

การศึกษาค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมแบบมิกระหว่างเหล็กกล้าวไนซ์
และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061

A STUDY OF THE TENSILE SHEAR FORCE OF MIG-WELDED
GALVANIZED STEEL AND AA6061 ALUMINUM ALLOY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF THE TENSILE SHEAR FORCE OF MIG-WELDED GALVANIZED STEEL AND AA6061 ALUMINUM ALLOY

MR. KORADON PHAAPHON

MR. KRITSANURAK BOONCHAROENSRIPHANICH

MR. DARANPOP VEERAKAEW

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การศึกษาค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมแบบมีกระหว่างเหล็กกล้าไนซ์
และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061

A STUDY OF THE TENSILE SHEAR FORCE OF MIG-WELDED
GALVANIZED STEEL AND AA6061 ALUMINUM ALLOY

นักศึกษา

นายกรดล พาผล

รหัสประจำตัว 61010020

นายกฤษณรัชช์ บุญเจริญศรีพานิช

รหัสประจำตัว 61010045

นายตรีณภพ วีระแก้ว

รหัสประจำตัว 61010373

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์



(รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมแบบมิกระหว่างเหล็กกล้าไนซ์และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061
นักศึกษา	นายกรตล พาผล นายกฤษณ์รัช บัญเจริญศรีพานิช นายดรัณภพ วีระแก้ว
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2564
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมแบบมิกระหว่างเหล็กกล้าไนซ์และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 โดยเริ่มต้นจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน โดยทำการคัดกรองปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัยได้แก่ 1) กระแสไฟเชื่อม โดยมีค่าระดับคือ 80 90 และ 100 แอมแปร์ 2) ระยะอาร์ค โดยมีค่าระดับคือ 8 9 และ 10 มิลลิเมตร และ 3) มุมในการเชื่อม โดยมีค่าระดับคือ 50 60 และ 70 องศา ให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าแรงดึงเดือน โดยกำหนดปัจจัยคงที่คือ 1) ความเร็วในการเดินรอยเชื่อม 0 มิลลิเมตรต่อวินาที 2) ระยะเวลาการไหลของแก๊สก่อนอาร์ค 0.5 วินาที 3) ระยะเวลาเกิดการอาร์ค 0.5 วินาที และ 4) ระยะเวลาการไหลของแก๊สหลังเกิดการอาร์ค 1 วินาที หลังจากนั้นใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method) ซึ่งมีทั้งหมด 2 ขั้นตอน คือขั้นตอน Steepest Ascent เพื่อหาจุดศูนย์กลางใหม่ และขั้นตอน Central Composite Design (CCD) เพื่อวิเคราะห์หาระดับปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมมีค่ามากที่สุด โดยนำชิ้นงานมาทำการเชื่อมและทดสอบหาค่าแรงดึงเดือน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมที่ระดับ $\alpha = 0.05$ นั้นมีระดับที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ คือกระแสไฟเชื่อม เท่ากับ 101 แอมแปร์ ระยะอาร์ค เท่ากับ 7 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม เท่ากับ 71 องศา ซึ่งมีค่ารับแรงดึงเดือนสูงสุดคือ 1717.77 นิวตัน

Thesis Title A Study of The Tensile Shear Force of MiG-Welded Galvanized Steel and AA6061 Aluminum Alloy

Student Mr. Koradon Phaaphon
Mr. Kritsanurak Booncharoensriphanih
Mr. Daranpop Veerakaew

Degree Bachelor of Engineering in Industrial Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2021

Thesis Advisor Assoc.Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

The purpose of this research is to study the tensile shear force of MIG-welded galvanized steel and AA6061 aluminum alloy, starting with a full factorial experimental design. Three factors were screened: 1) welding current with ratings of 80, 90, and 100 A, 2) arc length with level values of 8, 9, and 10 mm, and 3) welding angle with level values of 50, 60, and 70 degrees. The purpose was to identify the important parameters that exhibit significant tensile shear force at the welding point. The constant factors were a welding speed of 0 mm/sec, a pre-arc gas flow time of 0.5 s, an arcing time of 0.5 s, and the duration of the arc. The gas flow was measured 1 s after arcing. The response surface method, consisting of two steps - the steepest ascent step to find the new center and the central composite design (CCD) step, was used to analyze the level of factors that result in the greatest tensile shear force at the welding point. By welding and testing a workpiece to find the tensile shear force, the appropriate levels of various factors were found with a significance level of $\alpha = 0.05$. The suitable levels of factors were found to be a welding current of 101 amperes, an arc length of 7 millimeters, and a welding angle of 71 degrees, resulting in the maximum tensile shear force of 1717.77 Newtons.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่องการศึกษาค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมแบบมีกระหว่างเหล็กกล้าวาไนซ์และอลูมิเนียม AA6061 นี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิศวกรรมบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ซึ่งสามารถสำเร็จลงด้วยดี ทางคณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาฯ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ การช่วยเหลือ รวมทั้งชี้แนะแนวทางสำหรับการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง ในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ด้วยความเอาใจใส่ตลอดมา

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่คอยช่วยเหลือเอื้อเฟื้อในเรื่องวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองที่ใช้สำหรับการศึกษาในปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ และขอขอบคุณนายกำธร สุขพิมาย และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่คอยสั่งสอนให้ความรู้ และให้คำแนะนำในเรื่องวิธีการใช้งานเครื่องมือต่างๆ และขอขอบคุณเพื่อนๆที่คอยช่วยเหลือในด้านต่างๆ ในปริญญาานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจ รวมไปถึงเพื่อนๆที่คอยให้ความช่วยเหลือตลอดมา ทางคณะผู้ดำเนินงานวิจัยหวังว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจศึกษา เพื่อใช้เป็นสื่อการเรียนรู้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อไป

นายกรดล

พาผล

นายกฤษณร์ักษ์ บุญเจริญศรีพานิช

นายตรีณภพ

วีระแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษางานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การเชื่อมแบบมิก.....	5
2.2 หลักในการอาร์ค.....	6
2.3 การถ่ายเทโลหะ.....	7
2.3.1 การถ่ายเทแบบลัดวงจร (Short Circuit Transfer).....	7
2.3.2 การถ่ายเทแบบก้อนกลม (Globular Transfer).....	8
2.3.3 การถ่ายเทแบบละอองฝอย (Spray Transfer).....	8
2.3.4 การถ่ายเทแบบละอองฝอยลักษณะพัลส์ (Pulse Spray Transfer).....	9
2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมแบบมิก.....	9
2.4.1 เครื่องเชื่อม MIG (Power Source).....	10
2.4.2 เครื่องป้อนลวดและระบบควบคุม (Feed Control and Control System).....	10

สารบัญ

	หน้า
2.4.3 หัวเชื่อมและสายเชื่อม (Welding Torch and Wire Conduit)	13
2.4.4 อุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊ส	18
2.4.5 ลวดเชื่อม (Electrode Wire)	19
2.4.6 แก๊สปกคลุม (Gas Shield)	21
2.5 ปัจจัยในการเชื่อมแบบมิก.....	22
2.5.1 กระแสไฟเชื่อม (Welding Current).....	22
2.5.2 ระยะอาร์ค (Arc Length)	24
2.5.3 มุมในการเชื่อม (Welding Angle)	24
2.6 อลูมิเนียม.....	25
2.6.1 การแบ่งประเภทอลูมิเนียม	26
2.6.2 การเพิ่มความแข็งแรงให้อลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีทางความร้อน.....	27
2.7 เหล็กกล้าไนซ์.....	28
2.8 การเชื่อมระหว่างเหล็กกับอลูมิเนียม.....	31
2.9 การทดสอบแรงดึง.....	31
2.9.1 เครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น SHIMADZU Autograph AG-X-100KN.....	32
2.9.2 Color TFT Touch Panel Screen.....	32
2.9.3 ความเค้น (Stress).....	32
2.9.4 ความเครียด (Strain).....	32
2.9.5 การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติก.....	33
2.10 ลักษณะการแตกหักในการทดสอบการดึง	33
2.10.1 การแตกหักแบบเปราะ (Brittle Fracture).....	33
2.10.2 การเสียหายแบบเหนียว (Ductile Failure).....	33

สารบัญ

	หน้า
2.11 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	34
2.11.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	35
2.11.2 คำศัพท์พื้นฐานเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง.....	36
2.11.3 รูปแบบของการออกแบบการทดลอง.....	37
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.2 การออกแบบการทดลองเบื้องต้น.....	45
3.3 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย.....	49
3.3.1 การออกแบบการทดลองสำหรับการปีนเขาด้วยเส้นทางชันที่สุด (Steepest Ascent)....	49
3.3.2 การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design.....	50
3.4 การทดลองบนค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อยืนยันผล.....	51
3.5 กระบวนการและขั้นตอนการเชื่อมแบบมิก.....	51
3.5.1 การเตรียมชิ้นงาน.....	51
3.5.2 การเชื่อมแบบมิกเพื่อรับการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน.....	52
3.6 กระบวนการทดสอบคุณสมบัติทางกลโดยการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน.....	51
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	
4.1 ผลของการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น.....	54
4.2 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น... ..	56
4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของการทดลองในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น.....	61

สารบัญ

	หน้า
4.4 การทดลองในขั้นตอน Steepest Ascent.....	63
4.5 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบการรับแรงดึงเดือนในขั้นตอน Steepest Ascent...	66
4.6 การทดสอบการรับแรงดึงเดือนในขั้นตอน Central Composite Design.....	66
4.7 ผลของการทดสอบการรับแรงดึงเดือนในขั้นตอน Central Composite Design.....	69
4.8 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบการรับแรงดึงเดือนในขั้นตอน Central Composite Design.....	70
4.9 การตรวจสอบความถูกต้องของการทดลองในขั้นตอน Central Composite Design	74
4.10 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อม.....	75
4.11 สร้างพื้นผิวผลตอบแทน	76
4.12 การทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง	80
4.13 การอภิปรายผลการวิจัย	81
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 การสรุปผล.....	82
5.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดลอง Factorial Design เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อม.....	82
5.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดลอง Steepest Ascent.....	82
5.1.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดลอง Central Composite Design เพื่อหา ระดับของปัจจัยที่ส่งผลให้รอยเชื่อมมีค่าแรงดึงเดือนสูงที่สุด	83
5.2 ข้อเสนอแนะ	83
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก ก. แบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)	88
ภาคผนวก ข. กราฟแสดงผลสำหรับการทดสอบการรับแรงดึงเดือน	92
ภาคผนวก ค. ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อม.....	101

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการวิจัย	4
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมอลูมิเนียม ER4043	21
ตารางที่ 2.2 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมแบบ GMAW	23
ตารางที่ 2.3 การแบ่งกลุ่มของอลูมิเนียมตามมาตรฐาน Aluminum Association.....	26
ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงสัญลักษณ์ที่กำหนดกรรมวิธีทางความร้อนของอลูมิเนียม	28
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียมอัลลอย AA6061	28
ตารางที่ 2.6 ส่วนประกอบทางเคมีของอลูมิเนียมอัลลอย AA6061	28
ตารางที่ 2.7 ส่วนผสมของสังกะสีและเหล็ก	30
ตารางที่ 2.8 สารเคมีสังกะสีที่ใช้ในการทำเหล็กกล้าปาวาไนซ์.....	31
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของอลูมิเนียมอัลลอย AA6061	41
ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าปาวาไนซ์	42
ตารางที่ 3.3 ค่าปัจจัยที่ถูกกำหนดให้คงที่	46
ตารางที่ 3.4 ค่าระดับปัจจัยที่ศึกษาในการเชื่อมแบบมิกในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น	46
ตารางที่ 3.5 ตารางการทดลอง Factorial Design เพื่อรับการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน.....	48
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น.....	55
ตารางที่ 4.2 ตารางการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทาง (ANOVA) ในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น	56
ตารางที่ 4.3 ตารางการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทาง (ANOVA) หลังกำจัดจุดศูนย์กลางใน ขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น	58
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองจากสมการ Regression ที่วิเคราะห์ ได้หลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point).....	59
ตารางที่ 4.5 การทดลองในขั้นตอน Steepest Ascent.....	65
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมในขั้นตอน Steepest Ascent	65
ตารางที่ 4.7 ค่าระดับปัจจัยที่ศึกษาในขั้นตอน Central Composite Design	67
ตารางที่ 4.8 ค่าระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองในขั้นตอน Central Composite Design.....	67
ตารางที่ 4.9 ลำดับการทดลองในขั้นตอน Central Composite Design เพื่อรับการทดสอบการรับแรง ดึงเฉือน	68

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมในขั้นตอน Central Composite Design.....	69
ตารางที่ 4.11 ตารางการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทาง (ANOVA) ในขั้นตอน Central Composite Design.....	70
ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงผลค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองจากสมการ Regression จากการทำทดลองแบบ Central Composite Design	71
ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผล.....	79



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของกระบวนการเชื่อมมิก	6
รูปที่ 2.2 การอาร์คของการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม	7
รูปที่ 2.3 การถ่ายเทโลหะแบบต่างๆของกระบวนการเชื่อมมิก	9
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างชุดควบคุมป้องกันลวดงานเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม	11
รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบชุดใส่มีนลวดเชื่อมงานเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม	12
รูปที่ 2.6 ล้อป้องกันและล้อตัดลวดเชื่อมชนิด 2 ล้อ	13
รูปที่ 2.7 ล้อป้องกันและล้อตัดลวดเชื่อมชนิด 4 ล้อ	13
รูปที่ 2.8 หัวเชื่อมแบบคอกทาน	14
รูปที่ 2.9 หัวเชื่อมแบบระบบป้องกันลวดในตัว	14
รูปที่ 2.10 หัวเชื่อมแบบดึงลวด	15
รูปที่ 2.11 ภาพตัดขวางหัวเชื่อมและสายเชื่อมงานเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม	15
รูปที่ 2.12 ขนาดหัวฉีดแก๊สงานเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมแบบต่างๆ	16
รูปที่ 2.13 หน้าตัดท่อนำกระแสและหัวฉีดแก๊สของหัวเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม	17
รูปที่ 2.14 ท่อนำลวดงานเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม	17
รูปที่ 2.15 ชนิดวัสดุทำท่อนำลวดงานเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม	18
รูปที่ 2.16 ชุดควบคุมการไหลของแก๊สปกคลุมใช้สำหรับแก๊สผสม	19
รูปที่ 2.17 ลวดเชื่อมอลูมิเนียม ER4043	20
รูปที่ 2.18 ลักษณะของมุมขวางของงานเชื่อมฉากและเชื่อมร่อง	24
รูปที่ 2.19 มุมตามแนวยาวของงานเชื่อมรอยเชื่อมฉากและเชื่อมร่อง	25
รูปที่ 2.20 ลักษณะผิวเคลือบสังกะสี	29
รูปที่ 2.21 ลักษณะและองค์ประกอบของกระบวนการทดลอง	35
รูปที่ 2.22 การทดลองแบบ CCD (Central Composite Design)	39
รูปที่ 2.23 กราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติ	39
รูปที่ 3.1 ขนาดชิ้นงานของอลูมิเนียม AA6061 และเหล็กกล้าไนซ์	42
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์จับ (Fixture) ที่ใช้สำหรับการทดลอง	43

ญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 3.3 เครื่องเชื่อมมิก FRONIUS รุ่น TransPuls Synergic 2700 ALU edition	43
รูปที่ 3.4 ลวดเชื่อมอลูมิเนียม ER4043 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร.....	44
รูปที่ 3.5 ถังแก๊สอาร์กอน	44
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น SHIMADZU Autograph AG-X-100KN	45
รูปที่ 3.7 บริเวณที่ทำการเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไนซ์และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061	52
รูปที่ 3.8 บริเวณที่ทำการจับยึดด้วยสายดิน	53
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัย	57
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของปัจจัย	57
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัยหลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point).....	59
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของปัจจัยหลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point).....	60
รูปที่ 4.5 Residual Plots ของค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมตามการออกแบบการทดลองเชิง Factorial Design.	62
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมในขั้นตอน Steepest Ascent.....	66
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัยจากการทดลองแบบ Central Composite Design	72
รูปที่ 4.8 Residual Plots ของค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมตามการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite design	74
รูปที่ 4.9 ข้อมูลการวิเคราะห์ผลโดยฟังก์ชัน Response Optimizer	75
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าของปัจจัยที่ทำให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่ามากที่สุด.....	75
รูปที่ 4.11 กราฟโครงร่างระหว่างระยะอาร์คและกระแสไฟเชื่อม	76
รูปที่ 4.12 พื้นผิวตอบสนองค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมระหว่างระยะอาร์คและกระแสไฟเชื่อม	77
รูปที่ 4.13 กราฟโครงร่างระหว่างมุมในการเชื่อมและกระแสไฟเชื่อม.....	78
รูปที่ 4.14 พื้นผิวตอบสนองค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมระหว่างมุมในการเชื่อมและกระแสไฟเชื่อม.....	78
รูปที่ 4.15 กราฟโครงร่างระหว่างมุมในการเชื่อมและระยะอาร์ค	79
รูปที่ 4.16 พื้นผิวตอบสนองค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมระหว่างมุมในการเชื่อมและระยะอาร์ค	79

บทที่ 1

บทนำ

บทนี้เป็นกรกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และขอบเขตการศึกษาของปริญญาโทเรื่อง การศึกษาค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมแบบมีกระหว่างเหล็กกล้าวไนซ์และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา
3. ขอบเขตของการศึกษา
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
5. แผนการดำเนินงาน

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันผู้คนมีความสนใจในเรื่องมลพิษและการรักษาสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น อุตสาหกรรมยานยนต์จึงมีการดำเนินงานวิจัย เพื่อตอบสนองความต้องการโดยการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยการลดน้ำหนักของยานยนต์เพื่อประหยัดพลังงานจากการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่สิ่งแวดล้อมโดยหนึ่งในวิธีที่สามารถลดน้ำหนักของยานยนต์ได้คือการเปลี่ยนมาใช้อลูมิเนียมทดแทนเหล็กในบางส่วนของยานยนต์ เนื่องจากอลูมิเนียมเป็นวัสดุที่แข็งแรง ทนทานและมีน้ำหนักเบา ด้านทานการกัดกร่อนและการเกิดสนิมแต่การเชื่อมต่อวัสดุระหว่างโลหะประเภทไม่ใช่เหล็ก (Nonferrous Metals) กับโลหะที่เป็นเหล็ก (Ferrous Metals) เข้าด้วยกันนั้นค่อนข้างยากเนื่องจากคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของอลูมิเนียมส่งผลให้มีการเกิดออกไซด์บริเวณพื้นผิวได้ง่ายและมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าเหล็กกล้าดังนั้นการนำอลูมิเนียมและเหล็กมาเชื่อมกันด้วยกระบวนการเชื่อมหลอม (Fusion Welding) จึงทำได้ยากและแต่ละขั้นตอนในกระบวนการเชื่อมมีความร้อนสูงส่งผลให้ชิ้นงานนั้นมีความแข็งและเปราะสูง [1], [2]

ในการเชื่อมโลหะผสมระหว่างเหล็กกับอลูมิเนียมนั้นส่งผลให้มีการก่อตัวของสารประกอบระหว่างโลหะ (IMC) ซึ่งทำให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมลดน้อยลงและชิ้นงานเปราะ เพื่อการหลีกเลี่ยงแล้วควรเชื่อมในสถานะของแข็งที่อุณหภูมิต่ำและระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันของเหล็กและอลูมิเนียมที่นำมาเชื่อมนั้น โดยเฉพาะสารประกอบโลหะกับส่วนที่ใช้เชื่อมไม่เหมือนกันส่งผลให้ความแข็งแรงและการเสียรูปต่า นอกจากนี้ กระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งแบบอื่นๆเช่นพันธะแพร่ (Diffusion Bonding), แรงเสียดทานการเชื่อม (Friction Welding), การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Friction Stir Welding) และการเชื่อมแบบระเบิด (Explosive Welding) ก็สามารถเชื่อมอลูมิเนียมกับเหล็กได้เช่นกันแต่กระบวนการเหล่านี้ยากในการเชื่อมชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนและเชื่อมหลายตำแหน่ง [3], [4]

นอกจากนี้การเชื่อมแบบมิก (MIG Welding) นั้นสามารถทำการเชื่อมระหว่างเหล็กและอลูมิเนียมได้เช่นกัน โดยการเปลี่ยนลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อม จากลวดเชื่อมมิกปกติเป็นลวดเชื่อมอลูมิเนียม เช่น AlSi5, AlSi12 เป็นต้น เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า ทำให้สามารถหลอมเข้ากันได้ดี โดยกระบวนการนี้มีข้อดีสำหรับการเชื่อมอาร์คโลหะด้วยแก๊ส (GMAW) และการประสานแบบธรรมดา ในระหว่างการเชื่อมแบบ MIG เพื่อเชื่อมวัสดุที่ต่างกันให้เกิดการหลอมเหลวของวัสดุตัวเติมหลอมละลายต่ำ เช่น อลูมิเนียม ทำให้วัสดุเกิดบ่อหลอมเพื่อสร้างรอยต่อ การทำให้เกิดบ่อหลอมจะถูกควบคุมโดยอุณหภูมิและความหนืดของโลหะเติม ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างบ่อหลอมกับพื้นผิวและแรงตึงผิว ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการเชื่อมประสานแบบมิกนั้น มีความซับซ้อนในการควบคุมตัวแปรในการเชื่อม หลายตัวแปรจึงต้องอาศัยความชำนาญในการควบคุมเครื่องกับคู่มือในการปรับตั้งค่าให้เหมาะสมกับวัสดุที่ต่อกัน [1], [2], [5]

การศึกษานี้วิเคราะห์ผลกระทบของกระแสไฟเชื่อม (Welding Current), ระยะอาร์ค (Arc Length) และมุมในการเชื่อม (Welding angle) ในการเชื่อมแบบมิก (MIG) ของอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 ความหนา 3 มิลลิเมตรและเหล็กกล้าไนซ์ความหนา 2 มิลลิเมตรว่าในกระแสเชื่อม ระยะอาร์คและมุมในการเชื่อมที่แตกต่างกัน มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมและหาจุดเหมาะสมของระดับปัจจัยที่ส่งผลให้รอยเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไนซ์ และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 มีค่าแรงดึงเฉือนที่มากที่สุด โดยวิธีการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมแบบมิกระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 และเหล็กกล้าไนซ์ โดยใช้ลวดเชื่อมอลูมิเนียม ER4043 ต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลและแนวโน้มของปัจจัยกระแสไฟเชื่อม ระยะอาร์ค และมุมในการเชื่อมต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม
3. เพื่อศึกษาค่าระดับของปัจจัยกระแสไฟเชื่อม ระยะอาร์ค มุมในการเชื่อมในการเชื่อมแบบมิก ระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 และเหล็กกล้าไนซ์ โดยใช้ลวดเชื่อมอลูมิเนียม ER4043 ที่ทำให้อรอยเชื่อมมีค่าแรงดึงเฉือนมีค่ามากที่สุด

1.3 ขอบเขตปริญญานิพนธ์

1. โครงการวิจัยนี้จะทำการเชื่อมอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 ขนาดความกว้าง 20 มิลลิเมตร ความยาว 80 มิลลิเมตร และความหนา 3 มิลลิเมตร กับเหล็กกล้าไนซ์ ขนาดความกว้าง 20 มิลลิเมตร ความยาว 80 มิลลิเมตร และความหนา 2 มิลลิเมตร ด้วยการเชื่อมแบบรอยต่อเกย (Lap Joint) ตามมาตรฐาน DINEN10002-1 และตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมด้วยการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน และหาระดับปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่าสูงที่สุด

2. ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบของการเชื่อม คือ กระแสไฟเชื่อม ระยะอาร์คและมุมในการเชื่อม โดยกำหนดค่าระดับของตัวแปรด้วยหลักการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมแบบมิก ระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 และ เหล็กกล้าไนซ์ ที่มีค่ามากที่สุด
2. ได้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบมิก ระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 และ เหล็กกล้าไนซ์
3. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาไปพัฒนาหรือเพิ่มประสิทธิภาพงานในอุตสาหกรรมยานยนต์ได้

1.5 แผนการดำเนินงาน

โครงการวิจัยนี้ได้กำหนดระยะเวลาในการดำเนินงาน เริ่มตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2564 และสิ้นสุดในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2565 โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงานดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2564				พ.ศ. 2565					
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาและกำหนดหัวข้อของงานวิจัย ระบุที่มาและความสำคัญของปัญหา กำหนดวัตถุประสงค์, ขอบเขตและ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ										
2. ศึกษาค้นหาทฤษฎีและงานวิจัยที่ เกี่ยวข้อง										
3. ออกแบบการทดลอง จัดซื้อวัสดุและ จัดเตรียมชิ้นงานสำหรับทดลอง										
4. ออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจับ และ Fixture ที่ใช้สำหรับยึดตัวชิ้นงาน										
5. ทดลองทำการเชื่อมชิ้นงานตามการ ออกแบบการทดลองที่กำหนดไว้										
6. ตรวจสอบคุณสมบัติทางกล ด้วยการ ทดสอบการรับแรงดึงเฉือนและทำการ วิเคราะห์ผล										
7. สรุปผลการวิเคราะห์ ผลกระทบของ ตัวแปรการเชื่อม และค่าระดับของตัว แปรที่เหมาะสม										
8. รวบรวมข้อมูลและผลการศึกษา จัดทำเล่มรายงานการวิจัย										

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและเอกสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมแบบมีกระหว่างเหล็กกล้าไนซ์และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

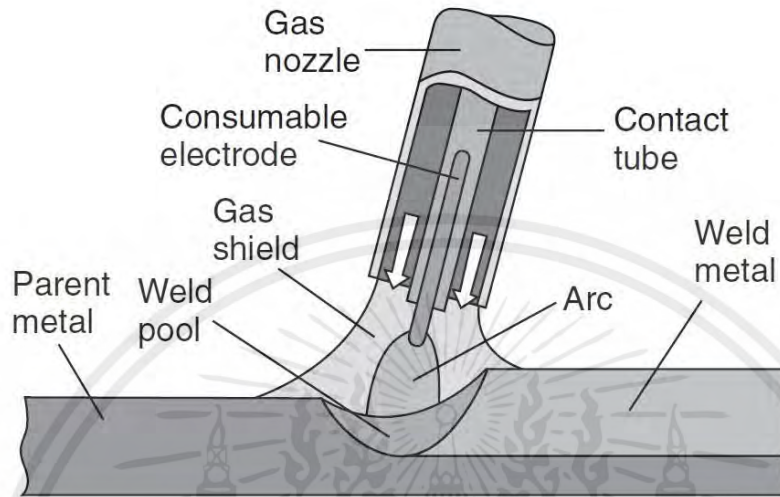
1. การเชื่อมแบบมิก
2. หลักในการอาร์ค
3. การถ่ายเทโลหะ
4. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมแบบมิก
5. ปัจจัยในการเชื่อมแบบมิก
6. อลูมิเนียม
7. เหล็กกล้าไนซ์
8. การเชื่อมระหว่างเหล็กกับอลูมิเนียม
9. การทดสอบแรงดึง
10. ลักษณะการแตกหักในการทดสอบการดึง
11. การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

2.1 การเชื่อมแบบมิก

การเชื่อมแบบมิกหรือที่รู้จักกันในชื่อการเชื่อม MIG (Metal Inert Gas Welding) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้รับความร้อนจากการอาร์คระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ลวดเชื่อมที่ใช้จะเป็นลวดเชื่อมเปลือยที่ส่งป้อนอย่างต่อเนื่อง ไปยังบริเวณอาร์คและทำหน้าที่เป็นโลหะเติมลงยังบ่อหลอมละลาย ซึ่งบริเวณบ่อหลอมละลายนั้นจะถูกปกคลุมไปด้วยแก๊สเฉื่อย เพื่อไม่ให้เกิดการรวมตัวกับอากาศ ซึ่งมีข้อดีในเรื่องของความเร็วในการเชื่อมสูง บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนน้อยกว่าการเชื่อมแบบ TIG (Tungsten Inert Gas Welding) และขจัดฟิล์มออกไซด์ได้ดีมาก ดังนั้นการเชื่อมแบบมิกจึงเป็นกระบวนการเชื่อมอาร์คแบบแมนนวลที่ใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการเชื่อมอลูมิเนียม [6], [7]

กระบวนการเชื่อม MIG แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ตามหลักในกระบวนการเชื่อมแล้วจะใช้กระแสตรงกับขั้วไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับขั้วบวกของแหล่งพลังงาน ขั้วบวก DC หรือขั้วย้อนกลับ ส่งผลให้สามารถขจัดฟิล์มออกไซด์ได้ดีมาก ปัจจุบันทำให้กระบวนการ MIG สามารถใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับได้เช่นกัน ความร้อนส่วนใหญ่ในส่วนโค้งจะเกิดขึ้นที่ขั้วบวก ในกรณีของการเชื่อม MIG กับอเล็กโทรด์ ส่งผลให้มีอัตราการเผาทำลายลวดที่สูงและการถ่ายเทความร้อนนี้ไปยังบ่อหลอมละลายอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ลวดเติม เมื่อทำการเชื่อมที่กระแสเชื่อมต่ำ

ปลายของลวดที่บ่อนอย่างต่อเนื่องอาจไม่สามารถละลายได้เร็วเพียงพอ เพื่อรักษาส่วนโค้ง แต่อาจทำให้หัวนำลวดจุ่มลงในบ่อหลอมละลายและทำให้เกิดการถ่ายเทน้ำโลหะลัดวงจร [6]



รูปที่ 2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของกระบวนการเชื่อมมิก

2.2 หลักในการอาร์ค

ในกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม ความร้อนที่หลอมลวดเชื่อมและโลหะชิ้นงาน ได้จากการอาร์คระหว่างปลายลวดเชื่อมเปลือย (Consumable Electrode) กับชิ้นงาน การอาร์คจะเกิดขึ้นได้ เมื่อกระแสเชื่อมที่ไหลผ่านกลุ่มอะตอมของแก๊สที่มีประจุไฟฟ้า (Ionized Gas) โมเลกุลและอะตอมของแก๊สจะแตกตัวออก ทำให้มีสภาพไม่เป็นกลาง (Ionized) เพราะสูญเสียอิเล็กตรอนไปจากประจุไฟฟ้าบวก (Positive Charge) ไอออนแก๊สที่เป็นบวกจะไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ส่วนอิเล็กตรอนจะไหลจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ปริมาณความร้อนประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ จะถูกส่งผ่านโดยอิเล็กตรอนและคงจะเป็นการส่งผ่านของไอออนบวก (Positive Ion) ความร้อนจากการอาร์คจะหลอมลวดเชื่อมและโลหะชิ้นงาน ปลายลวดเชื่อมส่วนที่หลอมจะถูกถ่ายโอน (Transfer) ผ่านการอาร์คเข้าสู่บ่อหลอมเหลว บริเวณกระทันร้อนและลวดเชื่อมจะถูกปกคลุมให้พ้นจากบรรยากาศรอบนอก โดยแก๊สที่ไหลพุ่งออกจากหัวฉีด ปริมาณความร้อนที่ได้รับจากการอาร์คของกระบวนการเชื่อมนี้จะสูงกว่าการเชื่อมอาร์คแบบอื่นๆ ดังในรูปที่ 2.2 [8]

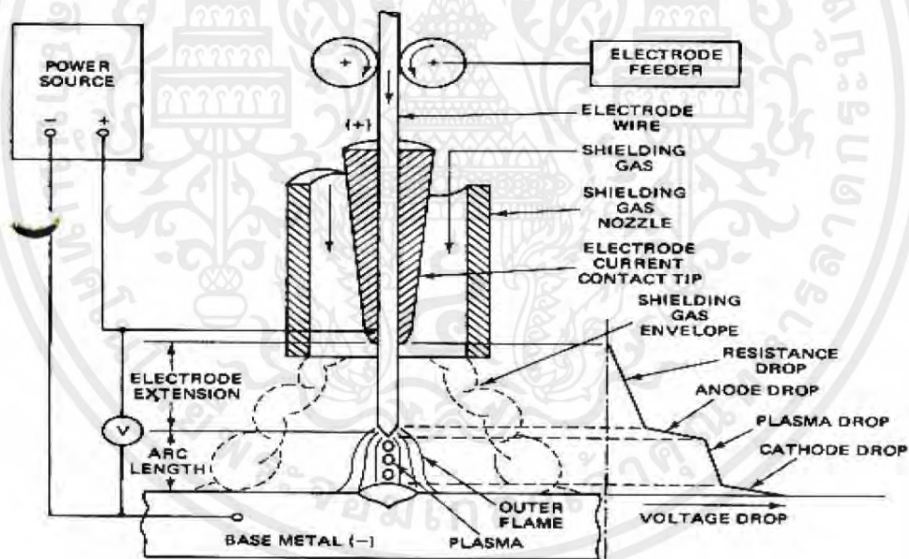
ข้อดีของการเชื่อมแบบมิก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมอื่นๆ มีดังนี้ [9]

1. สามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม
2. แนวเชื่อมไม่มีสแลกปกคลุมจึงไม่เสียเวลาในการเคาะสแลกออก
3. ไม่มีเขม่าและควันขณะเชื่อม
4. สามารถมองเห็นบ่อหลอมละลายของการเชื่อมได้อย่างชัดเจน

5. การเชื่อมกระทำได้เร็ว จึงประหยัดเวลาและลดต้นทุนการผลิต
6. งานเชื่อมมีการเสียรูปน้อย
7. คุณภาพของแนวเชื่อมสูง
8. สามารถเชื่อมงานที่มีระยะห่างรอยต่อกว้าง (Gap) ได้อย่างต่อเนื่อง
9. ลวดเชื่อมเป็นม้วนยาวสามารถเชื่อมได้แนวเชื่อมยาวและไม่มีเศษปลายลวดเชื่อมที่ต้องทิ้งมากเหมือนกับการเชื่อมด้วยลวดไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์

ข้อเสียของการเชื่อมแบบมิก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมอื่นๆ มีดังนี้ [10]

1. อุปกรณ์ซับซ้อนและไม่สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย
2. ไม่สามารถเชื่อมในบริเวณจำกัดได้
3. ถ้าเชื่อมเหล็กที่สามารถชุบแข็งได้ (Harden Ability) อาจทำให้แนวเชื่อมแตก เนื่องจากไม่มีสแลกคลุมแนวเชื่อมเพื่อช่วยลดอัตราการเย็นตัว จึงทำให้แนวเชื่อมเย็นตัวเร็วและมีความแข็ง
4. ไม่เหมาะกับการงานสนามหรือภายนอกอาคารเนื่องจากลมอาจพัดเอาแก๊สปกคลุมหนีจากบริเวณอาร์ค (ถ้าจะเชื่อมในสนามหรือภายนอกอาคาร ควรทำที่กำบังลมให้ดี)



รูปที่ 2.2 การอาร์คของการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม

2.3 การถ่ายเทโลหะ

ลักษณะการถ่ายเทน้ำโลหะในกระบวนการเชื่อมแบบมิก มีอยู่ 4 แบบ ดังนี้

2.3.1 การถ่ายเทแบบลัดวงจร (Short Circuit Transfer)

การสัมผัสของปลายลวดเชื่อมกับบ่อหลอมละลายอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ ซึ่งอาจสูงถึง 20-200 ครั้งต่อวินาที โดยลักษณะการถ่ายเทน้ำโลหะแบบลัดวงจรจะใช้กระแสเชื่อมและแรงดันอาร์คที่ต่ำ ซึ่งจะทำให้อัตราการเติมเนื้อเชื่อมต่ำไปด้วย ส่งผลให้มีความเร็วในการเชื่อมไม่สูง บ่อหลอมละลายจะแข็งตัวได้เร็ว จึงเหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะแผ่นบาง (ความหนาจะต่ำกว่า 3 มม.) โดยปกติการเชื่อม MIG โดยใช้การถ่ายเทแบบลัดวงจร จะมีเม็ดโลหะกระเด็น (Spatter) เกิดขึ้นในจังหวะที่หยุดลวดขาดออกจากลวดเชื่อม การลดปริมาณ Spatter สามารถทำได้โดยการปรับค่า Inductance ของแหล่งพลังงาน หรือการเลือกใช้ก๊าซปกคลุมแนวเชื่อมที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม การเชื่อมโดยใช้การถ่ายเทแบบลัดวงจร สามารถใช้เชื่อมกับงานที่มีความหนาได้เช่นกัน แต่ด้วยการใช้กระแสเชื่อมและแรงดันอาร์คที่ต่ำ จึงอาจก่อให้เกิดการหลอมลึกลงที่ไม่สมบูรณ์ได้ แต่ในทางกลับกัน ปริมาณความร้อนที่ต่ำเช่นนี้ ก็ช่วยให้งานเชื่อมลดการเสียรูปจากความร้อนได้ดี ในมุมมองเชิงเทคนิค การเชื่อมโดยใช้การถ่ายเทแบบลัดวงจร เป็นการเชื่อมที่สามารถจัดการได้ง่าย และด้วยเหตุที่แนวเชื่อมมีการเย็นตัวเร็ว ดังนั้นในการเชื่อมที่มีลักษณะการเชื่อมขึ้น จึงอาจจะต้องมีการส่ายแนวเชื่อม และรักษาระยะห่างของปลายหัวนำลวด (Contact Tip) กับชิ้นงานที่เหมาะสม [10]

2.3.2 การถ่ายเทแบบก้อนกลม (Globular Transfer)

การถ่ายเทน้ำโลหะที่เกิดขึ้นในช่วงพารามิเตอร์ของการถ่ายเทแบบลัดวงจรและการถ่ายเทแบบละอองฝอย เกิดจากการที่ปลายลวดเชื่อมถูกหลอมละลายกลายเป็นหยดน้ำโลหะขนาดใหญ่ หล่นผ่านอาร์คลงไปในบ่อหลอมละลายในขณะที่ทำการเชื่อม โดยทั่วไปหยดน้ำโลหะนี้จะเป็นรูปร่างที่ไม่แน่นอนและมีขนาดใหญ่กว่าลวดเชื่อม การถ่ายเทน้ำโลหะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันอาร์ค อัตราการป้อนลวดและกระแสเชื่อมที่สูงกว่าระดับที่ปรับใช้ในการถ่ายเทแบบลัดวงจร ทำให้ได้การเชื่อมที่มีความเร็วสูง ได้อัตราการผลิตสูง แต่การถ่ายเทแบบนี้จะให้แนวเชื่อมที่มี Spatter มาก ทำให้ยุ่งยากในการจัดการหลังจากการเชื่อม ในเชิงเทคนิคการเชื่อมโดยใช้การถ่ายเทน้ำโลหะแบบก้อนกลม จะใช้กระแสและแรงดันเชื่อมที่สูง จึงทำให้ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูง ดังนั้นจึงต้องปรับระยะห่างของปลายหัวนำลวดกับชิ้นงานระหว่าง $\frac{3}{4}$ ถึง 1 นิ้ว หากใช้ระยะห่างของปลายหัวนำลวดกับชิ้นงานที่ต่ำเกินไป น้ำโลหะขนาดใหญ่จะมีโอกาสสัมผัสกับบ่อหลอมละลาย เกิดความร้อนสูงจนทำให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัว กระเด็นออกเป็น Spatter ที่ไม่ต้องการได้ จึงต้องมั่นใจว่ารักษาระยะห่างของปลายหัวนำลวดกับชิ้นงานที่เพียงพอที่จะให้หยดน้ำโลหะ หยดและร่วงหล่นผ่านอาร์คอย่างอิสระ [10]

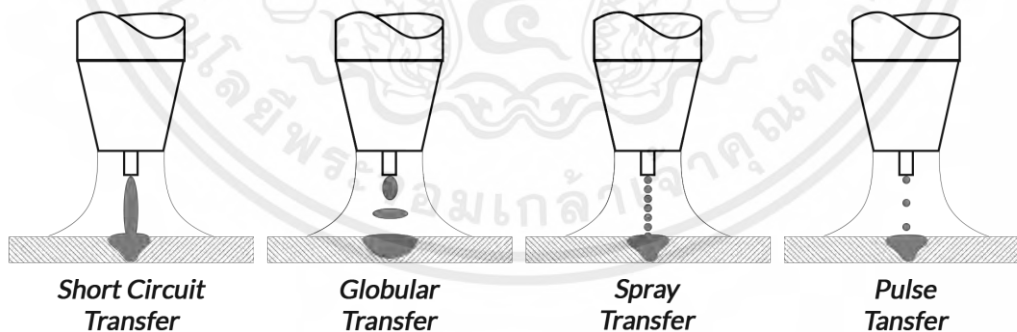
2.3.3 การถ่ายเทแบบละอองฝอย (Spray Transfer)

การถ่ายเทน้ำโลหะที่ใช้ช่วงกระแสและแรงดันอาร์คที่สูง ลวดเชื่อมจะถูกหลอมละลายด้วยกระแสเชื่อมที่สูงและถูกผลักดันด้วยแรงดันอาร์คเป็นละอองฝอยขนาดเล็กกว่าลวดเชื่อม พุ่งลงสู่บ่อหลอมละลายด้วยความเร็วสูงอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการเติมเนื้อเชื่อมที่สูงมาก สามารถเดินแนวเชื่อมได้เร็ว เพิ่มอัตราการผลิตได้มากกว่าการถ่ายเทน้ำโลหะแบบลัดวงจรและแบบก้อนกลม เมื่อพิจารณาในเชิงคุณภาพ การถ่ายเทแบบละอองฝอยนี้ ให้แนว

เชื่อมที่มีการหลอมสมบูรณ์ ให้การหลอมลึกดี และเนื่องจากไม่มีโอกาสที่จะเกิดการลัดวงจรระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน จึงทำให้การถ่ายเทแบบนี้เกิด Spatter น้อย อีกทั้งยังให้รูปลักษณะของแนวเชื่อมที่ดีด้วย [10]

2.3.4 การถ่ายเทแบบละอองฝอยลักษณะพัลส์ (Pulse Spray Transfer)

การถ่ายเทน้ำโลหะเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่องเหมือนกับการถ่ายเทแบบละอองฝอยแบบปกติ การถ่ายเทแบบพัลส์นี้ จำเป็นต้องใช้เครื่องเชื่อมที่รองรับการจ่ายกระแสเชื่อมแบบพัลส์ โดยที่การถ่ายเทแบบละอองฝอยลักษณะพัลส์นี้ แหล่งพลังงานจะจ่ายกระแสเชื่อมเป็นสองระดับ สลับกันไปมาระหว่างกระแสเชื่อมสูง (Peak Current) และกระแสเชื่อมต่ำ (Base Current) ด้วยความเร็วตั้งแต่ 30-400 ครั้งต่อวินาที กระแสเชื่อมสูงจะให้พลังงานมากพอที่จะทำให้ลวดเชื่อมเกิดการหลอมละลายและถ่ายโอนน้ำโลหะในลักษณะละอองฝอย (Spray Transfer) ผ่านการอาร์คลงไปบนแนวเชื่อม ในขณะที่กระแสเชื่อมต่ำ ทำหน้าที่รักษากระบวนการอาร์คให้เสถียร โดยไม่เกิดการหลอมละลายของลวดเชื่อม ช่วงระยะเวลาสั้นๆ จะทำให้แนวเชื่อมเย็นตัวลง ป้องกันไม่ให้เกิด Heat Input ที่มากเกินไป จึงทำให้การเชื่อมแบบ MIG Pulse Spray ช่วยแก้ปัญหาเรื่องการควบคุมความร้อน ป้องกันไม่ให้ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อมมากเกินไป ป้องกันการหลอมทะลุ จึงเหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น อลูมิเนียมหรือการเชื่อมงานโลหะบาง ในมุมมองเชิงการผลิต การเชื่อมด้วยการถ่ายเทน้ำโลหะแบบละอองฝอยลักษณะพัลส์นี้ ให้ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงมาก ในขณะที่มีจำนวน Spatter น้อยมาก เมื่อเทียบกับการถ่ายเทแบบอื่นๆ นอกจากนี้การถ่ายเทน้ำโลหะแบบละอองฝอยลักษณะพัลส์นี้ให้อัตราการเติมเนื้อเชื่อมที่สูงมาก โดยเฉพาะถ้าใช้ร่วมกับลวดเชื่อมแบบไส้โลหะ (Metal Cored Wires) จะทำให้เพิ่มอัตราการผลิตได้มากขึ้น สำหรับแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมที่เหมาะสมกับการถ่ายเทน้ำโลหะลักษณะนี้ สามารถใช้แก๊สแบบเดียวกันกับการถ่ายเทแบบละอองฝอยตามปกติ [10]



รูปที่ 2.3 การถ่ายเทโลหะแบบต่างๆของกระบวนการเชื่อมมิก

2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมแบบมิก

กรรมวิธีการของเชื่อม GMAW ลวดเชื่อมจะถูกหลอมเหลวและเติมเนื้อโลหะเชื่อม สร้างเป็นแนวเชื่อมเหมือนกับการเชื่อมด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ทั่วไป เพียงแต่การเชื่อม GMAW จะใช้แก๊สปกคลุมการอาร์คแทนการใช้ฟลักซ์และไม่มีสแลก เมื่อลวดเชื่อมถูกป้อนผ่านหัวเชื่อมออกมาอย่างต่อเนื่องผ่านท่อนำลวดและท่อนำกระแส ลวด

เชื่อมจะสัมผัสกับผิวที่อ่อนกว่ากระแสน้ำไหลเข้าสู่ลวด เมื่อปลายลวดแตะกับผิวโลหะชิ้นงานจะเกิดการอาร์คขึ้น ความร้อนจากการอาร์คจะหลอมผิวโลหะชิ้นงานและปลายลวดเชื่อมให้เป็นหยดโลหะถ่ายโอนสู่บ่อหลอมเหลวของรอยเชื่อม ขณะเดียวกันแก๊สจากท่อบรรจุจะไหลเข้าสู่หัวฉีดพุ่งออกมาคลุมบ่อหลอมเหลวและบริเวณรอบเปลวอาร์ค เพื่อเป็นม่านป้องกันไม่ให้ออกซิเจนหรือแก๊สอื่นในบรรยากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับเปลวอาร์คและโลหะที่กำลังหลอมเหลว [11]

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อม MIG ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

1. เครื่องเชื่อม MIG (Power Source)
2. เครื่องป้อนลวดและระบบควบคุม (Feed Control and Control System)
3. หัวเชื่อมและสายเชื่อม (Welding Torch and Wire Conduit)
4. อุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊ส
5. ลวดเชื่อม (Electrode Wire)
6. แก๊สปกคลุม (Gas Shield)

2.4.1 เครื่องเชื่อม MIG (Power Source)

เป็นเครื่องต้นกำลังในการจ่ายกระแสไฟเชื่อม ควบคุมการป้อนลวดและระบบควบคุมการจ่ายแก๊สคลุม เป็นเครื่องเชื่อมชนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ (CV) ซึ่งแรงเคลื่อนทางออกจะคงที่ตลอดเวลา ไม่ว่ากระแสไฟเชื่อมจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร เครื่องเชื่อมชนิดนี้จะเพิ่มหรือลดกระแสไฟของการเชื่อม โดยสามารถปรับปริมาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ที่ตัวปรับเครื่องเชื่อม โดยปกติเครื่องเชื่อมชนิดกระแสตรงขั้วกลับ (DCEP: Direct Current Electrode Positive) มีทั้งแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเรียงกระแสและแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ขนาด 150-1,000 แอมแปร์ โดยมีรอบทำงานหรือประสิทธิภาพการทำงาน (Duty Cycle) ที่ 60-100% [8]

เครื่องเชื่อมที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุมได้เหมาะสมที่สุด จะเป็นเครื่องเชื่อมที่ให้ Output เป็นกระแสตรงมีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าคงที่ (Constant Voltage) ซึ่งแตกต่างจากเครื่องเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมแบบ TIG และการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ในขณะที่ปฏิบัติการเชื่อม ถ้าระยะอาร์ค (Arc Length) คงที่ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าขณะเชื่อมก็จะคงที่ด้วย กระบวนการเชื่อมแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม จะใช้วงจรการเชื่อมหรือกระแสไฟเชื่อมเป็นชนิด DCEP เป็นส่วนมาก [12]

2.4.2 เครื่องป้อนลวดและระบบควบคุม (Feed Control and Control System)

เครื่องป้อนลวดรวมอยู่ในชุดควบคุม ซึ่งต่อกับโดยตรงเครื่องเชื่อม เครื่องป้อนลวดเชื่อมมีอยู่ 2 ชนิด จึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับเครื่องเชื่อม และการนำไปใช้งานสำหรับการเชื่อมแบบ MIG นั้นใช้เครื่องป้อนลวดชนิดความเร็วคงที่ (Constant Speed) ซึ่งเหมาะสมกับเครื่องเชื่อมแบบแรงเคลื่อนคงที่และลวดเชื่อมที่มีขนาดเล็กด้วย เครื่องป้อนลวดชนิดนี้จะมีที่ปรับความเร็วของลวด ซึ่งสามารถเลือกปรับได้ตามขนาดความเหมาะสมกับงานเชื่อม

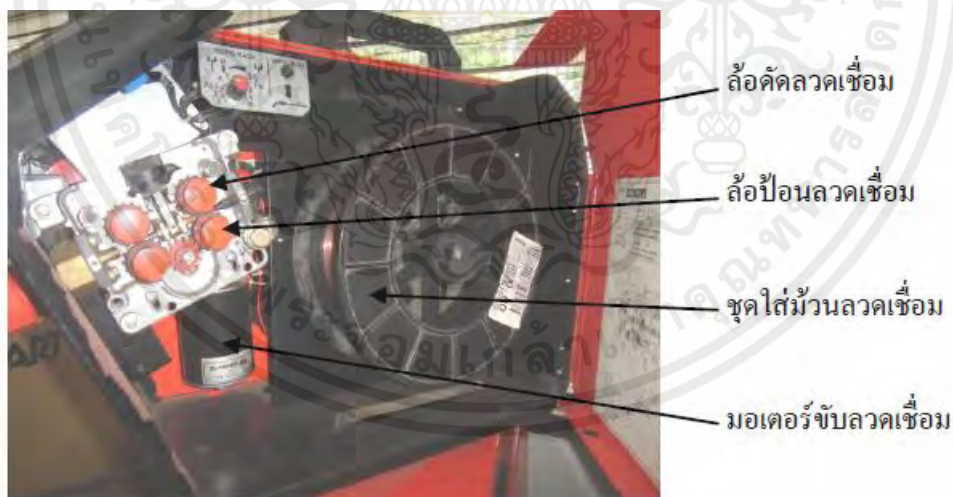
ชุดเครื่องป้อนลวดประกอบด้วยมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนลวดจากขดลวดให้ออกสู่บริเวณบ่อหลอมละลายที่ปลายหัวเชื่อม ซึ่งกลไกการขับเคลื่อนอาจเป็นระบบเฟืองก็ได้ ซึ่งสามารถเปลี่ยนใช้กับลวดแต่ละขนาดได้ในชุดควบคุมนี้จะมี Solenoids ควบคุมการไหลของแก๊สปกคลุมการอาร์คและน้ำระบายความร้อนที่หัวเชื่อมรวมอยู่ด้วย [13]

ส่วนประกอบของชุดควบคุมป้อนลวด (Wire Feeder) ทำหน้าที่ส่งลวดเชื่อมไปยังส่วนหัวเชื่อม มีส่วนประกอบดังนี้

1. มอเตอร์ขับเคลื่อนลวดเชื่อม
2. ชุดใส่ลวดลวดเชื่อม
3. ล้อตัดลวดเชื่อม
4. ล้อป้อนลวดเชื่อม

1. มอเตอร์ขับเคลื่อนลวดเชื่อม

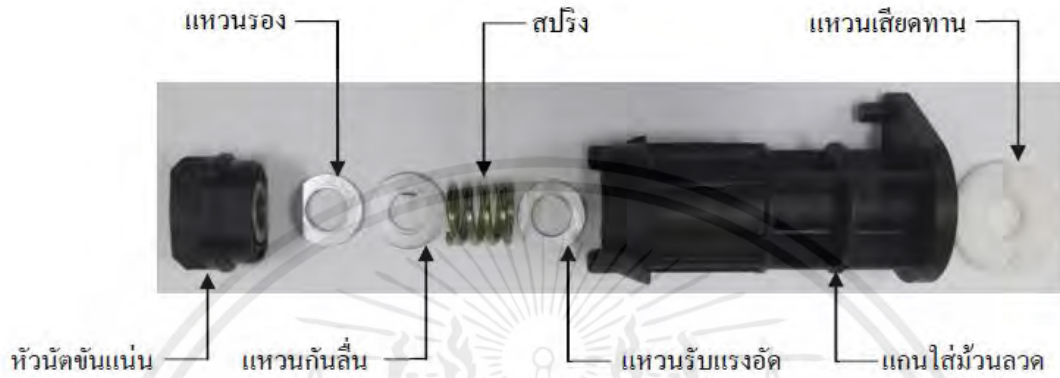
อุปกรณ์มอเตอร์ขับเคลื่อนลวดเชื่อมทำหน้าที่ป้อนลวดเชื่อมเป็นไปตามกำหนด โดยทำการควบคุมมอเตอร์ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ อัตราความเร็วของลวดเชื่อมขึ้นอยู่กับชนิดการส่งถ่านน้ำโลหะ ดังนั้นต้องมีอัตราคงที่แม้จะมีแรงดันกระเพื่อมก็ตาม โดยชุดของมอเตอร์มีระบบเบรกไม่ให้ลวดเชื่อมไหล ออกมาช่วงเวลาสิ้นสุดการเชื่อมและชุดควบคุมป้อนลวดเชื่อมนี้มีวงจรลอมย้อน (Burn-Back) มีไว้เพื่อทำให้การเริ่มต้นเชื่อมและหยุดเชื่อมได้อย่างราบเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างชุดควบคุมป้อนลวดงานเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม

2. ชุดใส่ม้วนลวดเชื่อม

อุปกรณ์ชุดใส่ม้วนลวดเชื่อม ทำหน้าที่วางใส่ม้วนลวดเชื่อม โดยขณะที่ทำการเชื่อมลวดเชื่อมที่ป้อนเข้าสู่ท่อนำลวดจะมีแรงเฉื่อยจึงต้องมีระบบเบรก ซึ่งระบบเบรกทำมาจากพลาสติกประกบกับแกนของม้วนลวดเชื่อม โดยอาศัยแรงกดของสปริง ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบชุดใส่ม้วนลวดเชื่อมงานเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม

3. ล้อตัดลวดเชื่อม

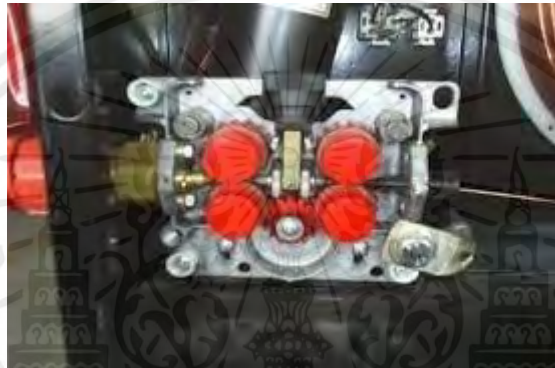
อุปกรณ์ชุดล้อตัดลวดเชื่อม ทำหน้าที่กัดหรือรองรับลวดเชื่อม โดยมีร่องเป็นคลื่นเพื่อใช้ความถี่ในการผลักดันลวดเชื่อมไปสู่หัวเชื่อมได้สะดวก ล้อตัดลวดมีหลายแบบขึ้นอยู่กับชนิดของลวดเชื่อมที่นำมาใช้เป็นวัสดุชนิดใด เช่น ล้อร่องวี (V) ใช้กับลวดโลหะ ล้อร่องครึ่งวงกลมใช้กับลวดอโลหะ แต่ขึ้นอยู่กับขนาดความโตของลวดเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.4

4. ล้อป้อนลวดเชื่อม

อุปกรณ์ชุดล้อป้อนลวดเชื่อม ทำหน้าที่ขับเคลื่อนลวดเชื่อมออกจากม้วนลวดแล้วผลักดัน ผ่านท่อ นำลวดเข้าสู่หัวเชื่อม ล้อป้อนลวดเชื่อมจะติดอยู่กับมอเตอร์เพื่อหมุนล้อขับเคลื่อน ซึ่งล้อป้อนลวดเชื่อมนี้จะเปลี่ยนตามขนาดความโตของลวดและชนิดของวัสดุลวดเชื่อม โดยปกติล้อป้อนลวดเชื่อมจะเรียงกันเป็นคู่ ในชุดควบคุมป้อนลวด (Wire feeder) มีชนิด 2 ล้อ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และมีชนิด 4 ล้อ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ขึ้นอยู่กับแต่ละรุ่นของเครื่องที่ได้ออกแบบการใช้งาน



รูปที่ 2.6 ล้อป้อนลวดและล้อตัดลวดเชื่อมชนิด 2 ล้อ



รูปที่ 2.7 ล้อป้อนลวดและล้อตัดลวดเชื่อมชนิด 4 ล้อ

2.4.3 หัวเชื่อมและสายเชื่อม (Welding Torch and Wire Conduit)

หัวเชื่อม MIG แตกต่างจากหัวเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ เนื่องจากหัวเชื่อม MIG ต้องจ่ายแก๊สปกคลุม (Shielding Gas) ไปสู่บริเวณที่ทำการเชื่อม และยังทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าไปยังลวดเชื่อม หัวเชื่อมจะประกอบติดอยู่กับสายเชื่อม ซึ่งสายเชื่อมนั้นจะเป็นทางผ่านแก๊สปกคลุม ลวดเชื่อมและกระแสไฟโดยภายในของสายเชื่อมที่ลวดผ่านจะทำด้วยเหล็กสปริงที่ม้วนขดเป็นท่อและภายนอกจะหุ้มไว้ด้วยท่อพลาสติกลักษณะของหัวเชื่อมมีทั้งชนิดตัวตรงและหัวโค้ง การเลือกใช้หัวเชื่อม หัวเชื่อมที่ใช้กันอยู่มีแบบระบายความร้อนด้วยน้ำกับแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งในการเชื่อมใช้หัวเชื่อมทั้งสองแบบนี้ต้องคำนึงถึงชนิดของแก๊สปกคลุม กระแสเชื่อมแรงเคลื่อนและลักษณะของรอยต่อ หัวเชื่อมและสายเชื่อมที่ใช้ในงานเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมแบบกึ่งอัตโนมัติสามารถแบ่งได้ 3 ชนิดดังนี้ [12], [13]

1. หัวเชื่อมแบบคอห่าน (Goose Neck Type)

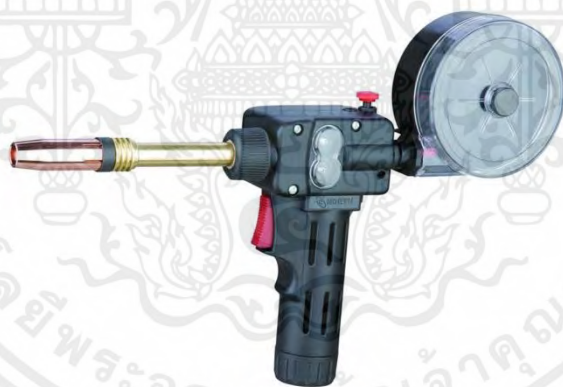
เป็นหัวเชื่อมชนิดที่นิยมใช้กับแปรงหลายสามารถเชื่อมได้สะดวกกับทุกรอยต่อ เพราะขณะปฏิบัติงานเชื่อมเข้าตามส่วนโค้งหรือมุมแคบได้เป็นอย่างดี โดยปกติชุดสายเชื่อมมีความยาว 3.0 3.5 เมตร นำมาใช้กับลวดเชื่อมที่มีขนาดความโตเริ่มต้นที่ 0.8, 1.0 มิลลิเมตร และขนาด 1.2 มิลลิเมตร ถ้าชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำใช้กับลวดเชื่อมที่มีขนาดความโตที่ 1.6 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 2.8 หัวเชื่อมแบบคอก่าน

2. หัวเชื่อมแบบระบบป้อนลวดในตัว (Self-type)

เป็นหัวเชื่อมที่ใช้กับงานออลูมิเนียมที่มีขนาดความโตที่ 1.1 มิลลิเมตร และลวดเชื่อมเหล็กโลหะที่มีความแข็งแรงดี ที่ด้ามจับหัวเชื่อมจะมีมอเตอร์ขับเคลื่อนและล้อป้อนลวดประกอบอยู่ด้วยกัน พร้อมกับม้วนลวดที่มีน้ำหนักประมาณ 450-900 กรัม ซึ่งติดอยู่กับหัวเชื่อม เหมาะกับการใช้งานที่มีความยาวและสามารถควบคุมความเร็วของลวดเชื่อมได้โดยตรงที่หัวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 หัวเชื่อมแบบระบบป้อนลวดในตัว

3. หัวเชื่อมแบบดึงลวด (Pull type)

เป็นหัวเชื่อมที่ใช้กับงานที่มีระยะความยาวมาก โดยจะใช้ร่วมกับระบบป้อนลวดแบบดันลวดสามารถเรียกได้ว่า ระบบดัน-ดึงลวด ซึ่งหัวเชื่อมมีมอเตอร์ประกอบอยู่ที่ด้ามจับ และต่อพ่วงกับระบบกลไกป้อนลวด ม้วนลวดจะอยู่ในกล่องควบคุมอีกต่างหาก เหมาะกับการใช้กับลวดเชื่อมชนิดอ่อน เช่น ออลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2.10

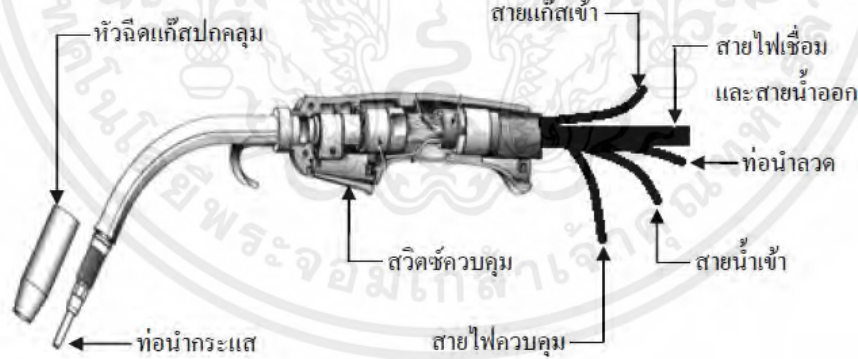


รูปที่ 2.10 หัวเชื่อมแบบดิ่งลวด

ดังนี้

ภายในหัวเชื่อมจะมีส่วนประกอบหลายอย่างและจะมีการระบายความร้อนด้วยน้ำ ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก

1. สวิตช์ควบคุมการเชื่อม (Torch Switch)
2. ท่อนำกระแส (Contact Tube)
3. หัวฉีดแก๊ส (Nozzle)
4. ท่อนำลวด (Wire Conduit)
5. สายเชื่อมและสายลำเลียงน้ำ (Power Cable และ Water Hose)



รูปที่ 2.11 ภาพตัดขวางหัวเชื่อมและสายเชื่อมงานเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลู

1. สวิตช์ควบคุมการเชื่อม (Torch Switch)

อุปกรณ์ตัวนี้ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการเปิด-ปิดกระแสเชื่อม พร้อมกับการเริ่มต้นและหยุดในชุดป้อนลวดเชื่อม ซึ่งสวิตช์จะเป็นตัวควบคุมการอาร์ค โดยสวิตช์ควบคุมการเชื่อมสามารถปรับได้อีกจุดที่ชุดควบคุมป้อนลวด (Wire Feeder)

2. ท่อนำกระแส (Contact Tube)

ชิ้นส่วนของท่อนำกระแสทำมาจากทองแดง เพื่อให้มีความสามารถในการนำกระแสไฟเชื่อมไปสู่ลวดเชื่อม ขณะเดียวกันลวดเชื่อมไหลผ่านออกมาทางรูของท่อนำกระแสไปยังบริเวณที่ทำการเชื่อมได้สะดวก ดังนั้นขนาดของลวดเชื่อมต้องมีความสัมพันธ์กับขนาดของความโตรูของท่อนำกระแส

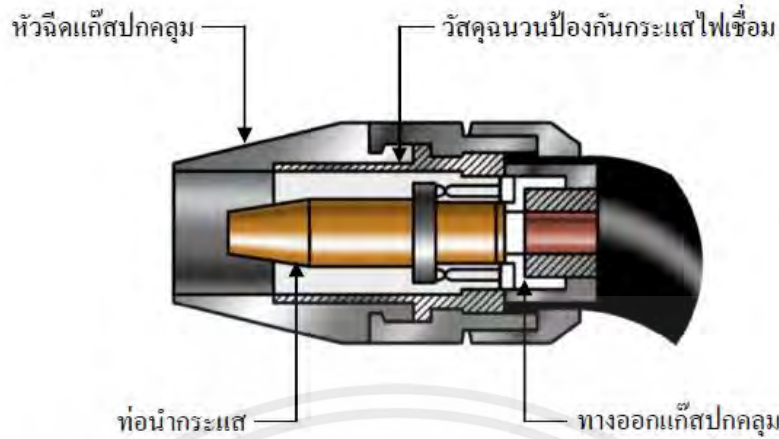
3. หัวฉีดแก๊ส (Nozzle)

ชิ้นส่วนของหัวฉีดแก๊สจะทำมาจากทองแดง ทำหน้าที่บังคับแก๊สให้ไหลพุ่งไปสู่ บ่อหลอมละลาย ซึ่งหัวฉีดขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่สามารถเลือกใช้ตามปริมาณของกระแสไฟเชื่อม เช่น หัวฉีดขนาดเล็กใช้กับกระแสไฟเชื่อมต่ำ ส่วนหัวฉีดขนาดใหญ่ใช้กับกระแสไฟเชื่อมสูง และมีแนวเชื่อม ขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ขนาดหัวฉีดแก๊สงานเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุมแบบต่างๆ

หลักการทำงานของหัวฉีดแก๊สจะไม่มีกระแสไฟเชื่อมไหลผ่าน เพราะมีวัสดุที่เป็นฉนวนกันไว้ไม่ให้กระแสเชื่อมไหลผ่าน แต่ในขณะที่ปฏิบัติงานเชื่อมสะเก็ดไฟขนาดเล็กกระเด็นเข้ามาติดสะสมปริมาณมากบริเวณปลายหัวฉีด จะทำให้กระแสเชื่อมไหลผ่านมายังหัวฉีดได้ เกิดการอาร์คทำให้หัวฉีดเสียหายได้ อีกทั้งยังทำให้แก๊สปกคลุมไปไม่ถึงบ่อหลอมละลาย ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานเชื่อมควรหมั่นทำความสะอาดหัวฉีดด้วยการฉีดสเปรย์ป้องกัน สะเก็ดโลหะในปริมาณพอเหมาะ ซึ่งทำให้งานเชื่อมมีประสิทธิภาพสูง



รูปที่ 2.13 หน้าตัดท่อนำกระแสและหัวฉีตแก๊สของหัวเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม

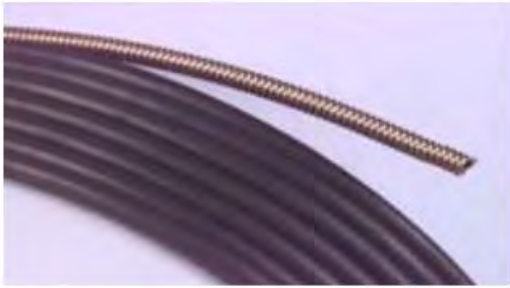
4. ท่อนำลวด (Wire Conduit)

ชิ้นส่วนของท่อนำลวดทำมาจากวัสดุโลหะ และพลาสติกไนลอนหรือเทปลอน ขึ้นอยู่กับชนิดของลวดเชื่อม เช่น ลวดเชื่อมที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนควรเลือกใช้ท่อนำลวดที่ทำเหล็กสปริง ส่วนพลาสติกไนลอนหรือเทปลอนใช้กับวัสดุอ่อนอย่างเช่น อลูมิเนียม ทองแดง เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14

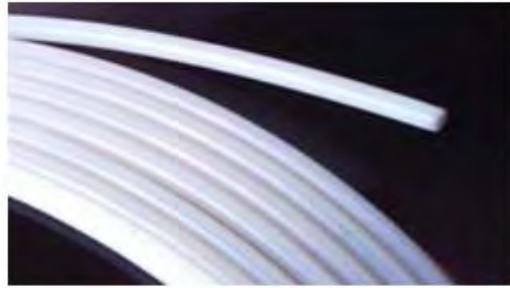
ท่อนำลวดทำหน้าที่นำลวดเชื่อมส่งต่อระหว่างชุดป้อนลวดไปยังหัวเชื่อมอยู่ ภายในสายเชื่อม โดยช่วงขณะสายเชื่อมโค้งงอสามารถอ่อนตัวไม่รัดแน่นลวดเชื่อมที่ไหลเคลื่อนอยู่ภายใน แต่ช่วงเวลาปฏิบัติงานควรปล่อยสายเชื่อมให้มีส่วนโค้งงอให้น้อยที่สุด



รูปที่ 2.14 ท่อนำลวดงานเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม



เหล็กสปริง



พลาสติกไนลอนหรือเทปลอน

รูปที่ 2.15 ชนิดวัสดุทำท่อนำพลังงานเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม

5. สายเชื่อมและสายลำเลียงน้ำ (Power Cable และ Water Hose)

ชิ้นส่วนสายเชื่อมหรือสายไฟเชื่อมทำมาจากทองแดงหรืออลูมิเนียม ส่วนมากทำมาจากทองแดง สายไฟเชื่อมประกอบด้วยเส้นลวดทองแดงขนาดเล็กรวมกันเป็นเส้นใหญ่ตามขนาดที่ต้องการ ท่อหุ้มด้วยยางธรรมชาติหรือวัสดุอย่างสังเคราะห์ ทำหน้าที่ลำเลียงกระแสไฟเชื่อมไปสู่หัวเชื่อม เพื่อทำการหลอมละลายลวดเชื่อม ส่วนสายลำเลียงน้ำ จะเป็นสายน้ำเพื่อทำการหล่อเย็นสายเชื่อมและหัวเชื่อม โดยสายลำเลียงน้ำ จะมีสายน้ำเข้าและสายน้ำออกประกอบอยู่กับปั้มน้ำแบบไหลเวียน ปกติสายเชื่อมมี 2 ชนิด ซึ่งชนิดหล่อเย็นด้วยอากาศหัวเชื่อมมีขนาดเล็กนำไปใช้กับกระแสเชื่อมระหว่าง 80-350 แอมแปร์ และชนิดหล่อเย็นด้วยน้ำ หัวเชื่อมมีขนาดใหญ่นำไปใช้กับกระแสเชื่อมระหว่าง 80-500 แอมแปร์

หัวเชื่อมและสายเชื่อมของการเชื่อมแบบอาร์คโลหะแก๊สคลุม ในปัจจุบันมีความหลากหลายของการนำมาใช้งาน โดยผู้ใช้งานควรศึกษารายละเอียดเพื่อทำความเข้าใจก่อนการตัดสินใจซื้อหรือทำการซ่อมแซม ทำให้ไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และควบคุมการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เช่น การเลือกใช้หัวเชื่อมและสายเชื่อมชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศกับชิ้นงานที่เป็นงานผลิตภัณฑ์ก็เพียงพอ เนื่องจากเวลาการเชื่อมแต่ละแนวเชื่อมเป็นช่วงระยะสั้น ไม่จำเป็นต้องมีสายลำเลียงน้ำ

2.4.4 อุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊ส

เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมความดันแก๊สปกคลุมเป็นมาตรวัดความดันภายในถังแก๊ส และมาตรวัดอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมที่ส่งไปยังหัวเชื่อม โดยหลักการใช้งานของชุดควบคุมการไหลของแก๊สปกคลุม เพื่อลดความดันจากท่อบรรจุให้พอเหมาะกับการใช้งานและให้มีความดันจ่ายคงที่ [12]

เมื่อมีความดันคงที่อุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊สจะส่งแก๊สลำเลียงผ่านท่อสายยางแบบทนแรงดันผ่านอุปกรณ์ตัวโซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valve) ในชุดควบคุมป้อนลวดเชื่อมทำงานคู่ขนานกับการเปิดและปิดสวิตช์กระแสเชื่อม ในกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม ชุดควบคุมการไหลของแก๊ส มีส่วนประกอบ 2 ส่วนดังนี้ [12]

1. มาตรวัดความดันภายในถังแก๊ส ส่วนประกอบนี้ใช้วัดค่าความดันภายในถังแก๊สมิ้วเลขบอกหน่วยเป็น ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (Psi) หรือมีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2)

2. มาตรวัดอัตราการไหลของแก๊ส ส่วนประกอบนี้ใช้วัดค่าความดันการปรับอัตราการไหลแก๊สปกคลุม โดยมีวัสดุโลหะทรงกลมลอยขึ้นมาบอกหน่วยเป็น ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง (ft^3/h) หรือมีหน่วยเป็น ลิตรต่อนาที (L/min)



รูปที่ 2.16 ชุดควบคุมการไหลของแก๊สปกคลุมใช้สำหรับแก๊สผสม

2.4.5 ลวดเชื่อม (Electrode Wire)

ลวดเชื่อมในการเชื่อมมิก (MIG Wire) ลวดเชื่อมเป็นหัวใจสำคัญของการเชื่อม MIG ดังนั้นจึงต้องรู้จักเลือกให้ถูกต้อง ลวดเชื่อมจะหลอมผ่านเปลวอาร์คไปยังบ่อหลอมละลายเกิดเป็นแนวเชื่อม ซึ่งลวดเชื่อมที่ผ่านเปลวอาร์ค นั้น จะทำปฏิกิริยากับแก๊สปกคลุม จึงทำให้ส่วนผสมของลวดเปลี่ยนไป ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางด้านกายภาพและทางกลของเนื้อเชื่อม ลวดเชื่อมมิกจะเป็นลวดเชื่อมแบบเปลือย มีเฉพาะแกนโลหะ ไม่มีสารพอกหุ้มภายนอก มีลักษณะเป็นม้วน ขนาด 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 มิลลิเมตร ข้อดีของลวดเชื่อมและการเชื่อมประเภทนี้คือ สามารถเชื่อมได้เร็วและต้นทุนลวดเชื่อมมีราคาที่ถูกกว่า เมื่อเทียบกับการเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมรูปที่เหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรมงานประกอบเหล็กทั่วไปและงานอุตสาหกรรมรถยนต์และงานโครงสร้างทั่วไป [14], [15]

2.4.5.1 ธาตุผสมในลวดเชื่อมมิกทั่วไป

1. ซิลิคอน (Si) ซิลิคอนเป็นธาตุจำพวก Deoxidizer โดยทั่วไปจะมีประมาณ 0.40-1.00% ถ้าซิลิคอนในลวดเชื่อมมากขึ้น จะทำให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น แต่ Ductility และ Toughness ลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามถ้ามีซิลิคอน 1-1.2% แนวเชื่อมมีโอกาสแตกได้ง่าย

2. แมงกานีส (Mn) แมงกานีสเป็นธาตุจำพวก Deoxidizer และช่วยเพิ่มความแข็งแรง มีผสมในลวดเชื่อมเหล็กประมาณ 1.00-2.00% เมื่อเพิ่มปริมาณแมงกานีสจะทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นดีกว่าการเพิ่มซิลิคอน และแมงกานีสยังช่วยลดการแตกขณะร้อนของแนวเชื่อมด้วย

3. อลูมิเนียม (Al), ไทเทเนียม (Ti) และเซอร์โคเนียม (Zr) ธาตุเหล่านี้เป็น Deoxidizer ผสมลงในลวดเชื่อม โดยมีปริมาณรวมกันแล้วไม่เกิน 0.2% ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับแนวเชื่อม

4. คาร์บอน (C) เป็นธาตุที่สำคัญและมีอิทธิพลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลของโลหะมากที่สุด ลวดเชื่อม MIG โดยทั่วไปจะมีคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.05-0.12% ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงกับแนวเชื่อมอย่างเพียงพอ โดยไม่เกิดผลเสียต่อ Ductility, toughness และการเกิดรูพรุน

5. ธาตุอื่นๆ ได้แก่ นิกเกิล โครเมียมและโมลิบดีนัม โดยมากเติมลงในลวดเชื่อม MIG เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อการกัดกร่อน ถ้าเติมธาตุดังกล่าวลงไป ในลวดเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน จำนวนเล็กน้อยจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและ Toughness ให้กับแนวเชื่อม แต่สำหรับลวดเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม จะมีธาตุดังกล่าวนี้ผสมอยู่จำนวนมาก

โดยทั่วไปเมื่อใช้แก๊สปกคลุมที่เป็นอาร์กอนผสมกับออกซิเจน 1-3% หรืออาร์กอนผสมกับ CO₂ จำนวนเล็กน้อยจะได้แนวเชื่อมที่มีส่วนผสมของธาตุต่างๆ ใกล้เคียงกับส่วนผสมของลวดเชื่อม [14]

ชนิดของลวดเชื่อมมิก (MIG Welding Wire) ที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย แบ่งตามลักษณะของโลหะฐาน มี 3 ประเภท ดังนี้ [15]

1. ลวดเชื่อมเหล็ก (Carbon Steel) เช่น ER70S-6
2. ลวดเชื่อมสแตนเลส (Stainless) เช่น ER308LSi, ER316LSi, ER309LSi และ ER310
3. ลวดเชื่อมอลูมิเนียม (Aluminum) เช่น ER4043, ER5356 และ MIG Al99.5

ลวดเชื่อมอลูมิเนียม (Aluminum) ER4043 เป็นลวดเชื่อมอลูมิเนียม-ซิลิกอน AlSi5 ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานเชื่อมโลหะผสมอลูมิเนียมหล่อ เนื่องจากมีส่วนผสมของซิลิกอน 5% ทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีในการป้องกันการแตกร้าว ต้านทานความร้อนได้ดีเยี่ยมและยังให้การซึมลึกที่ดี เหมาะสำหรับงานเชื่อม อยู่นิ่งเร็ว เครื่องยนต์ อุปกรณ์กีฬา เครื่องจักร อุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น [16]



รูปที่ 2.17 ลวดเชื่อมอลูมิเนียม ER4043

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมอลูมิเนียม ER4043

Composition (wt%)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
	5.17	0.154	0.014	<0.0005	0.0017	<0.001	0.016	Bal.

2.4.6 แก๊สปกคลุม (Shielding Gas)

ในกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม แก๊สที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อมจะมีผลต่อสมบัติของแนวเชื่อม และช่วยป้องกันอากาศภายนอกเข้ารวมตัวกับแนวเชื่อม ซึ่งจะส่งผลทำให้แนวเชื่อมเกิดข้อบกพร่อง เพราะบรรยากาศรอบๆ แนวเชื่อมจะมีส่วนประกอบของแก๊สไนโตรเจน ไฮโดรเจน ออกซิเจนและไอน้ำ แก๊สเหล่านี้ถ้าเข้ารวมตัวกับแนวเชื่อมจะเป็นสาเหตุของความบกพร่องในแนวเชื่อม เช่น การเกิดรอยร้าว เกิดรูพรุน หรือเกิดฟองอากาศ ในแนวเชื่อม ทำให้คุณภาพของแนวเชื่อมต่ำ ไม่สามารถใช้ในการงานวิศวกรรมที่ต้องการความแข็งแรงสูงได้ นอกจากนี้แก๊สปกคลุมนั้นยังมีผลต่อการเชื่อมอาร์คทางด้านอื่นๆ ด้วย เช่น การซึมลึกของแนวเชื่อม การเกิดเม็ดโลหะกระเด็น ความเสถียรของการอาร์ค การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบต่างๆ การใช้แก๊สปกคลุมเพียงชนิดเดียว ไม่สามารถทำให้เกิดการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบต่างๆ ได้ การเชื่อมวัสดุหรือโลหะบางชนิด หรือการถ่ายโอนน้ำโลหะบางแบบ ต้องเลือกใช้แก๊สปกคลุมที่เป็นแก๊สผสม หรือแม้แต่วัสดุชนิดเดียวกันถ้าเลือกใช้แก๊สผสมที่ถูกต้อง ในการปกคลุมก็จะได้ลักษณะและคุณภาพของแนวเชื่อมที่ดี กว่า การใช้แก๊สปกคลุมชนิดเดียว [17]

2.4.6.1 ชนิดของแก๊สปกคลุม

1. แก๊สเฉื่อยอาร์กอน (Ar), ฮีเลียม (He) เหมาะกับการใช้คลุมป้องกันแนวเชื่อม ในการเชื่อมเหล็กกล้า แต่ไม่สามารถใช้ได้กับโลหะทุกชนิด จึงต้องผสมแอกทีฟแก๊ส เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) หรือออกซิเจน (O₂) เข้าไป เพื่อให้การอาร์คเสถียร มีประกายโลหะจากการเชื่อมลดลง

2. แอกทีฟแก๊ส คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) หรือเป็นแก๊สผสมกันระหว่างแก๊สอาร์กอน กับแอกทีฟแก๊สบางตัว เช่น แก๊สออกซิเจนกับแก๊สไนโตรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สไฮโดรเจน

3. อันรีแอกทีฟแก๊ส คือ ไนโตรเจน (N₂) ใช้ในการปกคลุมแนวเชื่อมสำหรับการเชื่อมทองแดง และทองแดงเจือ ให้สมบัติการเชื่อมคล้ายกับฮีเลียม แต่การซึมลึกดีกว่าอาร์กอน และการถ่ายโอนโลหะเป็นแบบหยดขนาดใหญ่ ไนโตรเจนใช้แทนฮีเลียมได้ กรณีไม่มีฮีเลียม และอาจผสมอาร์กอน จะทำให้การอาร์คเสถียรและราบเรียบ ลดความปั่นป่วนในบ่อหลอมละลาย ขณะทำการเชื่อม แก๊สผสมนี้อาจใช้เชื่อมอลูมิเนียมเจือได้เช่นกัน

4. แก๊สผสม เช่น อาร์กอน ผสมคาร์บอนไดออกไซด์ (Ar/CO₂), อาร์กอน ผสมออกซิเจน (Ar/O₂) , อาร์กอน ผสมออกซิเจน ผสมคาร์บอนไดออกไซด์ (Ar/O₂/CO₂) จะนำมาใช้คลุมรอยเชื่อม เพื่อเพิ่มคุณภาพการเชื่อมและงานเชื่อมให้สูงขึ้นหรือเกิดการถ่ายโอนโลหะตามต้องการ การผสมจะใช้เครื่องผสมแก๊ส โดยแก๊สจะผสมกันก่อนจ่ายออกสู่หัวเชื่อมโดยในการผสมแบ่งออกได้ 4 อย่าง คือ

- แก๊สเฉื่อยผสมกับแก๊สเฉื่อย
- แก๊สเฉื่อยผสมแก๊สเฉื่อยและแอคทีฟแก๊ส
- แก๊สเฉื่อยผสมแอคทีฟแก๊ส
- แอคทีฟแก๊สผสมกันเอง

สมบัติเด่นของแก๊สคลุมแต่ละชนิดที่มีผลต่อสมบัติรอยเชื่อม แต่ละชนิดก่อนนำมาผสมมีดังนี้

- ฮีเลียม ให้ความร้อนเปลวอาร์กสูงรอยเชื่อมจะกว้าง ระยะซึมลึกตื้น
- อาร์กอน เป็นแก๊สที่ให้ประจุบวก ได้ดีช่วยให้เปลวอาร์คและกระแสเชื่อมคงที่แนวเชื่อมกว้าง ระยะซึมลึกมากทั้งด้านข้าง และด้านล่างแนวเชื่อม
- คาร์บอนไดออกไซด์ จะให้รอยซึมลึกกว้าง และลึก ผิวหน้าแนวเชื่อมมีเกล็ดหยาบและนูนโค้งเกิดสภาพประจุบวกต่ำ ขนาดหยดโลหะไม่สม่ำเสมอ เม็ดโลหะกระเด็นมากแต่มีรัศมีการปกคลุมบริเวณบ่อหลอมละลายอย่างทั่วถึง
- ออกซิเจน ทำให้หยดน้ำโลหะกระจายเป็นฝอยมีกระแสเชื่อมต่ำขณะเกิดหยดละอองโลหะ แนวเชื่อมกว้างความนูนต่ำ ผิวแนวเชื่อมเป็นเกร็ดละเอียดไม่เกิดการอาร์คคัลตวงจรและหยดโลหะมีเม็ดขนาดเล็กส่งผลให้อุณหภูมิที่บ่อหลอมเหลวสูง

2.5 ปัจจัยในการเชื่อมแบบมิก

2.5.1 กระแสไฟเชื่อม (Welding Current)

การตั้งอัตราความเร็วของการป้อนลวด จะเป็นการกำหนดค่ากระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อมด้วย ลวดเชื่อมที่มีขนาดใหญ่กว่า จะมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density) สูงกว่า ลวดเชื่อมแต่ละชนิดและแต่ละขนาดจะมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่ำสุดและค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงเฉพาะตัว ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ให้ผลดีที่สุด คือ ช่วงระหว่างค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด ดังที่แสดงในตารางที่ 2.2 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมมีความสัมพันธ์กับการซึมลึกของรอยเชื่อม โดยทั่วไปถ้าปริมาณกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนไป การซึมลึกของรอยเชื่อมจะเปลี่ยนไปด้วย เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าเชื่อมเพิ่มขึ้นการซึมลึกของรอยเชื่อมจะเพิ่มขึ้น เมื่อกระแสไฟฟ้าเชื่อมไม่คงที่จะมีผลทำให้การซึมลึกไม่สม่ำเสมอ เมื่อกระแสไฟฟาลดลงการเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าจะเป็นการเพิ่มอัตราการหลอมตัวของลวดเชื่อมและชิ้นงานด้วย ทำให้ขนาดของแนวเชื่อมและความนูนของแนวเชื่อมมีการเปลี่ยนไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเชื่อมด้วย ถ้าปริมาณกระแสไฟฟ้าเชื่อมที่ใช้มีค่าน้อยไปสำหรับลวดเชื่อมที่กำลังใช้งานอยู่การถ่ายเทโลหะจากลวดเชื่อมไปยังชิ้นงานจะช้ามากและเกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อมหรือเกิดการซึมลึกของรอยเชื่อมน้อยมากเนื่องจากหยดโลหะเย็นตัวเร็ว ถ้าใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าเชื่อมสูงเกินไปทำให้การซึมลึกของรอยเชื่อมจะมากเกินไปจนทำให้รอยเชื่อมปรากฏขึ้นบนชิ้นงานอีกด้านหนึ่ง (Burn Through) และทำให้เกิดอันเดอร์คัท (Under Cut) ที่ขอบแนวเชื่อม เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นเสมอในการเชื่อมที่ใช้ปริมาณกระแสในการเชื่อมสูงเกินกว่าปริมาณที่เหมาะสมสำหรับลวดเชื่อมที่ใช้งานอยู่ ควรเปลี่ยนไปใช้ลวดเชื่อม

ที่มีขนาดใหญ่กว่าแทน ปัญหาที่เกิดจากการใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าเชื่อมสูงเกินไปอีกประการหนึ่ง จะเกิดขึ้นขณะที่ทำการเชื่อมโดยลวดเชื่อมที่อยู่ในท่อนำกระแส (Contact Tube) อาจจะถูกหลอมละลายไปกับท่อนำกระแส (Electrode Burn Back Into The Contact Tube) ทำให้เกิดการอาร์คที่ไม่สม่ำเสมอการปกป้องรอยเชื่อมของแก๊สคลุมจะถูกรบกวนผลที่เกิดตามมาคือเกิดเม็ดโลหะแตกกระเด็น (Spatter) และรอยเชื่อมที่ได้จะมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่ดีตะเข็บเชื่อมนูนและกว้าง การเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าเชื่อมจะทำให้รอยเชื่อมมีความนูนเพิ่มมากขึ้นและมีความกว้างเพิ่มมากขึ้นด้วย และถ้าปริมาณกระแสที่ใช้ต่ำเกินไป ลวดเชื่อมอาจเป็นตัวลัดวงจรจากเครื่องเชื่อมไปยังชิ้นงานได้ ลวดเชื่อมจะร้อนแดงและเปลวไฟเชื่อมจะดับ หรือเปลวไฟเชื่อมอาจจะไม่ดับแต่เปลวไฟเชื่อมจะไม่สม่ำเสมอและการหลอมตัวของโลหะชิ้นงานจะไม่ดี ลักษณะรอยเชื่อมที่ได้การหลอมรวมกันระหว่างชิ้นงานและลวดเชื่อมมีน้อยมาก โดยการหลอมลึกของรอยเชื่อมไม่มีเลย หรือมีก็น้อยมากและจะเกิดข้อบกพร่องในงานเชื่อมอย่าง (Over Lap) ซึ่งลักษณะเช่นนี้เท่ากับเป็นการทำลายลักษณะที่ดีของการเชื่อมแบบ GMAW ซึ่งข้อดีของการเชื่อมแบบ GMAW จะมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ปลายลวดเชื่อมสูง การใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมมากไปหรือน้อยไปจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะชิ้นงานส่วนที่ได้รับขณะทำการเชื่อม (Weld Metal) ค่ากำลังต้านแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength) และความอ่อนตัว (Ductility) จะมีค่าลดลงรวมทั้งคุณสมบัติทางกลชนิดต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากเกิดรูพรุนในรอยเชื่อม นอกจากนี้ยังมีออกไซด์ส่วนเกินและสารอื่นๆ อยู่ในรอยเชื่อมด้วยลักษณะการเกิดเนื้อโลหะที่รอยเชื่อมก็ได้รับผลกระทบด้วยเช่นกันกระแสเชื่อมที่ใช้จะมีผลกระทบอย่างมากต่ออัตราการเติมเนื้อโลหะลวดเติม ในระบบแรงดันคงที่ (Constant Voltage: CV) กระแสเชื่อมจะถูกควบคุมด้วยอัตราเร็วป้อนลวด (Wire Feed Speed) เมื่ออัตราการป้อนลวดเพิ่มขึ้นกระแสก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน [18], [19]

ตารางที่ 2.2 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมแบบ GMAW

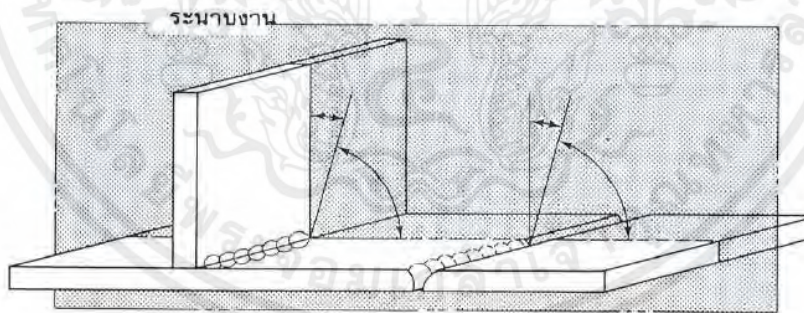
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อม	ช่วงปริมาณกระแสที่ใช้ในการเชื่อม
0.6 มิลลิเมตร	50-140 แอมแปร์
0.8 มิลลิเมตร	60-160 แอมแปร์
1.0 มิลลิเมตร	100-220 แอมแปร์
1.2 มิลลิเมตร	165-375 แอมแปร์
2.0 มิลลิเมตร	210-550 แอมแปร์
3.0 มิลลิเมตร	375-600 แอมแปร์

2.5.2 ระยะอาร์ค (Arc Length)

ระยะห่างระหว่างปลายลวดเชื่อมกับจุดบริเวณที่จะทำการเชื่อมบนชิ้นงาน ระยะอาร์คมีความสำคัญในการเชื่อมเนื่องจากเป็นตัวกำหนดปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทไปยังชิ้นงาน ความร้อนที่มากเกินไปอาจทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ ในขณะที่ความร้อนที่น้อยเกินไปจะทำให้รอยเชื่อมไม่สามารถทะลุผ่านได้ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องรักษาระยะอาร์คให้สม่ำเสมอ เพื่อให้แน่ใจว่าได้รอยเชื่อมที่เหมาะสม ระยะอาร์คที่ใกล้เกินไปนั้นจะทำให้พื้นผิวของรอยเชื่อมไม่สม่ำเสมอเมื่อถูกลากไปตามแนวเชื่อม และรอยเชื่อมจะใช้กำลังน้อยและมีเศษโลหะเกาะอยู่ ส่วนระยะอาร์คที่ห่างกับชิ้นงานมากเกินไป จะไปเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Arc Voltage) ส่งผลให้รอยเชื่อมเรียบและกว้างและมีสะเก็ด (Spatter) กระเด็นออกมามาก นอกจากนี้ยังทำให้ระยะอาร์คไม่มั่นคง และเศษโลหะจะหลุดออกจากขอบของรอยเชื่อมได้ยาก การเชื่อมอาร์คเป็นกระบวนการที่มีกระแสไฟฟ้าคงที่ แต่ระยะอาร์คจะมีผลต่อแรงดันไฟฟ้า การลดระยะอาร์คจะลดแรงดันไฟฟ้าและทำให้ความร้อนในรอยเชื่อมลดลง การเพิ่มระยะอาร์คจะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและทำให้ความร้อนในรอยเชื่อมสูงขึ้น [20], [21]

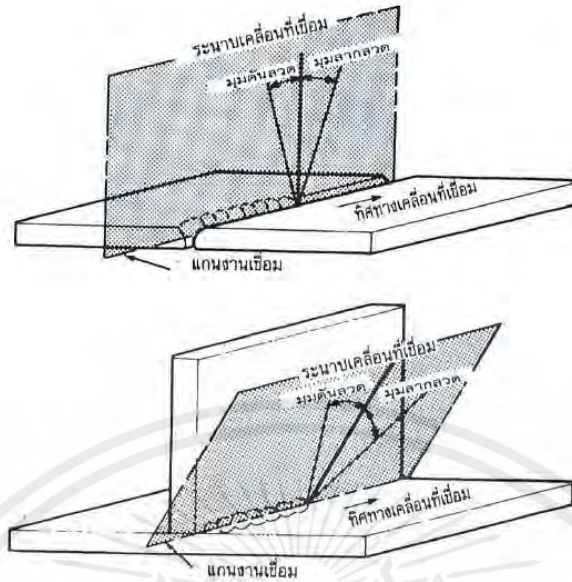
2.5.3 มุมในการเชื่อม (Welding Angle)

มุมของหัวเชื่อมที่อ้างอิงระหว่างหัวเชื่อมเทียบกับรอยต่อซึ่งประกอบด้วยมุมสองมุมคือ มุมตามแกนขวาง (Transverse หรือ Head Angle) และมุมตามแกนยาว (Longitudinal หรือ Nozzle Angle) มุมตามแกนขวางเป็นมุมที่ลวดเชื่อมหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมทำกับเส้นอ้างอิงที่ตั้งฉากกับแกนงานเชื่อม ดังที่แสดงในรูปที่ 2.18 [18]



รูปที่ 2.18 ลักษณะของมุมขวางของงานเชื่อมฉากและเชื่อมร่อง

ส่วนมุมตามแกนยาวเป็นมุมที่ลวดเชื่อมหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมทำกับเส้นอ้างอิงที่ตั้งฉากกับแกนของตะเข็บเชื่อมในระนาบของงานเชื่อม มุมตามแกนยาวมีทั้งแบบลากลวด (Pulling Angle) และแบบผลักลวด (Pushing Angle) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 [18]



รูปที่ 2.19 มุมตามแนวยาวของงานเชื่อมรอยเชื่อมฉากและเชื่อมร่อง

ขนาดมุมของหัวเชื่อมที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับลักษณะของรอยต่อและตำแหน่งท่าเชื่อมจะเป็นตัวกำหนดมุมของหัวเชื่อมที่กระทำต่อชิ้นงานจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของแนวเชื่อม ตำแหน่งของการเติมโลหะหลอมละลายและรูปร่างลักษณะของแนวเชื่อม

2.6 อลูมิเนียม

อลูมิเนียมเป็นโลหะที่ได้รับความนิยมใช้งานอย่างมาก เป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา อลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงด้านความแข็งแรง ทนทานและมีน้ำหนักเบา ด้านทานการกัดกร่อนและการเกิดสนิมได้ดี เนื่องจากมีการสร้างผิวออกไซด์มาปิดผิวไว้ตลอดเวลา มีค่าการนำกระแสไฟฟ้าได้ดีและสามารถขึ้นรูปด้วยวิธีต่างๆ ได้ง่าย จากคุณสมบัติที่ดีหลายประการนี้ ทำให้อลูมิเนียมจึงเป็นที่นิยมใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ ในระยะเริ่มแรกของการนำอลูมิเนียมมาใช้งานในการเชื่อมเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก เนื่องจากคุณสมบัติที่มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำและอลูมิเนียมยังทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ที่ผิว ซึ่งจะป้องกันการรวมตัวของน้ำโลหะจากลวดเชื่อมไปรวมกับเนื้องานที่บ่อหลอมละลาย ทำให้แนวเชื่อมไม่สมบูรณ์และการที่อลูมิเนียม มีการนำไฟฟ้าที่ดีทำให้ต้องใช้พลังงานความร้อนที่สูงอีกด้วย ซึ่งอาจทำให้เกิดการรวมตัวกับไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดไนไตรด์และเทคนิคการเชื่อมได้ก้าวหน้าขึ้นมา ได้เกิดการเชื่อมแบบอาร์คไฟฟ้าโดยใช้แก๊สเฉื่อยคลุมผิว ซึ่งทำให้คุณภาพของการเชื่อมอลูมิเนียมดีขึ้น ทำให้เกิดการใช้งานในอุตสาหกรรมแขนงต่างๆ กว้างมากขึ้น

2.6.1 การแบ่งประเภทอลูมิเนียม

การแบ่งประเภทของอลูมิเนียมสามารถแบ่งได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับเกณฑ์การแบ่ง โดยกรรมวิธีการผลิต อลูมิเนียมสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ อลูมิเนียมแปรรูปเย็น (Wrought Aluminum Alloys) และ อลูมิเนียมหล่อหลอม (Cast Aluminum Alloys) และหากจะทำการแบ่งโดยเกณฑ์ของส่วนผสมทางเคมี จะสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ อลูมิเนียมบริสุทธิ์และอลูมิเนียมเจือ โดยกำหนดแบ่งและเรียกชื่ออลูมิเนียมแปรรูปเย็นตามมาตรฐานอเมริกาของสมาคมอลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา (Aluminum Association) เป็นผู้กำหนดโดยใช้การแบ่งเกณฑ์ตามธาตุที่ผสมกำหนดเป็นตัวเลข 4 หลัก ซึ่งแบ่งได้เป็น 9 กลุ่มดังตารางที่ 2.3 [22]

ตารางที่ 2.3 การแบ่งกลุ่มของอลูมิเนียมตามมาตรฐาน Aluminum Association

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอลูมิเนียม
1XXX	อลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.00%
2XXX	ทองแดง (Copper, Cu)
3XXX	แมงกานีส (Manganese, Mn)
4XXX	ซิลิกอน (Silicon, Si)
5XXX	แมกนีเซียม (Magnesium, Mg)
6XXX	แมกนีเซียมกับซิลิกอน (Magnesium, Mg and Silicon, Si)
7XXX	สังกะสี (Zinc, Zn)
8XXX	ธาตุอื่นๆนอกเหนือจากที่กล่าว (Other Element)
9XXX	ยังไม่มีกำหนดใช้ (Unused Series)

1. อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (อนุกรม 1XXX) ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมมีความบริสุทธิ์ของอลูมิเนียมที่ 99.0% ถึง 99.9% อลูมิเนียมในกลุ่มนี้ยังจะมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และยังสามารถสะท้อนแสงได้ดี จึงนิยมใช้ในการแผงสะท้อนแสงในไฟหน้ารถยนต์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายทั้งการตัดเฉือนและขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการต่างๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ดี จะมีข้อเสียคือในด้านของความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุอื่น 21 ชนิด แต่ก็สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมธาตุเจืออื่น เพื่อให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปหรือการขึ้นรูปเย็นคือการทำให้แข็งได้ด้วยความเค้น (Strain Hardening)

2. อลูมิเนียมเจือทองแดง (อนุกรม 2XXX) เป็นอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูงคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยสามารถที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (Solution Treatment) และชุบ (Quenching) ต่อจากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) เรียกกระบวนการนี้ว่า การอบบ่ม (Ageing Hardening) ซึ่งภายหลังการอบบ่มความสามารถในการต้านทานการ

กัลดกร่อนจะลดลงและความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดนี้จะต่ำกว่าชนิดอื่นๆ คือจะเชื่อมได้ยากโดยจะเกิดการอ่อนตัวที่แนวเชื่อม ดังนั้นจึงมักทำการเชื่อมต่อด้วยวิธีทางกลคือ การย้ำหมุด

3. อลูมิเนียมเจือแมงกานีส (อนุกรม 3XXX) เป็นอลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติเหมือนกับอลูมิเนียมบริสุทธิ์แต่มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้

4. อลูมิเนียมเจือซิลิกอน (อนุกรม 4XXX) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่เมื่ออยู่ในสภาพของเหลวจะไหลตัวได้ดีและขณะแข็งตัวจะไม่เกิดการแตกร้าวทั้งในสภาพร้อนและเย็น ดังนั้นอลูมิเนียมจึงนิยมใช้ในการเป็นลวดเติมสำหรับเชื่อมอลูมิเนียมเจือและอลูมิเนียมหล่อ

5. อลูมิเนียมเจือแมกนีเซียม (อนุกรม 5XXX) บางครั้งจะมีการเติมแมงกานีสลงไปด้วย อลูมิเนียมเจือชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน จึงนิยมนำไปทำลวดเติมสำหรับเชื่อมเหมือนกับอนุกรม 4XXX นอกจากนั้นยังนำไปทำเป็นถังหรือขวดบรรจุแก๊ส (Storage Vessels)

6. อลูมิเนียมเจือแมกนีเซียม - ซิลิกอน (อนุกรม 6XXX) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีพอสมควร ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการแปรรูปและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ แต่มีข้อเสียคือเมื่อนำอลูมิเนียมเจือชนิดนี้ไปทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการให้ความร้อนแบบต่างๆ จะทำให้บริเวณแนวเชื่อมอ่อน

7. อลูมิเนียมเจือสังกะสี - แมกนีเซียม (อนุกรม 7XXX) อลูมิเนียมชนิดนี้มีการเจือธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลักและแมงกานีสเป็นธาตุรอง นอกจากนั้นยังมีทองแดงและโครเมียมอีกเล็กน้อย อลูมิเนียมเจือกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีมากและมีน้ำหนักเบา ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำเพราะเกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อม อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ โดยการผสมแมกนีเซียมลงไปและกำจัดทองแดงออกไปทำให้ความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดสูงขึ้น โดยจะไม่เกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อมเพราะบริเวณดังกล่าวได้เกิดการแข็งตัวจากตกตะกอนตามธรรมชาติ

2.6.2 การเพิ่มความแข็งแรงให้อลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีทางความร้อน

กรรมวิธีทางความร้อนที่ใช้กับอลูมิเนียมเจือนี้ เป็นการกระทำเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับอลูมิเนียมเจือโดยที่มีวิธีการให้ความร้อนที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับนำไปใช้งานและได้กำหนดสัญลักษณ์ตัวอักษรตามหลังเพื่อที่จะเป็นการระบุถึงกรรมวิธีทางความร้อนมากระทำต่ออลูมิเนียมเจือชนิดนั้นๆ ซึ่งความหมายของสัญลักษณ์และการใช้งานดูได้ดังในตารางที่ 2.4 [23]

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงสัญลักษณ์ที่กำหนดกรรมวิธีทางความร้อนของอลูมิเนียม

สัญลักษณ์	ความหมาย
F	สภาพเดิมไม่มีการใช้กรรมวิธีทางความร้อน
O	สภาพผ่านการอบอ่อน
H	สภาพผ่านการขึ้นรูปเย็น
W	สภาพอบละลาย
T1	สภาพผ่านการรีดร้อนและอบบ่มธรรมชาติ
T2	สภาพผ่านการรีดร้อน รีดเย็นและอบบ่มธรรมชาติ
T3	สภาพอบละลาย รีดเย็นและอบบ่มธรรมชาติ
T4	สภาพอบละลาย และอบบ่มธรรมชาติ
T5	สภาพรีดเย็นและอบบ่มธรรมชาติ
T6	สภาพอบละลายและอบบ่มเทียม
T8	สภาพอบละลาย รีดเย็นและอบบ่มเทียม
T9	สภาพอบละลาย อบบ่มเทียมและรีดเย็น

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 [24]

Temper	Ultimate Tensile Strength		Yield Strength		Elongation (%)	Hardness (HB)
	MPa	ksi	MPa	ksi		
6061-O	125	18	55	8	25	30
6061-T4	240	35	145	21	22	65
6061-T6	310	45	275	40	12	95

ตารางที่ 2.6 ส่วนประกอบทางเคมีของอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 [24]

Composition (wt%)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
	0.4-0.8	0.7	0.15-0.4	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25	0.15

2.7 เหล็กกล้าไนซ์

เหล็กกล้าไนซ์ คือ เหล็กที่ผ่านกระบวนการนำสังกะสีมาชุบเคลือบตัวเหล็ก จุดประสงค์ของการทำการชุบสังกะสี เพื่อป้องกันการเกิดสนิม เพราะเหล็กกล้าจะเกิดเป็นสนิมได้ง่าย เมื่อสัมผัสกับอากาศแล้วเกิดเป็นเหล็กออกไซด์และออกไซด์ตัวนี้ก็ไม่ได้ป้องกันเหล็กไม่ให้เกิดออกไซด์อีก ออกไซด์จะเกิดขึ้นเรื่อยๆ โดยเหล็กจะเป็นสนิม

มากขึ้นเรื่อยๆ เนื้อเหล็กก็จะค่อยๆหมดไป ดังนั้นจึงต้องหาวิธีที่จะทำให้ไม่ให้เกิดการกัดกร่อนเกิดขึ้น เช่น การทาสี หรือ โดยการหาโลหะหรือวัสดุต่างๆ ที่จะนำมาเคลือบผิวเหล็กเพื่อไม่ให้เหล็กสัมผัสกับอากาศโดยตรง [27]

การชุบเคลือบผิวเหล็กด้วยสังกะสี เป็นกรรมวิธีหนึ่งที่จะใช้สังกะสีเคลือบผิวเหล็ก เพื่อป้องกันเหล็กสัมผัสกับอากาศโดยตรง ผิวสังกะสีที่ได้จากการชุบสังกะสีจะป้องกันผิวหน้าของเหล็กกล้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า การทาสีหรือการเคลือบผิวด้วยพลาสติก [25]

การชุบโดยวิธีการจุ่มร้อน (Hot Dip Galvanizing Process) หรือการทำกัลวาไนซ์ เป็นกระบวนการที่เหล็กกล้าถูกทำให้มีความทนทานต่อการกัดกร่อน โดยการจุ่มชิ้นงานที่เป็นเหล็กลงในบ่อโลหะหลอมเหลว ซึ่งวิธีดังกล่าวส่วนใหญ่แล้ว จะใช้โลหะที่หลอมเหลวแล้วเคลือบผิวเหล็กคือสังกะสี ซึ่งจะเรียกว่าการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนหรือแบบกัลวาไนซ์และหลักการนี้ยังคงใช้อยู่ โดยไม่เปลี่ยนแปลงจนถึงปัจจุบัน การทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนมีมาตั้งแต่ 150 ปีก่อน ส่วนใหญ่แล้วชิ้นงานที่นำมาทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนจะเป็นเหล็กกล้า แต่เนื่องจากสังกะสีหลอมเหลวจะไม่ทำปฏิกิริยาเหล็กกล้าที่มีคราบสนิม คราบไขมัน คราบน้ำมัน ดังนั้นก่อนการนำเอาเหล็กหรือเหล็กกล้าไปทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนจะต้องผ่านการทำความสะอาดเหล็กหรือเหล็กกล้ามีด้วยกันหลายวิธี เช่น การพ่นทราย การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ การใช้กรดไฮโดรคลอริก เมื่อชิ้นงานสะอาดดีแล้ว ก็จะต้องจุ่มน้ำยาประสาน (น้ำฟลักซ์) เพื่อช่วยให้การทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีหลอมเหลว เกิดเป็นผิวเคลือบขึ้นเป็นโลหะผสมกับพื้นโลหะเดิม ดังนั้นการทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนซึ่งมีความทนทานทางกายภาพมากกว่าการทาสี ลักษณะของผิวเคลือบสังกะสีจะแบ่งออกเป็นชั้น" โดยในแต่ละชั้นมีส่วนผสมของสังกะสีและเหล็กต่างกันไป [25]



รูปที่ 2.20 ลักษณะผิวเคลือบสังกะสี

การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนหรือแบบกัลวาไนซ์ ใช้มาตรฐานควบคุม คือ มาตรฐาน ASTM A123 ในการทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน เพื่อให้ชิ้นงานที่ทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนได้ความหนาผิวเคลือบสังกะสีตามข้อกำหนด มาตรฐานของ ASTM A123 มีข้อกำหนดความหนาของผิวเคลือบสังกะสี ดังนี้ [25]

1. เหล็กที่นำมาชุบมีความหนามากกว่าหรือเท่ากับ 6 มม. ต้องได้ความหนาผิวเคลือบสังกะสีไม่ต่ำกว่า 100 ไมครอน
2. เหล็กที่นำมาชุบมีความหนาน้อยกว่า 6 มม. ต้องได้ความหนาผิวเคลือบสังกะสีไม่ต่ำกว่า 86 ไมครอน

ดังในรูปที่ 2.20 ในแต่ละชั้นจะมีส่วนผสมของสังกะสีและเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ส่วนผสมของสังกะสีและเหล็ก

ชั้นผิวเคลือบสังกะสี	สังกะสี (%)	เหล็ก (%)
ชั้นเอด้า	100	-
ชั้นซีต้า	94	6
ชั้นเดลต้า	90	10
ชั้นแกรมมา	75	25

ในขณะที่แช่ชิ้นงานในบ่อสังกะสีหลอมเหลวจะต้องควบคุมให้มีความสัมพันธ์กัน เมื่อทุกอย่างอยู่ในระดับคุณภาพที่คงที่ความหนาผิวเคลือบสังกะสี และคุณภาพจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสังกะสีหลอมเหลวเวลาที่ใช้ในการชุบชิ้นงานและอัตราการความเร็วในการยกชิ้นงานขึ้นจากบ่อสังกะสีหลอมเหลว [25]

โดยทั่วไปกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน จะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. การกำจัดคราบไขมัน โดยการล้างด้วยโซดาไฟ
2. การกำจัดคราบสนิมและการกระตุ้นผิวชิ้นงานโดยการจุ่มในบ่อกรดกำมะถันหรือกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์
3. จุ่มฟลักซ์เพื่อกระตุ้นผิวให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีโดยใช้แอมโมเนียมคลอไรด์กับซิงค์คลอไรด์ผสมกัน
4. ทำการชุบสังกะสีในบ่อสังกะสีหลอมเหลว
5. จุ่มน้ำเพื่อระบายความร้อน
6. ตรวจสอบคุณภาพ
7. ตกแต่งและบรรจุ

ในกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนยังแบ่งเป็น 2 แบบ คือ

1. แบบ Wet Process คือ เมื่อชิ้นงานผ่านการจุ่มกรดกระตุ้นแล้ว จะนำมาล้างน้ำแล้วจุ่มผ่าน ฟลักซ์ที่ลอยอยู่บนผิวหน้าของสังกะสีหลอมเหลว
 2. แบบ Dry Process คือ เมื่อชิ้นงานผ่านการจุ่มกรดกระตุ้นผิวแล้ว จะนำไปจุ่มในบ่อน้ำฟลักซ์ก่อนแล้วปล่อยให้ฟลักซ์แห้งบนชิ้นงานหลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปจุ่มในสังกะสีหลอมเหลว
- ส่วนประกอบของสังกะสีที่ใช้ในการทำกัลวานซ์ ดังแสดงตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สารเคมีสังกะสีที่ใช้ในการทำเหล็กกล้าไนซ์

Composition (wt%)	Zn	Pb	Fe	Cd
	98.5	<1.3	<0.025	<0.4

2.8 การเชื่อมระหว่างเหล็กกับอลูมิเนียม

การเชื่อมระหว่างโลหะต่างชนิดเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมยานยนต์ เนื่องจากโครงสร้างของยานยนต์นั้นเหล็กกล้าเป็นวัสดุหลัก แต่เหล็กกล้านั้นมีน้ำหนักที่มาก ซึ่งส่งผลให้ใช้น้ำมันการขับเคลื่อนมาก และเป็นการเพิ่มมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการนำเหล็กไปเชื่อมกับโลหะต่างชนิด เช่น อลูมิเนียมเพื่อที่จะลดน้ำหนักของยานยนต์ แต่เนื่องจากการเชื่อมโลหะต่างชนิดนั้นไม่ใช่เรื่องง่ายเนื่องจากมีความต่างของคุณสมบัติทางกายภาพ การขยายตัวจุดหลอมเหลว เป็นต้น [26]

การเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กกล้า ซึ่งมีความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพของวัสดุ เช่น อลูมิเนียมมีการนำความร้อนและการขยายตัวสูงเกิดชั้นออกไซด์ที่ผิวได้ง่ายและมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าเหล็กกล้า ดังนั้นการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอม (Fusion Welding) จึงทำได้ยากและกระบวนการมีความร้อนสูงกับตำแหน่งที่เชื่อมหรือบริเวณที่มีการเติมโลหะเติมทำให้สามารถเกิดสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compounds: IMC) เช่น FeAl, Fe₃Al, FeAl₂, FeAl₃ และ Fe₂Al₅ ได้ง่ายที่ระหว่างรอยต่อ โดยชั้นสารประกอบเชิงโลหะเหล่านี้จะมีความแข็งและความเปราะสูง นอกจากนั้นยังเกิดปัญหาจากตำหนิที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่เชื่อมติดกับโลหะพื้นเหล็ก จนเกิดการขยายตัวของรอยแตกจากขอบเกรนไปยังเนื้อเกรน ดังนั้นการเชื่อมประสานแบบมิก (MIG Brazing) จึงเป็นวิธีการต่อวัสดุอีกวิธีหนึ่งที่สามารถต่อวัสดุต่างชนิด ได้ดีเนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการหลอมโลหะเติมต่ำกว่าจุดหลอมละลายของชิ้นงาน ความร้อนเกิดขึ้นและเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาสั้น จึงทำให้สามารถลดขนาดชั้นสารประกอบเชิงโลหะได้ โดยทั่วไปแล้วการเชื่อมประสานแบบมิกเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนซึ่งจะต้องควบคุมตัวแปรการเชื่อมประสาน (Brazing Parameters) หลายตัวแปร ในการกำหนดค่าตัวแปรที่เหมาะสมกับการเชื่อมประสานวัสดุแต่ละชนิดจึงทำได้ยาก กระบวนการเชื่อมประสานแบบมิกโดยทั่วไป นอกจากความชำนาญของผู้ควบคุมเครื่องแล้วจะต้องอาศัยคู่มือการใช้เครื่องสำหรับปรับตั้งค่าให้เหมาะกับวัสดุที่นำมาต่อกัน แต่สำหรับการต่อวัสดุต่างชนิดจึงยากที่จะปรับตั้งตัวแปรให้เหมาะสม [1]

2.9 การทดสอบแรงดึง

เป็นการทดสอบที่นิยมในการทดสอบหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุต่างๆ โดยทั่วไปในการทดสอบจะต้องเพิ่มแรงดึงขึ้นอย่างสม่ำเสมอถึงชิ้นงานให้ยืดออกและขาดออกจากกัน โดยหลักๆจากทดสอบกับชิ้นงานที่มีความเหนียวมากกว่าชิ้นงานที่มีความเปราะ ข้อมูลและการคำนวณในการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ได้แก่

ขีดจำกัดการยืดหยุ่น (Elastic Limit) ร้อยละการยืด (Percent Elongation) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ความแข็งแรงการดึง (Tensile Strength) จุดจำนน (Yield Point) และความแข็งแรงจำนน (Yield Strength) โดยทดสอบตามแบบมาตรฐานสากลที่หลากหลายที่จัดตั้งโดยสมาคมวิชาชีพ เช่น American Society of Testing and Materials (ASTM), มาตรฐานอังกฤษ, มาตรฐาน JIS และมาตรฐาน DIN ให้การทดสอบถูกเลือกตามการใช้งานที่ต้องการ แต่ละมาตรฐานอาจประกอบด้วยมาตรฐานการทดสอบที่หลากหลายซึ่งเหมาะสมกับวัสดุต่างๆ การทดสอบนี้ใช้กระบวนการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN EN10002-1 [27]

2.9.1 เครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น SHIMADZU Autograph AG-X-100KN

เป็นเครื่องทดสอบที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมา เพื่อเสริมประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และรวดเร็ว ให้กับผู้ใช้สูงสุดพร้อมฟังก์ชันการใช้งานที่ง่าย ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมผ่านจอร์บบสัมผัส 4 สี หรือ ชุดสมาร์ทคอนโทรลเลอร์ ผ่านตัวเครื่องเอง หรือการควบคุมโดยผ่านซอฟต์แวร์อัจฉริยะ

คุณลักษณะพิเศษของเครื่องทดสอบแรงดึง

- ควบคุมด้วยระบบปฏิบัติการระดับสูงและความปลอดภัย
- ผลการทดสอบมีคุณภาพสูง มีช่วงความละเอียดสูงถึง 1/1000 เท่าของโหลดเซลล์
- เรียงค่าผลการทำงานอย่างต่อเนื่อง
- มั่นใจด้วย Over-Stroke Limit และ Emergency-Stop Switch ให้เคลื่อนที่ถูกต้องทิศทาง ไม่เกินระยะที่กำหนดไว้

2.9.2 Color TFT Touch Panel Screen (Optional)

แสดงผลด้วยค่าแรงและระยะการเคลื่อนที่ แสดงผลและค่าสี่สมจริง ทันสมัย มีปุ่มการเคลื่อนที่กลับ (Return) มีฟังก์ชันตรวจสอบสภาพเครื่องเองได้ บนหน้าจอการทดสอบ Capacity เครื่อง 10N-50KN (Tabletop Type) 20KN-300KN (Floor Type) ขนาดแรง 20 KN ถึง 300 KN ความเร็วทดสอบ รุ่นปกติ 0.0005 ถึง 1,000 มม./นาที ความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงสุด 0.2 m/sec (5 kHz) ความแม่นยำของแรง +/- 1% ของค่าที่แสดง (รุ่นปกติ) ความแม่นยำของแรง +/- 0.3% ของค่าที่แสดง

2.9.3 ความเค้น (Stress)

ลักษณะของแรงต้านที่อยู่ภายในของโลหะที่มีความพยายามในการต้านทานต่อแรงภายนอกที่มากกระทำต่อวัสดุนั้นๆ จะหาค่าได้จากแรงภายนอกที่มากกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่าแรงที่กระทำ ภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะของแรงที่มากกระทำ

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางโดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน

2. ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง

3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำในทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้อะตอมของวัสดุเคลื่อนที่ออกจากกันจะมีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) ทหารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน

2.9.4 ความเครียด (Strain)

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อแรงภายนอกมากระทำทำให้รูปร่างของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอะตอมภายในเนื้อวัสดุ

2.9.5 การเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Deformation)

เป็นการเปลี่ยนรูปแบบในลักษณะ ปลอดภัยกระทำอะตอม เคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิมทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวงยางยืดและสปริง ถ้าเราดึงวัสดุ แล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) เป็นการเปลี่ยนรูปแบบที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม [17]

2.10 ลักษณะการแตกหักในการทดสอบการดึง

การแตกหักของรอยเชื่อมมี 2 ประเภท ได้แก่ การแตกหักแบบเปราะ (Brittle Fracture) และการเสียหายแบบเหนียว (Ductile Failure)

2.10.1 การแตกหักแบบเปราะ (Brittle Fracture)

การแตกแบบเปราะของวัสดุเกิดขึ้นเมื่อการกระทำของแรงทางกลมีค่าสูงกว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุ ทำให้วัสดุแตกออกจากกันเป็นสองชิ้นหรือมากกว่า โดยปรากฏให้เห็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation) หรือการยืดตัวน้อยมากปัจจัยที่จะแสดงตัวเป็นจุดเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวและนำไปสู่การแตกแบบเปราะได้แก่ลักษณะเฉพาะของวัสดุและจุดบกพร่อง เช่น ร่องหลุม ช่องว่างขนาดเล็ก (Void) สิ่งเจือปน (Inclusion) รอยร้าว (Crack) และความเค้นตกค้าง (Residual Stress) การแตกร้าวมักเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วขณะที่วัสดุกำลังรับแรง มีการดูดซับพลังงานในปริมาณน้อย [27]

2.10.2 การเสียหายแบบเหนียว (Ductile Failure)

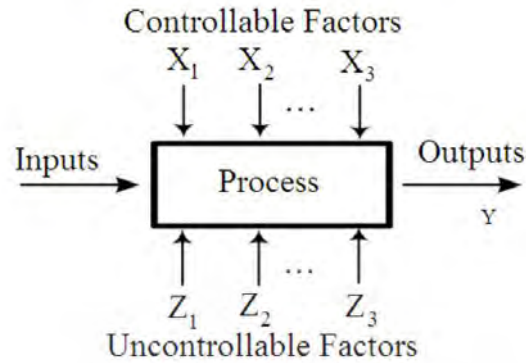
การแตกแบบเหนียวเป็นรูปแบบความเสียหายที่มีลักษณะปรากฏตรงกันข้ามกับการแตกแบบเปราะ โดยการแตกแบบเหนียวจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุรับแรงหรือความเค้นสูงเกินไปจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่าง

ถาวร โดยความเค้นที่กระทำมีค่ามากกว่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength) และมีผลทำให้วัสดุแยกออกจากกันเป็นสองชิ้น กระบวนการเสียหายอย่างถาวรที่เกิดขึ้นจะมีการดูดซับพลังงานปริมาณมาก (เมื่อเทียบกับ การแตกแบบเปราะ) การเริ่มต้นของรอยแตกแบบเหนียวมีลักษณะคล้ายกับที่เกิดขึ้นกับการแตกแบบเปราะ คือ จะเกิดบริเวณจุดบกพร่องของวัสดุ เช่น ช่องว่างขนาดเล็ก (Void) และสิ่งเจือปน (Inclusion) ถ้าวัสดุเหนียวเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร จะทำให้ช่องว่างขนาดเล็กมีการเชื่อมรวมตัวกัน (Void Coalescence) กลายเป็นรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-Crack) และขยายไปเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่จนเกิดการแตกหักในที่สุด ซึ่งมีลักษณะเป็น Cup and Cone และกระบวนการขยายตัวของรอยร้าวจากการแตกหักแบบเหนียวค่อนข้างจะช้า [27]

2.11 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การออกแบบการทดลอง (Design of experiments) เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการด้านสถิติ เพื่อออกแบบการทดลองปัจจัยต่างๆ Montgomery กล่าวว่า การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ หมายถึง กระบวนการวางแผนการทดลองมีจุดประสงค์ให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติที่จะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ โดยการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ มีเป้าหมายเพื่อค้นหาระดับที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งปัจจัยจะแบ่งได้ออกเป็น 2 ปัจจัย ปัจจัยที่ควบคุมได้ เช่น ค่ากระแสไฟฟ้า และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ เช่น อุณหภูมิจากการเชื่อม เป็นต้น

ระบบการทดลองทั่วไปจะมีส่วนประกอบคือทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการทดลองนั้นๆ ได้แก่ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องเชื่อม เป็นต้น และมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ ซึ่งมีผลกระทบต่อผลลัพธ์ของระบบ ดังในรูปที่ 2.21 ซึ่งโดยปกติแล้วการออกแบบการทดลองที่ดีจะมุ่งเน้นให้กำจัดหรือลดอิทธิพลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ นอกจากนี้การออกแบบการทดลองที่มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาระดับปัจจัยที่จะส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ออกมาได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจำเป็นที่จะใช้แบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาเป็นตัวแทนและอธิบายค่าความสัมพันธ์และอิทธิพลของปัจจัยต่างๆหลายปัจจัยพร้อมกัน ในช่วงเวลาทดลองเดียวกันที่มีผลต่อผลลัพธ์ของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองที่ใช้จำนวนการทดลองที่น้อยกว่าการศึกษาแต่ละปัจจัย ดังนั้นการออกแบบการทดลองจึงเป็นการวางรูปแบบการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของปัจจัยอย่างมีเป้าหมายเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงต่อผลลัพธ์ของระบบ [28]



รูปที่ 2.21 ลักษณะและองค์ประกอบของกระบวนการทดลอง

โดยปกติแล้วการออกแบบและปรับปรุงผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตโดยใช้การออกแบบการทดลองมีจุดประสงค์ เพื่อค้นหาตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่สามารถควบคุมในเชิงปฏิบัติ ซึ่งส่งผลต่อตัวแปรตามหรือผลลัพธ์ โดยลดความผันแปรของผลลัพธ์ให้น้อยที่สุดในทางตรงกันข้ามทำให้ผลลัพธ์อยู่ในเป้าหมายหรือความต้องการของการออกแบบมากที่สุด โดยที่การกำหนดตัวแปรอิสระและระดับตัวแปรอิสระต้องอยู่ในระดับเหมาะสมที่สุด เพื่อเป็นการลดความแปรปรวนของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมที่จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการ (Noise) ได้ในเชิงปฏิบัติ ในส่วนของหลักพื้นฐานที่สำคัญอย่างมากในการออกแบบการทดลองทุกรูปแบบ มี 3 หลักการ ดังนี้คือ การสุ่ม (Randomization) การทำการทดลองซ้ำ (Replication) และการจัดกลุ่ม (Blocking) [29]

1. การสุ่ม คือ การกำหนดโอกาสความเป็นไปของลำดับการทดลองแต่ละตัวให้เท่ากัน เพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออกไปให้กับระดับการศึกษาทุกระดับอย่างใกล้เคียงกัน ซึ่งจะทำให้ข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกันและจะส่งผลให้ลดความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้

2. การทำการทดลองซ้ำ คือ การทดลองซ้ำอีกเป็นจำนวนที่กำหนด เพื่อลดหรือกำจัดเอาปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออกจากกระบวนการ และยังสามารถสังเกตความคลาดเคลื่อนเพื่อนำไปประเมินปัจจัยที่อาจจะมีอิทธิพลต่อกระบวนการ

3. การจัดกลุ่ม คือ การจัดกลุ่มสิ่งๆ ที่เหมือนกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน เพื่อลดความผันแปรจากความแตกต่างของปัจจัยหรือหน่วยตัวอย่าง

2.11.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

สำหรับขั้นตอนการออกแบบการทดลอง เพื่อการออกแบบและปรับปรุงผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิต ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ [30]

1. การทำความเข้าใจและกำหนดปัญหาที่ต้องการศึกษา โดยปกติแล้วการระบุและมองปัญหาที่มีอยู่ในเชิงการออกแบบการทดลองอาจจะเป็นเรื่องที่ซับซ้อน แต่เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการทบทวนแนวความคิดทั้งหมดต่อปัญหาและวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยจะต้องระบุให้มีความชัดเจน เพื่อสามารถเข้าใจปัญหา หาสาเหตุและวิธีการแก้ไขอย่างถูกต้อง

2. กำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ศึกษา การทดลองจะต้องระบุปัจจัยที่จะศึกษาและระดับของปัจจัยเหล่านั้น โดยในขั้นตอนนี้จะต้องมีความเข้าใจในกระบวนการและความรู้ทางด้านทฤษฎีมาเกี่ยวข้อง ที่สำคัญคือ การระบุปัจจัยที่มีความเป็นไปได้ที่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ของกระบวนการทั้งหมด กำหนดตัวแปรตอบสนองหรือผลลัพธ์ที่ต้องการศึกษา เป็นการกำหนดตัวชี้วัดที่เป็นผลลัพธ์ของกระบวนการออกมาในเชิงคุณลักษณะที่สามารถวัดได้

3. การเลือกแบบการทดลอง หลังจากทีระบุปัญหาและกำหนดระดับของปัจจัยกำหนดตัวแปรตอบสนองเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อมาคือการกำหนดรูปแบบของการทดลอง ทั้งในส่วนของลำดับของการทดลอง จำนวนในการทำซ้ำ พิจารณาว่าการจัดกลุ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำเป็นต้องใช้ในการทดลองหรือไม่ รวมถึงข้อจำกัดลำดับการทดลองต่างๆ

4. การดำเนินการทดลอง เมื่อดำเนินการทดลองจะต้องมีการติดตามผลลัพธ์ของกระบวนการอย่างสม่ำเสมอเพื่อยืนยันว่าการทดลองเป็นไปตามที่วางแผนไว้ เนื่องจากว่าการเกิดความผิดพลาดในการทดลองอาจจะทำให้กระบวนการทั้งหมดใช้การไม่ได้

5. การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ การใช้กระบวนการทางสถิติเพื่อวิเคราะห์ผลของข้อมูลออกมาให้อยู่ในรูปแบบข้อสรุปตรงตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง สามารถใช้ซอฟต์แวร์ต่างๆ วิธีในการดูกราฟ เป็นสิ่งสำคัญในการช่วยวิเคราะห์ข้อมูล

6. การสรุปผลการทดลอง หลังจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแล้ว การสรุปผลการทดลองจะช่วยตอบปัญหาที่ได้กำหนดขึ้น เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ ระดับของปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมเพื่อได้ผลลัพธ์ของระบบที่ต้องการ

2.11.2 คำศัพท์พื้นฐานเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง

สำหรับการออกแบบการทดลอง จะต้องทราบคำศัพท์พื้นฐานเพื่อเข้าใจหลักการและกระบวนการออกแบบการทดลองได้ดังต่อไปนี้ [31] ,[32]

1. การออกแบบทดลอง (Experiment Design) เป็นการออกแบบทั่วไปของการทดลองซึ่งเกี่ยวข้องกับจำนวนและการจัดการตัวแปรอิสระ รวมทั้งการสุ่มหรือการเลือกตัวอย่าง และการกำหนดเงื่อนไขในการทดลอง เพื่อควบคุมตัวแปรแทรกซ้อนหรือตัวแปรเกินไม่ให้มีผลต่อตัวแปรตาม การออกแบบการทดลองที่ดีจะต้องดำเนินการได้ง่าย และให้คำตอบที่ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษา

2. ตัวแปรตอบสนอง (Response) คือ ตัวแปรผลลัพธ์ (Output) หรือลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristic) ที่ต้องการควบคุมให้ได้ตามความต้องการหรือตามที่กำหนด

3. ตัวแปร (Variable) หมายถึงลักษณะของสิ่งที่สนใจศึกษา ซึ่งอาจเป็น คน พืช สัตว์ หรือสิ่งของที่สามารถเปลี่ยนค่าได้ตามเวลา การแปรเปลี่ยนค่าของตัวแปรนั้น เรียกว่าระดับของตัวแปร

4. ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) บางครั้งเรียกว่าปัจจัย (Factor) หมายถึงตัวแปรที่เกิดขึ้นก่อน และเป็นตัวแปรเหตุที่ทำให้ผลหรือสิ่งที่เกี่ยวข้องเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะหรือแปรสภาพไป

5. ตัวแปรตาม (Dependent Variable) หมายถึงตัวแปรที่เกิดขึ้นที่หลังหรือต้องเปลี่ยนแปลงแปรสภาพหรือคุณลักษณะไปตามอิทธิพลของตัวแปรอิสระ ตัวอย่างของตัวแปรอิสระ ระดับของตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม

6. ปัจจัย (Factor) หมายถึง ตัวแปรนำเข้า (Input) ที่ใช้ในกระบวนการหรือระบบที่ต้องการทดลอง ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor)

7. ระดับปัจจัย (Level) คือ จำนวนค่าของแต่ละปัจจัยหลักที่มีการเปลี่ยนแปลงในการทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยนั้นๆ

8. วิธีปฏิบัติ (Treatment) หมายถึงระดับต่างๆ ของปัจจัยหรือวิธีการต่างๆ ที่ใช้ปฏิบัติต่อหน่วยทดลอง แล้วหน่วยทดลองจะส่งผลตอบสนองออกมาเป็นข้อมูล เพื่อนำไปเปรียบเทียบอิทธิพลของวิธีปฏิบัติ ตามวัตถุประสงค์ของการทดลองโดยที่วิธีปฏิบัติ อาจมาจากปัจจัยเดี่ยวหรือหลายปัจจัยร่วมกัน (Treatment Combination) ก็ได้

9. หน่วยทดลอง (Experimental Unit) หมายถึง หน่วยหรือกลุ่มของสิ่งทดลองที่ใช้ในการทดลองโดยได้รับอิทธิพลของวิธีปฏิบัติเดียวกันในการกระทำครั้งใดครั้งหนึ่ง

10. หน่วยตัวอย่าง (Sampling Unit) หมายถึงส่วนหนึ่งของหน่วยทดลองหรือทั้งหมดของหน่วยทดลองซึ่งใช้วัดอิทธิพลของวิธีปฏิบัติ ตามจุดประสงค์ของการทดลองความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

2.11.3 รูปแบบของการออกแบบการทดลอง

แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design Experiment) จะใช้ค้นหาอิทธิพลปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 2 ปัจจัยคือ ปัจจัยหลัก (Main Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยนั้นที่ส่งผลต่อตัวแปร ตอบสนองด้วยตัวของปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วม (Interaction Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งจะเปลี่ยนไปเมื่อปัจจัยอื่นที่มีผลร่วมมีการเปลี่ยนแปลง โดยทั่วไปแล้ว มีรูปแบบคือ $A \times B \times C \times \dots$ แฟกทอเรียล เช่น $2 \times 3 \times 4$ แฟกทอเรียล และมีรูปแบบแผนการทดลองของแฟกทอเรียลที่สำคัญ เช่น 2^k ในการกำหนดระดับปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับเท่านั้น เช่น 2^2 หรือ 2^4 และการทดลองหลายปัจจัยที่กำหนดระดับปัจจัยไว้ 3 ระดับใน k ปัจจัยเช่น 3^2 หรือ 3^4 เป็นต้น รูปแบบของการออกแบบการทดลองมีหลายหลายชนิด โดยแต่ละรูปแบบมีความแตกต่างกันของวิธีการและการนำไปใช้งานขึ้นอยู่กับผลลัพธ์ที่ต้องการ [29], [33]

1. General Full Factorial Design คือการทดลองที่ง่ายที่สุดเพราะสามารถกำหนดระดับของปัจจัยเป็นที่ระดับก็ได้ แต่หากกำหนดระดับของปัจจัยมากเท่าไรก็จะส่งผลให้จำนวนครั้งในการทดลองมีจำนวนมากตามไปด้วยนอกจากนี้ยังใช้ได้ทั้งกรณีที่ตัวแปรเป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

2. Factorial Design คือการทดลองที่ทุกปัจจัยมีแค่ 2 ระดับเท่านั้น โดยปกติแล้วมักกำหนดเป็น High กับ Low เพื่อลดจำนวนการทดลองลงจากกรณีของ General Full Factorial Design โดยที่มีความนิยม

นำไปใช้กับกรณีตัวแปรเป็นค่าต่อเนื่องและมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น เนื่องจากว่าการคำนวณจะสมมติให้ ความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองในทุกๆ ปัจจัยเป็นแบบเส้นตรงทั้งหมด

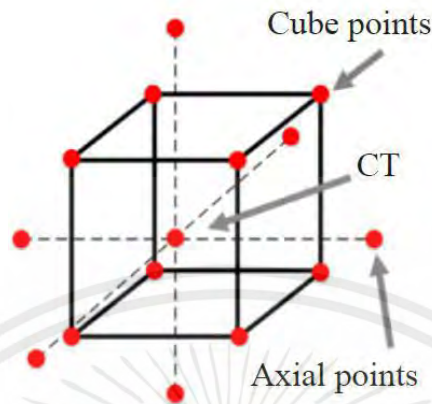
3. A Single Replicate of 2^k Factorial Design คือการทดลองที่ทุกปัจจัยมีเพียง 2 ระดับและในแต่ละชุดการทดลองจะทำซ้ำเพียงครั้งเดียวเท่านั้น

4. 2^{k-P} Fractional Factorial Design คือการทดลองที่ทุกปัจจัยมีแค่ 2 ระดับ แต่ไม่ได้ทำครบทุกการทดลองจะทำการทดลองเพียงบางส่วนเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามจำนวนครั้งการทดลองที่ลดลงอาจมีผลกระทบต่อ การวิเคราะห์ผลการทดลอง ยิ่งไปกว่านั้นการลดจำนวนครั้งการทดลองลดลงมากเท่าใด ความน่าเชื่อถือของการทดลองจะลดลงไปด้วย และนอกจากนี้บางการทดลองไม่สามารถประมาณค่าความผันแปรจากการทดลองจะส่งผล ให้การวิเคราะห์ (ANOVA) ไม่สามารถทำได้ จึงทำให้การสรุปผลการทดลองมีความยากมากขึ้น นั้นหมายความว่า การเลือกแบบการทดลองจำเป็นต้องพิจารณาทั้งความสามารถในการทดลองและข้อมูลที่จะได้รับควบคู่กันไปด้วย นอกจากนี้วิธีการออกแบบการทดลองที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้วยังมีตัวแบบการทดลองแบบอื่นๆ อีกหลายรูปแบบ เช่น 2^k Factorial Design with Center Point หรือ Plackett-Burman ที่ใช้ในกรณีที่ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับในกรณีที่ Uncontrollable Factor ส่งผลมากจึงจำเป็นต้องใช้หลักการ Blocking นอกเหนือจากนี้ในการ ออกแบบเพื่อช่วยเรื่องความแม่นยำในการทดลองเช่น Randomized Complete Block, Design Latin Square Design หรือ Graeco-Latin Square Design

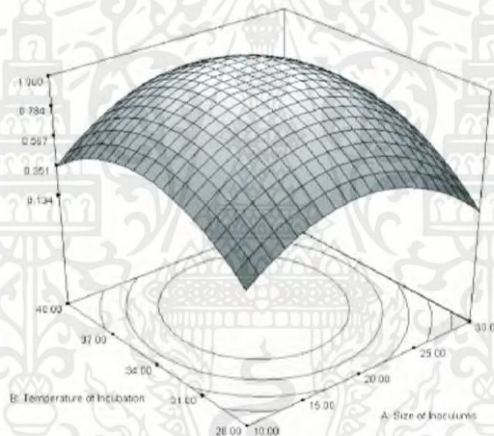
5. การออกแบบพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ และทาง สถิติที่มีประโยชน์มาใช้ในการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจขึ้นอยู่กับหลาย ตัวแปร และที่สำคัญคือมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ เช่น ผลตอบสนอง y เป็นฟังก์ชันของปัจจัย x_1, x_2 ซึ่งวิธีการทำจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการทดสอบว่าบริเวณการค่าระดับปัจจัยที่ ศึกษาในปัจจุบันเป็นบริเวณที่สามารถให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุดหรือไม่ โดยทำการทดลองแฟกทอเรียลแบบมีจุด ศูนย์กลาง (Center Points) ถ้าพบว่าบริเวณปัจจุบันไม่สามารถให้ค่าที่ดีที่สุด ให้ทำการหาบริเวณใหม่โดยใช้วิธีการ Steepest Ascent เพื่อหาเส้นทางที่มีความเป็นไปได้ซึ่งจะให้ค่าตอบสนองที่ใกล้เคียงจุดที่ดีที่สุด และขั้นตอนที่ สองเป็นการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้การทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง(Response Surface Experiment) เมื่อ พบว่าบริเวณที่ทดสอบมีความเป็นไปได้ว่าสามารถให้ค่าที่ดีที่สุดจากการทำวิธีการ Steepest Ascent

การทดลองพื้นผิวตอบสนองที่นิยมใช้มี 2 แบบ ได้แก่ การทดลองแบบ CCD (Central Composite Design) และการทดลองแบบ BBD (Box-Behnken Design) ซึ่งการทดลองแบบ CCD จะประกอบไปด้วยการ ทดลอง 2 ชนิด ได้แก่ การทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบมีจุดกึ่งกลาง (Cube Points and CT) และการทดลอง นอกบริเวณของการทดลองแฟกทอเรียล (Axial Points) ดังในรูปที่ 2.22 และผลลัพธ์โดยส่วนใหญ่จะแสดงในรูป ของกราฟิก โดยที่พื้นผิวตอบสนองจะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อช่วยให้สามารถสังเกตรูปร่างและ

แนวโน้มของพื้นผิวตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะสร้างกราฟในรูปแบบเส้นโครงร่าง (Contour Plot) หรือกราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติดังในรูปที่ 2.23 [30], [32]



รูปที่ 2.22 การทดลองแบบ CCD (Central Composite Design)



รูปที่ 2.23 กราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติ

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการต่อวัสดุต่างชนิดระหว่างอลูมิเนียม 1100 และเหล็กเคลือบสังกะสีโดยการเล่นประสานแบบมิก โดยศึกษาผลกระทบของปัจจัยในการเล่นประสาน ได้แก่ ความเร็วในการเล่นประสาน กระแสไฟที่ใช้ในการเล่นประสาน อัตราการป้อนโลหะเติม ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวทอร์ช และมุมที่ใช้ในการเล่นประสาน ได้ใช้เทคนิคเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^{5-1} ทั้งหมด 48 การทดลอง โดยนำผลการทดลองจากการทดสอบแรงดึงเดือนมาวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละปัจจัย โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อรอยเชื่อม ได้แก่ ปัจจัยหลักกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเล่นประสาน และมุมในการเล่นประสาน อิทธิพลร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเล่นประสานกับอัตราป้อนโลหะเติม อิทธิพลร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเล่นประสานกับระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวทอร์ช และอิทธิพลร่วมระหว่างระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวทอร์ชกับมุมที่ใช้ในการเล่นประสาน [1]

การศึกษาคุณสมบัติของโลหะระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้าไนซ์โดยการเชื่อมแบบมิก โดยในการทดลองนั้นใช้อลูมิเนียมเกรด AA6061-T6 หนา 2 มิลลิเมตร เชื่อมกับเหล็กกล้าไนซ์ หนา 1 มิลลิเมตร โดยใช้ลวดเชื่อม Al-5Si ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตรในการเชื่อม และทำการศึกษาลักษณะของรอยเชื่อม โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม และคุณสมบัติของรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมแบบมิกโดยการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหวิทยาด้วยเครื่องมือ FESEM, EDS และ HRTEM [29]

การศึกษาความแข็งแรงของรอยเชื่อมแบบเกยของโลหะต่างชนิดระหว่างอลูมิเนียม AA6061 และเหล็กกล้าคาร์บอนโดยการทดสอบการรับแรงดึง ซึ่งชิ้นงานของโลหะทั้ง 2 ชนิดมีขนาดเท่ากันคือ กว้าง 35 มิลลิเมตร ยาว 160 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร และเจาะรู 3 แบบบนเหล็กกล้าคาร์บอน ได้แก่แบบหนึ่งรู, สองรู และ ช่องเปิดแคบยาว และใช้ลวดเชื่อม ER4043 เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตรในการเชื่อม โดยมีปัจจัยที่ศึกษาทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ลักษณะรูบนเหล็กกล้าคาร์บอน แรงดันไฟเชื่อม ปริมาณแก๊สคลุม และ ความเร็วลวดเชื่อม ซึ่งแต่ละปัจจัยนั้นมี 3 ระดับ โดยจากการทดสอบการดึงพบว่ารอยเชื่อมแบบเกยใช้ได้กับการเชื่อมโลหะต่างชนิด และระดับปัจจัยที่ทำให้รอยเชื่อมมีค่าความสามารถในการรับแรงดึงสูงที่สุดก่อนที่รอยเชื่อมจะเกิดการแตกหัก ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนที่เจาะ 2 รู แรงดันไฟเชื่อม เท่ากับ 1 โวลต์ ความเร็วลวดเชื่อม เท่ากับ 3 เมตรต่อนาที ปริมาณแก๊สคลุม 10 ลิตรต่อนาที โดยสามารถรับแรงดึงได้ เท่ากับ 100.57 เมกะปาสคาล [34]

การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้าแบบใช้แก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding) สำหรับเหล็กกล้า เอสที 37 โดยใช้ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^4) โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับในการคัดกรองปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟเชื่อม แรงดันไฟเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม และปริมาณแก๊สคลุม ให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความต้านทานแรงดึงของตะเข็บรอยเชื่อม จากนั้นใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) เพื่อวิเคราะห์หาคำตอบที่ดีที่สุด โดยจากผลการทดลองความต้านแรงดึงที่ระดับ $\alpha = 0.05$ พบว่าค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ คือกระแสไฟเชื่อม เท่ากับ 125 แอมแปร์ แรงดันไฟเชื่อม เท่ากับ 27 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม เท่ากับ 14.2 นิ้วต่อนาที ซึ่งได้แรงดึงสูงสุดที่ 599.379 นิวตันต่อตารางเมตร [35]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการและกระบวนการดำเนินงานวิจัยเรื่อง การศึกษาค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมแบบมิกระหว่างเหล็กกล้าไนซ์และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
2. การออกแบบการทดลองเบื้องต้น
3. การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย
4. การทดลองบนค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อยืนยันผล
5. กระบวนการและขั้นตอนในการเชื่อมแบบมิก
6. กระบวนการทดสอบคุณสมบัติทางกลโดยการทดสอบการรับแรงดึงเดือน

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 และเหล็กกล้าไนซ์ ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับดังนี้

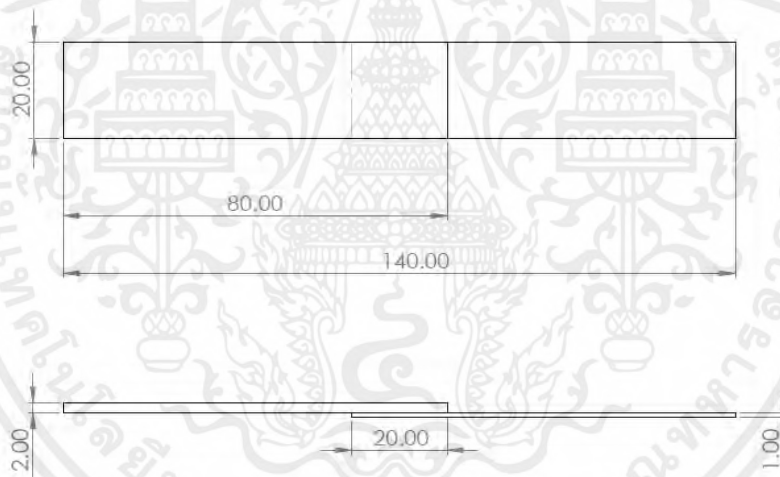
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของอลูมิเนียมอัลลอย AA6061

Chemical Composition	Wt%
Aluminum (Al)	balance
Copper (Cu)	0.15 – 0.4
Chromium (Cr)	0.04 – 0.35
Silicon (Si)	0.4 – 0.8
Magnesium (Mg)	0.8 – 1.2
Manganese (Mn)	0.15
Iron (Fe)	0.7
Titanium (Ti)	0.15
Zinc (Zn)	0.25
Other Element	0.05

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไนซ์

Chemical Composition	Wt%
Iron (Fe)	balance
Carbon (C)	0.0024
Aluminum (Al)	0.042
Silicon (Si)	0.52
Magnesium (Mg)	0.91

ชิ้นงานทดสอบนั้นจะถูกเตรียมจากอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 และเหล็กกล้าไนซ์ โดยมีการกำหนดขนาดชิ้นงานเพื่อรับการทดสอบการดึง คือ อลูมิเนียมอัลลอย AA6061 ขนาด กว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 80 มิลลิเมตรหนา 3 มิลลิเมตร และเหล็กกล้าไนซ์ ขนาด กว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 80 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร และมีระยะเกยระหว่างโลหะทั้ง 2 ชนิดอยู่ที่ 20 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน DIN EN10002-1 ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขนาดชิ้นงานของเหล็กกล้าไนซ์ และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061

2. อุปกรณ์สำหรับจับยึด (Fixture) โดยมีทั้งหมด 2 ชิ้นที่ใช้ในการทดลองนี้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 อุปกรณ์สำหรับจับยึดชิ้นงาน มีหน้าที่ในการจับยึดตัวชิ้นงานให้อยู่ในตำแหน่งที่กำหนด ทำจากเหล็ก ซึ่งนำมาทำการตัดและเจาะตามแบบในภาคผนวก ผก. 1

2.2 อุปกรณ์สำหรับจับยึดเครื่องเชื่อมแบบมิก มีหน้าที่ในการจับยึดด้ามจับของหัวเชื่อม เพื่อไม่ให้หัวเชื่อมขยับตอนที่เกิดการอาร์คในระหว่างทำการเชื่อม ทำจากเหล็กตามแบบในภาคผนวก ผก. 2 - ผก. 6

จากนั้นนำอุปกรณ์สำหรับจับยึดทั้ง 2 แบบ ทำการเชื่อมกับแผ่นเหล็กเพื่อให้ได้ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์จับยึดเครื่องเชื่อมแบบมิกและอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานตามที่ต้องการดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์จับ (Fixture) ที่ใช้สำหรับการทดลอง

3. เครื่องเชื่อมมิก เครื่องหมายการค้า FRONIUS รุ่น TransPuls Synergic 2700 ALU edition ควบคุม
ตัวแปรการเชื่อมด้วยไมโครโพรเซสเซอร์และซอฟต์แวร์ของเครื่องเชื่อม



รูปที่ 3.3 เครื่องเชื่อมมิก Fronius รุ่น TransPuls Synergic 2700 ALU edition

4. ลวดเชื่อมอลูมิเนียม ER4043 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร



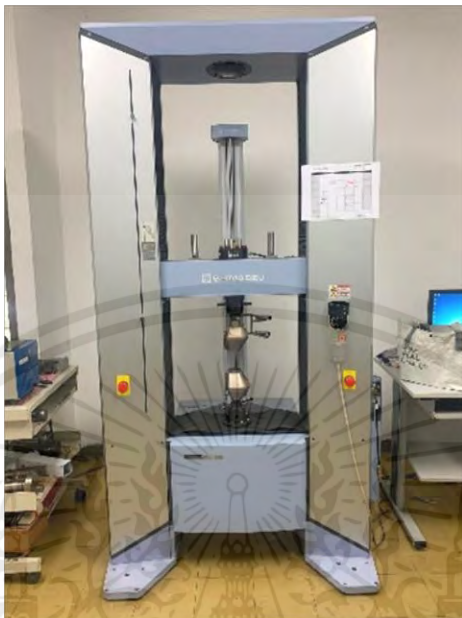
รูปที่ 3.4 ลวดเชื่อมอลูมิเนียม ER4043 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร

5. แก๊สอาร์กอน ใช้สำหรับการปกคลุมบริเวณแนวเชื่อม เพื่อให้ประสิทธิภาพของการอาร์คเสถียรมากขึ้น



รูปที่ 3.5 ถังแก๊สอาร์กอน

6. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test Machine) รุ่น SHIMADZU Autograph AG-X-100KN เพื่อทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ได้ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบมิก



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น SHIMADZU Autograph AG-X-100KN

3.2 การออกแบบการทดลองเบื้องต้น

การออกแบบการทดลอง โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วย Factorial Design แบบ 2^k Factorial Design มาเพื่อเป็นการคัดกรองปัจจัยต่างๆ ให้เหลือเฉพาะปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมแบบมิก ระหว่างอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 และเหล็กกล้าไนซ์ โดยมีปัจจัยที่ศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟเชื่อม (Welding Current) ระยะอาร์ค (Arc Length) และมุมในการเชื่อม (Welding Angle) โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้ ตามลำดับ

1. การทำความเข้าใจและกำหนดปัญหาที่ต้องการศึกษา การเชื่อมแบบมิกระหว่างอลูมิเนียม AA6061 และ เหล็กกล้าไนซ์นั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติของอลูมิเนียมและเหล็กกล้า เช่น จุดหลอมเหลวของโลหะที่ต่างชนิดกัน และยังเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นต้นเหตุของความเปราะของรอยเชื่อม ทำให้รอยเชื่อมเกิดการแตกหัก ซึ่งส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงที่ต่ำ จึงไม่สามารถใช้การเชื่อมแบบมิกที่ใช้ความร้อนสูงในการเชื่อม สำหรับการเชื่อมอลูมิเนียมและเหล็ก จึงได้มีการปรับปรุงการเชื่อมแบบมิกเพื่อให้สามารถเชื่อมระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กกล้าได้ โดยการเปลี่ยนลวดเชื่อมจากลวดเชื่อมเหล็กกล้าที่ใช้ในการเชื่อมเหล็กทั่วไปเป็นลวดเชื่อม Al5Si หรือ Al12Si เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่ามาก ส่งผลให้รอยเชื่อมนั้นมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่นอกเหนือจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมด้วยเช่นกัน โดยการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การทดสอบการรับแรงดึงเฉือน ที่จะแสดงว่ารอยเชื่อม

นั้นสามารถรับแรงดึงเดือนได้เท่าไร โดยยิ่งรับแรงดึงเดือนได้มากแสดงว่ารอยเชื่อมนั้นมีความแข็งแรงมาก และระดับปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเดือนสูงที่สุด งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดประเด็นที่ต้องการศึกษานั้นคือ การศึกษา ค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมแบบมิกระหว่างเหล็กกล้าไนซ์และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061

2. กำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่ศึกษา ในการศึกษาเกี่ยวกับระดับปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมมีค่ามากที่สุด จำเป็นต้องควบคุมปัจจัยการเชื่อมแบบมิกให้คงที่ ซึ่งปกติแล้วปัจจัยที่จะถูกควบคุมคือ กระแสไฟเชื่อม แรงดันไฟฟ้า มุมในการเชื่อม ระยะเวลาในการอาร์ค ระยะอาร์ค และ ความเร็วในการเดินรอยเชื่อม แต่เนื่องจากกระแสไฟเชื่อม และ แรงดันไฟฟ้านั้นมีความสัมพันธ์กันแบบแปรผันตรง ทำให้สามารถปรับค่าได้แค่ตัวใดตัวหนึ่ง ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้ได้กำหนดปัจจัยที่ต้องการศึกษาการเชื่อมแบบมิก คือ กระแสไฟเชื่อม ระยะอาร์ค และ มุมในการเชื่อม ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับและ 1 จุดศูนย์กลาง (Center Point) แสดงดังตารางที่ 3.4 โดยที่มีการกำหนดระยะเวลาในการอาร์คเป็นเวลา 0.5 วินาที และ เวลาในการคลุมของแก๊สก่อนอาร์คเป็นเวลา 0.5 วินาที และเวลาในการคลุมของแก๊สหลังอาร์คเป็นเวลา 1 วินาที ดังตารางที่ 3.3 และเนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการทำการเชื่อมแบบมิกนั้นไม่ใช่แบบอัตโนมัติ จึงทำให้การเดินรอยเชื่อมให้สม่ำเสมอเป็นไปได้ยาก จึงได้กำหนดให้ความเร็วในการเดินรอยเชื่อมเป็น 0 มิลลิเมตรต่ออนาที ดังตารางที่ 3.3 เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่สม่ำเสมอที่สุด

ตารางที่ 3.3 ค่าปัจจัยที่ถูกกำหนดให้คงที่

ปัจจัยคงที่			
ระยะเวลาในการอาร์ค (วินาที)	ระยะเวลาในการคลุม ของแก๊สก่อนอาร์ค (วินาที)	ระยะเวลาในการคลุม ของแก๊สหลังอาร์ค (วินาที)	ความเร็วในการเดิน รอยเชื่อม (มิลลิเมตรต่ออนาที)
0.5	0.5	1	0

ตารางที่ 3.4 ค่าระดับปัจจัยที่ศึกษาในการเชื่อมแบบมิกในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น

ระดับปัจจัย	ปัจจัยที่ศึกษา		
	กระแสไฟเชื่อม (แอมแปร์)	ระยะอาร์ค (มิลลิเมตร)	มุมในการเชื่อม (องศา)
1	80	8	50
2	100	12	70
จุดศูนย์กลาง	90	10	60

3. กำหนดตัวแปรตอบสนอง หรือผลลัพธ์ที่ต้องการศึกษา จากการศึกษาเกี่ยวกับค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม รอยเชื่อมที่ตึ้นนั้นต้องมีความแข็งแรงและต้องไม่เกิดการแตกหักขึ้นในระดับการใช้งานที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งสามารถทดสอบค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมได้จากการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน ดังนั้นตัวแปรตอบสนองที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ คือ ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมแบบมิก ระหว่างเหล็กกล้าไนซ์ และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 โดยการตรวจสอบจะทำการทดสอบการดึงด้วยเครื่องทดสอบการดึง ซึ่งชิ้นงานทดสอบจะผ่านการเชื่อมตามการออกแบบชิ้นงานอ้างอิงตามมาตรฐาน DIN EN10002-1

4. การเลือกการออกแบบการทดลอง กำหนดให้ทำซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อทดสอบการรับแรงดึงเฉือนในทุกๆ การทดลอง (Treatment) และทำซ้ำ 3 ครั้งที่จุดศูนย์กลางเพื่อเป็นค่าเปรียบเทียบ โดยให้ความสำคัญกับค่าความผันแปรที่สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ Regression ซึ่งค่าได้นั้นควรมีค่ามากกว่า 90% เพื่อแสดงถึงความแม่นยำของผลการทดลองที่วิเคราะห์ได้ โดยสามารถสร้างตารางการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design ได้ตามตารางที่ 3.5



ตารางที่ 3.5 ตารางการทดลอง Factorial Design เพื่อรับการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน

ลำดับการทดลอง	การทำซ้ำ ครั้งที่	ปัจจัย			ค่าแรงดึงเฉือน (นิวตัน)
		กระแสไฟเชื่อม (แอมแปร์)	ระยะอาร์ค (มิลลิเมตร)	มุมในการเชื่อม (องศา)	
1	1	80	8	50	
2	1	100	8	50	
3	1	80	12	50	
4	1	100	12	50	
5	1	80	8	70	
6	1	100	8	70	
7	1	80	12	70	
8	1	100	12	70	
9	2	80	8	50	
10	2	100	8	50	
11	2	80	12	50	
12	2	100	12	50	
13	2	80	8	70	
14	2	100	8	70	
15	2	80	12	70	
16	2	100	12	70	
17	1	90	10	60	
18	2	90	10	60	
19	3	90	10	60	

5. การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ มีการใช้กระบวนการทางสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์ผลของการทดลองมาอยู่ในรูปสรุปตามวัตถุประสงค์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ Minitab version 18 มาช่วยในการวิเคราะห์ ด้วยวิธี (ANOVA) ซึ่งมีการพิจารณาค่าความถูกต้องของการทดลองและค่าความแปรปรวน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$

6. การสรุปผลการทดลอง หลังจากที่ทำกรวิเคราะห์การทดลองแล้ว การสรุปผลให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง เพื่อการคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์เพื่อนำไปหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมต่อไป

3.3 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

หลังจากที่ได้ทำการคัดกรอง (Screening) อิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลด้วยการทดลองแบบ 2k Factorial Design จะทำให้รู้ถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม และทำให้ทราบค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่มากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามระดับของปัจจัยนั้นยังเป็นเพียงระดับปัจจัยที่กำหนดขึ้นเพื่อศึกษาเท่านั้น จึงยังไม่ใช่ระดับปัจจัยที่ส่งผลให้รอยเชื่อมนั้นมีค่าแรงดึงเฉือนที่มากที่สุดที่แท้จริง

จากการทดลองเบื้องต้นทราบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม คือ กระแสไฟเชื่อม ระยะเวลาอาร์ค และ มุมในการเชื่อม ซึ่งทำให้เห็นว่าปัจจัยที่ได้ทำการศึกษานั้นส่งผลต่อค่าแรงดึงเฉือนทั้งหมด ขั้นตอนต่อไปคือ นำผลทดลองที่ได้ไปออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ด้วยวิธีการออกแบบการตอบสนองพื้นผิว (Response Surface Design)

โดยขั้นตอนการออกแบบการทดลองแบบการตอบสนองพื้นผิว (Response Surface Design) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกแรก วิธีการปีนเขาด้วยเส้นทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent) และขั้นตอนที่สอง Central Composite Design

3.3.1 การออกแบบการทดลองสำหรับวิธีการปีนเขาด้วยเส้นทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent)

ในการออกแบบการทดลองแบบ Steepest Ascent เป็นขั้นเริ่มต้นในการหาจุดเหมาะสม โดยจะทำเลื่อนระดับของปัจจัยที่ถูกคัดกรองมา ตามทิศทางที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงสถิติในการทดลองเบื้องต้น เพื่อหาเส้นทางที่มีความเป็นไปได้ที่จะให้ค่าตอบสนองที่ใกล้เคียงจุดที่ดีที่สุด ซึ่งการออกแบบการทดลองมี 4 ขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่ศึกษา ขั้นตอนนี้เป็นการนำปัจจัยที่ศึกษา ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลเชิงสถิติจากการทดลองเบื้องต้น ว่าเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมโดยนำมาออกแบบการทดลองเพื่อหาจุดศูนย์กลาง (Center Point) ใหม่

2. กำหนดตัวแปรตอบสนอง หรือผลลัพธ์ที่ต้องการศึกษา ตัวแปรตอบสนองที่ให้ความสำคัญคือ ค่าแรงดึงเฉือน หน่วยเป็นนิวตัน วัดค่าจากการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน

3. การเลือกการออกแบบการทดลอง โดยการกำหนด Step Size ของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมากที่สุดจากการทดลองในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น เพื่อหาความถี่ในการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดึงเฉือนในระดับปัจจัยที่เพิ่มขึ้น โดยเริ่มต้นจากจุดศูนย์กลาง (Center Point) ของระดับปัจจัยในการทดลองเบื้องต้น และระดับของปัจจัยอื่นที่เพิ่มขึ้นสามารถคำนวณได้จากการหาค่าความชันของสมการการถดถอย (Regression Model) หลังจากกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point) และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งในทุกการทดลองและทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าแรงดึงเฉือนในการทดลองเพื่อเพิ่มความแม่นยำของผลการทดลอง

4. การสรุปผลการทดลอง หลังจากที่ได้ทำการทดลองแล้ว นำผลการทดลองที่ได้มาสรุปผลให้อยู่ในรูปแบบภูมิการกระจายเพื่อหาจุดที่มีค่าแรงดึงเฉือนมากที่สุด และนำไปใช้เป็นจุดศูนย์กลางในขั้นตอนถัดไป

3.3.2 การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design

จากผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนในขั้นตอน Steepest Ascent จะทำให้ทราบถึงช่วงของค่าระดับของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่ามากที่สุด โดยจะนำค่าระดับของปัจจัยที่มีค่าค่าแรงดึงเฉือนมากที่สุดในขั้นตอน Steepest Ascent ไปเป็นจุดศูนย์กลางในการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design เพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดต่อไป ซึ่งการออกแบบการทดลองมี 5 ขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่ศึกษา ขั้นตอนนี้เป็นการนำปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมที่ได้จากวิเคราะห์ในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น เป็นปัจจัยหลักในการศึกษา และกำหนดระดับของปัจจัยโดยใช้ระดับของปัจจัยที่ส่งผลให้ผลการทดลองมีค่ามากที่สุดที่สุดในขั้นตอน Steepest Ascent เป็นจุดศูนย์กลางเพื่อกำหนดค่าของระดับปัจจัยที่ศึกษาในขั้นตอน Central Composite Design

2. กำหนดตัวแปรตอบสนอง หรือผลลัพธ์ที่ต้องการศึกษา ตัวแปรตอบสนองที่ให้ความสำคัญคือ ค่าแรงดึงเฉือน หน่วยเป็นนิวตัน วัดค่าจากการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน

3. การเลือกการออกแบบการทดลอง ในการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design จะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นส่วนของแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k Factorial) จากบริเวณที่มีค่าตอบสนองมากที่สุด ที่ได้จากการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองในขั้นตอน Steepest Ascent , ส่วนที่สองคือ Axial Point จะทำการปรับค่าเพียงตัวแปรเดียวส่วนตัวแปรอื่นจะให้มีระดับเดียวกับค่าที่จุดศูนย์กลาง โดยจะมีระดับของการทดลองเป็น $-1.633, 1.633$ และ ส่วนที่สามคือ Center Point คือบริเวณจุดมีค่าตอบสนองมากที่สุดจากขั้นตอน Steepest Ascent โดยจะทำการทดลองซ้ำทั้ง 6 การทดลอง

4. การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ มีการใช้กระบวนการทางสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์ผลของการทดลองมาอยู่ในรูปสรุปตามวัตถุประสงค์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ Minitab version 18 มาช่วยในการวิเคราะห์ ด้วยวิธี (ANOVA) ซึ่งมีการพิจารณาค่าความถูกต้องของการทดลองและค่าความแปรปรวน โดยกำหนดค่าระดับนัยสำคัญเท่ากับในขั้นตอน Factorial Design

5. การสรุปผลการทดลอง หลังจากทำการวิเคราะห์การทดลองแล้ว การสรุปผลให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง เพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลลัพธ์เพื่อนำไปหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมของผลลัพธ์ของระบบที่ต้องการ

3.4 การทดลองบนค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อยืนยันผล

หลังจากทราบผลการทดลองที่ได้จากขั้นตอน Central Composite Design นำสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองไปหาระดับของปัจจัยที่ดีที่สุดที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่ามากที่สุด โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer เพื่อวิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย จากนั้นนำระดับของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์มาทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง โดยผลการทดลองที่ได้ต้องอยู่ในช่วงการทำนาย (Prediction interval : PI) ที่ได้จากการวิเคราะห์สมการทำนาย ซึ่งแสดงว่าสมการทำนายและค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยที่ได้ว่าถูกต้องแม่นยำและนำไปใช้งานได้จริง

3.5 กระบวนการและขั้นตอนในการเชื่อมแบบมิก

ในขั้นตอนนี้จะระบุถึงการเชื่อมแบบมิกของชิ้นงานทดสอบระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061

3.5.1 การเตรียมชิ้นงาน

ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบสำหรับการศึกษาค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมแบบมิกระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิม และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน

1. ชิ้นงานที่ใช้สำหรับการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design โดยจะประกอบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 19 ชิ้น และ อลูมิเนียมอัลลอย AA6061 จำนวน 19 ชิ้น ตามขนาดดังรูปที่ 3.1
2. ชิ้นงานสำหรับการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนสำหรับขั้นตอน Steepest Ascent ประกอบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 27 ชิ้น และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 จำนวน 27 ชิ้น ตามขนาดดังรูปที่ 3.1
3. ชิ้นงานสำหรับการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนสำหรับขั้นตอน Central Composite Design ประกอบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 20 ชิ้น และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 จำนวน 20 ชิ้น ตามขนาดดังรูปที่ 3.1
4. ชิ้นงานสำหรับการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนสำหรับขั้นตอนการยืนยันผลการทดลอง ประกอบด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 5 ชิ้น และ อลูมิเนียมอัลลอย AA6061 จำนวน 5 ชิ้น ตามขนาดดังรูปที่ 3.1

3.5.2 การเชื่อมแบบมิกเพื่อรับการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน

หลังจากทำการเตรียมชิ้นงานตามขนาด และ จำนวนที่กำหนดแล้ว นำชิ้นงานมาเชื่อมแบบมิก โดยมีขั้นตอนดังนี้ โดยมีการเชื่อมเพื่อรับการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนทั้งหมด 6 ขั้นตอน

1. นำชิ้นงานทดสอบอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 และเหล็กกล้าไนซ์ มาจุ่มในสารละลายอซิโตนและ เช็ดพื้นผิวให้สะอาดด้วยผ้าแห้งเพื่อล้างน้ำมันและสิ่งสกปรกออกจากพื้นผิวของวัสดุ
2. นำชิ้นงานทดสอบทั้ง 2 ชิ้น ประกอบลงไปบนอุปกรณ์สำหรับจับชิ้นงาน (Fixture) โดยมีวางให้มี ระยะเกยอยู่ที่ 20 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 3.1 โดยให้อลูมิเนียมอัลลอย AA6061 อยู่ด้านบน และ เหล็กกล้าไนซ์ อยู่ ด้านล่าง
3. ตั้งค่าปัจจัยที่กำหนดให้คงที่ตามตารางที่ 3.3 และดำเนินลำดับการทดลองตามค่าที่ได้จากการ ออกแบบการทดลองในขั้นตอนต่างๆ
4. ทำการตรวจสอบบริเวณส่วนปลายลวดเชื่อมว่าสัมพันธ์ตำแหน่งเหล็กกล้าไนซ์ และ อลูมิเนียม อัลลอย AA6061 อยู่ตรงกลางตำแหน่งที่ตั้งฉากกันหรือไม่ ดังรูปที่ 3.7 และนำสายดินของเครื่องมิกมายึดเพื่อไม่ให้ อลูมิเนียมเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 3.8
5. หลังจากที่ยึดชิ้นงานผ่านกระบวนการเชื่อมแบบมิกแล้ว นำหัวเชื่อมออกจากอุปกรณ์จับเครื่องมิก จากนั้นนำสายดินออก และนำชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับชิ้นงานแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง
6. ตรวจสอบชิ้นงานที่ถูกเชื่อมว่าการเชื่อมชิ้นงานติดหรือไม่หรือมีตำหนิหรือไม่เพื่อป้องกันผลการ ทดลองที่อาจจะคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาดนี้ได้



รูปที่ 3.7 บริเวณที่ทำการเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไนซ์ และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061



รูปที่ 3.8 บริเวณที่ทำการจับยึดด้วยสายดิน

3.6 กระบวนการทดสอบคุณสมบัติทางกลโดยการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน

หลังจากทำการเชื่อมชิ้นงานโดยวิธีการเชื่อมแบบมิก ตามการทดลองที่ได้กำหนดไว้เสร็จสิ้นแล้ว สำหรับขั้นตอนนี้เป็น การตรวจสอบค่าแรงดึงเฉือนของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

1. ทำการติดตั้งชิ้นงานที่ทำการเชื่อมเสร็จเรียบร้อยแล้วกับที่จับปลายชิ้นงานของเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ตามคำแนะนำจากคู่มือของเครื่องทดสอบ โดยเริ่มจับชิ้นงานจากด้านบน จากนั้นทำการขันที่ปลายจับชิ้นงานให้แน่น และทำการการจับขึ้นด้านล่างในภายหลัง โดยต้องระวังไม่ให้ชิ้นงานเกิดการแกว่งระหว่างการจับชิ้นงาน

2. ทำการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมด้วยความเร็ว 0.5 มิลลิเมตร/นาที

3. บันทึกค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมลงตาราง

4. นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนไปทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab version 18 ด้วยวิธีการทาง (ANOVA) เพื่อพิจารณาค่าความถูกต้องของการทดลองค่าความแปรปรวนโดยกำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ เพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อคุณสมบัติทางกลในการรับแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมแบบมิก ระหว่างเหล็กกล้าไนซ์ และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 และระดับของปัจจัยกระแสไฟเชื่อม ระยะอาร์คและมุมในการเชื่อมที่ทำให้ได้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมากที่สุด

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินการทดลองที่ได้ปฏิบัติทั้งหมดในงานวิจัยเรื่องการศึกษาค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมแบบมิกระหว่างเหล็กกล้าไนซ์ และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 ซึ่งมีการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยจากค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ผลของการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น
2. ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น
3. การตรวจสอบความถูกต้องของการทดลองในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น
4. การทดลองในขั้นตอน Steepest Ascent
5. ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบแรงดึงเฉือนในขั้นตอน Steepest Ascent
6. การทดสอบการรับแรงดึงเฉือนในขั้นตอน Central Composite Design
7. ผลของการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนในขั้นตอน Central Composite Design
8. ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบแรงดึงเฉือนในขั้นตอน Central Composite Design
9. การตรวจสอบความถูกต้องของการทดลองในขั้นตอน Central Composite Design
10. ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม
11. การสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง
12. การทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง
13. การอภิปรายผลการวิจัย

4.1 ผลของการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น

ในการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบมิกระหว่างเหล็กกล้าไนซ์ และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 ซึ่งกำหนดปัจจัยที่ศึกษาคือ กระแสไฟเชื่อม ระยะเวลาอาร์ค และมุมในการเชื่อมตามกระบวนการออกแบบการทดลองเชิง Factorial Design ซึ่งมีการทำซ้ำทั้งหมด 2 ครั้ง

โดยหลังจากชิ้นงานผ่านการเชื่อมแบบมิกแล้ว นำชิ้นงานไปทดสอบการรับแรงดึงเฉือน ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการรับแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น

ลำดับการทดลอง	การทำซ้ำครั้งที่	ปัจจัย			ค่าแรงดึงเดือน (นิวตัน)
		กระแสไฟเชื่อม (แอมแปร์)	ระยะอาร์ค (มิลลิเมตร)	มุมในการเชื่อม (องศา)	
1	1	80	8	50	725.71
2	1	100	8	50	983.08
3	1	80	12	50	788.58
4	1	100	12	50	1400.92
5	1	80	8	70	1165.64
6	1	100	8	70	1706.85
7	1	80	12	70	1050.38
8	1	100	12	70	982.76
9	2	80	8	50	658.67
10	2	100	8	50	807.52
11	2	80	12	50	802.55
12	2	100	12	50	1306.45
13	2	80	8	70	1298.97
14	2	100	8	70	1772.10
15	2	80	12	70	999.64
16	2	100	12	70	1013.63
17	1	90	10	60	954.80
18	2	90	10	60	1110.24
19	3	90	10	60	1219.54

4.2 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบการรับแรงดึงเดือนในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น

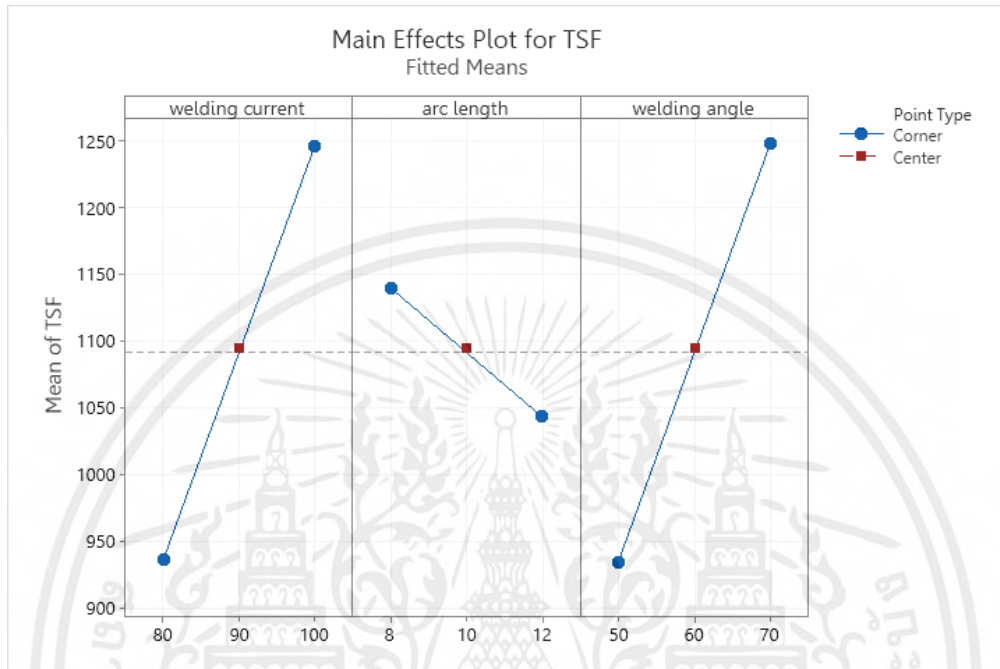
หลังจากทราบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบการรับแรงดึงเดือน ทางผู้วิจัยได้ใช้ซอฟต์แวร์ Minitab Version 18 มาช่วยในการวิเคราะห์ผลเชิงสถิติด้วยวิธีการทาง (ANOVA) ซึ่งมีการพิจารณาค่าความถูกต้องของการทดลองค่าความแปรปรวน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ เพื่อวิเคราะห์หาอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษารวมถึงคักรองปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งนำมาสู่การหาข้อสรุปที่ตรงตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2

จากผลการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า การเชื่อมแบบมิกนั้น มีผลต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อม โดยมีปัจจัยที่ส่งผลคือ กระแสไฟเชื่อม ระยะอาร์ค มุมในการเชื่อม อิทธิพลร่วมระหว่างระยะอาร์คและมุมในการเชื่อม และ อิทธิพลร่วมระหว่างกระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อม ระยะอาร์คและมุมในการเชื่อม ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ดังตารางที่ 4.2 แต่ความโค้ง (Curvature) ไม่มีนัยสำคัญต่อโมเดลที่ถูกสร้างขึ้นจากการทดลองจึงแก้ไขด้วยการทำสมการลดรูป (Reduced Model) ที่จุดศูนย์กลาง (Center Point) โดยการตัดข้อมูลในลำดับการทดลองดังกล่าวออก ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์และสร้างโมเดลสมการ Regression ใหม่ที่มีความแม่นยำมากขึ้น ดังตารางที่ 4.3, 4.4 และสมการที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ตารางการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทาง (ANOVA) ในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	1614197	201775	28.66	<0.001
Linear	3	818586	272862	38.76	<0.001
welding current	1	385384	385384	54.75	<0.001
arc length	1	37408	37408	5.31	<0.044
welding angle	1	395794	395794	56.22	<0.001
2-Way Interactions	3	598003	199334	28.32	<0.001
welding current*arc length	1	8008	8008	1.14	0.311
welding current*welding angle	1	19723	19723	2.80	0.125
arc length*welding angle	1	570272	570272	81.01	<0.001
3-Way Interactions	1	197579	197579	28.07	<0.001
welding current*arc length*welding angle	1	197579	197579	28.07	<0.001
Curvature	1	29	29	<0.01	0.950

Error	10	70396	7040		
Total	18	1684593			



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัย



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของปัจจัย

ตารางที่ 4.3 ตารางการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทาง (ANOVA)
หลังกำจัดจุดศูนย์กลางในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น

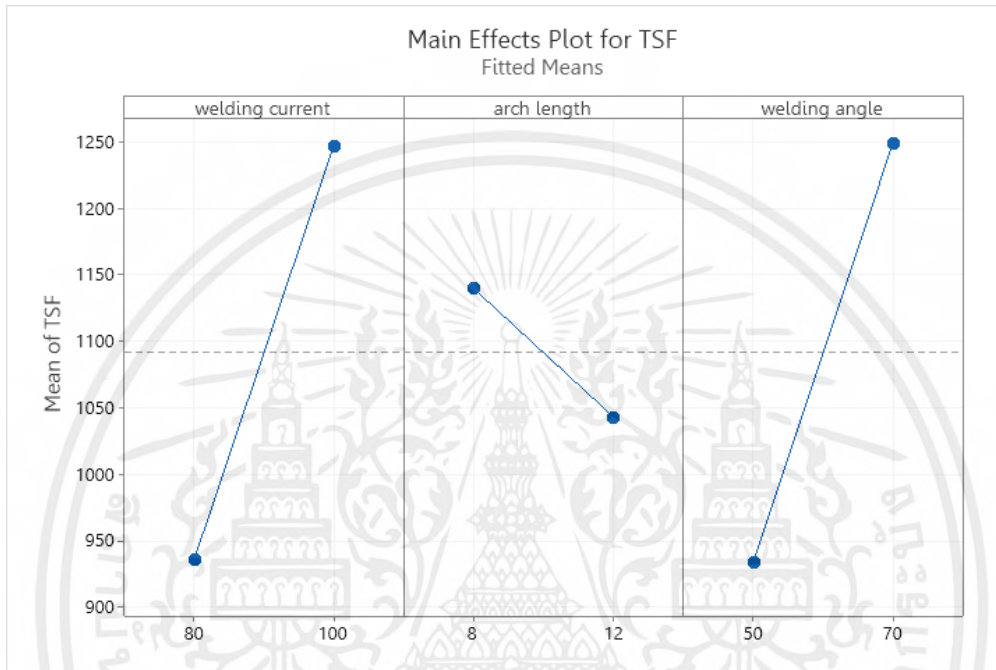
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	1586437	317287	50.58	<0.001
Linear	3	818586	272862	43.50	<0.001
welding current	1	385384	385384	61.44	<0.001
arch length	1	37408	37408	5.96	0.035
welding angle	1	395794	395794	63.10	<0.001
2-Way Interactions	1	570272	570272	90.91	<0.001
arch length*welding angle	1	570272	570272	90.91	<0.001
3-Way Interactions	1	197579	197579	31.50	<0.001
welding current*arch length*welding angle	1	197579	197579	31.50	<0.001
Error	10	62729	6273		
Lack-of-Fit	2	27731	13865	3.17	0.097
Pure Error	8	34998	4375		
Total	15	1649166			

$$\begin{aligned}
 \text{TSF} = & 1091.5 + 155.2 \text{ welding current} - 48.4 \text{ arch length} + 157.3 \text{ welding angle} \\
 & - 188.8 \text{ arch length*welding angle} \\
 & - 111.1 \text{ welding current*arch length*welding angle}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

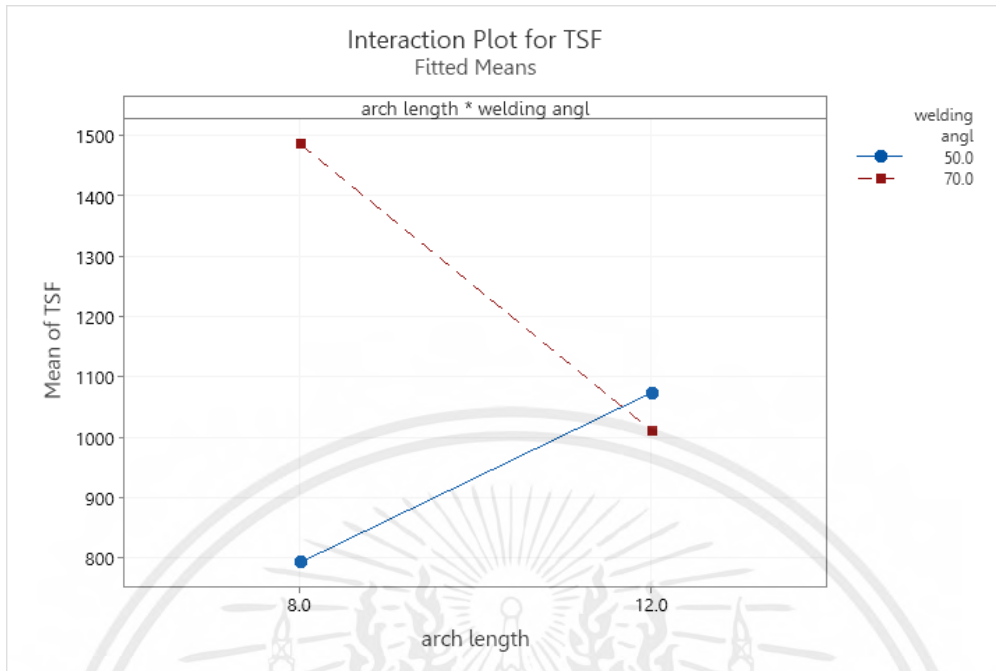
โดยที่ TSF คือ ค่าแรงดึงเฉือน (นิวตัน)
 Welding Current คือ กระแสไฟเชื่อม (แอมแปร์)
 Arc Length คือ ระยะอาร์ค (มิลลิเมตร)
 Welding Angle คือ มุมในการเชื่อม (องศา)

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองจากสมการ Regression
ที่วิเคราะห์ได้หลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point)

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
79.2015	96.20%	94.29%	90.26%



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัยหลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของปัจจัยหลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point)

หลังจากทำการกำจัดจุดศูนย์กลางและวิเคราะห์ผลของการทดลองอีกครั้งด้วยวิธีการทาง (ANOVA) โดยพิจารณาความถูกต้องของการทดลองค่าความแปรปรวนโดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ได้ผลลัพธ์ตามตารางที่ 4.3, 4.4 และ สมการที่ 4.1 พบว่าการเชื่อมแบบมิกนั้น มีผลต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมโดยมีปัจจัยที่ส่งผลคือ กระแสไฟเชื่อม ระยะอาร์ค มุมในการเชื่อม อิทธิพลร่วมระหว่างระยะอาร์คและมุมในการเชื่อม และอิทธิพลร่วมระหว่างกระแสไฟเชื่อม ระยะอาร์ค และมุมในการเชื่อม ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 เหมือนกับการทดลองก่อนกำจัดจุดศูนย์กลาง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากกราฟแสดงอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมของปัจจัยดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าความผันแปรตอบสนองจากสมการ Regression พบว่ามีค่ามากกว่า 90% จึงถือว่าสมการ Regression นี้ค่อนข้างมีความผันแปรอยู่ในระดับที่ต่ำ ซึ่งแสดงว่าผลของการทดลองนี้นั้นอยู่ระดับที่น่าพอใจ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัยหลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point) พบว่ากระแสไฟเชื่อมและมุมในการเชื่อมนั้นส่งผลต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมเป็นอย่างมาก โดยมีแนวโน้มแปรผันตรงกับค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อม ส่วนระยะอาร์คนั้นส่งผลต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมเล็กน้อย โดยมีแนวโน้มแปรผกผันกับค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อม และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.4 กราฟแสดงอิทธิพลร่วมของปัจจัยหลังกำจัดจุดศูนย์กลาง (Center Point) จะเห็นได้ว่าอิทธิพลร่วมระหว่างระยะอาร์คและมุมในการเชื่อมนั้นมีการตัดกันแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลร่วมนี้นั้นมีผลต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อม โดยที่มุมในการเชื่อม 50 องศา นั้นจะมีค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมน้อยกว่า มุมในการการเชื่อม 70 องศา ที่ระยะอาร์ค 8 มิลลิเมตร แต่จะ

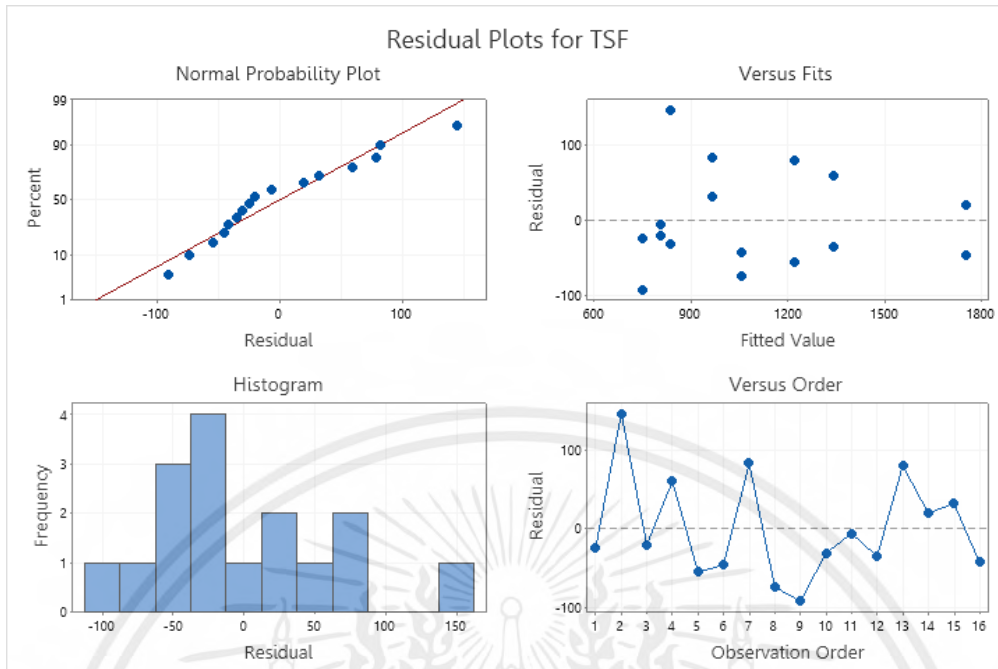
มีค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมมากกว่าเมื่อระยะอาร์คที่ 12 มิลลิเมตร ความผันแปรนี้ถือเป็นอิทธิพลร่วมที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อม

อีกทั้งเมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 และ 4.4 จะพบว่าค่าที่ทำให้ค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมสูงที่สุดคือ กระแสไฟเชื่อมที่ 100 แอมแปร์ ระยะอาร์คที่ 8 มิลลิเมตร และ มุมในการเชื่อมที่ 70 องศา แต่ระดับของปัจจัยนี้ยังไม่ใช่ค่าที่ทำให้ค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมสูงที่สุดที่แท้จริงเนื่องจากเป็นเพียงค่าที่ถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อคัดกรองปัจจัยที่เกี่ยวข้องเท่านั้น จึงได้ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method) เพื่อหาค่าของปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมที่มากที่สุดต่อไป โดยในวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method) จะเป็นวิธีในการค้นหาเส้นทางที่นำไปสู่ค่าตอบสนองที่ดีที่สุด โดยเริ่มจากการทำ Steepest Ascent เพื่อค้นหาบริเวณที่มีค่าตอบสนองใกล้เคียงจุดที่มากที่สุด โดยต้องสอดคล้องกับการออกแบบการทดลองแบบการทดลองเบื้องต้นที่ได้กำหนดไว้ และนำบริเวณที่มีค่าตอบสนองดีที่สุดจากการทำ Steepest Ascent มาออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design เพื่อค้นหาค่าของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าตอบสนองดีที่สุด

4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของการทดลองในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น

นอกจากการวิเคราะห์ในเชิง Factorial Design แล้วยังมีการพิจารณาเพิ่มเติมในด้านความถูกต้องของการออกแบบการทดลองเพิ่มเติม (Model Adequacy Checking) ซึ่งจะมีการวิเคราะห์ในส่วนของความถูกต้องและความเป็นอิสระของข้อมูลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 มีรายละเอียดดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Normal Distribution of Residuals) พบว่าส่วนตกค้างนั้นมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงไม่พบสิ่งผิดปกติ แสดงว่าค่าส่วนตกค้างนั้นมีการแจกแจงแบบปกติ
2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง (Independent of Residual) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) พบว่าส่วนตกค้างนั้นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและข้อมูลมีความอิสระต่อกัน
3. การตรวจสอบความเสถียรของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) โดยเปรียบเทียบกับ Fitted Value พบว่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างในแต่ละตำแหน่งนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ไม่พบรูปแบบของการกระจายตัวลักษณะเป็นแนวโน้มของส่วนตกค้าง แสดงว่าข้อมูลนั้นมีความเสถียรของความแปรปรวน



รูปที่ 4.5 Residual Plots ของค่าแรงดิ่งเดือนของรอยเชื่อมตาม
การออกแบบการทดลองเชิง Factorial Design

4.4 การทดลองในขั้นตอน Steepest Ascent

ในขั้นตอน Steepest Ascent นี้เป็นการประมาณตำแหน่งที่สำหรับหาดับที่เหมาะสมของปัจจัยในการเชื่อม โดยเริ่มต้นจากการกำหนด Step Size จากปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมจากการวิเคราะห์ผลการทดลองในขั้นตอนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น หลังกำจัดจุดศูนย์กลาง เพื่อไปวิเคราะห์หาระดับที่เพิ่มขึ้นของปัจจัยอื่นๆ โดยจะมีค่าเริ่มต้นของปัจจัยในการทดลองที่เป็นค่ากลางของการทดลองเบื้องต้น คือ กระแสไฟเชื่อม เท่ากับ 90 แอมแปร์ ระยะอาร์ค เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และ มุมในการเชื่อม เท่ากับ 60 องศา โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. การกำหนดปัจจัย และ Step Size ของปัจจัย

ในการกำหนด Step Size นั้นจะเลือกจากปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมที่มากที่สุดจากการทดลองเบื้องต้นหลังกำจัดจุดศูนย์กลาง หากมีหลายปัจจัยให้เลือกเพียงปัจจัยเดียว และ การกำหนดค่าของ Step Size นั้นควรกำหนดให้น้อยเพื่อป้องกันการข้ามระดับของปัจจัยอาจส่งผลให้ค่าแรงดึงเดือนสูงที่สุดไป เนื่องจากขั้นตอนนี้เป็นการหาเส้นทางที่นำไปสู่ค่าที่ดีที่สุด อุปกรณ์สำหรับปรับค่าปัจจัยนั้นต้องสามารถปรับค่าตามที่กำหนดได้ด้วย ซึ่งในการศึกษานี้ได้กำหนดให้ Step Size เป็นปัจจัยมุมในการเชื่อม เนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดจากสมการ Regression ที่ 4.1 มีค่าเท่ากับ 2 องศา และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับระยะห่าง 1 หน่วยของปัจจัยมุมในการเชื่อมจากการทดลองเบื้องต้น (เท่ากับ 10 องศา) จะได้ว่าระยะห่างระหว่างจุดแรกและจุดถัดไปของปัจจัยมุมในการเชื่อม เท่ากับ 0.2 หน่วย คำนวณได้จากค่า Step Size ของขั้นตอน Steepest Ascent หารด้วยระยะห่าง 1 หน่วยของปัจจัยมุมในการเชื่อมจากการทดลองเบื้องต้น (เท่ากับ 10 องศา)

2. การหาระดับปัจจัยที่เพิ่มขึ้นของปัจจัยกระแสไฟเชื่อม

2.1 การหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยมุมในการเชื่อมและปัจจัยกระแสไฟเชื่อม

ค่าความสัมพันธ์เป็นตัวกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของปัจจัย โดยนำปัจจัยที่ต้องการหาทิศทางการเคลื่อนที่ไปเปรียบเทียบกับปัจจัยที่กำหนดให้เป็น Step Size คือ ปัจจัยมุมในการเชื่อม ซึ่งในส่วนนี้จะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกระแสไฟเชื่อม และปัจจัยมุมในการเชื่อม เพื่อหาทิศทางการเคลื่อนที่ของปัจจัยกระแสไฟเชื่อมว่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกระแสไฟเชื่อมและปัจจัยมุมในการเชื่อม นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ Regression ที่ 4.1 โดยการนำสัมประสิทธิ์หน้าปัจจัยมุมในการเชื่อมไปหารด้วยสัมประสิทธิ์หน้าปัจจัยกระแสไฟเชื่อม จะได้ว่า $157.3/155.2$ ดังนั้นมีค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยมุมในการเชื่อมและปัจจัยกระแสไฟเชื่อมเท่ากับ 1.0135 และ ทิศทางการเคลื่อนที่ของปัจจัยกระแสไฟเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีค่าความสัมพันธ์มีค่าเป็นบวก

2.2 การหาระยะห่างระหว่างจุดแรกและจุดถัดไปของปัจจัยกระแสไฟเชื่อม

จากการกำหนดค่า Step Size ทำให้ทราบระยะห่างของปัจจัยมุมในการเชื่อมระหว่างจุดแรกและจุดถัดไปมีค่าเท่ากับ 0.2 หน่วย ดังนั้นสามารถคำนวณหาระยะห่างของปัจจัยกระแสไฟเชื่อมระหว่างจุดแรกและจุดถัดไป

ได้จากระยะห่างของปัจจัยมุมในการเชื่อมระหว่างจุดแรกและจุดถัดไปหารด้วยค่าความชันระหว่างปัจจัยมุมในการเชื่อมและปัจจัยกระแสไฟเชื่อม จะได้ว่า $0.2/1.0135$ ดังนั้นระยะห่างของปัจจัยกระแสไฟเชื่อมระหว่างจุดแรกและจุดถัดไปมีค่าเท่ากับ 0.197 หน่วย หรือมีค่าเท่ากับ 1.97 แอมแปร์ สามารถคำนวณได้จากการนำค่าระยะห่างของปัจจัยกระแสไฟเชื่อมระหว่างจุดแรกและจุดถัดไปมีค่าเท่ากับ 0.197 หน่วย คูณด้วยระยะห่าง 1 หน่วยของปัจจัยกระแสไฟเชื่อมจากการออกแบบการทดลองเบื้องต้น (มีค่าเท่ากับ 10 แอมแปร์) ดังนั้นจุดถัดไปของปัจจัยกระแสไฟเชื่อมมีค่าเท่ากับ 91.97 แอมแปร์ แต่เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ในการปรับค่ากระแสไฟเชื่อมที่ปรับได้ขั้นต่ำที่ละ 1 แอมแปร์จึงได้มีการปรับค่าเป็นเพิ่มขึ้นทีละ 2 แอมแปร์ ดังตารางที่ 4.5

3. การหาระดับปัจจัยที่เพิ่มขึ้นของปัจจัยระยะอาร์ค

3.1 การหาความชันระหว่างปัจจัยมุมในการเชื่อมและปัจจัยระยะอาร์ค

ค่าความชันนั้นเป็นตัวกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของปัจจัย โดยนำปัจจัยที่ต้องการหาทิศทางการเคลื่อนที่ไปเปรียบเทียบกับปัจจัยที่กำหนดให้เป็น Step Size คือ ปัจจัยมุมในการเชื่อม ซึ่งในส่วนนี้จะทำการหาค่าความชันระหว่างปัจจัยระยะอาร์ค และปัจจัยมุมในการเชื่อม เพื่อหาทิศทางการเคลื่อนที่ของปัจจัยระยะอาร์คว่ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยการหาค่าความชันระหว่างปัจจัยระยะอาร์คและปัจจัยมุมในการเชื่อม นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ Regression ที่ 4.1 โดยการนำสัมประสิทธิ์หน้าปัจจัยมุมในการเชื่อมไปหารด้วยสัมประสิทธิ์หน้าปัจจัยระยะอาร์ค จะได้ว่า $157.3/-48.4$ ดังนั้นมีค่าความชันระหว่างปัจจัยมุมในการเชื่อมและปัจจัยระยะอาร์คเท่ากับ -3.25 และ ทิศทางการเคลื่อนที่ของปัจจัยระยะอาร์คมีค่าลดลงเนื่องจากมีค่าความชันมีค่าเป็นลบ

3.2 การหาระยะห่างระหว่างจุดแรกและจุดถัดไปของปัจจัยระยะอาร์ค

จากการกำหนดค่า Step Size ทำให้ทราบระยะห่างของปัจจัยมุมในการเชื่อมระหว่างจุดแรกและจุดถัดไปมีค่าเท่ากับ 0.2 หน่วย ดังนั้นสามารถคำนวณหาระยะห่างของปัจจัยระยะอาร์คระหว่างจุดแรกและจุดถัดไป ได้จากระยะห่างของปัจจัยมุมในการเชื่อมระหว่างจุดแรกและจุดถัดไปหารด้วยค่าความชันระหว่างปัจจัยมุมในการเชื่อมและปัจจัยระยะอาร์ค จะได้ว่า $0.2/-3.25$ ดังนั้นระยะห่างของปัจจัยระยะอาร์คระหว่างจุดแรกและจุดถัดไปมีค่าเท่ากับ -0.061 หน่วย หรือมีค่าเท่ากับ -0.12 มิลลิเมตร สามารถคำนวณได้จากการนำค่าระยะห่างของปัจจัยระยะอาร์คระหว่างจุดแรกและจุดถัดไปมีค่าเท่ากับ -0.061 หน่วย คูณด้วยระยะห่าง 1 หน่วยของปัจจัยระยะอาร์คจากการออกแบบการทดลองเบื้องต้น (มีค่าเท่ากับ 2 มิลลิเมตร) ดังนั้นจุดถัดไปของปัจจัยระยะอาร์คค่าเท่ากับ 9.88 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ในการปรับค่าระยะอาร์คที่ปรับได้ละเอียดสุดที่ 1 มิลลิเมตร แต่ระยะห่างระหว่างปัจจัยระยะอาร์คจุดแรกและจุดถัดไปลดลงทีละ 0.12 ซึ่งลดลงทีละน้อยมากจึงกำหนดให้ระดับของปัจจัยระยะอาร์คในการทำ Steepest Ascent คงที่ เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ตลอดการทดลอง ดังตารางที่ 4.5

4. การทดสอบการรับแรงดึงเดือน

ในการทดสอบการรับแรงดึงเดือนของชิ้นงานในแต่ละการทดลองนั้นจะทำซ้ำ 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยของค่าแรงดึงเดือนในแต่ละการทดลองเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่แม่นยำ และมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 การทดลองในขั้นตอน Steepest Ascent

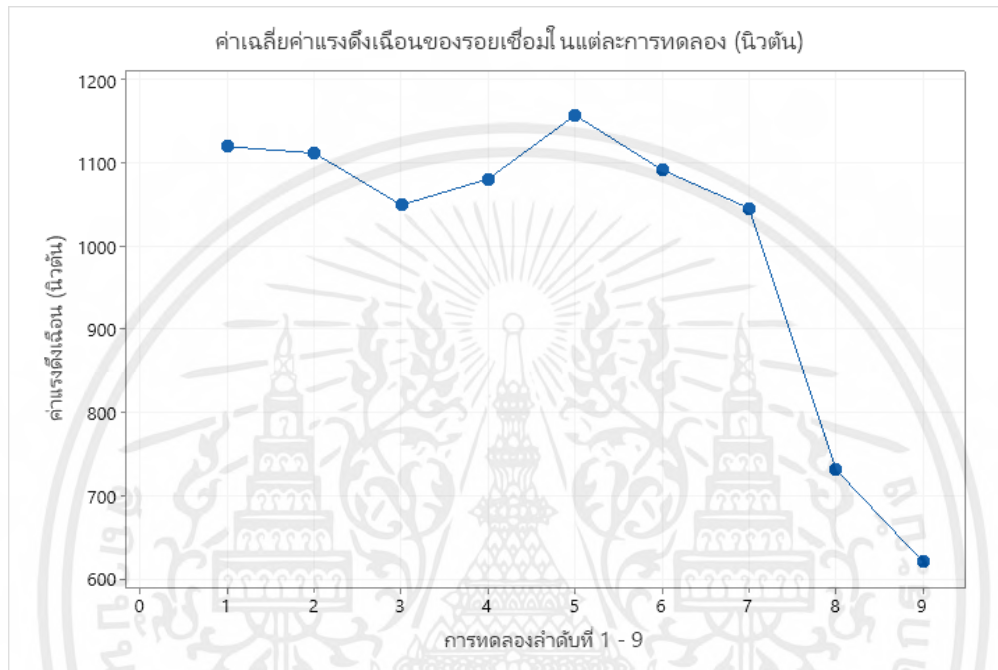
ลำดับการทดลอง	ปัจจัย		
	กระแสไฟเชื่อม (แอมแปร์)	ระยะอาร์ค (มิลลิเมตร)	มุมในการเชื่อม (องศา)
1	90	10	60
2	92		62
3	94		64
4	96		66
5	98		68
6	100		70
7	102		72
8	104		74
9	106		76

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมในขั้นตอน Steepest Ascent

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			ค่าแรงดึงเฉือน (นิวตัน)			
	กระแสไฟเชื่อม (แอมแปร์)	ระยะอาร์ค (มิลลิเมตร)	มุมในการเชื่อม (องศา)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	90	10	60	1027.04	1110.24	1219.54	1118.94
2	92		62	1059.41	1080.75	1193.59	1111.25
3	94		64	1113.40	1001.80	1032.04	1049.08
4	96		66	1023.93	1066.96	1149.61	1080.17
5	98		68	1167.84	1018.17	1283.63	1156.55
6	100		70	1196.93	977.71	1098.74	1091.13
7	102		72	1071.61	1031.34	1032.75	1045.23
8	104		74	784.02	732.37	679.21	731.87
9	106		76	710.49	596.19	557.64	621.44

4.5 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนในขั้นตอน Steepest Ascent

หลังจากทราบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน ทำการหาบริเวณที่มีค่าตอบสนองสูงที่สุด โดยนำผลการทดลองในแต่ละครั้งมาหาค่าเฉลี่ยที่ได้ของแต่ละการทดลองมาจัดรูปแบบของข้อมูลใหม่โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมในขั้นตอน Steepest Ascent

จากรูปที่ 4.6 จะทำให้ทราบได้ถึงค่าแรงดึงเฉือนของแต่ละการทดลอง และนำการทดลองที่ได้ค่าแรงดึงเฉือนสูงที่สุดไปเป็นจุดศูนย์กลางของการออกแบบการทดลองในขั้นตอน Central Composite Design ซึ่งจากการทดลองนั้นบ่งบอกว่าการทดลองที่ 5 นั้นมีค่าแรงดึงเฉือนสูงที่สุด โดยมีระดับของปัจจัย คือ กระแสไฟเชื่อม เท่ากับ 98 แอมแปร์ ระยะอาร์ค เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และ มุมในการเชื่อม เท่ากับ 68 องศา และมีบริเวณที่ใกล้เคียงจุดที่สูงที่สุดเป็นการทดลองที่ 4 และ 6

4.6 การทดสอบการรับแรงดึงเฉือนในขั้นตอน Central Composite Design

จากผลการทดลองในขั้นตอน Steepest Ascent นำระดับของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่ามากที่สุด คือ กระแสไฟเชื่อม เท่ากับ 98 แอมแปร์ ระยะอาร์ค เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม เท่ากับ 68 องศา เป็นจุดศูนย์กลางในการออกแบบการทดลอง และกำหนดระดับปัจจัยที่ระดับ 1 คือการทดลองที่ 6 ในการทดลองแบบ Steepest Ascent และ ระดับ -1 คือการทดลองที่ 5 ในการออกแบบการทดลอง

แบบ steepest Ascent แต่เนื่องจากค่าระยะอาร์คถูกกำหนดให้คงที่ในขั้นตอน Steepest Ascent เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ แต่จากวิเคราะห์ในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น พบว่าระยะอาร์คนั้นส่งผลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม ดังนั้นจึงได้กำหนดระดับของปัจจัยระยะอาร์คเป็นค่าเดียวกับในขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น และในส่วน Axial point กำหนดระดับของปัจจัยดังตารางที่ 4.7 แต่เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ในการปรับค่าปัจจัยต่างๆ ที่ไม่สามารถปรับค่าน้อยกว่า 1 ได้ จึงทำการปรับค่าของระดับปัจจัยต่างๆ ให้เป็นจำนวนเต็มเพื่อให้สะดวกแก่การทดลอง ดังตารางที่ 4.8 และสามารถออกแบบการทดลองได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.7 ค่าระดับปัจจัยที่ศึกษาในขั้นตอน Central Composite Design

ปัจจัย	ระดับปัจจัยที่ศึกษา				
	-1.633	-1	0	1	1.633
กระแสไฟเชื่อม (แอมแปร์)	94.734	96	98	100	101.266
ระยะอาร์ค (มิลลิเมตร)	6.734	8	10	12	13.266
มุมในการเชื่อม (องศา)	64.734	66	68	70	71.266

ตารางที่ 4.8 ค่าระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองในขั้นตอน Central Composite Design

ปัจจัย	ระดับปัจจัยที่ศึกษา				
	-1.633	-1	0	1	1.633
กระแสไฟเชื่อม (แอมแปร์)	95	96	98	100	101
ระยะอาร์ค (มิลลิเมตร)	7	8	10	12	13
มุมในการเชื่อม (องศา)	65	66	68	70	71

ตารางที่ 4.9 ลำดับการทดลอง Central Composite Design เพื่อรับการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย		
	กระแสไฟเชื่อม (แอมแปร์)	ระยะอาร์ค (มิลลิเมตร)	มุมในการเชื่อม (องศา)
1	96	8	66
2	100	8	66
3	96	12	66
4	100	12	66
5	96	8	70
6	100	8	70
7	96	12	70
8	100	12	70
9	98	10	68
10	98	10	68
11	98	10	68
12	98	10	68
13	95	10	68
14	101	10	68
15	98	7	68
16	98	13	68
17	98	10	65
18	98	10	71
19	98	10	68
20	98	10	68

4.7 ผลของการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนในขั้นตอน Central Composite Design

หลังจากนำชิ้นงานที่ทำการเชื่อมตามการออกแบบการทดลองตามตารางที่ 4.9 และนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมในขั้นตอน Central Composite Design

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			ค่าแรงดึงเฉือน (นิวตัน)
	กระแสไฟเชื่อม (แอมแปร์)	ระยะอาร์ค (มิลลิเมตร)	มุมในการเชื่อม (องศา)	
1	96	8	66	1284.56
2	100	8	66	1283.61
3	96	12	66	1098.97
4	100	12	66	1124.31
5	96	8	70	1385.36
6	100	8	70	1772.10
7	96	12	70	1107.30
8	100	12	70	1293.64
9	98	10	68	1283.63
10	98	10	68	1167.84
11	98	10	68	1018.17
12	98	10	68	1013.65
13	95	10	68	1126.53
14	101	10	68	1457.36
15	98	7	68	1345.02
16	98	13	68	1099.27
17	98	10	65	953.25
18	98	10	71	1016.34
19	98	10	68	1009.37
20	98	10	68	997.25

4.8 ผลการวิเคราะห์ผลการทดสอบการรับแรงดึงเดือนในขั้นตอน Central Composite Design

หลังจากได้ผลการทดสอบการรับแรงดึงเดือน ทางผู้วิจัยได้ใช้ซอฟต์แวร์ Minitab Version 18 มาช่วยในการวิเคราะห์ผลเชิงสถิติด้วยวิธีการทาง (ANOVA) ซึ่งมีการพิจารณาค่าความถูกต้องของการทดลองค่าความแปรปรวน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ เพื่อวิเคราะห์ผลอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษารวมถึงระดับที่ดีที่สุดของแต่ละปัจจัย ซึ่งนำมาสู่การหาข้อสรุปที่ตรงตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.11, 4.12 และสมการที่ 4.2

พบว่าในการเชื่อมแบบมิกตามการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design นั้นมีผลต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อม โดยมีปัจจัยที่ส่งผลคือ กระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อม ระยะอาร์ค มุมในการเชื่อม อิทธิพลร่วมระหว่างกระแสไฟเชื่อมกับกระแสไฟเชื่อม และอิทธิพลร่วมระหว่างระยะอาร์คกับระยะอาร์ค ซึ่งมี P-Value น้อยกว่า 0.05 ดังตารางที่ 4.11 และเมื่อพิจารณาค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองที่วิเคราะห์ได้จากสมการ Regression มีค่าอยู่ที่ 88.50% ดังตารางที่ 4.12 ถือว่ามีความผันแปรในระดับค่อนข้างต่ำ และพิจารณาค่า P-value ของ Lack-of-Fit พบว่ามีค่าอยู่ที่ 0.723 มีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่ามีความเพียงพอของตัวแปรในสมการที่วิเคราะห์ความแปรปรวน และเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นมีความสามารถในการทำนายค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อม

ตารางที่ 4.11 ตารางการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทาง (ANOVA)
ในขั้นตอน Central Composite Design

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	671231	67123	6.93	0.004
Blocks	1	39533	39533	4.08	0.074
Linear	3	327964	109321	11.28	0.002
Welding Current	1	95697	95697	9.87	0.012
Arc length	1	172880	172880	17.84	0.002
Welding Angle	1	59386	59386	6.13	0.035
Square	3	222008	74003	7.63	0.008
Welding Current * Welding Current	1	140499	140499	14.50	0.004
Arc Length * Arc Length	1	75888	75888	7.83	0.021
Welding Angle * Welding Angle	1	3889	3889	0.40	0.542
2-Way Interaction	3	62602	20867	2.15	0.164
Welding Current * Arc Length	1	3789	3789	0.39	0.547

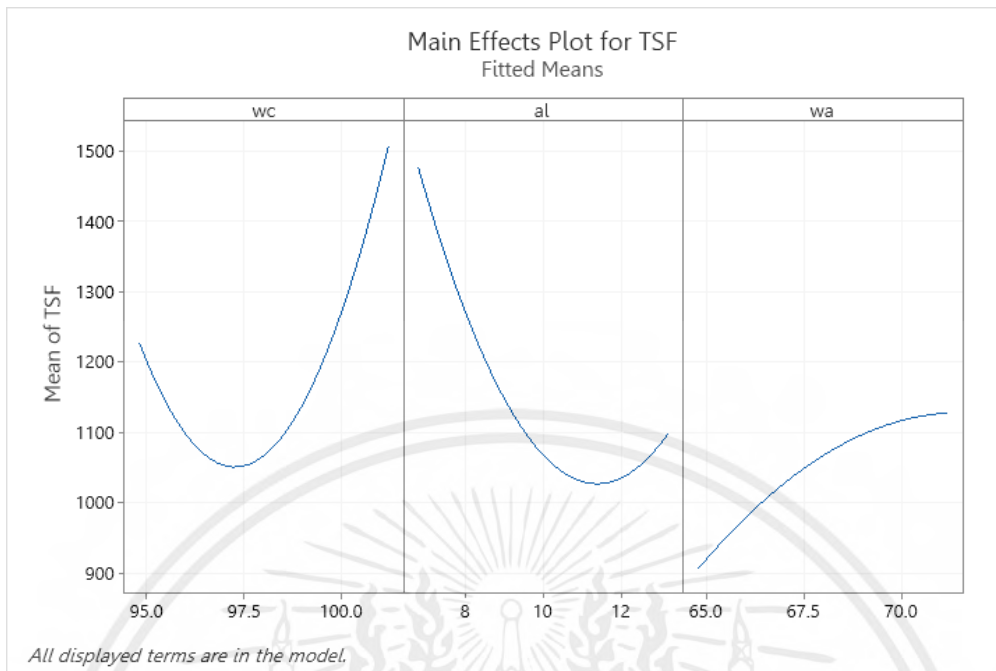
Welding Current * welding Angle	1	37633	37633	3.88	0.080
Arc Length * Welding Angle	1	21180	21180	2.19	0.173
Error	9	87234	9693		
Lack-of-Fit	5	36421	7284	0.57	0.723
Pure Error	4	50814	12703		
Total	19	758466			

$$\begin{aligned}
\text{TSF} = & 355859 - 6803 \text{ welding current} + 919 \text{ arch length} - 855 \text{ welding angle} + 29.26 \text{ welding} \\
& \text{current} * \text{welding current} + 21.50 \text{ arch length} * \text{arch length} - 4.87 \text{ welding angle} * \text{welding} \\
& \text{angle} - 5.44 \text{ welding current} * \text{arch length} + 17.15 \text{ welding current} * \text{welding angle} \\
& - 12.86 \text{ arch length} * \text{welding angle}
\end{aligned} \tag{4.2}$$

- โดยที่ TSF คือ ค่าแรงดึงเฉือน (นิวตัน)
- Welding Current คือ กระแสไฟเชื่อม (แอมแปร์)
- Arc Length คือ ระยะอาร์ค (มิลลิเมตร)
- Welding Angle คือ มุมในการเชื่อม (องศา)

ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงผลค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองจากสมการ Regression จากการทดลองแบบ Central Composite Design

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
98.4516	88.50%	75.72%	38.70%



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัยจากการทดลองแบบ Central Composite Design

นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปที่ 4.7 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของปัจจัยจากการทดลองแบบ Central Composite Design การพิจารณาปัจจัยหลักกระแสไฟเชื่อมจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้กระแสไฟเชื่อมที่ระดับน้อยกว่า 95 แอมแปร์ จนถึง 97.5 แอมแปร์ ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมนั้นจะมีแนวโน้มที่ลดลง และเมื่อใช้กระแสไฟเชื่อมในระดับที่ 97.5 แอมแปร์ จนถึง 100 แอมแปร์ขึ้นไป ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมนั้นจะมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการพิจารณาปัจจัยหลักกระแสไฟเชื่อม ทำให้ทราบว่าค่าแรงดึงเฉือนที่สูงที่สุดนั้น จะต้องใช้กระแสไฟเชื่อมประมาณ 100 แอมแปร์ การพิจารณาปัจจัยหลักระยะอาร์ค จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ระยะอาร์คในระดับที่ 12 มิลลิเมตร จนถึง 10 มิลลิเมตร ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมจะมีแนวโน้มที่ลดลง และ กลับมาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อใช้ระยะอาร์คในระดับที่ 10 มิลลิเมตร จนถึง 8 มิลลิเมตร ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการพิจารณาปัจจัยหลักระยะอาร์ค ทำให้ทราบว่าค่าแรงดึงเฉือนที่สูงที่สุดนั้น จะต้องใช้ระยะอาร์คประมาณ 8 มิลลิเมตร การพิจารณาปัจจัยหลักมุมในการเชื่อมจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้มุมในการเชื่อมในระดับที่ 70 องศา จนถึง 65 องศา ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีแนวโน้มที่ลดลง จากการพิจารณาปัจจัยหลักมุมในการเชื่อม ทำให้ทราบว่าค่าแรงดึงเฉือนที่ดีที่สุดนั้นจะต้องใช้มุมในการเชื่อมประมาณ 70 องศา

จากนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยตามตารางที่ 4.11 สามารถสร้างสมการทำนายได้ดังสมการที่ 4.3 เพื่อนำไปใช้สำหรับการหาค่าที่ดีที่สุดของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมมีค่ามากที่สุด

$$\text{TSF} = 277558 - 5679 \text{ welding current} - 488 \text{ arch length} + 34.5 \text{ welding angle} + 29.20 \text{ welding current} * \text{welding current} + 21.44 \text{ arch length} * \text{arch length} \quad (4.3)$$

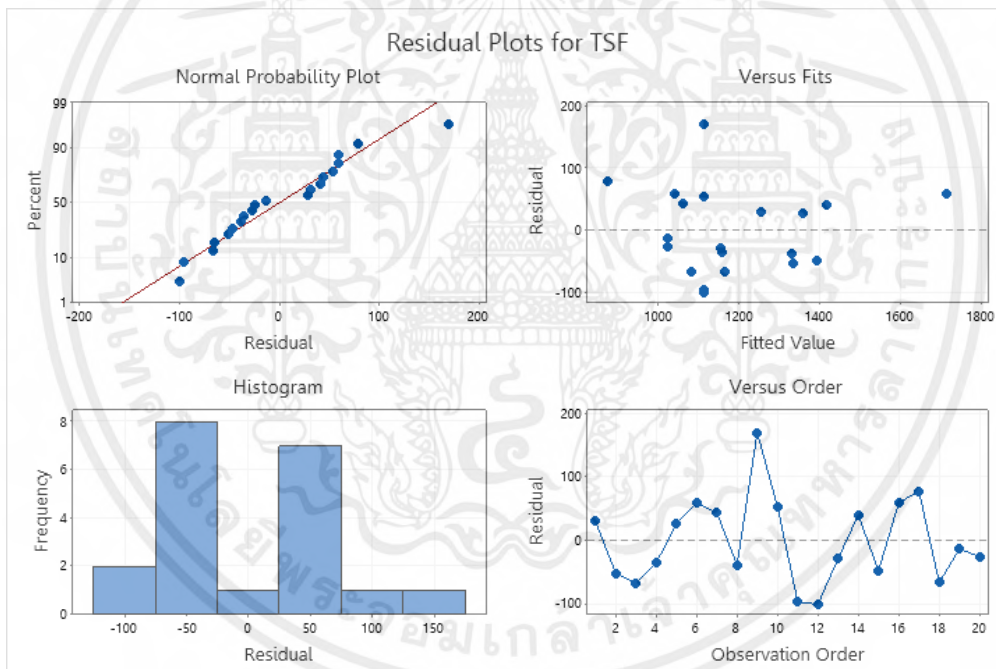
โดยที่ TSF	คือ ค่าแรงดึงเดือน (นิวตัน)
Welding Current	คือ กระแสไฟเชื่อม (แอมแปร์)
Arc Length	คือ ระยะอาร์ค (มิลลิเมตร)
Welding Angle	คือ มุมในการเชื่อม (องศา)



4.9 การตรวจสอบความถูกต้องของการทดลองในขั้นตอน Central Composite Design

นอกจากการวิเคราะห์ในเชิง Central Composite Design แล้วยังมีการพิจารณาเพิ่มเติมในด้านความถูกต้องของการออกแบบการทดลองเพิ่มเติม (Model Adequacy Checking) ซึ่งจะมีการวิเคราะห์ในส่วนของความถูกต้องและความเป็นอิสระของข้อมูลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8 มีรายละเอียดดังนี้

1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Normal Distribution of Residuals) มีการกระจายตัวของส่วนตกค้างอยู่ตามแนวเส้นตรง แสดงถึงค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ
2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง (Independent of Residual) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) พบว่าส่วนตกค้างนั้นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและมีความเป็นอิสระต่อกัน
3. การตรวจสอบความเสถียรของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ในแต่ละระดับของปัจจัย พบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลองมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



รูปที่ 4.8 Residual Plots ของค่าแรงดึงเส้นของรอยเชื่อมตามการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite design

4.10 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อม

จากสมการที่ 4.3 นำสมการที่ได้ไปหาค่าที่ดีที่สุดของแต่ละปัจจัยที่ทำให้ค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมมีค่าสูงสุด โดยค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมนั้นต้องอยู่ในช่วงการทำนาย (PI) มีค่าอยู่ระหว่าง 1582 ถึง 2264 นิวตัน ซึ่งมีการวิเคราะห์ข้อมูลโดยฟังก์ชัน Response Optimizer ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยที่มีผลให้ค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมมีค่าสูงที่สุดดังรูปที่ 4.9

Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
TSF	Maximum	953.25	1772.1		1	1

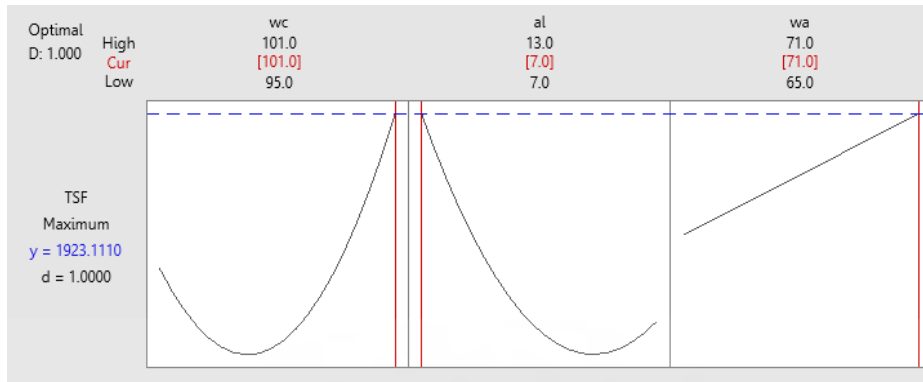
Solution					
Solution	wc	al	wa	TSF	Composite
				Fit	Desirability
1	101	7	71	1923.11	1

Multiple Response Prediction					
Variable	Setting				
wc	101				
al	7				
wa	71				

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
TSF	1923	114	(1676, 2170)	(1582, 2264)

รูปที่ 4.9 ข้อมูลการวิเคราะห์ผลโดยฟังก์ชัน Response Optimizer

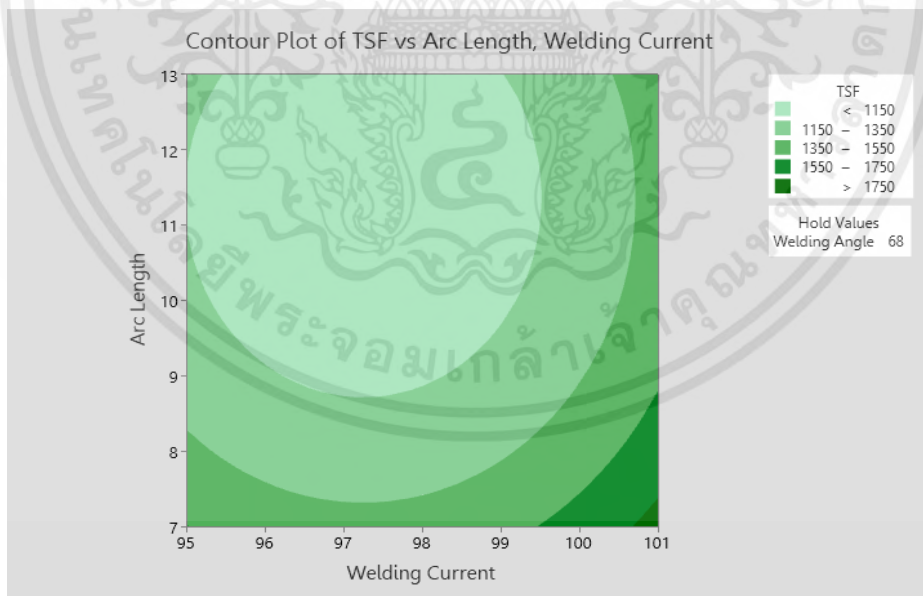
จากการใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในการวิเคราะห์ผล พบว่า ถ้าต้องการให้ได้ค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมที่สูงที่สุดจะต้องใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อม เท่ากับ 101 แอมแปร์, ระยะอาร์ค เท่ากับ 7 มิลลิเมตร และ มุมในการเชื่อมเท่ากับ 71 องศา โดยมีค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมอยู่ระหว่าง 1582 นิวตัน ถึง 2264 นิวตัน และมีลักษณะกราฟของแต่ละปัจจัยดังรูปที่ 4.10



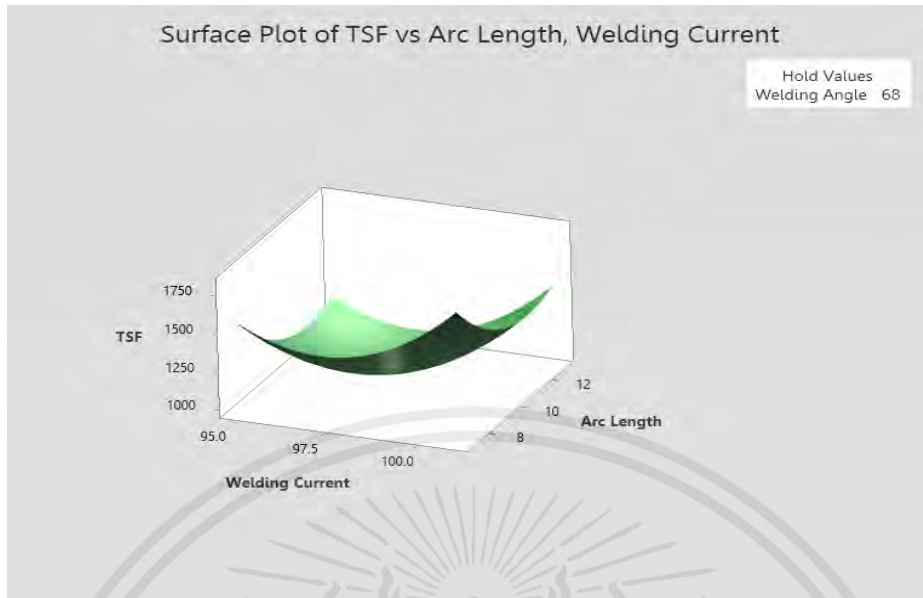
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าของปัจจัยที่ทำให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่ามากที่สุด

4.11 สร้างพื้นผิวผลตอบสนอง

จากการตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อใช้ในการทำนายค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม ในขั้นตอนถัดไปสร้างพื้นผิวผลตอบสนองของค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมเทียบกับปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมจากการทดลอง ได้แก่ กระแสไฟเชื่อม ระยะอาร์ค และมุมในการเชื่อม



รูปที่ 4.11 กราฟโครงร่างระหว่างระยะอาร์คและกระแสไฟเชื่อม

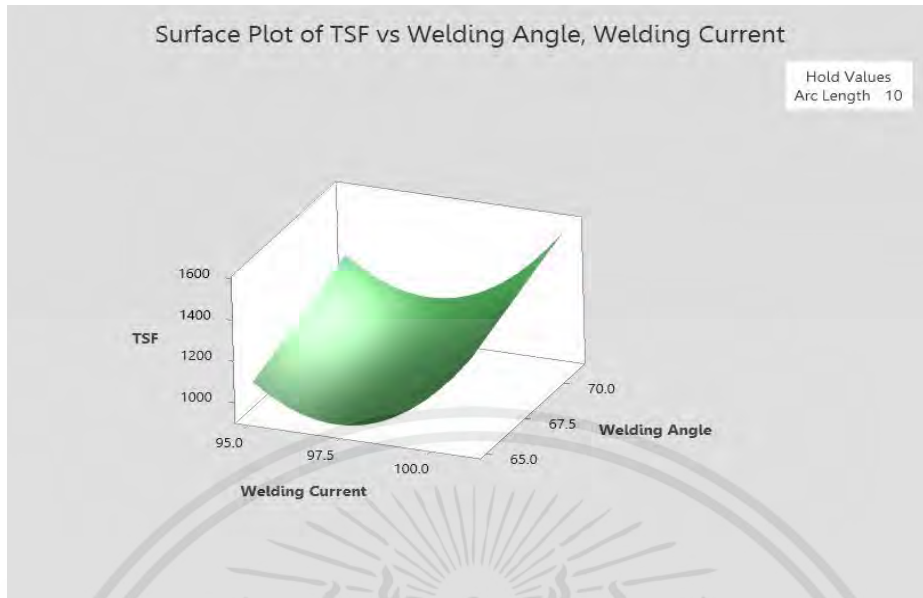


รูปที่ 4.12 พื้นผิวตอบสนองค่าแรงดึงเฉือนระหว่างระยะอาร์คและกระแสไฟเชื่อม

จากรูปที่ 4.11 กราฟโครงสร้างระหว่างระยะอาร์คและกระแสไฟเชื่อม และ รูปที่ 4.12 พื้นผิวตอบสนองค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมระหว่างระยะอาร์คและกระแสไฟเชื่อมแสดงลักษณะการให้ผลตอบสนองสูงสุด ซึ่งจะกำหนดค่าของปัจจัยให้คงที่ในระดับกลาง โดยคงที่ค่ามุมในการเชื่อมไว้ที่ 68 องศา จะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมสูงกว่า 1750 นิวตัน จะใช้กระแสไฟเชื่อมประมาณ 101 แอมป์ และใช้ระยะอาร์คประมาณ 7 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.13 กราฟโครงสร้างระหว่างมุมในการเชื่อมและกระแสไฟเชื่อม

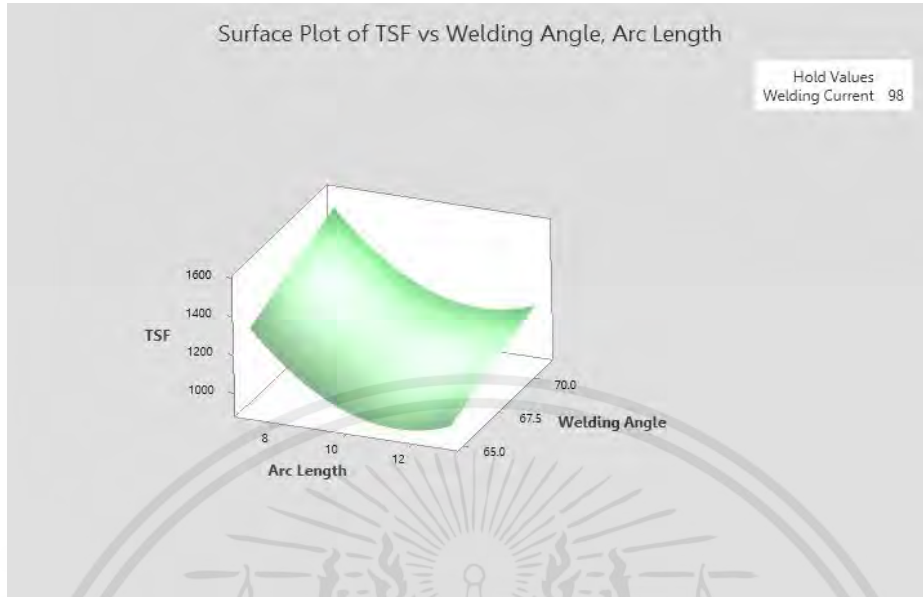


รูปที่ 4.14 พื้นผิวตอบสนองค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมระหว่างมุมในการเชื่อมและกระแสไฟเชื่อม

จากรูปที่ 4.13 กราฟโครงสร้างระหว่างมุมในการเชื่อมและกระแสไฟเชื่อม และ รูปที่ 4.14 พื้นผิวตอบสนองค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมระหว่างมุมในการเชื่อมและกระแสไฟเชื่อม แสดงลักษณะการให้ผลตอบสนองสูงที่สุด ซึ่งกำหนดค่าของปัจจัยให้คงที่ในระดับกลาง โดยคงที่ค่าระยะอาร์คไว้ที่ 10 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองที่ทำให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่ามากกว่า 1600 นิวตัน จะใช้กระแสไฟเชื่อมประมาณ 101 แอมแปร์ และ มุมในการเชื่อมประมาณ 71 องศา



รูปที่ 4.15 กราฟโครงสร้างระหว่างมุมในการเชื่อมและระยะอาร์ค



รูปที่ 4.16 พื้นผิวตอบสนองค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมระหว่างมุมในการเชื่อมและระยะอาร์ค

จากรูปที่ 4.15 กราฟโครงร่างระหว่างมุมในการเชื่อมและระยะอาร์ค และ รูปที่ 4.16 พื้นผิวตอบสนองค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมระหว่างมุมในการเชื่อมและระยะอาร์คแสดงลักษณะการให้ตอบสูงสุด ซึ่งกำหนดค่าของปัจจัยให้คงที่ในระดับกลาง โดยค่าคงที่กระแสไฟเชื่อมไว้ที่ 98 แอมแปร์ จะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองที่ทำให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่ามากกว่า 1600 นิวตัน จะใช้ระยะอาร์คประมาณ 7 มิลลิเมตร และ มุมในการเชื่อมประมาณ 71 องศา

4.12 การทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง

เป็นการทดลองบนค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม ในการเชื่อมแบบมีกระหว่างเหล็กกล้าไนซ์ และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล โดยปรับตั้งค่ากระแสไฟเชื่อม 101 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 7 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 71 องศา โดยทำการทดลองซ้ำทั้งหมดเท่ากับ 5 ครั้ง เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นให้กับผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผล

ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย			ค่าแรงดึงเฉือน (นิวตัน)					ค่าเฉลี่ย
กระแสไฟ เชื่อม (แอมแปร์)	ระยะอาร์ค (มิลลิเมตร)	มุมในการ เชื่อม (องศา)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
101	7	71	1617.35	1823.09	1745.14	1622.47	1780.80	1717.77

จากการทดลองเพื่อยืนยันผลพบว่าระดับปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล และนำค่าระดับปัจจัยมาทำการเชื่อมชิ้นงานเพื่อรับการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน ทั้งหมด 5 ชิ้น มีค่าแรงดึงเฉือนตามตารางที่ 4.13 โดยค่าเฉลี่ยของค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม เท่ากับ 1717.77 นิวตัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมจากสมการที่ 4.3 ที่มีช่วงการทำงาน (PI) ของค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมอยู่ในช่วง 1582 นิวตัน ถึง 2264 นิวตัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองเพื่อยืนยันผลกับช่วงการทำงาน (PI) ที่คำนวณจากสมการที่ 4.3 พบว่าผลการทดลองเพื่อยืนยันผลนั้นอยู่ในช่วงของ 1582 นิวตัน ถึง 2264 นิวตัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นมีความเพียงพอที่จะทำนายค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมสำหรับการเชื่อมแบบมีกระหว่างเหล็กกล้าไนซ์และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061

4.13 การอภิปรายผลการวิจัย

จากการกำหนดปัจจัยในการเชื่อมเพื่อศึกษาปัจจัยในการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมและหาจุดเหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบมิกระหว่างเหล็กกล้าไนซ์ และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 โดยลวดเชื่อมอลูมิเนียม ER4043 ทำให้ทราบว่าปัจจัยและระดับของปัจจัยที่แตกต่างกันนั้น มีผลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม โดยมีรายละเอียดดังนี้

การคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design และทำการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการทาง (ANOVA) พิจารณาความถูกต้องของการทดลองค่าความแปรปรวน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ พบว่ากระแสไฟเชื่อม ระยะอาร์ค มุมในการเชื่อม อิทธิพลร่วมระหว่างระยะอาร์คและมุมในการเชื่อม และ อิทธิพลร่วมระหว่างกระแสไฟเชื่อม ระยะอาร์ค และมุมในการเชื่อมมีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมและเมื่อพิจารณากราฟอิทธิพลหลักของปัจจัยกระแสไฟเชื่อมส่งผลต่อค่าแรงดึงเฉือนเป็นอย่างมาก โดยมีค่าแปรผันตรงระหว่างกัน และระยะอาร์คส่งผลต่อค่าแรงดึงเฉือน โดยมีค่าแปรผันตรงระหว่างกัน และ มุมในการเชื่อมส่งผลต่อค่าแรงดึงเฉือนเป็นอย่างมาก โดยมีค่าแปรผันตรงระหว่างกัน

หลังจากทราบปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อม นำปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมนั้นมาเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่าสูงสุดด้วยวิธี Response Surface Method โดยเริ่มจากการออกแบบการทดลองด้วย Steepest Ascent เพื่อไล่ระดับของปัจจัยจากจุดศูนย์กลางในการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design โดยจากผลการทดสอบแรงดึงเฉือนพบว่าจุดศูนย์กลางใหม่ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design คือ กระแสไฟเชื่อม เท่ากับ 98 แอมแปร์ ระยะอาร์ค เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 68 องศา

การหาระดับปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่ามากที่สุดโดยการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design และทำการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการทาง (ANOVA) พิจารณาความถูกต้องของการทดลองค่าความแปรปรวนโดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ พบว่าปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเฉือนมีค่ามากที่สุด ได้แก่กระแสไฟเชื่อม ระยะอาร์ค มุมในการเชื่อม และอิทธิพลร่วมระหว่างกระแสไฟเชื่อมกับกระแสไฟเชื่อม อิทธิพลร่วมระหว่างระยะอาร์คกับระยะอาร์ค และทำการหาระดับปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่ามากที่สุด โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมมีค่ามากที่สุด ได้แก่ กระแสไฟเชื่อม เท่ากับ 101 แอมแปร์ ระยะอาร์ค เท่ากับ 7 มิลลิเมตร และ มุมในการเชื่อม เท่ากับ 71 องศา โดยมีค่าเฉลี่ยของการทดลอง 5 ครั้งในขั้นตอนการยืนยันผลการทดลอง เท่ากับ 1717.77 นิวตัน

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัยเรื่องการศึกษาค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมแบบมิกระหว่างเหล็กกล้าไนซ์และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การสรุปผล
2. ข้อเสนอแนะ

5.1 การสรุปผล

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อหาอิทธิพลและค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมแบบมิก ระหว่างเหล็กกล้าไนซ์ และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 ด้วยลวดเชื่อมอลูมิเนียม ER4043 โดยหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อม โดยงานวิจัยเริ่มจากการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมได้แก่ กระแสไฟเชื่อม ระยะอาร์ค และมุมในการเชื่อม โดยพิจารณาผลการทดสอบการรับแรงดึงเดือน จากนั้นเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญมาทำการออกแบบการทดลองแบบ Steepest Ascent เพื่อหาจุดศูนย์กลางในการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design เพื่อหาระดับของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเดือนมีค่าที่สูงที่สุด สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดลอง Factorial Design เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงเดือนของรอยเชื่อม

กระแสไฟเชื่อมมีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงเดือน ซึ่งมีค่าแปรผันตรงระหว่างกัน และ ระยะอาร์คมีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงเดือน ซึ่งมีค่าแปรผกผันกัน และ มุมในการเชื่อมมีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงเดือน โดยมีอิทธิพลร่วมระหว่างระยะอาร์คกับมุมในการเชื่อม และอิทธิพลร่วมของปัจจัยทั้งสามที่กำหนดมีผลต่อค่าแรงดึงเดือนด้วยเช่นกัน

5.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดลอง Steepest Ascent

จุดศูนย์กลางในการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design คือ กระแสไฟเชื่อม เท่ากับ 98 แอมแปร์ ระยะอาร์ค เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมุมการเชื่อม เท่ากับ 68 องศา

5.1.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดลอง Central Composite Design เพื่อหาระดับของปัจจัยที่ส่งผลให้รอยเชื่อมมีค่าแรงดึงเฉือนสูงที่สุด

ค่าเหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงเฉือนของรอยเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบมิก ระหว่างเหล็กกล้าไนซ์ และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 ด้วยลวดเชื่อม ER4043 ได้แก่

1. กระแสไฟเชื่อม เท่ากับ 101 แอมแปร์
2. ระยะอาร์ค เท่ากับ 7 มิลลิเมตร
3. มุมในการเชื่อม เท่ากับ 71 องศา

จากนั้นได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลจำนวน 5 ชิ้นงาน เพื่อตรวจสอบผลตอบที่ได้มาว่าเป็นค่าที่ดีที่สุดหรือไม่ จากผลการทดลองพบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผล มีค่าแรงดึงเฉือนเฉลี่ยเท่ากับ 1717.77 นิวตัน ซึ่งอยู่ในช่วงการทำนาย (PI) ที่ได้การสมการทำนายจึงสรุปได้ว่าผลการทดลองที่ได้เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดของการตั้งค่าปัจจัยที่ส่งผลให้รอยเชื่อมมีค่าแรงดึงเฉือนที่สูงที่สุดในการเชื่อมแบบมิก ระหว่างเหล็กกล้าไนซ์ และอลูมิเนียมอัลลอย AA6061 ด้วยลวดเชื่อมอลูมิเนียม ER 4043 อย่างแท้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการเดินรอยเชื่อมในการทดลองเพื่อให้ค่าของผลตอบสนองนั้นมีความแม่นยำที่มากขึ้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการเดินรอยเชื่อม เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้เป็นแบบไม่อัตโนมัติจึงทำให้การเดินรอยเชื่อมนั้นอาจทำได้ไม่เหมือนกันในทุกๆการทดลอง จึงได้ทำการกำหนดจุดที่ทำการเชื่อม เพื่อให้ได้ลักษณะรอยเชื่อมที่คงที่

2. ควรมีการศึกษาต่อในด้านการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหวิทยาของรอยเชื่อม เพื่อที่จะได้รู้เกี่ยวกับลักษณะของรอยเชื่อมและปริมาณแต่ละธาตุที่เกิดขึ้นหลังทำการเชื่อม

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมคิด ภิมย์ภักดี, การพัฒนากระบวนการเชื่อมแบบจุ่มร้อน กรณีศึกษา บริษัท เอื้อวิทยาเครื่องอุปโภค จำกัด, สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2006.
- [2] Hyoung Jin Park, Sehun Rhee, Mun Jin Kang and Dong Cheol Kim, Joining of Steel to Aluminum Alloy by AC Pulse MIG Welding, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea, 2009.
- [3] KHALFALLAH, Z. BOUMERZOUQ, S. RAJAKUMAR and E. RAOUACHE, Optimization by RSM on rotary friction welding of AA1100 aluminum alloy and mild steel, International Review of Applied Sciences and Engineering 34-42, Algeria, 2020.
- [4] Taichi MURAKAMI, Kazuhiro NAKATA, Hongjun TONG and Masao USHIO, “Dissimilar Metal Joining of Aluminum to Steel by MIG Arc Brazing Using Flux Cored Wire”, Welding Research & Mechanical Engineering Dept., DAIHEN Corporation, Settsu, Osaka, Japan, 2003.
- [5] Sushovan Basak, Hrishikesh Das, Tapan Kumar Pal, Mahadev Shome, “Characterization of intermetallics in aluminum to zinc coated interstitial free steel joining by pulsed MIG brazing for automotive application,” Materials Characterization, vol. 112, pp. 229-237, February 2016.
- [6] Gene Mathers, “MIG welding,” The Welding of Aluminium and its Alloys, 2002, pp. 116-146.
- [7] Howard B. Cary, Scott C. Helzer, “Arc Welding with a Consumable Electrode,” Modern Welding Technology, 6th Edition, 2005, pp. 116-117.
- [8] ตรีเนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ, ชัยวัฒน์ พันธชาติ, โชคนิมิตร ชันธจันทร์, วิทยา อั้งดีดใช้, “การศึกษาอิทธิพลของแก๊สคลุมที่มีผลต่ออัตราการหลอมลึกในการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม,” The Journal of Industrial Technology, vol. 2, issue 1, February - July 2006.
- [9] ธีระยุทธ รัตนอาษา, การศึกษาเปรียบเทียบการบิดงอเชิงมุมของเหล็กกล้าคาร์บอนระหว่าง กระบวนการเชื่อม FCAW และ กระบวนการเชื่อม GMAW, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2013
- [10] ชัชชัย อินนุมาต, “รูปแบบการถ่ายเทน้ำโลหะ ในกระบวนการเชื่อม MIG...ต่างกันอย่างไร,” (2015, August 10). [Online]. Available: <https://thermal-mech.com/mig-weld/>

- [11] คณะณีย์ วรรณโท, การเชื่อมโลหะในระบบ GMAW, กรุงเทพฯ: สวัสดิการสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ, 1996.
- [12] สุริยนต์ ฉิ่งแก้ว, “เครื่องมือในงานเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม,” เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชาการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม, วิทยาลัยเทคนิคราชบุรี, 2017.
- [13] วิชิต เลื่อมใส, สุรชัย ขจรเดชะศักดิ์, อุดม สมไสยา, การศึกษาและพัฒนาวิธีการทำงานที่มีผลต่อการโค้งงอของบานประตูเตาอบอ่อนจากการเชื่อมแบบมิกซ์, เทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2011.
- [14] บริษัท สยามพาร์ท โปรดักส์ จำกัด, “ความปลอดภัยในการเชื่อม (Welding Safety),” Introduction of Welding Industry, 2016.
- [15] CRAFT SKILL, “MIG/MAG/CO2 Welding Wire ลวดเชื่อมมิก (ลวดเชื่อมซีโอทู) ลวดถ้ง,” (2022, July 15). [Online]. Available: <https://www.craftskill.co/migwire/>
- [16] บริษัท กู๊ดวิล แมชชีน จำกัด, “ลวดเชื่อมอลูมิเนียมแก๊ส โคเวท-ER4043,” (2020 April 26). [Online]. Available: <https://th.kovet.com/product-page/welding-wire-for-aluminium-and-aluminium-alloys-er4043>.
- [17] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, การเชื่อมแก๊สเฉื่อยปกคลุมรอยต่อเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมในงานโครงสร้างอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2013.
- [18] มานะศิษฐ์ พิมพ์สาร, คู่มือการเชื่อมมิก-แม็ก, กรุงเทพฯ : เอ็มแอนด์อี, 1999.
- [19] ชีรวุฒิ เชื้อนแก้ว, การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429 โดยหุ่นยนต์งานเชื่อมอัตโนมัติ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2012.
- [20] Welding Tech, “What is Arc Length in Welding?,” (2019 October 28). [Online]. Available: <https://weldingtech.net/arc-length/>.
- [21] DIY MIG welding, “Arc Welding Faults,” (2022 November 24). [Online]. Available: <https://www.mig-welding.co.uk/arc-welding-faults.htm>.
- [22] ชีรภัทร์ ยามานนท์, ปัจจัยความเร็วรอบและความเร็วการเดินเชื่อมของโลหะอลูมิเนียมผสม 6061-T6 ในการเชื่อมแบบหมุนเสียดทาน, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2015.

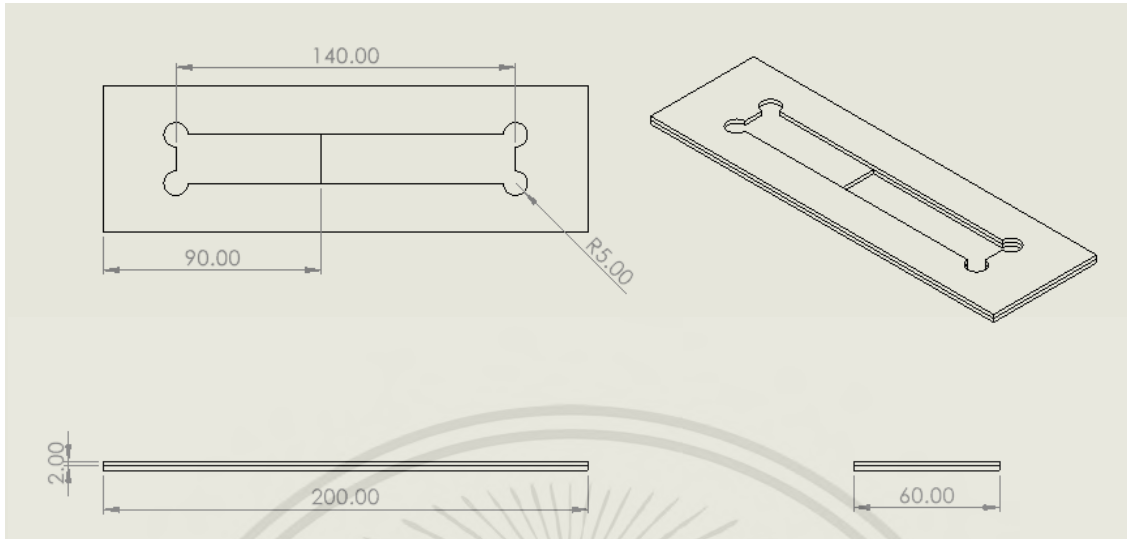
- [23] อนุชา ขวัญสุข, เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมอลูมิเนียมเนื้อ AA6063-T1 โดยการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวนด้วยแกนหมุนทรงกระบอกผิวเรียบและผิวเกลียว, สาขาวิศวกรรมการผลิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2007.
- [24] ASM Handbook Committee, “Metals Handbook - Ninth Edition (Volume 2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals),” American Society for Metals, 9th edition, 1979.
- [25] สมคิด ภิรมย์ภักดี, การพัฒนากระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน กรณีศึกษา บริษัท เอื้อวิทยาเครื่องอุปกรณ์ จำกัด, สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2006.
- [26] M. J. RATHOD and M. KUTSUNA, “Joining of Aluminum Alloy 5052 and Low-Carbon Steel by Laser Roll Welding”, WELDING JOURNAL, 2004.
- [27] Dr. Osama Mohammed Elmardi Suleiman Khayal, LABORATORY EXPERIMENTS TENSILE TESTING, Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering and Technology, Nile Valley University, Atbara, Sudan, 2019.
- [28] Montgomery, Douglas C. Introduction to Statistical Quality Control. Hoboken, NJ: Wiley, 2013.
- [29] Sushovan Basak, Hrishikesh Das, Tapan Kumar Pal, Mahadev Shome, “Characterization of intermetallic in aluminum to zinc coated interstitial free steel joining by pulsed MIG brazing for automotive application”, Metallurgical and Material Engineering Department, Jadavpur University, Kolkata-700032, Material Characterization & Joining Group, R & D, Tata Steel, Jamshedpur-831007, India, 2016
- [30] ชีรวิทย์ เชื้อนแก้ว, การเชื่อมความต้านทานแบบจุดของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS316L กับ SUS425, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2019.
- [31] ปาริชาติ นาทะสัน, การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยในกระบวนการผลิตกล่องกระดาษลูกฟูก, วิศวกรรมอุตสาหกรรม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2010.
- [32] ภูมินทร์ รักษากิจ, ชีรเดช วุฒิพรพันธ์ และ กุศล พิมาพันธุ์ศรี, “การลดปริมาณของเสียในกระบวนการกลั่นสารอัลลิลคลอไรด์ โดยใช้การทดลองพินผิวตอบสนอง,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 25, ฉบับที่ 3, หน้า 393-403, 2015.

- [33] ประภาพรพรณ พรหมทองและนายปुरुณ์พมิตธิ ดาศรี, การเชื่อมความต้านทานจุดแบบพัลส์คู่ระหว่าง เหล็กกล้าไร้สนิม JFE409L และเหล็กกล้าไร้สนิม JFE429EX, ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2021.
- [34] Abdunnasser Embark Beled, A I M Shaiful, Muhamad Fahmi Mohd Roslan, M N B Omar and Mazlan Mohamed, “A Study of Tensile Strength of MIG Welding-Brazing Dissimilar Lap Joints of Mild Steel and Aluminum Alloy”, School of Manufacturing Engineering, University Malaysia Perlis (UniMAP), PO Box 77, Pejabat Pos Besar, 01000 Kangar, Perlis, Malaysia, 2019.
- [35] พิศิต ดวงมาลา, การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเชื่อมด้วยไฟฟ้าก๊าซคลุมสำหรับเหล็กกล้า เอสที่ 37 โดยวิธีพื้นผิวตอ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2006.

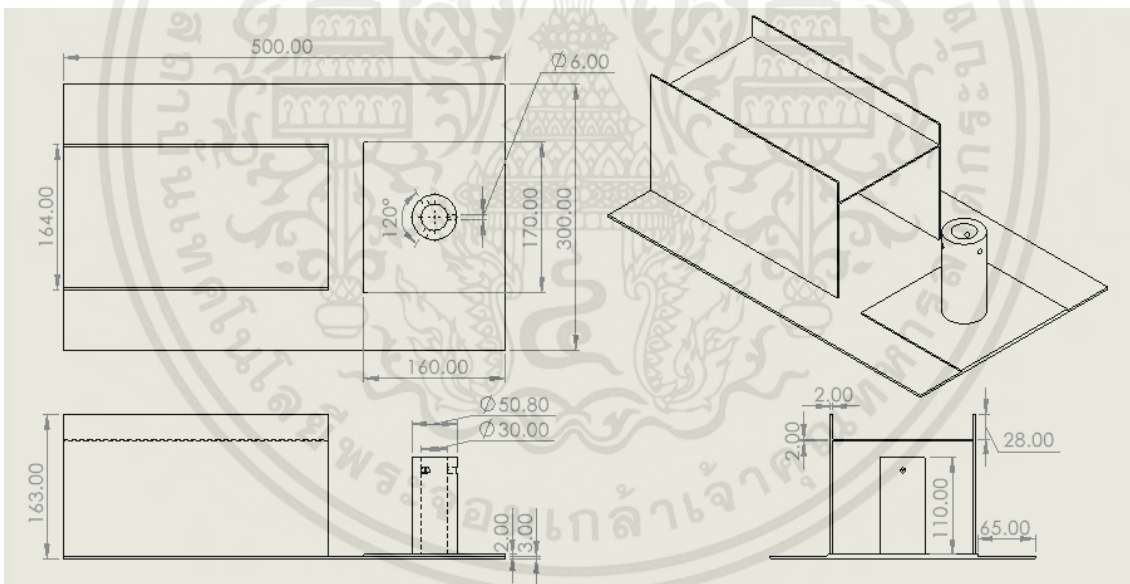




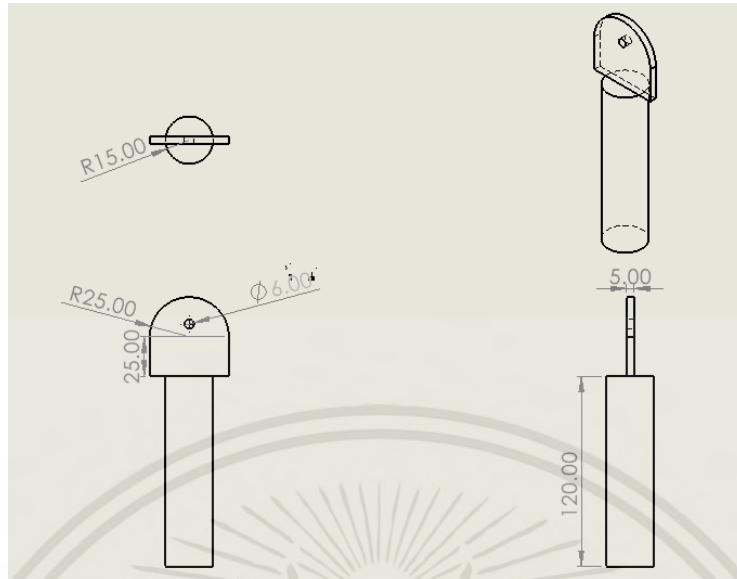
ภาคผนวก ก.
แบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)



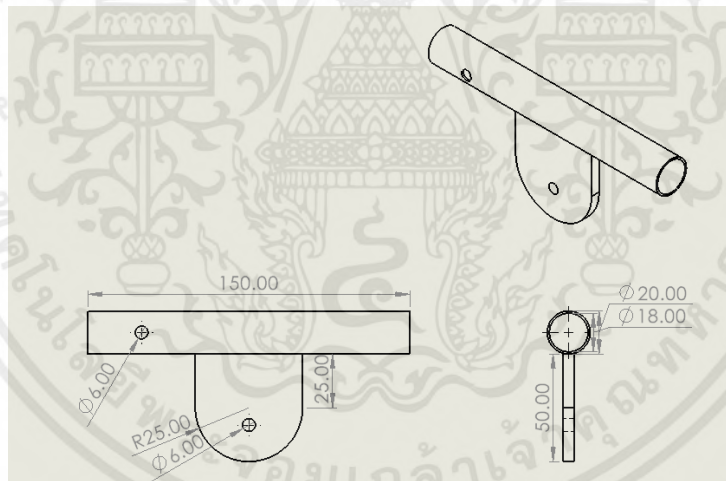
รูปที่ ผก. 1 แบบอุปกรณ์จับชิ้นงาน
สำหรับการเชื่อมแบบมิกเพื่อการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน (หน่วย : มิลลิเมตร)



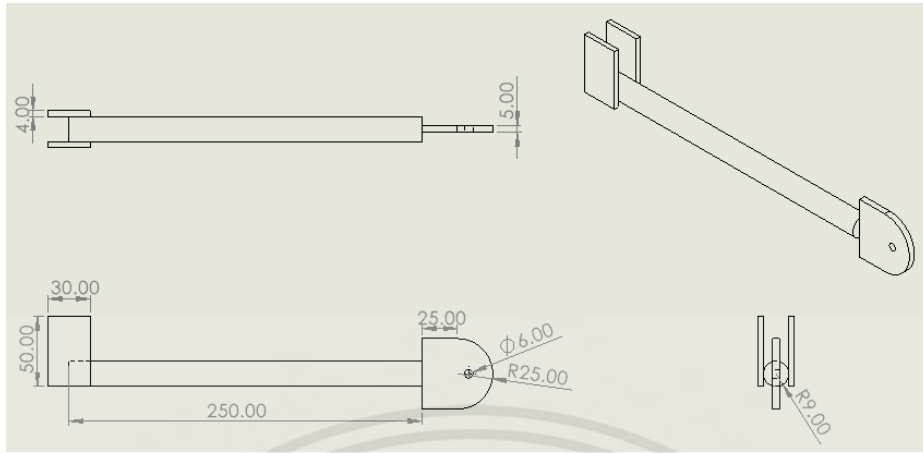
รูปที่ ผก. 2 แบบอุปกรณ์สำหรับจับหัวเชื่อม
สำหรับการเชื่อมแบบมิกเพื่อการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน (ชิ้นที่ 1) (หน่วย : มิลลิเมตร)



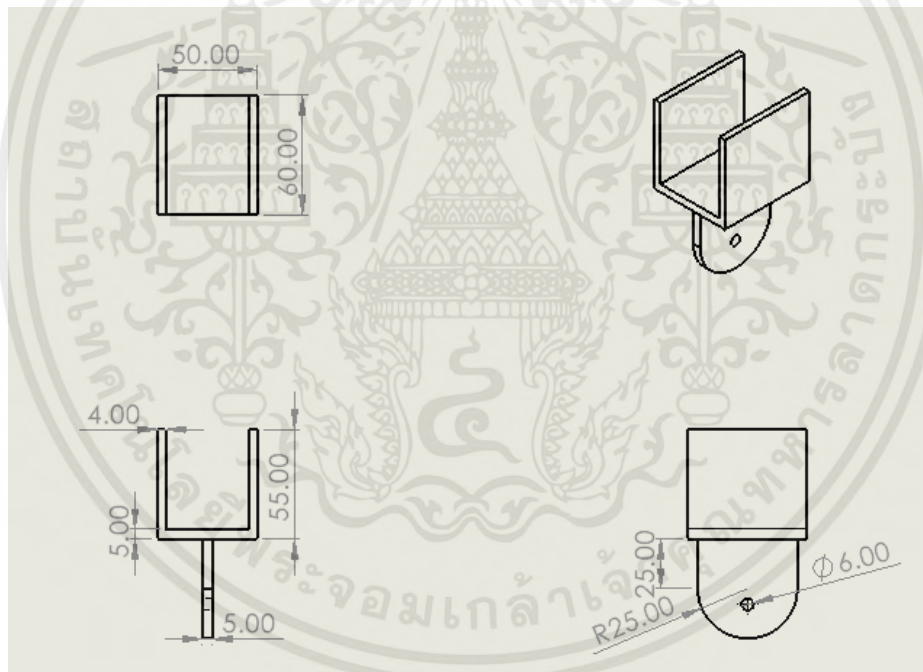
รูปที่ ผก. 3 แบบอุปกรณ์สำหรับจับหัวเชื่อม
สำหรับการเชื่อมแบบมิกเพื่อการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน (ขั้นที่ 2) (หน่วย : มิลลิเมตร)



รูปที่ ผก. 4 แบบอุปกรณ์สำหรับจับหัวเชื่อม
สำหรับการเชื่อมแบบมิกเพื่อการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน (ขั้นที่ 3) (หน่วย : มิลลิเมตร)



รูปที่ ผก. 5 แบบอุปกรณ์สำหรับจับหัวเชื่อม
สำหรับการเชื่อมแบบมิกเพื่อการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน (ชั้นที่ 4) (หน่วย : มิลลิเมตร)

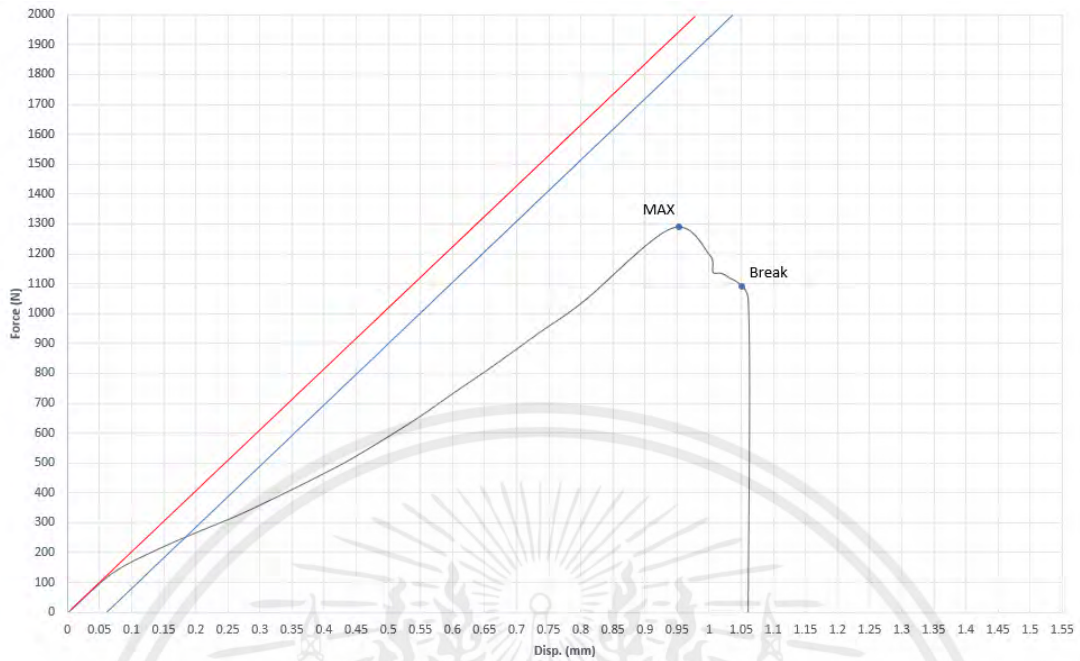


รูปที่ ผก. 6 แบบอุปกรณ์สำหรับจับหัวเชื่อม
สำหรับการเชื่อมแบบมิกเพื่อการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน (ชั้นที่ 5) (หน่วย : มิลลิเมตร)

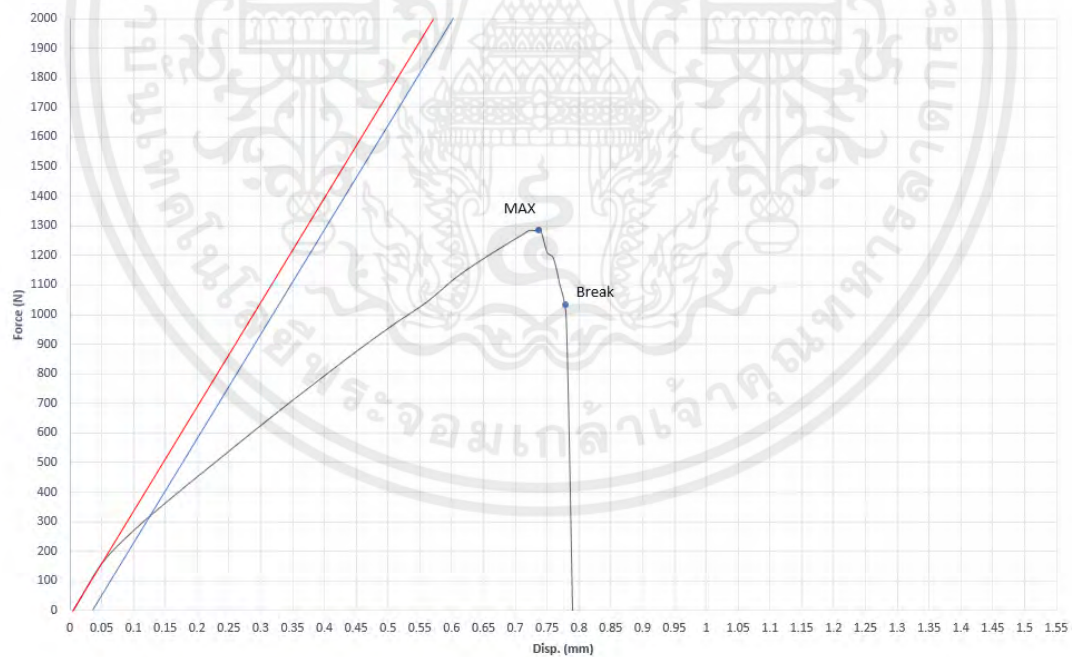


ภาคผนวก ข.

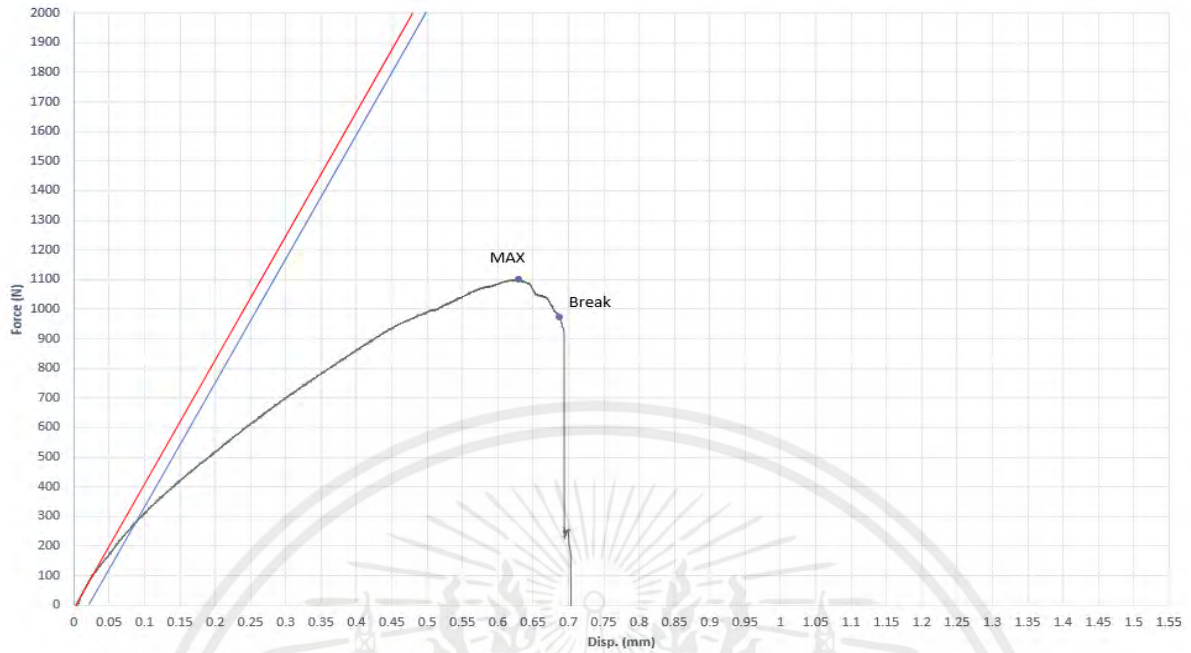
กราฟแสดงผลสำหรับการทดสอบการรับแรงดึงเฉือน



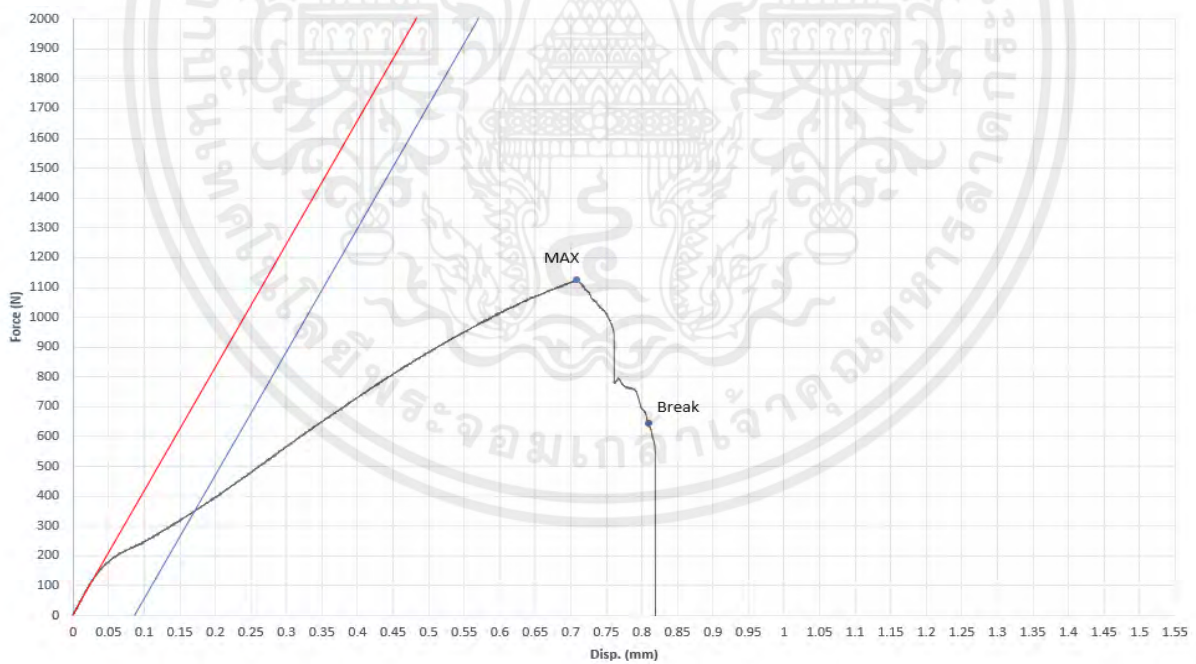
รูปที่ ผข. 1 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วย กระแสไฟฟ้า 96 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 8 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 66 องศา



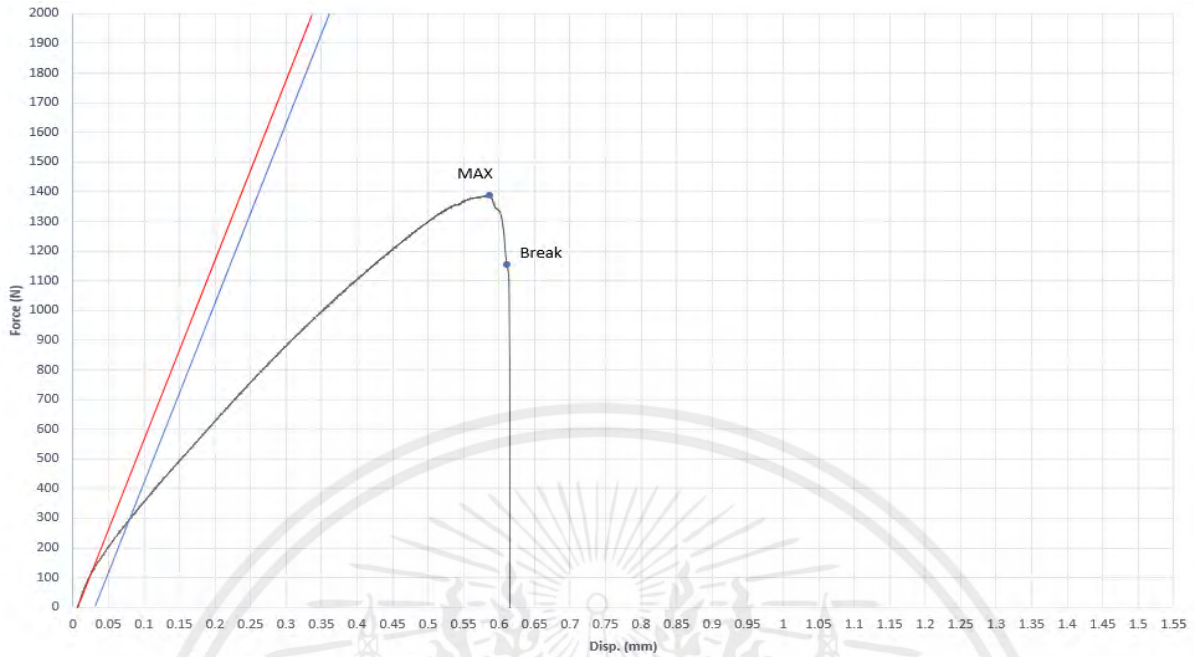
รูปที่ ผข. 2 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วย กระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 8 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 66 องศา



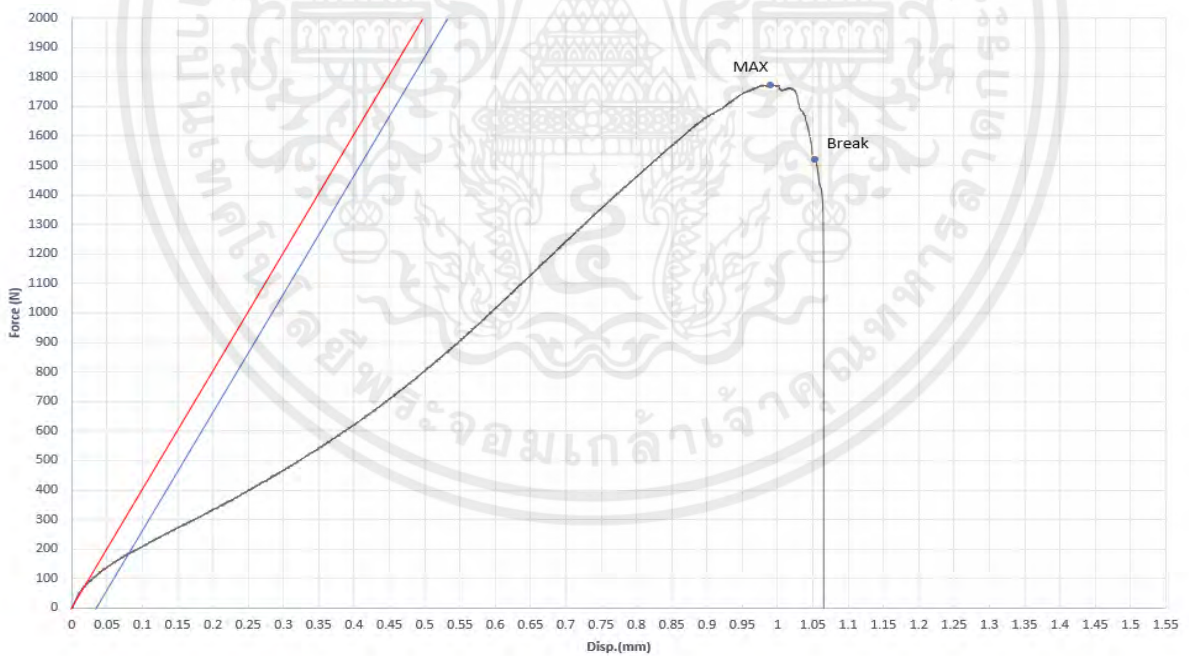
รูปที่ ผข. 3 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วย กระแสไฟฟ้า 96 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 12 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 66 องศา



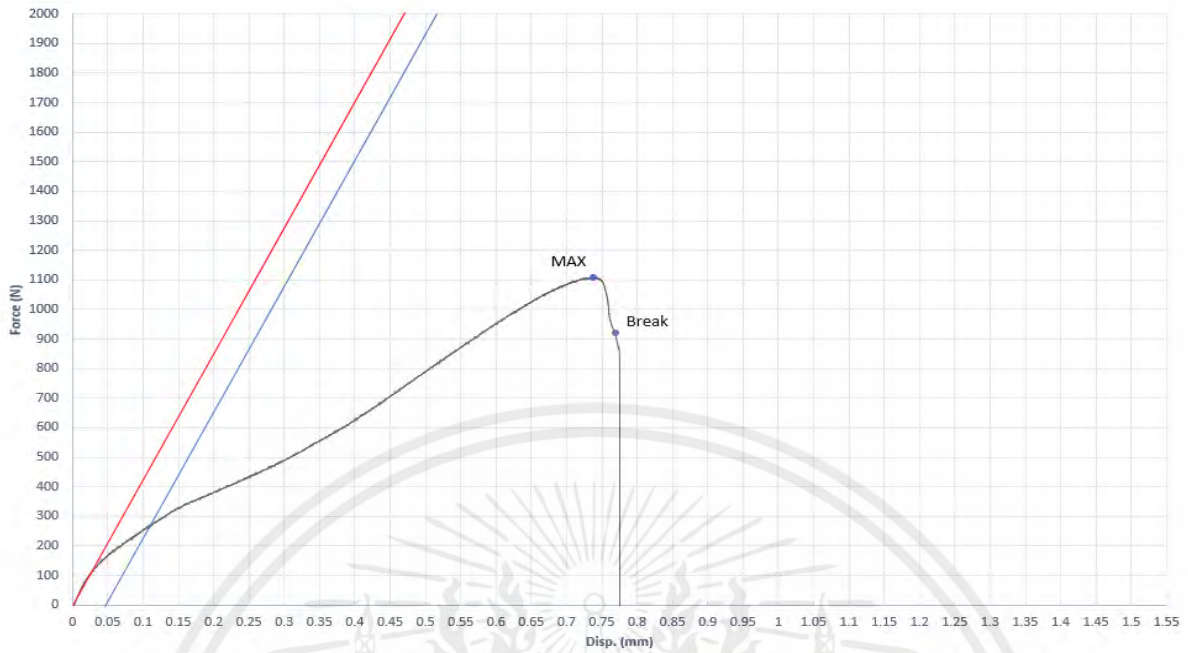
รูปที่ ผข. 4 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วย กระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 12 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 66 องศา



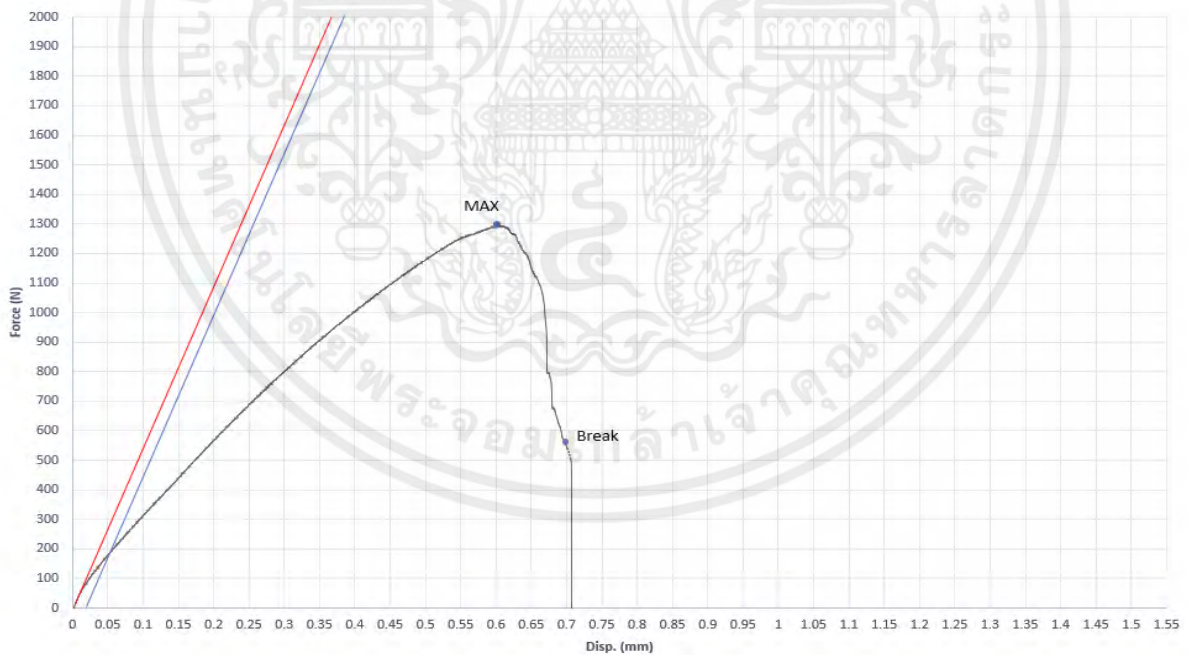
รูปที่ ผข. 5 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วย
กระแสไฟฟ้า 96 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 8 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 70 องศา



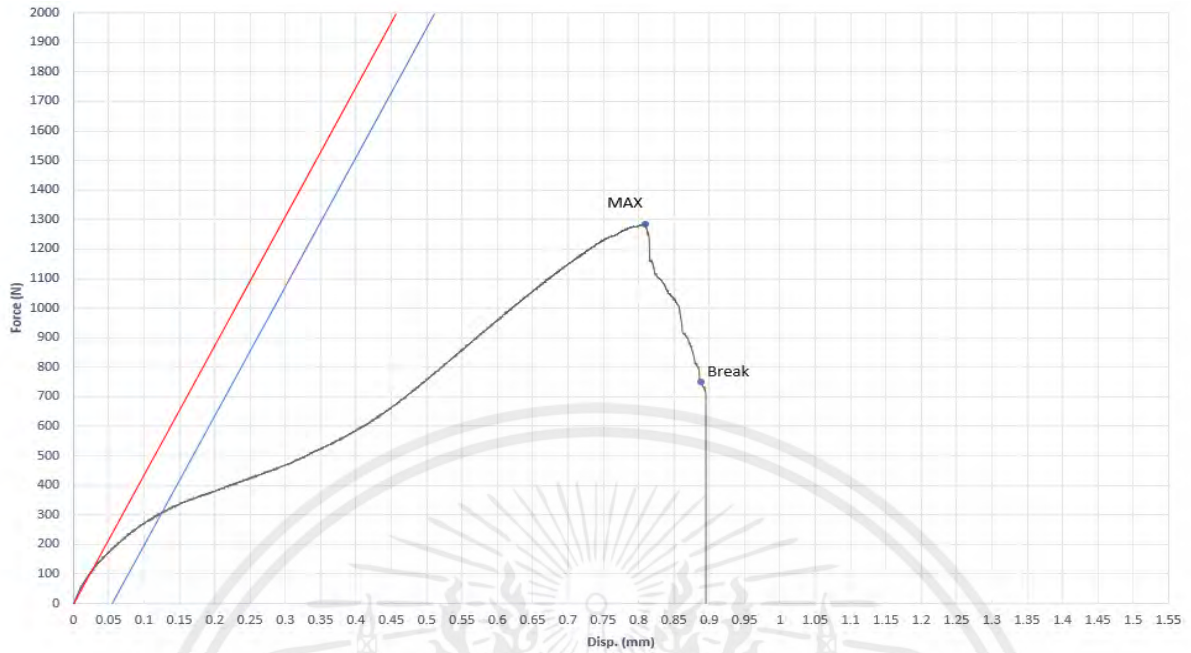
รูปที่ ผข. 6 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วย
กระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 8 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 70 องศา



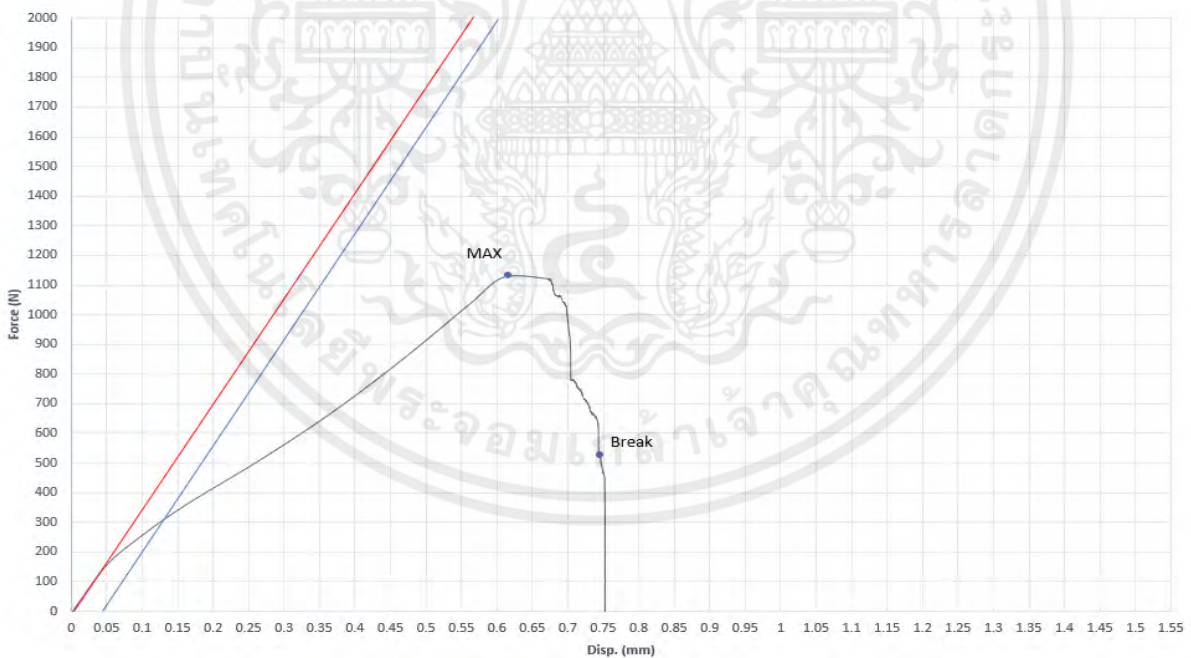
รูปที่ ผข. 7 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วย กระแสไฟฟ้า 96 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 12 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 70 องศา



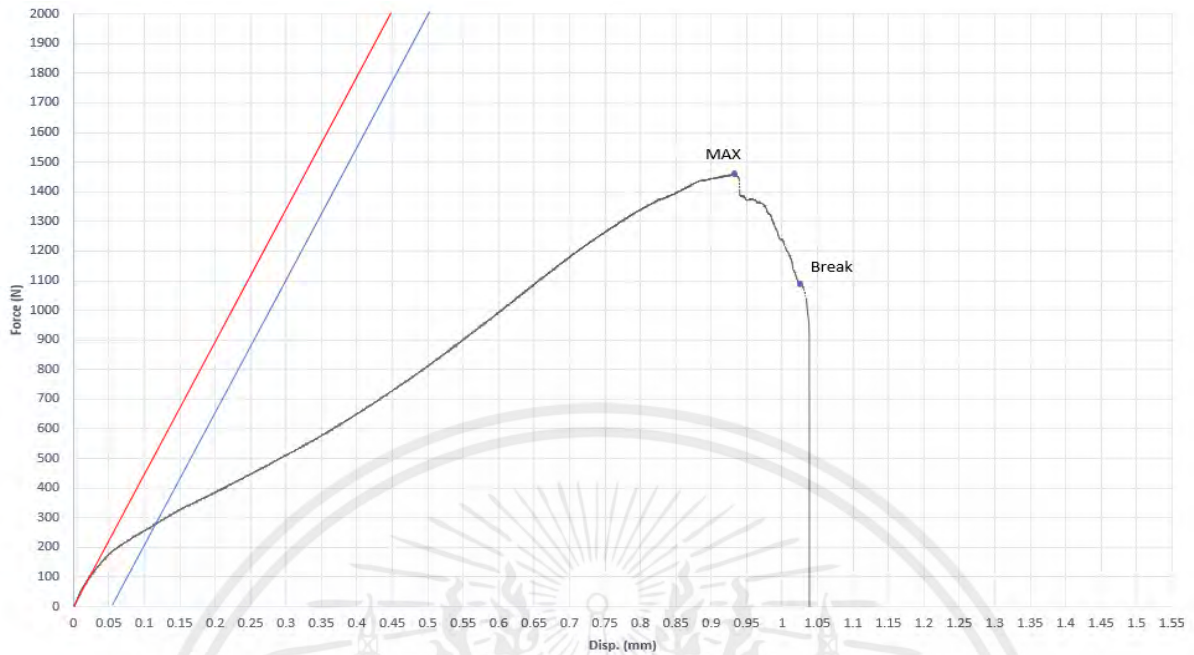
รูปที่ ผข. 8 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วย กระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 12 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 70 องศา



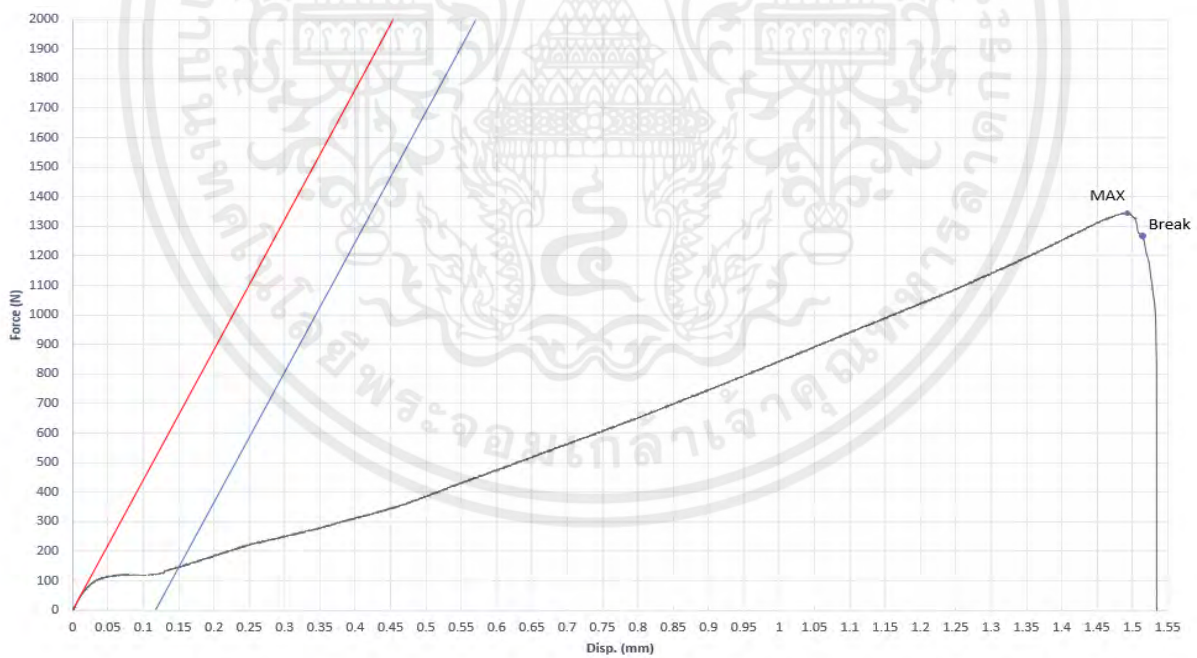
รูปที่ ผข. 9 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วยกระแสไฟฟ้า 98 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 10 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 68 องศา



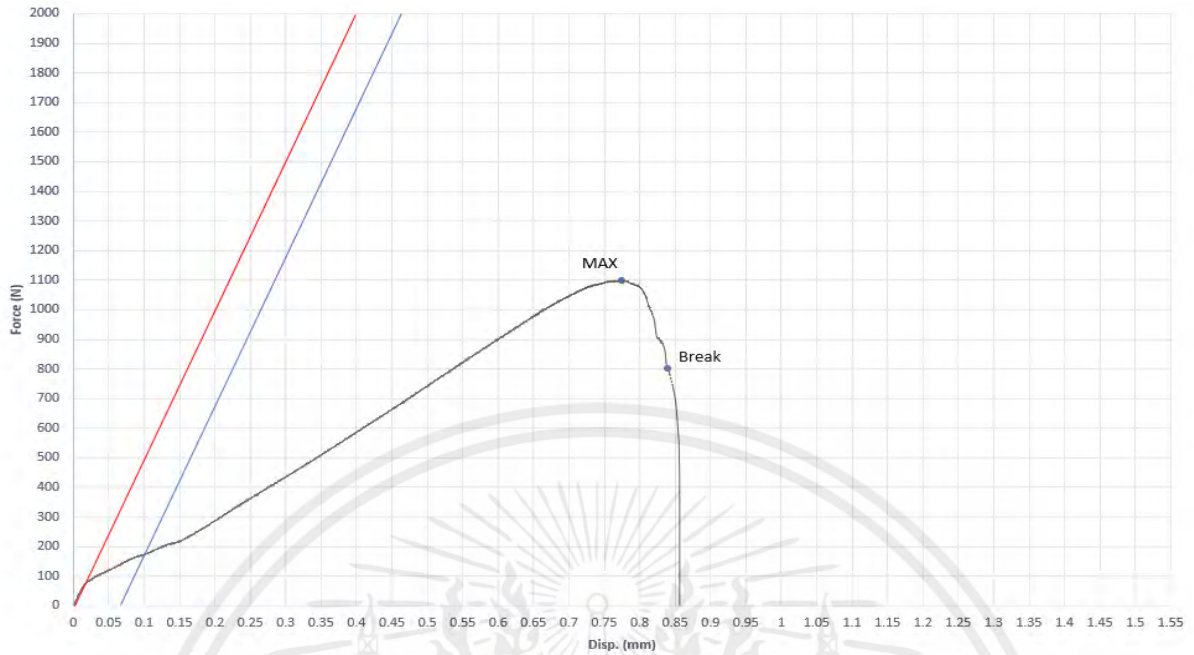
รูปที่ ผข. 10 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วยกระแสไฟฟ้า 95 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 10 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 68 องศา



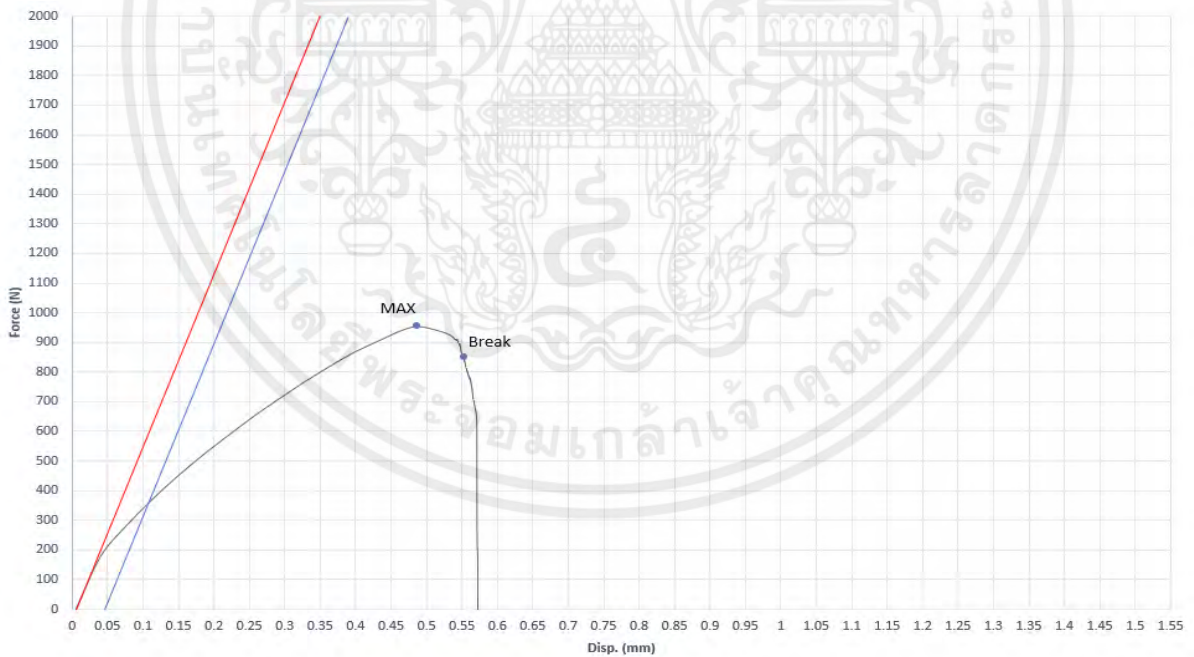
รูปที่ ผข. 11 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วย
กระแสไฟฟ้า 101 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 10 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 68 องศา



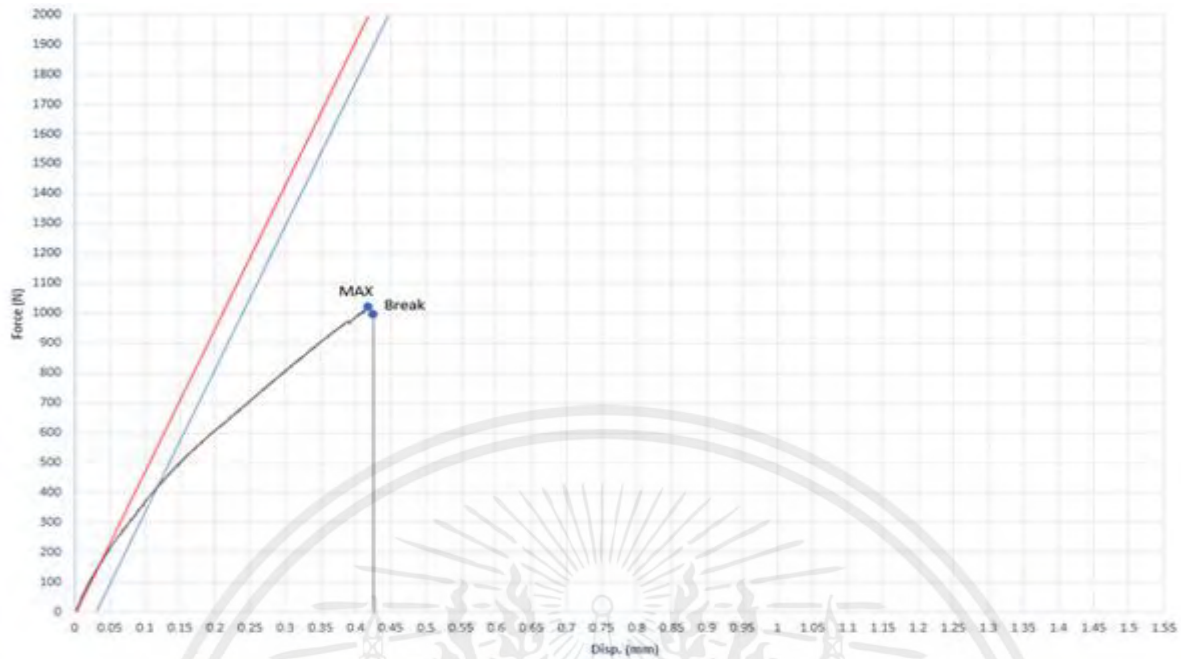
รูปที่ ผข. 12 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วย
กระแสไฟฟ้า 98 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 7 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 68 องศา



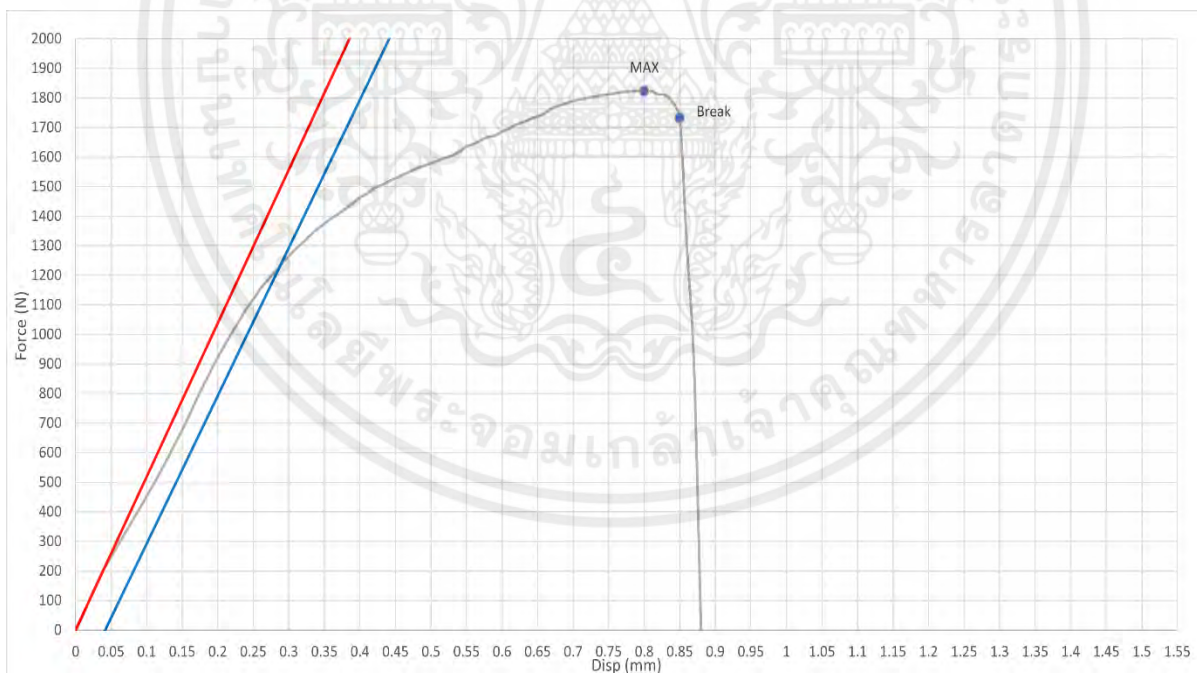
รูปที่ ผข. 13 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วย
กระแสไฟฟ้า 98 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 13 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 68 องศา



รูปที่ ผข. 14 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วย
กระแสไฟฟ้า 98 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 10 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 65 องศา



รูปที่ ผข. 15 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วย
กระแสไฟฟ้า 98 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 10 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 71 องศา









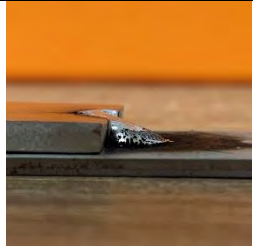



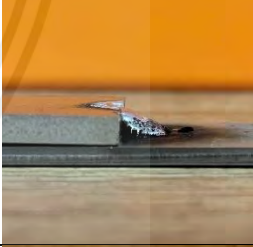

รูปที่ ผข. 16 กราฟแสดงผลการทดสอบการรับแรงดึงเฉือนของชิ้นงานเชื่อมแบบมิกด้วย
กระแสไฟฟ้า 101 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 7 มิลลิเมตร และมุมในการเชื่อม 71 องศา





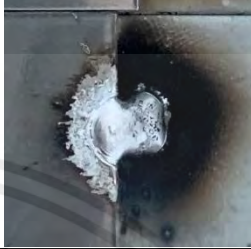
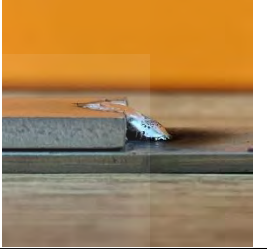
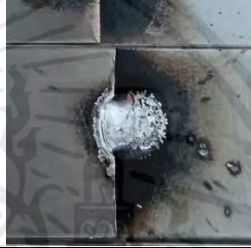
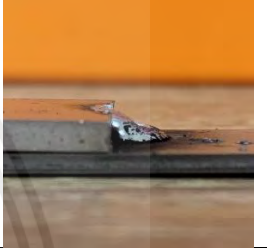


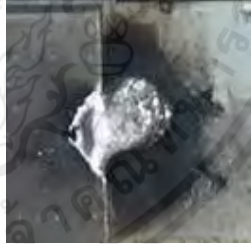

ภาคผนวก ค.
ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อม

ตารางที่ ผค.1 ตารางแสดงลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมที่ค่าของระดับปัจจัยที่ศึกษาแตกต่างกัน

ลำดับการทดลอง	ปัจจัยที่ศึกษา			ลักษณะรอยเชื่อมทางกายภาพ	
	กระแสไฟฟ้า	ระยะอาร์ค	มุมในการเชื่อม	มุมมองด้านบน	มุมมองด้านข้าง
1	96	8	66		
2	100	8	66		
3	96	12	66		
4	100	12	66		
5	96	8	70		

6	100	8	70		
7	96	12	70		
8	100	12	70		
9	98	10	68		
13	95	10	68		
14	101	10	68		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15	98	7	68		
16	98	13	68		
17	98	10	65		
18	98	10	71		
19	101	7	71		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้