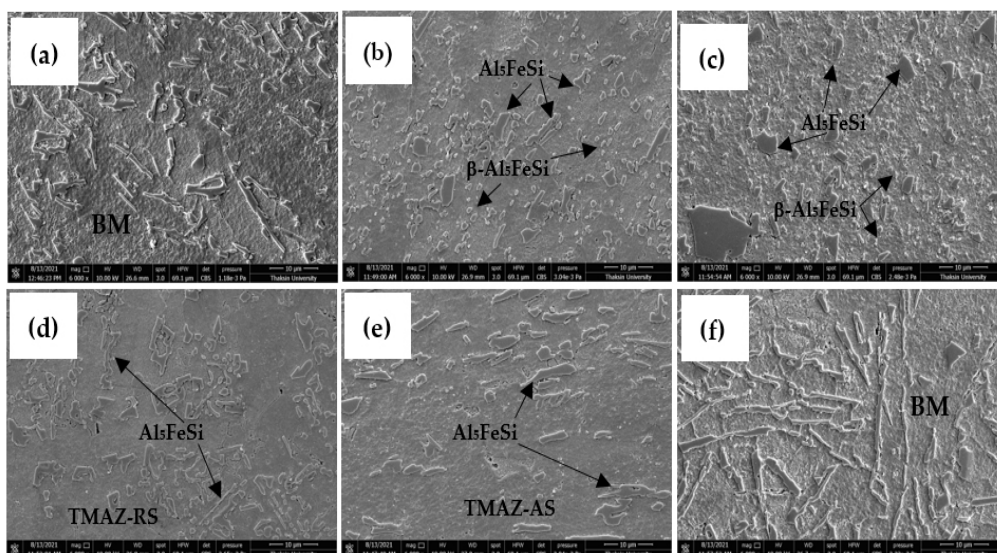
ภาพที่ 4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของสถานะการเชื่อมด้วยวิธี D-optimal (a และ f) BM, (b และ c) SZ, (e) TMAZ-AS และ (d) TMAZ-RS



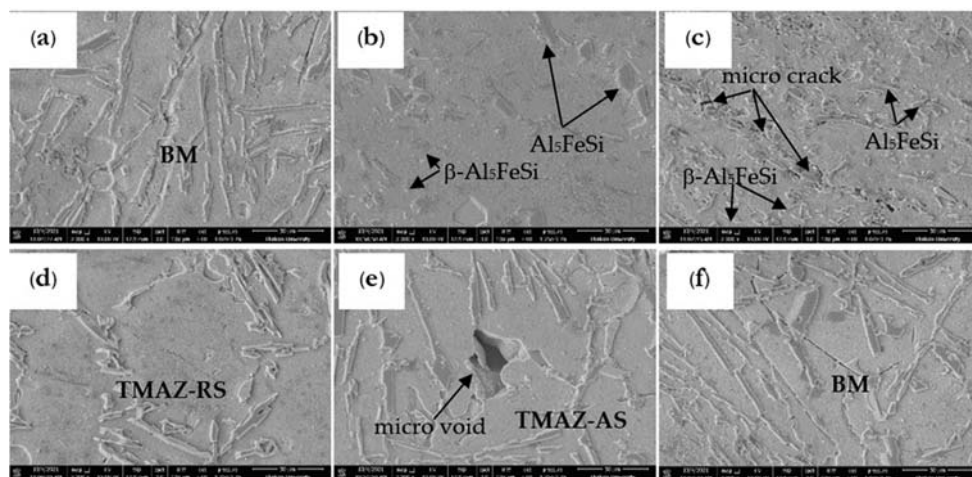
ภาพที่ 4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของสถานะการเชื่อมด้วยวิธีแบบการทดลอง (a และ f) BM, (b และ c) SZ, (e) TMAZ-AS และ (d) TMAZ-RS

เส้นเชื่อมของสภาพที่เหมาะสมที่สุดจาก D-optimal พบข้อบกพร่องขนาดเล็กใน TMAZ ดังภาพที่ 4.10(d), 4.10(e) บริเวณรอยกวนแสดงเกรนละเอียด ดังภาพที่ 4.10(b), 4.10(c) มุมเอียงของเครื่องมือกวน ทำให้วัสดุไหลและผสมในรอยเชื่อม นอกจากนี้ TMAZ ของทั้งด้าน retreating side และด้าน advancing side ยังแสดงการเสียรูปของวัสดุและเกรนที่ขยายออกตามทิศทางการหมุนที่เพิ่มขึ้น แม้ว่าความหนาแน่นของการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มความแข็งแรงของรอยเชื่อม แต่ข้อบกพร่องขนาดเล็กยังปรากฏในโครงสร้าง ซึ่งเป็นปัญหาทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและแรงดัดลดลง ดังนั้นการทำนายแบบ D-optimal ให้แรงดึงและแรงดัดต่ำกว่าค่าทำนายของ MOVaNSAS โครงสร้างทางจุลภาคของการทดลองเริ่มต้นแสดงให้เห็นข้อบกพร่องขนาดใหญ่และรอยแตกในบริเวณรอยกวน ดังภาพที่ 4.11(b), 4.11(c) โครงสร้างในแนวเชื่อมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและมีขนาดของเกรนน้อยกว่าทั้งสองวิธีที่กล่าวข้างต้นในบริเวณรอยกวน นอกจากนี้ การเปลี่ยนรูปของวัสดุจากการกวนยัง

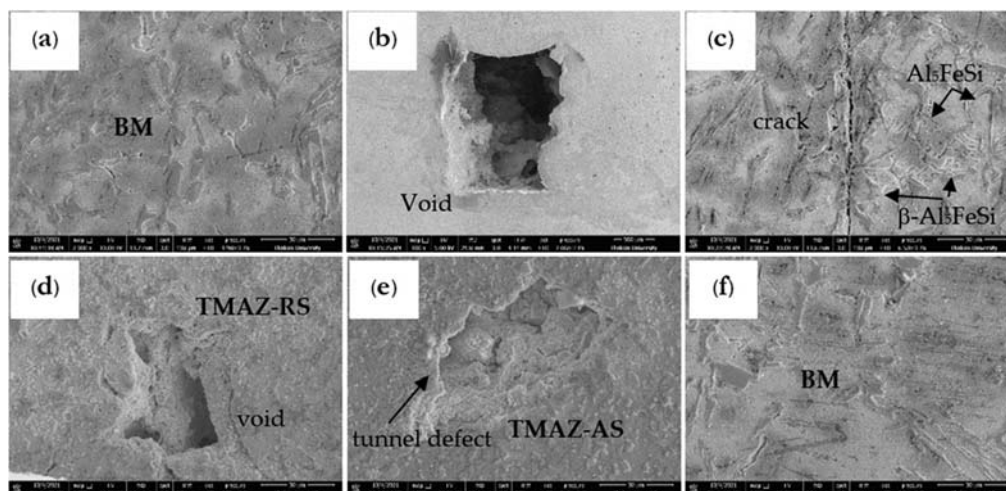
ปรากฏเกรนขนาดใหญ่ใน TMAZ ดังภาพที่ 4.11(d), 4.11(e) ซึ่งมีความหนาแน่นของความคลาดเคลื่อนของเกรนต่ำ ดังนั้น สภาวะการเชื่อมนี้จึงให้ความแข็งแรงดึงและแรงดัดต่ำกว่าสภาวะที่เหมาะสมของวิธี D-optimal และ MOVaNSAS



ภาพที่ 4.12 โครงสร้างทางจุลภาค(SEM)ของสภาวะการเชื่อมด้วยวิธี MOVaNSAS (a และ f) BM, (b และ c) SZ, (e) TMAZ-AS และ (d) TMAZ-RS



ภาพที่ 4.13 โครงสร้างทางจุลภาค(SEM)ของสภาวะการเชื่อมด้วยวิธี D-optimal (a และ f) BM, (b และ c) SZ, (e) TMAZ-AS และ (d) TMAZ-RS



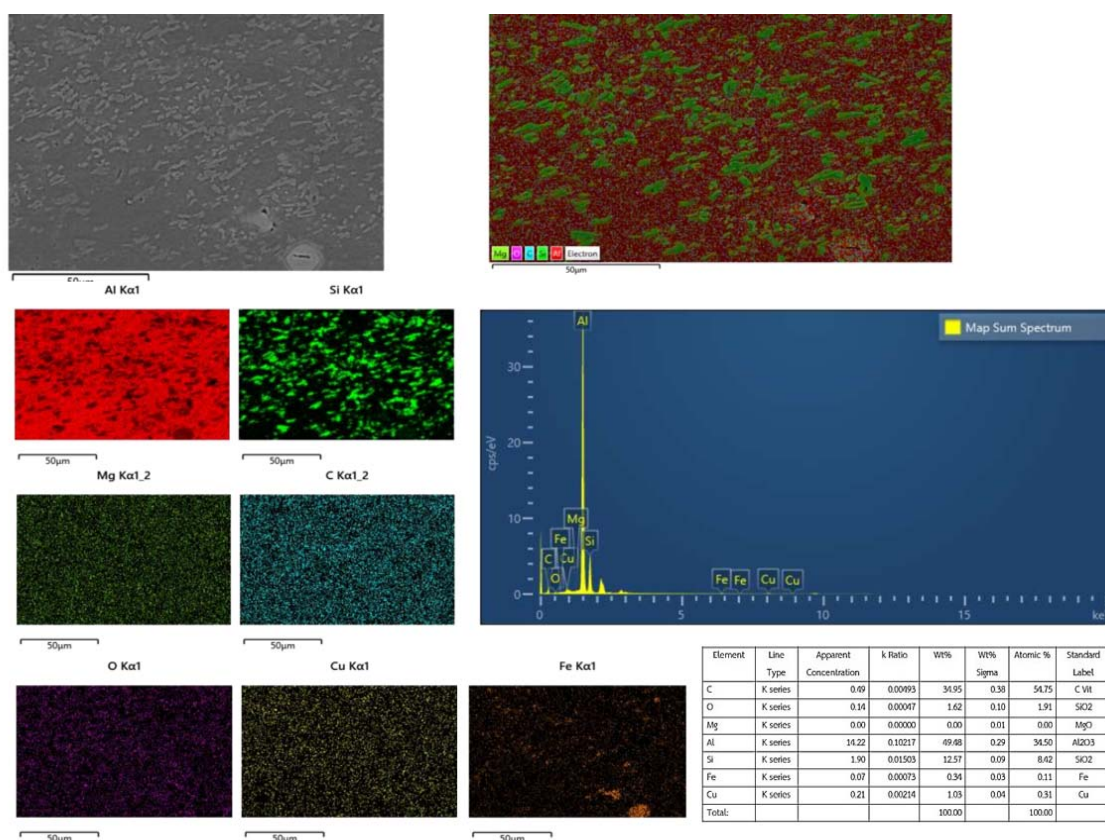
ภาพที่ 4.14 โครงสร้างทางจุลภาค(SEM)ของสภาวะการเชื่อมด้วยวิธีการทดลอง (a และ f) BM, (b และ c) SZ, (e) TMAZ-AS และ (d) TMAZ-RS

สำหรับพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสมแต่ละตัว โครงสร้างรอยเชื่อมของวิธีการ MOVaNSAS แสดงเฟสสารประกอบระหว่างโลหะ Al_5FeSi ในบริเวณรอยกรวน ที่ปรากฏแบ่งออกเป็นขนาดอนุภาคขนาดใหญ่และการกระจายที่สม่ำเสมอ สารประกอบระหว่างโลหะ Al_5FeSi ถูกแยกออกจากกันโดยการกรวนของเครื่องมือกรวน และมีการกระแทกเข้ากับมุมเอียงของเครื่องมือกรวน ความเร็วรอบเครื่องมือกรวน และความเร็วในการเดินเชื่อม ส่งผลต่อการไหลของวัสดุและการกระจายตัวของอนุภาคระหว่างโลหะอย่างสม่ำเสมอ ขนาดอนุภาคของเฟส Al_5FeSi มีขนาดเล็กกว่า $10\ \mu m$ และมีลักษณะแหลมคมดังแสดงในภาพที่ 4.12(b), 4.12(c) เฟส $\beta-Al_3FeSi$ มีอนุภาคละเอียดที่เล็กกว่าเฟส Al_5FeSi และกระจายตัวสม่ำเสมอซึ่งทำให้เกิดความหนาแน่นของความคลาดเคลื่อน ดังนั้น ความหนาแน่นของเฟส Al_5FeSi และ $\beta-Al_3FeSi$ สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของความต้านทานแรงดึงและแรงดัดได้ ในทำนองเดียวกัน TMAZ ระบุว่าเฟส Al_5FeSi มีรูปร่างยาวซึ่งมีขนาดเล็กเช่นกัน เฟส Al_5FeSi ใน TMAZ มีขนาดที่ใหญ่กว่าเฟส Al_5FeSi ในบริเวณรอยกรวน เนื่องจากพลังงานความร้อนต่ำและการเสียดสีของวัสดุต่ำใน TMAZ ดังภาพที่ 4.12(d), 4.12(e) ดังนั้น บริเวณ TMAZ จึงมีโอกาสปรากฏคุณสมบัติทางกลที่อ่อนแอกว่าบริเวณรอยกรวน นอกจากนี้ เนื้อโลหะเดิมของโลหะผสมอะลูมิเนียม SSM-ADC12 ยังแสดงเฟส Al_5FeSi ที่ใหญ่ที่สุด ซึ่งใหญ่กว่าโซนอื่นในรอยเชื่อมโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 4.12(a), 4.12(f) การจัดเรียงเฟส Al_5FeSi มีการกระจายที่ราบรื่นและสม่ำเสมอ เฟส Al_5FeSi เป็นรูปแท่งและจัดเรียงตามแนวขอบเกรนของวัสดุ

โครงสร้างรอยเชื่อมของวิธีการ D-optimal แสดงการกระจายเฟส $\beta-Al_3FeSi$ ต่ำกว่าโครงสร้างของวิธีการ MOVaNSAS ส่วนของอนุภาคมีขนาดใหญ่และการกระจายตัวต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ MOVaNSAS ดังแสดงในภาพที่ 4.13(b), 4.13(c) นอกจากนี้ บริเวณรอยกรวนมีข้อบกพร่องขนาดเล็กและรอยแตกขนาดเล็ก ใน TMAZ ของด้าน advancing side ซึ่งนำไปสู่จุดอ่อนในแนวรอยเชื่อม โครงสร้างทางจุลภาคของการทดลองแสดงข้อบกพร่องที่มีขนาดใหญ่และการแตกร้าวในบริเวณรอยกรวน

และ TMAZ ดังแสดงในภาพที่ 4.14 นอกจากนี้ เฟสระหว่างโลหะ β - Al_5FeSi ยังไม่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.14(b), 4.14(c)

โครงสร้างรอยเชื่อมของวิธี MOVaNSAS ได้รับการตรวจสอบสำหรับองค์ประกอบของเฟส Al_5FeSi ของการตกผลึกใหม่และการเกิดสารประกอบระหว่างโลหะ การเปลี่ยนแปลงเฟส Al_5FeSi ในขนาดอนุภาคและการกระจายของเฟสได้รับอิทธิพลจากความร้อนและพารามิเตอร์การทดลอง เฟส Al_5FeSi เกิดขึ้นจากเฟส Mg_2Si เนื่องจากองค์ประกอบ Fe แยกการก่อตัวของเฟส Mg_2Si ดังแสดงในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 EDX-ray spectroscopy ขึ้นงานทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องมือแกน 1469.44 รอบต่อวินาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 80.35 มิลลิเมตร/นาที มุมเอียงของเครื่องมือแกน 1.01° รูปทรงของเครื่องมือแกนแบบทรงกระบอก และทิศทางการหมุนของเครื่องมือแกนแบบตามเข็มนาฬิกา

อย่างไรก็ตาม ความร้อนที่ป้อนเข้าระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อยู่ในช่วง 330–520 °C ดังนั้นจึงเป็นไปได้สำหรับการก่อตัวของเฟส $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ และ Al_4FeSi_2 ซึ่งมีความสามารถในการละลายได้ดีในสารละลายที่เป็นของแข็งที่อุณหภูมิสูง เป็นที่น่าสังเกตว่าองค์ประกอบ O เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมทำให้เกิดเฟสสารประกอบใหม่ องค์ประกอบ O นำไปสู่การก่อตัวของเฟส Al_2O_3 และ SiO_2 ซึ่งกระจายอย่างกว้างขวางตามการวิเคราะห์ เฟส Al_2O_3 และ SiO_2 มีความทนทานต่อแรงดึงและแรงดัด

เช่นกัน แต่ทั้งสองเฟสฝังตัวมากขึ้นในวัสดุและลดความโดดเด่นของคุณสมบัติเชิงกล เช่น การยึดตัว และคุณสมบัติเหนียว ดังนั้นคุณสมบัติทางกลที่ลดลงอาจทำให้รอยเชื่อมแตกหักได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับความแข็งแรงดึงและแรงดัด การทำนายค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการวิจัยได้ดำเนินการในสามขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกคือการออกแบบการทดลองโดย D-optimal สำหรับการรวบรวมข้อมูลการทดลองและการจำลองความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การเชื่อม ขั้นตอนที่สองคือการสร้างชุดข้อมูลที่เหมาะสมที่สุดจากข้อมูลของขั้นตอนแรกโดยพารेटโดพร้อม จากนั้นใช้ TOPSIS เพื่อค้นหาวิธีแก้ปัญหาที่มีแนวโน้มดีที่สุดสำหรับปัญหาที่เสนอ เป็นการนำวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้มาใช้ในการหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งเรียกว่า การแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ (MOVaNSAS) ใช้ในการหาพารามิเตอร์การเชื่อมทั้ง 5 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบเครื่องมือกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม ทิศทางการหมุนของเครื่องมือกวน มุมเอียงของเครื่องมือกวน และรูปทรงของเครื่องมือกวน ในการหาค่าที่สูงสุดค่าความแข็งแรงดึงและแรงดัดของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ADC12

สภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายด้วยวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ คือ ความเร็วรอบเครื่องมือกวน 1469.44 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 80.35 มิลลิเมตร/นาที มุมเอียงของเครื่องมือกวน 1.01° รูปทรงของเครื่องมือกวน แบบทรงกระบอก และทิศทางการหมุนของเครื่องมือกวนแบบหมุนตามเข็มนาฬิกา เงื่อนไขเหล่านี้ส่งผลได้ค่าความแข็งแรงดึง เท่ากับ 202.45 MPa และความต้านทานแรงดัด เท่ากับ 148.58 MPa ซึ่งได้นำปัจจัยที่เหมาะสมทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ไปทดสอบเพื่อความแม่นยำและความน่าเชื่อถือ ผลที่ได้แสดงให้เห็นความแตกต่าง 0.203–0.287% สำหรับทั้งสองค่าที่กล่าวมาเมื่อเทียบ จากการทดลองจริง สำหรับค่าการทำนายของความแข็งแรงดึงด้วยวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ดีกว่า MODE, MOGA และ D-opt คือ 5.82, 5.15 และ 10.27% ตามลำดับ ในขณะที่การทำนายของความต้านทานแรงดัดของวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์ดีกว่า MODE, MOGA และ D-opt คือ 2.13, 2.37 และ 4.84% ตามลำดับ จากผลลัพธ์นี้ เราสามารถยืนยันได้ว่าวิธีการแปรผันกลยุทธ์ในการหาคำตอบใกล้เคียงแบบปรับค่าได้หลายวัตถุประสงค์เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการทำนายพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของวัตถุประสงค์ที่สนใจ

โครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อมของชิ้นงานที่ดีที่สุดไม่พบข้อบกพร่อง และมีอนุภาคของเฟสระหว่าง Al_5FeSi , $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ กระจายแบบสม่ำเสมอ การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอของเฟสระหว่างโลหะ เป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางกลของความแข็งแรงดึงและแรงดัด ส่งผลให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงดึงและแรงดัดสูง นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การเชื่อมทำให้เกิดความร้อนที่เพียงพอ การไหลของวัสดุ และการผสมที่เหมาะสมในแนวเชื่อม ดังนั้นปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นมีผล

ต่อประสิทธิภาพของแนวเชื่อมในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน การไหลของวัสดุและการกวนจากเครื่องมือกวนนำไปสู่การผสมของวัสดุ และอนุภาค Al_5FeSi จะแยกออกเป็นอนุภาค $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ ขนาดเล็กที่มีการกระจายสม่ำเสมอ รอยเชื่อมแสดงความสมบูรณ์ของโครงสร้างทางจุลภาคของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ไม่มีข้อบกพร่อง

5.2 ข้อเสนอแนะ

แนวทางการพัฒนาและทำการศึกษา ในการแก้ปัญหาสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอนาคตควรจะมีมุ่งเน้นทำการศึกษาดังนี้

5.2.1 ศึกษาวิธีวิธีวัสดุอื่น ๆ เพื่อพัฒนาการสร้างความตอและปรับปรุงคำตอบในการแก้ไข ปัญหา

5.2.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกัน เช่น อะลูมิเนียมที่ต่างชนิดกันเชื่อมด้วยกัน

5.2.3 ศึกษาปัจจัยอื่น เช่น อัตราส่วนระหว่างปากกับตัวกวน แรงที่กดลงบนเนื้อวัสดุ ชนิดของเครื่องมือกวน เพื่อพัฒนาในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

5.2.4 ศึกษาคุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมเพิ่มเติมจากการทดลอง เช่น ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความล้า เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- Ba-Abbad, M. M. and et al. “Optimization of process parameters using D-optimal design for synthesis of ZnO nanoparticles via sol–gel technique”, **J. Ind. Eng. Chem.** 19(1): 99-105; January, 2013.
- Bisadi, H. and et al. “The influences of rotational and welding speeds on microstructures and mechanical properties of friction stir welded Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints”, **Materials & Design.** 43(1): 80-88; January, 2013.
- Da Silva, C. L. M. and Scotti, A. “The influence of double pulse on porosity formation in aluminum GMAW”, **Journal of materials processing technology.** 171(3): 366-372; February, 2006.
- Doherty, R. D., Lee, H. I. and Feest, E. A. “Microstructure of stir-cast metals”, **Journal of Materials Science and Engineering.** 65(1): 181-189; July, 1984.
- Elangovan, K. and Balasubramanian, V. “Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy”, **Journal of materials processing technology.** 200(1-3): 163-175; May, 2008.
- Fang, X. and Zhang, J. “Effect of underfill defects on distortion and tensile properties of Ti-2Al-1.5 Mn welded joint by pulsed laser beam welding”, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.** 74(5-8): 699-705; September, 2014.
- Flemings, M. C. **Solidification processing.** New York: McGraw-Hill Book Company, 1974.
- Flemings, M. C. and Johnson, W. L. “High viscosity liquid and semi-solid metal casting: Processes and products”, In **Plenary lecture world foundry conference.** Busan, South Korea: Busan Exhibition and Convention Center, 2002.
- Guo, H., Hu, J. and Tsai, H. L. “Formation of weld crater in GMAW of aluminum alloys”, **International Journal of Heat and Mass Transfer.** 52(23–24): 5533-5546; November, 2009.
- Guo, J. and et al. “Friction stir welding of dissimilar materials between AA6061 and AA7075 Al alloys effects of process parameters”, **Materials and Design.** 56: 185-192; April, 2014.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Giraud, L. and et al. “Investigation into the dissimilar friction stir welding of AA7020-T651 and AA6060-T6”, **Journal of Materials Processing Technology**. 235(1): 220-230; September, 2016.
- Ghaffarpour, M. and et al. “Evaluation of dissimilar welds of 5083-H12 and 6061-T6 produced by friction stir welding”, **Metallurgical and Materials Transactions A**. 44(8): 3697-3707; August, 2013.
- Hartl, R. and et al. “Predicting the Ultimate Tensile Strength of Friction Stir Welds Using Gaussian Process Regression”, **J. Manuf. Mater. Process.** 4(3): 75; July, 2020
- Hartl, R. and Praehofer, B. and Zaeh, M. “Prediction of the surface quality of friction stir welds by the analysis of process data using Artificial Neural Networks. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L”, **Journal of Materials: Design and Applications**. 234(5): 732-751; January, 2020.
- Heinz, A. and et al. “Recent development in aluminium alloys for aerospace applications”, **Materials Science and Engineering**. 280(1): 102-107; March, 2000.
- Hoyos, E. and et al. “Manufacturing Concept and Prototype for Train Component Using the FSW Process”, **Journal of Manufacturing and Materials Processing**. 5(1): 19; February, 2021.
- Ilangovan, M., Boopathy, S. R. and Balasubramanian, V. “Effect of tool pin profile on microstructure and tensile properties of friction stir welded dissimilar AA 6061-AA 5086 aluminium alloy joints”, **Defence Technology**. 11(2): 174-184; June, 2015.
- Jessada, W. and Sangop, T. “Development of a semi-solid metal processing technique for aluminium casting applications”, **Songklanakarin J. Sci. Technol.** 30(2): 215-220; March-April, 2008.
- Jirasirilerd, G. and et al. “Simple Assembly Line Balancing Problem Type 2 by Variable Neighborhood Strategy Adaptive Search: A Case Study Garment Industry”, **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**. 6(1): 21; January, 2020.
- Ji, S. and et al. “Effect of groove distribution in shoulder on formation, macrostructures, and mechanical properties of pinless friction stir welding of 6061-O aluminum alloy”, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 87(9-12): 3051-3058; December, 2016

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Jirang, C. and Roven, H. J. “Recycling of automotive aluminum”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 20(11): 2057-2063; November, 2010.
- Jones, B., Allen-Moyer, K. and Goos, P. “A-optimal versus D-optimal design of screening experiments”, **J. Qual. Technol.** 53(4): 369-382; May, 2021.
- Kadaganchi, R., Gankidi, M. R. and Gokhale, H. “Optimization of process parameters of aluminum alloy AA 2014-T6 friction stir welds by response surface methodology”, **Defence Technology**. 11(3): 209-219; September, 2015.
- Kasman, Ş. and Yenier, Z. “Analyzing dissimilar friction stir welding of AA5754/AA7075”, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 70(1-4): 145-156; January, 2014.
- Kesharwani, R., Panda, S. and Pal, S. “Multi objective optimization of friction stir welding parameters for joining of two dissimilar thin aluminum sheets”, **Procedia Materials Science**. 6(1): 178-187; December, 2014,
- Khan, N. Z., Khan, Z. A. and Siddiquee, A. N. “Effect of shoulder diameter to pin diameter (D/d) ratio on tensile strength of friction stir welded 6063 aluminium alloy”, **Materials Today: Proceedings**. 2(4-5): 1450-1457; September, 2015.
- Khamsing, N. and et al. “Modified ALNS Algorithm for a Processing Application of Family Tourist Route Planning: A Case Study of Buriram in Thailand”, **Computation**. 9(2): 23; February, 2021.
- Koilraj, M. and et al. “Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA2219 to AA5083–Optimization of process parameters using Taguchi technique”, **Materials & Design**. 42(1): 1-7; December, 2012.
- Kuram, E. and et al. “Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using D-optimal design of experiments”, **J. Clean. Prod.** 42: 159-166; March, 2013.
- Kusoncum, C. and et al. “Heuristics with novel approaches for cyclical multiple parallel machine scheduling in sugarcane unloading systems”, **International Journal of Production Research**. 59(8): 2479-2497; March, 2020.
- Lakshminarayanan, A. and Balasubramanian, V. “Process parameters optimization for friction stir welding of RDE-40 aluminium alloy using Taguchi technique”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 18(3): 548-554; June, 2008.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Lakshminarayanan, A., Malarvizhi, S. and Balasubramanian, V. “Developing friction stir welding window for AA2219 aluminium alloy”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 21(11): 2339-2347, November, 2011.
- Liu, H. and et al. “Effect of friction stir welding parameters on microstructural characteristics and mechanical properties of 2219-T6 aluminum alloy joints”, **International journal of material forming**. 5(3): 235-241; September, 2011.
- Li, W. and et al. “Pinless friction stir welding of AA2024-T3 joint and its failure modes”, **Transactions of Tianjin University**. 20(6): 439-443; December, 2014.
- Lotfi, A. H. and Nourouzi, S. “Effect of welding parameters on microstructure, thermal, and mechanical properties of friction-stir welded joints of AA7075-T6 aluminum alloy”, **Metallurgical and Materials Transactions A**. 45(6): 2792-2807; June, 2014.
- Mao, Y. and et al. “Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of 2060 aluminum lithium alloy”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 81(5): 1419-1431; May, 2015.
- Martinez, R. A. **Formation and Processing of Rheocast microstructures**. Doctor’s Thesis: Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2004.
- Meengam, C. and Sillapasa, K. “Evaluation of Optimization Parameters of Semi-Solid Metal 6063 Aluminum Alloy from Friction Stir Welding Process Using Factorial Design Analysis”, **J. Manuf. Mater. Process**. 4(4): 123; December, 2020.
- Miller, W. and et al. “Recent development in aluminium alloys for the automotive industry”, **Materials Science and Engineering**. 280(1): 235-241; March, 2011.
- Palani, K. and Elanchezhian, C. “Multi response Optimization of Friction stir welding process parameters in dissimilar alloys using Grey relational analysis”, **Materials Science and Engineering**. 390(1): 18-27; July-August, 2011.
- Pitakaso, R., Sethanan, K. and Theeraviriya, C. “Variable neighborhood strategy adaptive search for solving green 2-echelon location routing problem”, **Computers and Electronics in Agriculture**. 173(1): 235-241; June, 2020.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- RajKumar, V. and et al. “Studies on effect of tool design and welding parameters on the friction stir welding of dissimilar aluminium alloys AA 5052-AA 6061”, **Procedia Engineering**. 75(1): 93-97; December, 2014.
- Shojaeefard, M. H. and et al. “Modelling and Pareto optimization of mechanical properties of friction stir welded AA7075/AA5083 butt joints using neural network and particle swarm algorithm”, **Materials and Design**. 44(1): 190-198; February, 2013.
- Shanavas, S. and Edwin Raha Dhas, J. “Parametric optimization of friction stir welding parameters of marine grade aluminium alloy using response surface methodology”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 8(9): 2334-2344; November, 2017.
- Srichok, T. and et al. “Combined Response Surface Method and Modified Differential Evolution for Parameter Optimization of Friction Stir Welding”, **Processes**. 8(9): 1080; September, 2020.
- Tansel, I. N. and et al. “Optimizations of friction stir welding of aluminum alloy by using genetically optimized neural network”, **Int J Adv Manuf Technol**. 8(9): 95-101; August, 2020.
- Tehyo, M., Muangjunburee, P. and Chuchom, S. “Friction stir welding of dissimilar joint between semi-solid metal 356 and AA 6061-T651 by computerized numerical control machine”, **Songklanakarin Journal of Science & Technology**. 33(4): 441-448; July-August, 2011.
- Theeraviriya, C., Ruamboon, K. and Praseeratasang, N. “Solving the multi-level location routing problem considering the environmental impact using a hybrid metaheuristic”, **Int. J. Eng. Bus. Manag.** 13: 1-17; May, 2021.
- Theeraviriya, C., Sirirak, W. and Praseeratasang, N. “Location and routing planning considering electric vehicles with restricted distance in agriculture”, **World Electric Vehicle Journal**. 11(4): 61; September, 2020.
- Thomas, W. M., Johnson, K. I. and Wiesner, C. S. “Friction stir welding—recent developments in tool and process technologies”, **Advanced engineering materials**. 5(7): 485-490; July, 2003.
- Thomas, W. and Nicholas, E. “Friction stir welding for the transportation industries”, **Materials & Design**. 18(4-6): 269-273; December, 1997.
- Threadgill, P. and et al. “Friction stir welding of aluminium alloys”, **International Materials Reviews**. 54(2): 49-93; March, 2009.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Uematsu, Y. and et al. “Comparative study of fatigue behaviour in dissimilar Al alloy/steel and Mg alloy/steel friction stir spot welds fabricated by scroll grooved tool without probe”, **Science and Technology of Welding and Joining**. 17(5): 348-356; November, 2013.
- Vogel, A., Doherty, R. D. and Carton, B. **Solidification and casting metal**. London, England: The metal Society, 1979.
- Yousif, Y. K., Daws, K. M. and Kazem, B. I. “Prediction of Friction Stir Welding Characteristic Using Neural Network”, **Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering**. 2(3): 151-155; September, 2008.
- Zimmer, S. and et al. “Influence of processing parameters on the tool and workpiece mechanical interaction during Friction Stir Welding”, **Int. J. Mater.** 2: 299-302; August, 2009.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายศุภชัย ชัยณรงค์
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2547 - 2550 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พ.ศ. 2551 - 2553 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2554-ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ตำแหน่ง	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
สถานที่ทำงาน	สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จังหวัดสงขลา