

248935

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



248935

รายงานการวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานแบบมิกที่มีต่อรูปร่าง คุณสมบัติทางกล
และโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมในการเชื่อมประสานเหล็กกล้าเข้ากับอลูมิเนียมเพื่อ
ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์

A study on influence of MIG brazing parameters on bead shape, mechanical
properties, and microstructure in joining of steel to aluminium for applications in
automobile industry

นายกรรณชัย กัลยาศิริ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานแบบมิกที่มีต่อรูปร่าง คุณสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมในการเชื่อมประสานเหล็กกล้าเข้ากับอลูมิเนียมเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์

A study on influence of MIG brazing parameters on bead shape, mechanical properties, and microstructure in joining of steel to aluminium for applications in automobile industry

นายกรรณชัย กัถยาศิริ



ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2554

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานแบบมิกที่มีต่อรูปร่าง คุณสมบัติทางกล และ โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมในการเชื่อมประสานเหล็กกล้าเข้ากับอลูมิเนียมเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์

(ภาษาอังกฤษ) A study on influence of MIG brazing parameters on bead shape, mechanical properties, and microstructure in joining of steel to aluminium for applications in automobile industry

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2554 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 483,500 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2553 ถึง 30 กันยายน 2554

หัวหน้าโครงการ นายกรรณชัย กัลยาศิริ

หน่วยงานต้นสังกัด สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์ 02-329-8339 อีเมล kkanac@kmitl.ac.th

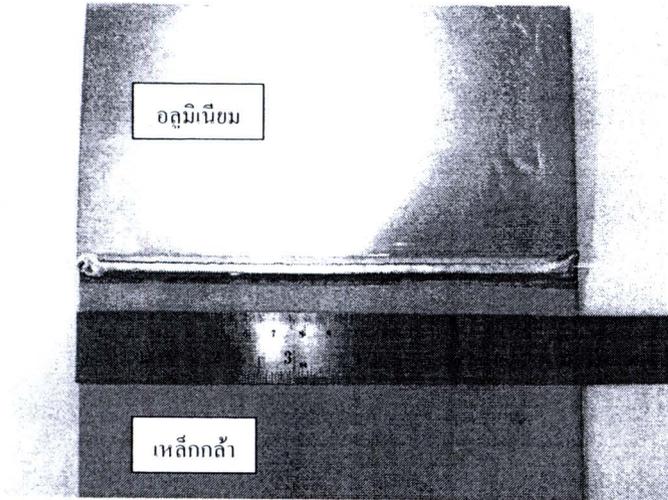
คำสำคัญ (Keywords) MIG brazing, Steel to aluminium joining, Intermetallic compound

บทคัดย่อ

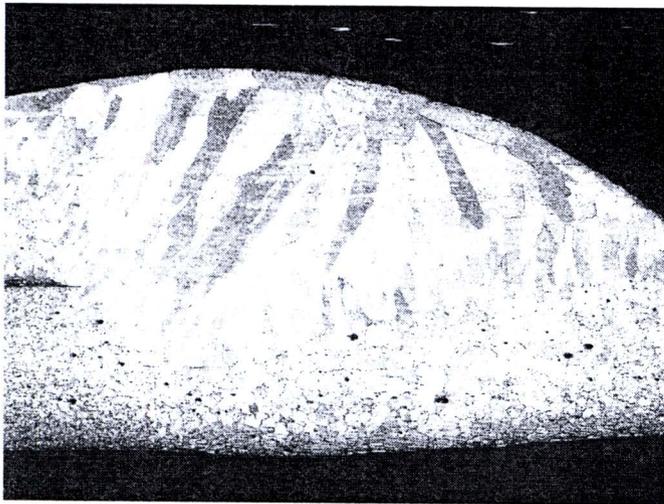
248935

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานแบบมิกที่มีต่อรูปร่าง คุณสมบัติทางกล และ โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมในการเชื่อมประสานเหล็กกล้าเข้ากับอลูมิเนียม เพื่อนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอื่นๆที่เกี่ยวข้อง ในการศึกษาได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design และ Central Composite Design ช่วยในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยตัวแปรหรือปัจจัยที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ความเร็วในการเล่นประสาน (Travel speed) ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน (Nozzle to work distance) และมุมงาน (Work angle) โดยให้แรงดันไฟฟ้า (Voltage) กระแสไฟฟ้า (Current) อัตราการป้อนลวด (Wire feed rate) และอัตราการไหลของแก๊สคลุม (Gas flow rate) มีค่าคงที่ จากการทดลองและการวิเคราะห์ผลพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล (ความต้านทานแรงดึงของรอยต่อ) คือ ความเร็วในการเล่นประสาน และมุมงาน ส่วนปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานแรงดึงของรอยต่อ คือ ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วในการเล่นประสานและมุมงาน และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการพยากรณ์ค่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อ คือ $Y = 2164.16 - 0.66 * \text{Speed} - 61.35 * \text{Angle} + 0.12 * \text{Speed} * \text{Angle}$ โดยข้อจำกัดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ คือ ขอบเขตของปัจจัยความเร็วในการเล่นประสาน จะอยู่ในช่วง 400 ถึง 650 มิลลิเมตร/นาที และขอบเขตของมุมงาน จะอยู่ในช่วง -15 ถึง 15 องศา โดยที่ความเร็วในการเล่นประสานและมุมงานที่ใช้ในช่วงที่ได้กล่าวมานี้ เป็นช่วงที่ให้รูปร่างของรอยเชื่อมที่สมบูรณ์ตามมาตรฐานการตรวจสอบรอยเชื่อม ANSI/AWS.B.11:2000 สำหรับสารประกอบเชิงโลหะที่พบในรอยต่อจากการเล่นประสานในการศึกษานี้ ได้แก่ Fe_2Al_3 , $FeAl_2$ และ $FeAl_3$

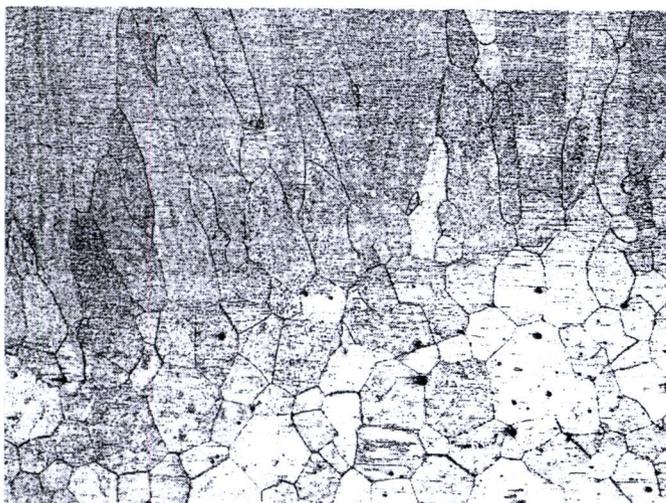
This research was aimed to investigate influence of MIG brazing parameters on bead shape, mechanical properties, and microstructure of brazed joint between galvanized steel and 5052 aluminum alloy. The experiment was designed, performed, and analyzed based on full factorial experimental design and central composite design. The experimental parameters were travel speed, nozzle to work distance, and work angle. Brazing voltage, brazing current, wire feed rate, and gas flow rate was kept at a constant value throughout the experiment. Results showed that main factors affecting tensile strength of brazed joints are travel speed, and work angle, and the significant interaction is the interaction between the travel speed and the work angle. The statistical model for predicting tensile strength of brazed joints can be described as $Y = 2164.16 - 0.66 * \text{Speed} - 61.35 * \text{Angle} + 0.12 * \text{Speed} * \text{Angle}$. This equation was applicable on the range of travel speed between 400 and 650 mm/min and the range of work angle between -15 and 15 degrees. This operation range gave an acceptable bead shape according to ANSI/AWS.B.11:2000 visual inspection standard. Intermetallic phases found in the brazed joints included Fe_2Al_5 , FeAl_2 and FeAl_3 .



ลักษณะของรอยต่อและขนาดของชิ้นงานจากการแล่นประสานแบบมิก



ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่ได้จากการแล่นประสานที่กำลังขยาย 50 เท่า



ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่ได้จากการแล่นประสานที่กำลังขยาย 200 เท่า

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1	บทนำ
1.1	ที่มาและปัญหาของโครงการ..... 1
1.2	วัตถุประสงค์..... 2
1.3	ขอบเขตของโครงการ..... 2
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2
บทที่ 2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2.1	ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการประสานรอยต่อแผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสี..... 3
2.2	การแล่นประสาน..... 3
2.2.1	กระบวนการแล่นประสาน..... 4
2.2.2	องค์ประกอบในการแล่นประสาน..... 4
2.3	การแล่นประสานด้วยมิก (MIG-Brazing)..... 7
2.3.1	การเชื่อมแบบ GMAW-P บนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี..... 7
2.3.2	การเกิดอาร์ก..... 9
2.4	การถ่ายโอนน้ำโลหะ (Metal Transfer)..... 10
2.4.1	การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร (Short circuit transfer)..... 10
2.4.2	การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดน้ำขนาดใหญ่ (Globular Transfer)..... 10
2.4.3	การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง (Spray Transfer) 11
2.4.4	การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพัลส์ (Pulse Transfer)..... 12
2.5	การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหล่อเย็น (Cold Metal Transfer)..... 14
2.6	ตัวแปรในการแล่นประสานรอยต่อ..... 15
2.6.1	ลวดเติม (Filler Metal)..... 15
2.6.2	แก๊สคลุม (Shielding Gas)..... 16
2.6.3	กระแสในการเชื่อม (Welding Current)..... 17
2.6.4	แรงดันอาร์ก (Arc Voltage)..... 18
2.6.5	อัตราเร็วเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม (Welding Speeds : Travel Speeds)..... 19
2.7	การออกแบบการทดลอง (Designing Experiments)..... 19
2.7.1	การวางแผน (Planning)..... 19
2.7.2	การคัดเลือก (Screening)..... 20
2.7.3	การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) 21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.4 การทวนสอบ (Verification).....	21
2.8 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design).....	21
2.8.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design).....	21
2.8.2 การออกแบบเพื่อคัดเลือก (Screening Design).....	21
2.8.3 การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial.....	22
2.8.4 การออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial.....	22
2.9 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression).....	23
2.9.1 สหสัมพันธ์แยกส่วน (Partial Correlation).....	23
2.9.2 สหสัมพันธ์ครึ่งส่วน (Semipartial (Part) Correlation).....	23
2.9.3 สมการถดถอยที่อยู่ในรูปคะแนนดิบ (Unstandardized Regression Equation).....	24
2.9.4 สมการการถดถอยในรูปของคะแนนมาตรฐาน (Standardized Regression Equation).....	25
2.9.5 การทดสอบนัยสำคัญ.....	26
2.9.5.1 การทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอยทั้งหมด.....	26
2.9.5.2 การทดสอบนัยสำคัญของ b^k	27
2.9.6 การทดสอบการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้.....	28
2.9.7 ข้อตกลงเบื้องต้นทางสถิติ.....	29
2.10 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม.....	30
2.10.1 ความสามารถในการหมุน.....	30
2.11 แบบจำลองการถดถอยสำหรับ Central Composite Design.....	32
2.12 พื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology).....	33

บทที่ 3 การออกแบบและวิธีการดำเนินงาน

3.1 กล่าวนำ.....	40
3.2 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ.....	41
3.2.1 วัสดุงาน.....	41
3.2.1.1 แผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี.....	41
3.2.1.2 แผ่นอลูมิเนียม.....	41
3.2.2 ลวดเคม.....	42
3.2.3 แก๊สสำหรับปกคลุมรอยต่อ.....	43
3.2.4 เครื่องเชื่อมมิกัด โนมติ.....	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.5 เครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Cut EDM).....	45
3.2.6 จิ๊กที่ใช้ยึดจับชิ้นงาน.....	46
3.2.7 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Testing Machine).....	47
3.3 การควบคุมพารามิเตอร์ของการเล่นประสาน.....	47
3.4 การออกแบบการทดลอง.....	49
3.4.1 การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial 2 ^k	49
3.5 การตรวจสอบคุณภาพของงานเล่นประสาน.....	51
3.5.1 ตรวจสอบรอยต่อด้วยสายตา (Visual Inspection).....	51
3.5.2 การเตรียมการเพื่อทำการทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	51
3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าผลตอบสนอง (Output).....	54
3.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	54

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 การเปรียบเทียบลักษณะของรอยเชื่อม.....	55
4.2 การวัดค่าตอบสนอง (Output).....	59
4.3 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมมินิแทบ (MINITAB).....	61
4.3.1 การทดสอบสมมติฐานเพื่อคัดเลือกปัจจัยโดยใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียล.....	61
(Factorial Design)	
4.3.1.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residual).....	61
4.3.1.2 แผ่นการตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง.....	63
4.3.1.3 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง.....	63
4.3.1.4 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability).....	65
4.3.2 การคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง (Screening).....	66
4.3.3 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Respond Surface Analysis) เพื่อหาสมการการถดถอย.....	69
(Regression Analysis)	
4.3.3.1 การทดสอบสมมติฐานในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง.....	69
4.3.3.2 การวิเคราะห์หาสมการการถดถอย (Regression Analysis).....	73
4.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	75

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	77
หนังสืออ้างอิง.....	78

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของการใช้แก๊สอาร์กอน.....	17
ตารางที่ 2.2 อัตราการไหลของแก๊สคลุมที่ใช้ในกระบวนการ GMAW.....	17
ตารางที่ 2.3 ข้อตกลงเบื้องต้นและผลของการละเมิดข้อตกลงเบื้องต้น ในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ.....	29
ตารางที่ 3.1 สมบัติของวัสดุงานเหล็กกล้าชุบสังกะสี (Electro Galvanized Steel Sheet).....	41
ตารางที่ 3.2 สมบัติของวัสดุงาน อลูมิเนียมอัลลอยชนิด 5052 (5052 Aluminium Alloy).....	41
ตารางที่ 3.3 สมบัติของลวดเติมเกรด ANSI/AWS A5.10 ER/R 4043 ตามน้ำหนัก.....	42
ตารางที่ 3.4 ค่าของปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	48
ตารางที่ 3.5 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง 2^k Factorial design.....	49
ตารางที่ 3.6 ตารางการออกแบบลำดับการทดลอง 2^k Factorial Design.....	50
ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกค่าความต้านทานแรงดึง.....	59
ตารางที่ 4.2 แสดงการกำหนดค่าแปรลงในโปรแกรมมินิแทบ.....	61
ตารางที่ 4.3 แสดงค่า P-Values จากตาราง Estimated Effects and Coefficients.....	67
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA).....	67
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการในรูปแบบเส้นตรง.....	73

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การแทรกตัวของลวดเติมเข้าไปในช่องรอยต่อ.....	3
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะห่างของช่องรอยต่อกับค่าความแข็งแรงทางการดึง.....	4
รูปที่ 2.3 ลักษณะของรอยต่อชน.....	5
รูปที่ 2.4 ลักษณะของรอยต่อ Scarf joint.....	5
รูปที่ 2.5 ลักษณะของรอยเกยที่ใช้ในการเล่นประสาน.....	6
รูปที่ 2.6 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมมิก.....	8
รูปที่ 2.7 แสดงแนวเชื่อมที่ใช้กระบวนการเชื่อมแบบ MIG-Brazing และ MIG.....	9
รูปที่ 2.8 การเกิดอาร์คของกระบวนการประสานด้วยมิก.....	9
รูปที่ 2.9 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร.....	10
รูปที่ 2.10 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดขนาดใหญ่.....	11
รูปที่ 2.11 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง.....	12
รูปที่ 2.12 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพัลส์.....	12
รูปที่ 2.13 รูปแบบกระแสพัลส์ของการเชื่อมแบบ GMAW-P.....	13
รูปที่ 2.14 ระหว่างระยะการหลอมลึกลงของลวดเติมขนาดต่างกันเมื่อกระแสเท่ากัน.....	15
รูปที่ 2.15 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ระดับต่างกัน.....	18
รูปที่ 2.16 ผลกระทบของแรงดันอาร์คที่มีต่อรอยประสาน.....	18
รูปที่ 2.17 ผลกระทบจากอัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมที่ระดับต่างกัน.....	19
รูปที่ 2.18 ออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial ในแต่ละปัจจัย.....	22
รูปที่ 2.19 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ k=2 และ k=3.....	30
รูปที่ 2.20 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่ ซึ่งถูกทำนายสำหรับ CCD ที่สามารถหมุนได้	31
รูปที่ 2.21 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ.....	34
รูปที่ 2.22 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ.....	35
รูปที่ 2.23 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบแบบ First Order Model.....	36
รูปที่ 2.24 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบแบบ First Order with Interaction.....	37
รูปที่ 2.25 โครงร่างของพื้นผิวผลตอบแบบ Second Order.....	38
รูปที่ 2.26 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบในลักษณะหลากหลายแบบของ Second Order.....	39

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 แผนผังการออกแบบการทดลอง.....	40
รูปที่ 3.2 ลักษณะของรอยต่อของชิ้นงานทดสอบ.....	42
รูปที่ 3.4 ตัวจ่ายกระแสและตัวจ่ายลวดของเครื่องเชื่อมมิกอัด โนมติ (Power Source and Wire Feeder).....	43
รูปที่ 3.5 ชุดยึดจับชิ้นงานและชุดยึดจับหัวเชื่อม.....	44
รูปที่ 3.6 ภาพโดยรวมทั้งหมดของตัวเครื่องเชื่อมมิกอัด โนมติ.....	44
รูปที่ 3.7 เครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Cut EDM).....	45
รูปที่ 3.8 จิ๊กที่ใช้ในการยึดจับชิ้นงาน.....	46
รูปที่ 3.9 พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมในการเล่นประสาน.....	47
รูปที่ 3.10 พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมในการเล่นประสาน.....	48
รูปที่ 3.11 ลักษณะของมูมงานและทิศทางการเชื่อม.....	49
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้ว.....	51
รูปที่ 3.13 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน JIS Z3192.....	52
รูปที่ 3.14 ชิ้นงานทดสอบที่จะนำมาตัดเป็นชิ้นงานตรวจสอบตามมาตรฐาน JIS Z3192.....	52
รูปที่ 3.15 ชิ้นงานความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการเดินของหัวเชื่อมและลำดับของชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....	53
ที่มูมงาน 15 องศา	
รูปที่ 3.16 ชิ้นงานความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการเดินของหัวเชื่อมและลำดับของชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....	53
ที่มูมงาน -15 องศา	
รูปที่ 4.1 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ค่าของปัจจัยที่แตกต่างกัน.....	55
รูปที่ 4.2 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 565 มิลลิเมตร/นาที.....	56
ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมูมงานเท่ากับ -15 องศา	
รูปที่ 4.3 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 455 มิลลิเมตร/นาที.....	56
ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมูมงานเท่ากับ -15 องศา	
รูปที่ 4.4 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 455 มิลลิเมตร/นาที.....	57
ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมูมงานเท่ากับ 15 องศา	
รูปที่ 4.5 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 565 มิลลิเมตร/นาที.....	57
ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมูมงานเท่ากับ -15 องศา	
รูปที่ 4.6 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 565 มิลลิเมตร/นาที.....	58
ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมูมงานเท่ากับ 15 องศา	
รูปที่ 4.7 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 455 มิลลิเมตร/นาที.....	58
ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมูมงานเท่ากับ 15 องศา	

รูปที่ 4.8	ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 565 มิลลิเมตร/นาที.....59
	ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ 15 องศา
รูปที่ 4.9	แสดงการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล..... 62
รูปที่ 4.10	ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล.....62
รูปที่ 4.11	แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Observation Order จากการวิเคราะห์แบบ.....63
	แฟคทอเรียล
รูปที่ 4.12	แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่าปัจจัยต่างๆ จากการวิเคราะห์แบบ.....64
	แฟคทอเรียล
รูปที่ 4.13	แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่า Fitted Value หรือค่าความต้านทานแรงดึง....66
	จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล
รูปที่ 4.14	กราฟ Effect Plot แสดงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล.....67
รูปที่ 4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักต่างๆ กับค่าความต้านทานแรงดึง (Main Effects Plot).....68
	จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล
รูปที่ 4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักต่างๆ กับค่าความต้านทานแรงดึง (Interaction Plot).....69
	จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล
รูปที่ 4.17	แสดงการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง..... 70
รูปที่ 4.18	ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง..... 70
รูปที่ 4.19	แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Observation Order ในการวิเคราะห์..... 71
	พื้นผิวตอบสนอง
รูปที่ 4.20	แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่าปัจจัยต่างๆ ในการวิเคราะห์..... 71
	พื้นผิวตอบสนอง
รูปที่ 4.21	แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่า Fitted Value หรือค่าความต้านทานแรงดึง... 73
รูปที่ 4.22	แสดงแนวโน้มของค่าความต้านทานแรงดึง โดย Contour Plot.....74
รูปที่ 4.23	แสดงแนวโน้มของค่าความต้านทานแรงดึง โดย Surface Plot.....74
รูปที่ 4.24	ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่ได้จากการเล่นประสานที่กำลังขยาย 50 เท่า.....75
รูปที่ 4.25	ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่ได้จากการเล่นประสานที่กำลังขยาย 100 เท่า.....76
รูปที่ 4.26	ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่ได้จากการเล่นประสานที่กำลังขยาย 200 เท่า.....76