

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของรอยต่อในการ
แผ่นประสานแบบมิกะหว่างเหล็กกล้าชุบสังกะสีและอลูมิเนียม
อัลลอย 5052

AN INVESTIGATION ON EFFECT OF MIG BRAZING
PARAMETERS ON TENSILE STRENGTH OF JOINT
BETWEEN GALVANIZED STEEL AND 5052 ALUMINIUM
ALLOY

นายชูเกียรติ เมืองอินทร์

MR. CHUKIAT MUANGIN

นายนภพล ตรีถึก

MR. NAPAPHON TREETUK

นายวารุต ศิริสุขทุม

MR. WARUT SIRISUMTHUM



T119352

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 119352
วัน,เดือน,ปี - 7.ศ.บ. 2554



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

**AN INVESTIGATION ON EFFECT OF MIG BRAZING
PARAMETERS ON TENSILE STRENGTH OF JOINT
BETWEEN GALVANIZED STEEL AND 5052 ALUMINIUM
ALLOY**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพรอยต่อในงานเล่นประสานแบบมิกะหว่าง
เหล็กกล้าชุบสังกะสีและอลูมิเนียมอัลลอย 5052

An Investigation on Effect of MIG Brazing Parameters on Tensile Strength of
Joint Between Galvanized Steel and 5052 Aluminium Alloy

นักศึกษา

นายชูเกียรติ เมืองอินทร์ รหัสประจำตัว 50010384

นายนภพล ศรีถึก รหัสประจำตัว 50010746

นายวารุต ศิริสุขุม รหัสประจำตัว 50011452

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท

(รศ. ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ)

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพรอยต่อในงานเล่นประสานแบบมิกระหว่าง
เหล็กกล้าชุบสังกะสีและอลูมิเนียมอัลลอย 5052

นักศึกษา

นายชูเกียรติ เมืองอินทร์

นายณภพล ตรีถึก

นายวารุต ศิริสุขุม

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2553

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

รศ. ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้แสดงการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของรอยต่อในงานเล่นประสานแบบมิก ระหว่างเหล็กกล้าชุบสังกะสีและอลูมิเนียมอัลลอยชนิด 5052 เพื่อนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการเล่นประสานแบบมิก โดยใช้ออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design และ Central Composite Design โดยปัจจัยที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ความเร็วในการเล่นประสาน ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน และมุมงาน จากการทดลองและวิเคราะห์ผลพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของรอยต่อ คือ ความเร็วในการเล่นประสาน และมุมงาน ส่วนปัจจัยร่วมได้แก่ ความเร็วในการเล่นประสาน*มุมงาน และได้สมการที่ใช้ในการพยากรณ์ค่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อ คือ $Y = 2164.16 - 0.66 \times \text{Speed} - 61.35 \times \text{Angle} + 0.12 \times (\text{Speed} \times \text{Angle})$ โดยข้อจำกัดของสมการคือ ขอบเขตของปัจจัยความเร็วในการเล่นประสาน คือ 400 ถึง 650 มิลลิเมตร/นาที และขอบเขตของมุมงาน คือ -15 ถึง 15 องศา

Thesis Title	An Investigation on Effect of MIG Brazing Parameters on Tensile Strength of Joint Between Galvanized Steel and 5052 Aluminium Alloy
Student	Mr. Chukiatt Muangin Mr. Napaphon Treetuk Mr. Warut Sirisumthum
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2010
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to investigate effect of MIG brazing parameters on tensile strength of joint between galvanized steel and 5052 aluminum alloy. The experimental method was based on full factorial design and central composite design. The experiment parameters were travel speed, feed, nozzle to work distance and work angle. Results showed that the main factor that affects tensile strength of brazed joints is travel speed and work angle, and the significant interaction is travel speed*work angle. The statistical model for predicting tensile strength of brazed joints is $Y = 2164.16 - 0.66 \times \text{Speed} - 61.35 \times \text{Angle} + 0.12 \times (\text{Speed} \times \text{Angle})$. This equation is applicable on the range of brazing speed between 400 and 650 mm/min and the range of work angles between -15 and 15 degrees.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพรอยต่อในงานแผ่นประสานแบบมิกะหว่าง เหล็กกล้าชุบสังกะสีและอลูมิเนียมอัลลอย 5052 สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

รศ. ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและความเอาใจใส่ในทุกๆ ด้านตลอดเวลาที่ผ่านไป

รศ. พรศักดิ์ อรรถวานิช หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ ความเอาใจใส่และทุกสิ่งทุกอย่างตลอดการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ

ดร. ชุมพล ขวงโย กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับความรู้ คำแนะนำและความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านในการจัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เอื้อเฟื้อต่อผู้เขียนที่และอุปกรณ์ในการทำปริญญาานิพนธ์ รวมทั้งอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ปรีชญ์ วัฒนธรรม และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำหรับคำแนะนำ และความอนุเคราะห์ในการให้ใช้เครื่องเชื่อม CMT

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ. วิชาญ คงเกียรติไพบูลย์และเจ้าหน้าที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่อนุเคราะห์ในการให้ใช้เครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Cut EDM)

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนสำหรับความช่วยเหลือจนทำให้ปริญญาานิพนธ์สำเร็จลุล่วง และคอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

นายชูเกียรติ เมืองอินทร์

นายนภพล ศรีถึก

นายวารุค ศิริสุมทุม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
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 การเล่นประสาน.....	3
2.2.1 กระบวนการเล่นประสาน.....	4
2.2.2 องค์ประกอบในการเล่นประสาน.....	4
2.3 การเล่นประสานด้วยมิก (MIG-Brazing).....	7
2.3.1 การเชื่อมแบบ GMAW-P บนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี.....	7
2.3.2 การเกิดอาร์ค.....	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 ตัวแปรในการเล่นประสานรอยต่อ.....	15
2.6.1 ลวดเติม (Filler Metal).....	15
2.6.2 แก๊สคลุม (Shielding Gas).....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
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
2.7.4 การทวนสอบ (Verification).....	21
2.8 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design).....	21
2.8.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (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 สมการถดถอยในรูปของคะแนนมาตรฐาน (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

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
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	ลวดเติม..... 42
3.2.3	แก๊สสำหรับปกคลุมรอยต่อ..... 43
3.2.4	เครื่องเชื่อมมิกอัด โนมตี..... 43
3.2.5	เครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Cut EDM)..... 45
3.2.6	จิ๊กที่ใช้ยึดจับชิ้นงาน..... 46
3.2.7	เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Testing Machine)..... 47
3.3	การควบคุมพารามิเตอร์ของการแล่นประสาน..... 47
3.4	การออกแบบการทดลอง..... 49
3.4.1	การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial 2^k 49
3.5	การตรวจสอบคุณภาพของงานแล่นประสาน..... 51
3.5.1	ตรวจสอบรอยต่อด้วยสายตา (Visual Inspection)..... 51
3.5.2	การเตรียมการเพื่อทำการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)..... 51
3.6	ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าผลตอบสนอง (Output)..... 54
บทที่ 4	ผลการดำเนินงาน
4.1	การเปรียบเทียบลักษณะของรอยเชื่อม..... 55
4.2	การวัดค่าตอบสนอง (Output)..... 59
4.3	ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมมินิแทบ (MINITAB)..... 61
4.3.1	การทดสอบสมมติฐานเพื่อคัดเลือกปัจจัยโดยใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design)..... 61
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

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
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
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	
5.1 สรุปผล.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
หนังสืออ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	๗1



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 แสดงการกำหนดตัวแปรลงใน โปรแกรมมินิแทบ.....	61
ตารางที่ 4.3 แสดงค่า P-Values จากตาราง Estimated Effects and Coefficients.....	67
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA).....	67
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ ในรูปเส้นตรง.....	73

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การแทรกตัวของลวดเค็มเข้าไปในช่องรอยต่อ.....	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 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบฟิลล์.....	12
รูปที่ 2.13 รูปแบบกระแสฟิลล์ของการเชื่อมแบบ GMAW-P.....	13
รูปที่ 2.14 ระหว่างระยะการหลอมลึกของลวดเค็มขนาดต่างกันเมื่อกระแสเท่ากัน.....	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 โนมัติ (Power Source and Wire Feeder).....	43
รูปที่ 3.5 ชุดยึดจับชิ้นงานและชุดยึดจับหัวเชื่อม.....	44
รูปที่ 3.6 ภาพโดยรวมทั้งหมดของตัวเครื่องเชื่อมมิกอัด โนมัติ.....	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 ลักษณะของมุมงานและทิศทางการเชื่อม.....	49
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้ว.....	51
รูปที่ 3.13 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน JIS Z3192.....	52
รูปที่ 3.14 ชิ้นงานทดสอบที่จะนำมาตัดเป็นชิ้นงานตรวจสอบตามมาตรฐาน JIS Z3192.....	52
รูปที่ 3.15 ชิ้นงานความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการเดินของหัวเชื่อมและลำดับของชิ้นงานทดสอบแรงดึง ที่มุมงาน 15 องศา.....	53
รูปที่ 3.16 ชิ้นงานความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการเดินของหัวเชื่อมและลำดับของชิ้นงานทดสอบแรงดึง ที่มุมงาน -15 องศา.....	53
รูปที่ 4.1 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ค่าของปัจจัยที่แตกต่างกัน.....	55
รูปที่ 4.2 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 565 มิลลิเมตร/นาที.....	56
ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ -15 องศา	
รูปที่ 4.3 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 455 มิลลิเมตร/นาที.....	56
ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ -15 องศา	
รูปที่ 4.4 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 455 มิลลิเมตร/นาที.....	57
ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ 15 องศา	
รูปที่ 4.5 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 565 มิลลิเมตร/นาที.....	57
ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ -15 องศา	
รูปที่ 4.6 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 565 มิลลิเมตร/นาที.....	58
ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ 15 องศา	
รูปที่ 4.7 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 455 มิลลิเมตร/นาที.....	58
ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ 15 องศา	

รูปที่ 4.8	ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการแล่นประสานเท่ากับ 565 มิลลิเมตร/นาที.....59
	ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ 15 องศา
รูปที่ 4.9	แสดงการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) จากการวิเคราะห์แบบแฟลทอเรียล..... 62
รูปที่ 4.10	ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง จากการวิเคราะห์แบบแฟลทอเรียล..... 62
รูปที่ 4.11	แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Observation Order จากการวิเคราะห์แบบ.....63
	แฟลทอเรียล
รูปที่ 4.12	แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่าปัจจัยต่างๆ จากการวิเคราะห์แบบ.....64
	แฟลทอเรียล
รูปที่ 4.13	แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่า Fitted Value หรือค่าความต้านทานแรงดึง....66
	จากการวิเคราะห์แบบแฟลทอเรียล
รูปที่ 4.14	กราฟ Effect Plot แสดงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง จากการวิเคราะห์แบบแฟลทอเรียล.....67
รูปที่ 4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักต่างๆ กับค่าความต้านทานแรงดึง (Main Effects Plot).....68
	จากการวิเคราะห์แบบแฟลทอเรียล
รูปที่ 4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักต่างๆ กับค่าความต้านทานแรงดึง (Interaction Plot).....69
	จากการวิเคราะห์แบบแฟลทอเรียล
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

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ที่มาและปัญหาของโครงการ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมด้านการผลิตชิ้นส่วน โครงสร้างยานยนต์ได้มีการนำมาตรฐานการต่อต้านมลพิษมาใช้โดยลดอัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงต่อหน่วยของยานพาหนะ โดยการทำให้โครงสร้างของยานยนต์ให้เบาลง และเพื่อลดน้ำหนักของยานยนต์ให้น้อยลง ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงได้มากขึ้น วิธีหนึ่งที่ยอมรับคือการนำอลูมิเนียมมาใช้ในการผลิต [1] เนื่องจากอลูมิเนียมมีคุณสมบัติที่เหมาะสมหลายประการ เช่น มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา มีกำลังวัสดุค่อน้ำหนักสูง เป็นโลหะที่ไม่มีพิษต่อร่างกาย ทนทานต่อการเกิดเป็นสนิม และการสึกกร่อน แต่อลูมิเนียมนั้นมีราคาแพง การใช้อลูมิเนียมอย่างเดียวในการผลิตจะทำให้มีต้นทุนที่สูง จึงได้มีการนำอลูมิเนียมมาใช้ร่วมกับเหล็กในการทำโครงของยานยนต์ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนลดลง [2]

อย่างไรก็ตามอลูมิเนียมและเหล็กไม่สามารถทำให้ติดกันได้อย่างสมบูรณ์ด้วยเทคนิคการเชื่อม โดยทั่วไปทางอุตสาหกรรม เมื่อทำการเชื่อมโลหะ 2 ชนิดนี้ จะเกิดปัญหาขึ้นหลายอย่าง ซึ่งในระหว่างการเปลี่ยนเป็นสถานะของเหลวระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กไม่สามารถผสมหรือเข้ากันได้ และจะทำให้เกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds) Fe_3Al_7 ที่มีความเปราะขึ้น วิธีหนึ่งที่ได้มีการนำมาใช้คือ กระบวนการเล่นประสานโลหะด้วยวิธีมิก (MIG Brazing) ซึ่งเหมาะกับอลูมิเนียมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและเชื่อมกับเหล็กได้ยาก และยังสามารถทำได้อย่างรวดเร็วเหมาะแก่การผลิตจำนวนมาก สามารถใช้ประสานชิ้นงานที่มีผนังบางๆ ได้ เกิดการทำลายผิวเคลือบของชิ้นงานน้อย และตกแต่งรอยเชื่อมได้รวดเร็ว [1, 3, 4]

อย่างไรก็ตาม คุณภาพของรอยต่อที่เกิดจากการเล่นประสานโลหะด้วยวิธีมิก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ค่าอัตราเร็วป้อนลวด (Wire Feed Speed) ค่าอัตราเร็วในการเล่นประสาน (Travel Speed) กระแสในการเล่นประสาน (Brazing Current) ค่าแรงดันอาร์ค (Arc Voltage) ค่าความถี่ (Frequency) มุมงาน (Work Angle) เป็นต้น ดังนั้นในโครงการนี้จึงมีการศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ค่าอัตราเร็วในการเล่นประสาน (Travel Speed) ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน (Nozzle to Work) และมุมงาน (Work Angle) ที่มีผลกับความต้านทานแรงดึงของรอยต่อ เพื่อนำไปวิเคราะห์และเลือกใช้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมและยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์กับงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไป

1.2. วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม ในการเชื่อมประสานแบบมิก ระหว่าง เหล็กกล้าชุบสังกะสี (Hot Dip Galvanized Steel Sheet) และอลูมิเนียมอัลลอย (Aluminium Alloy)
- 1.2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการพยากรณ์คุณภาพของรอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมประสานแบบมิก

1.3. ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 วัสดุที่ใช้คือแผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสี (Hot Dip Galvanized Steel Sheet) และอลูมิเนียมอัลลอยชนิด 5052
- 1.3.2 กระบวนการเชื่อมประสาน เป็นกระบวนการเชื่อมประสานแบบมิก (MIG Brazing) โดยใช้เครื่องเชื่อม CMT (Cold Metal Transfer)
- 1.3.3 แก๊สคลุมที่ใช้เป็นอาร์กอนบริสุทธิ์ 100%
- 1.3.4 ลวดเติมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมอลูมิเนียม ไฟฟ้า AISi 5 – DC มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร
- 1.3.5 รอยต่อของชิ้นงานเป็นรอยต่อแบบเกย (ระยะเกย 12.7 mm ± 0.254)
- 1.3.6 ทดสอบชิ้นงาน โดยมี 3 ปัจจัยที่ใช้คือ ความเร็วในการเชื่อมประสาน (Travel Speed) ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน (Nozzle to Work) และมุมงาน (Work Angle)

1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อความต้านทานแรงดึงของรอยต่อในการเชื่อมประสานแบบมิก
- 1.4.2 ได้ค่าที่เหมาะสมในการเชื่อมประสานแบบมิก
- 1.4.3 สามารถนำข้อมูลไปใช้ได้จริงในทางอุตสาหกรรม

บทที่ 2

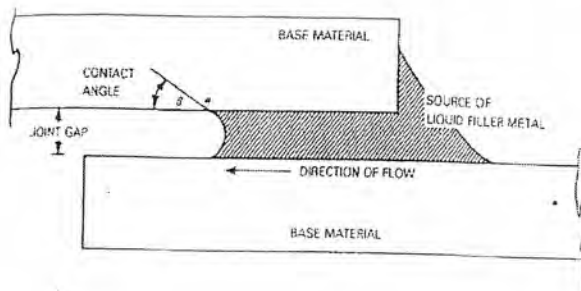
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการประสานรอยต่อแผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสี

แผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสีเป็นวัสดุที่มีความต้านทานการเกิดสนิม กระบวนการนี้เป็นการเคลือบสังกะสี ด้วยกรรมวิธีทางไฟฟ้าภายในอ่างชุบ โดยมีส่วนประกอบ คือ ขั้วบวก ขั้วลบ และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งได้แก่ สารละลายสังกะสีซัลเฟต (Zinc Sulfate) โดยสังกะสีจะเคลือบลงบนแผ่นเหล็กในลักษณะเป็นไอออน ซึ่งจะต่างไปจากวิธีจุ่มร้อน ที่เป็นสารละลายของเหลวติดบนแผ่นเหล็ก ดังนั้นประสิทธิภาพในการเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้าจึงสูงกว่า ทำให้มีความสามารถป้องกันการเกิดสนิมได้ดีกว่า การประสานรอยต่อของเหล็กกล้าชุบสังกะสีนั้นทำได้ยาก [5] ส่วนใหญ่จะยึดด้วยหมุดย้ำหรือใช้กระบวนการเชื่อมทางไฟฟ้า ซึ่งก็จะพบปัญหาเมื่อทำการเชื่อม เนื่องจากสังกะสีมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อม ทำให้เกิดการสูญเพลิงของสังกะสีเคลือบ ดังนั้นกระบวนการ การเชื่อมโลหะด้วยเส้นลวดตันภายใต้แก๊สคลุมแบบพัลส์ (Pulsed Gas Metal Arc Welding : GMAW-P) จึงเริ่มมีบทบาทในการใช้งาน เนื่องจากอุณหภูมิในการเชื่อมต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของชิ้นงาน ทำให้เกิดการสูญเพลิงของสังกะสีเคลือบเป็นบางส่วนเท่านั้น ทำให้การแล่นประสานด้วยมิกพัลส์เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย [4]

2.2 การแล่นประสาน

การแล่นประสาน (Brazing) [6] เป็นการประสานรอยต่อ โดยใช้ลวดเติมที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 450°C แต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะงาน โลหะเติมจะเกิดการแทรกตัวเข้าไปในช่องรอยต่อด้วยแรงปฏิกิริยาดึงดูด (Capillary Attraction) ปฏิกิริยา Capillary Attraction [7] เป็นความสามารถของของเหลวที่สามารถไหลเข้าไปในช่องแคบ ๆ หรือ รูเล็ก ๆ ในทิศทางต้านแรงโน้มถ่วงโลก ในการแล่นประสานรอยต่อนั้น ลวดเติมที่หลอมจะทำหน้าที่ไหลแทรกเข้าไปในช่องรอยต่อของชิ้นงานสองชิ้นดังปรากฏในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การแทรกตัวของลวดเติมเข้าไปในช่องรอยต่อ

2.2.1 กระบวนการเชื่อมประสาน

กระบวนการเชื่อมประสาน สามารถแบ่งตามกระบวนการให้ความร้อน ออกเป็นหลายวิธี [6, 7] ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้ประกอบด้วย

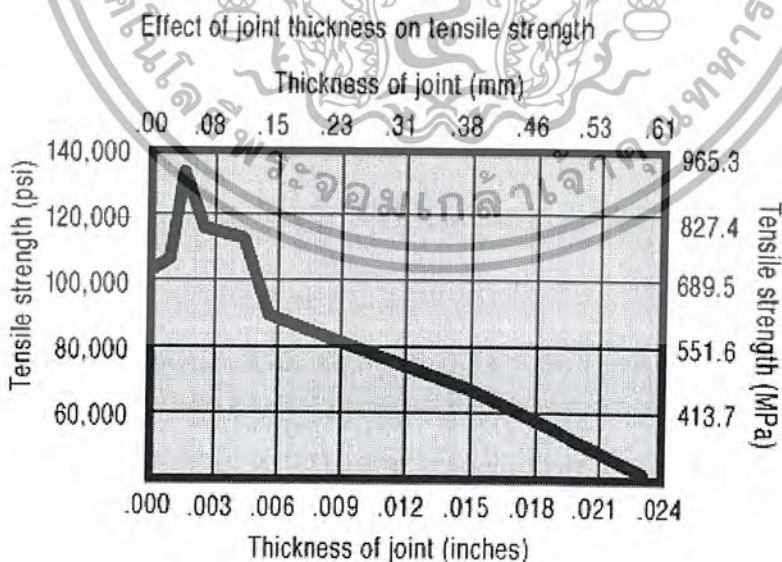
- 1) การเชื่อมประสานด้วยหัวเชื่อมแก๊ส (Torch Brazing)
- 2) การเชื่อมประสานในเตา (Furnace Brazing)
- 3) การเชื่อมประสานโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Brazing)
- 4) การเชื่อมประสานด้วยการจุ่ม (Dip Brazing)
- 5) การเชื่อมประสานด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared Brazing)

สำหรับในที่นี้จะไม่ขอกล่าวถึงรายละเอียดในแต่ละวิธี โดยการเลือกใช้วิธีใดนั้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของชิ้นงาน

2.2.2 องค์ประกอบในการเชื่อมประสาน

ในการเชื่อมประสานแต่ละครั้งจะมีองค์ประกอบต่างๆที่ต้องพิจารณาดังนี้

- 1) การทำความสะอาดชิ้นงาน ก่อนการเชื่อมประสาน นับเป็นตัวแปรที่สำคัญ เนื่องจากถ้าผิวงานสะอาดจะทำให้เกิดปฏิกิริยา Capillary Action ได้ดี และรอยประสานมีความแข็งแรง
- 2) การเว้นช่องรอยต่อ (Joint Clearance : Fit-Up) [8] การเว้นช่องรอยต่อ ควรเลือกให้เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยา Capillary Action ได้ดี ถ้าระยะห่างไม่เหมาะสม จะทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง และยังทำให้สิ้นเปลืองวัสดุเติมมากเกินไป ดังนั้นการระยะห่างของช่องรอยต่อ จึงมีผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรงทางการดึง (Tensile Strength) ดังผลเปรียบเทียบที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะห่างของช่องรอยต่อกับค่าความแข็งแรงทางการดึง [8]

จากรูปที่ 2.2 ระยะห่างของช่องรอยต่อที่แคบ จะมีค่าความแข็งแรงทางการดึง (Tensile Strength) มากกว่าระยะห่างของช่องรอยต่อที่กว้าง ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า เมื่อค่าระยะห่างของช่องรอยต่อมากขึ้นค่าความแข็งแรงทางการดึงจะลดลง

3) การเลือกขนาดเติมที่เหมาะสม มีสิ่งที่ควรพิจารณาดังต่อไปนี้

- ความเหมาะสมกับวัสดุงานและการออกแบบรอยต่อ
- สภาพการใช้งาน เช่น แรงกระทำ อายุการใช้งาน สภาพการกัดกร่อน
- อุณหภูมิที่ต้องการ การเล่นประสานต้องการอุณหภูมิต่ำเพื่อให้เกิดความร้อนน้อยที่สุด
- วิธีการให้ความร้อน ต้องเลือกวิธีการให้ความร้อน ให้เหมาะสมกับวัสดุงานเพื่อ ไม่ให้เกิดความเสียหายกับวัสดุงาน

4) การออกแบบรอยต่อการเล่นประสาน โดยทั่วไปสามารถเตรียมได้ใน 2 ลักษณะ คือ

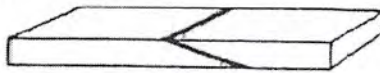
- รอยต่อชน (Butt Joint) รอยต่อชน ในการเล่นประสานจะเหมือนกับรอยต่อชนในงานเชื่อมทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 2.3



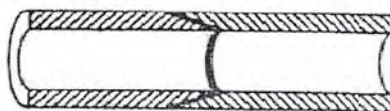
รูปที่ 2.3 ลักษณะของรอยต่อชน [8]

- Scarf Joint ประยุกต์ขึ้นจากรอยต่อชนธรรมดา โดยเตรียมผิวหน้าวัสดุให้เอียง ดังรูปที่ 2.4 เพื่อให้มีผิวสัมผัสในการประสานรอยต่อเพิ่มมากขึ้น

Scarf joint — flat parts



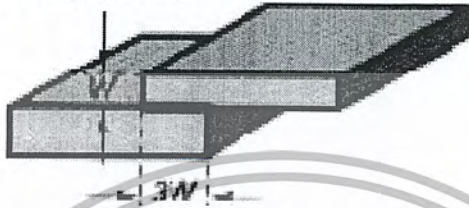
Scarf joint — tubular parts (cutaway)



รูปที่ 2.4 ลักษณะของรอยต่อ Scarf joint [9]

5) การกำหนดระยะรอยต่อเกย [9] การเตรียมรอยต่อเกยโดยทั่วไป กำหนดให้มีระยะเกยกันของชิ้นงานอย่างน้อย 3 เท่าของความหนาของชิ้นงาน ถ้าวัสดุงานมีความหนาไม่เท่ากัน ให้เลือกตามความหนาของงานชิ้นที่บางกว่า ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.5

Length of lap

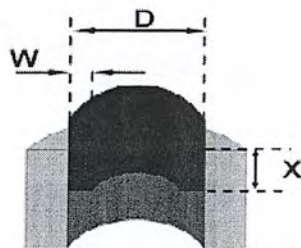


รูปที่ 2.5 ลักษณะของรอยเกยที่ใช้ในการเล่นประสาน [9]

การออกแบบรอยต่อ เพื่อให้ได้รอยต่อในการเล่นประสานที่แข็งแรงที่สุด โดยใช้สวดเคม้น้อยที่สุด สามารถคำนวณระยะเกยจากการคำนวณระยะเกยสำหรับงานแผ่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$X = \frac{T \times W}{C \times L} \quad (2.1)$$

- X = Length of lap
- T = Tensile strength of the weakest member
- W = Thickness of the weakest member
- C = Joint integrity factor of 0.8
- L = Shear strength of brazed filler metal



$$X = \frac{W (D-W) T}{CLD} \quad (2.2)$$

X = Length of lap area

W = Wall thickness of the weakest member

D = Diameter of lap area

T = Tensile strength of the weakest member

C = Joint integrity factor of 0.8

L = Shear strength of brazed filler metal

6) ข้อดีของการแผ่นประสานเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมด้วยวิธีอื่นมีดังนี้

- อุณหภูมิต่ำ โลหะงานไม่หลอมละลาย ใช้พลังงานความร้อนต่ำ
- สามารถประสานรอยต่อของโลหะต่างชนิดกันได้
- สามารถเชื่อมได้รวดเร็ว
- โอกาสที่ชิ้นงานเสียหายมีน้อยกว่า เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำ
- อัตราการให้ความร้อนและการเย็นตัวต่ำ จึงเป็นการลดการเกิดความเค้นตกค้างภายใน
- สามารถประสานรอยต่องานหนาและงานบาง ๆ เข้าด้วยกันได้
- ง่ายต่อการปรับแต่งรอยต่อตำแหน่งใหม่

การแผ่นประสานที่ใช้งานมากที่สุด คือการแผ่นประสานด้วยหัวเชื่อมแก๊ส เนื่องจากไม่ยุ่งยาก แต่ในปัจจุบันวิธีการแผ่นประสานอีกวิธีหนึ่ง ที่มีจะนำมาใช้งานต่าง ๆ คือ การแผ่นประสานด้วยมิก โดยจะกล่าวในตอนต่อไป

2.3 การแผ่นประสานด้วยมิก (Metal Inert Gas Brazing)

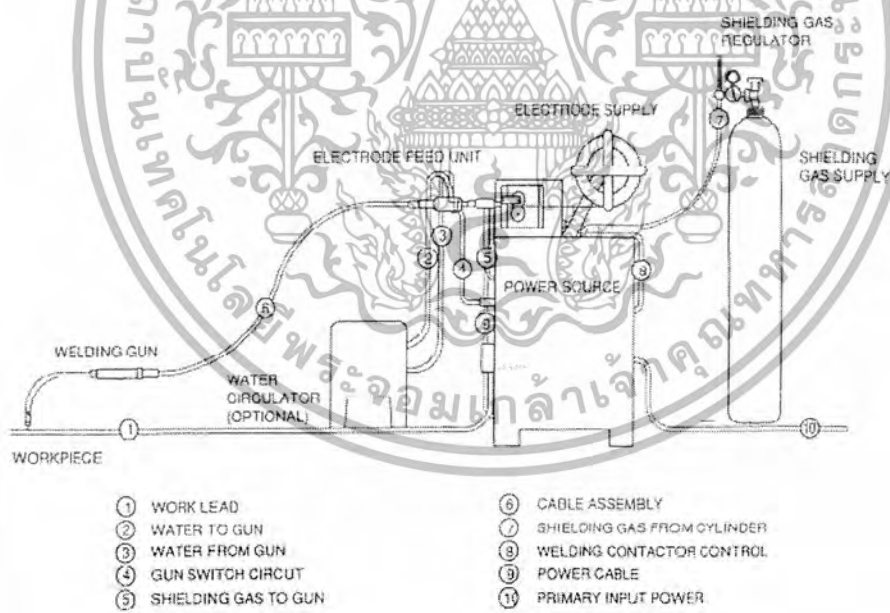
MIG-Brazing เป็นกระบวนการประสานโลหะที่อาศัยหลักการของกระบวนการเชื่อมมิก และการแผ่นประสานรวมกัน โดยนำข้อดีของทั้งสองกระบวนการมารวมไว้ด้วยกัน MIG-Brazing ใช้หลักการพื้นฐานของการเชื่อมโลหะด้วยเส้นลวดตันภายใต้แก๊สคลุมแบบพัลส์ (Pulsed Gas Metal Arc Welding : GMAW-P) กระบวนการดังกล่าวถูกออกแบบ ให้กระแสเชื่อมมีพลังงานเพียงเปิดผิวเคลือบของโลหะงานตรงบริเวณรอยต่อ และหยดน้ำโลหะจากลวดเติมไหลแทรกเข้าไปประสานรอยต่อโดยที่ชิ้นงานไม่เกิดการหลอมละลาย ทำให้กระบวนการ GMAW-P สามารถนำมาใช้ในการประสานแผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสีในอุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ โดยกระบวนการดังกล่าวได้ถูกนำมาทดแทน Metal Active Gas Welding หรือ MAG-Welding เนื่องจากมีการทำสายผิวเคลือบที่น้อยกว่า ทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีขึ้น และสามารถทำการเชื่อมได้เร็วกว่าการใช้หัวแก๊ส

2.3.1 การเชื่อมแบบ GMAW-P บนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี

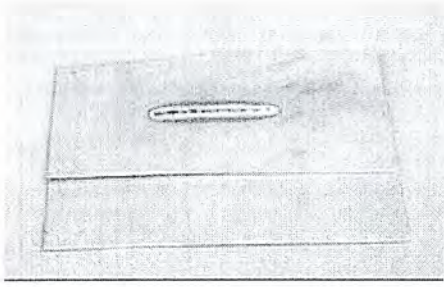
เป็นการเชื่อมโลหะด้วยเส้นลวดตันภายใต้แก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding) ซึ่งจะมีการเรียกชื่อแตกต่างกัน ตามแก๊สที่ใช้ปกคลุมรอยเชื่อม โดยการเชื่อมมิก (MIG: Metal Inert Gas Arc Welding) จะใช้แก๊สเฉื่อยใน

การปกคลุมรอยเชื่อมเช่น อาร์กอนและฮีเลียม การเชื่อมแมก (MAG: Metal Active Gas Arc Welding) จะใช้แก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์เป็นแก๊สคลุมในการเชื่อม

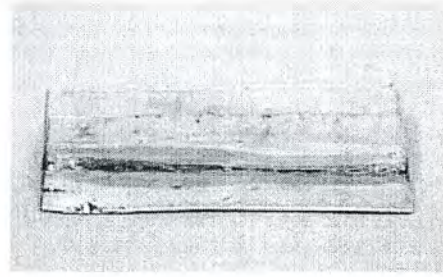
การเชื่อมมิก (MIG welding) [10] ลวดเติมจะหลอมเหลว และเติมเนื้อโลหะเชื่อม สร้างเป็นแนวเชื่อมเหมือนกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ทั่วไป เพียงแต่กระบวนการเชื่อมมิกนั้น ใช้แก๊สปกป้องแทนฟลักซ์ ทำให้รอยเชื่อมที่ได้ไม่มีสแลก (Slag) ลวดเติมจะถูกป้อนไปตามท่อนำลวดผ่านไปยังหัวเชื่อม ที่หัวเชื่อมจะมีท่อนำกระแส (Contact Tip) เป็นตัวทำให้กระแสไฟฟ้าและลวดเติมสัมผัสกันทำให้ลวดเติมกลายเป็นตัวอาร์ค หลอมเหลวตัวเองกับชิ้นงานเป็นการเติมเนื้อโลหะ ชุดป้อนลวดจะขับเคลื่อนลวดเติมไปสู่บริเวณที่มีการอาร์คที่มีอัตราความเร็วสัมพันธ์กับการหลอมของลวดเติม แต่ในการเชื่อมแบบ MIG-Brazing [11] นั้น จะมีความเหมือนกับการเชื่อมมิกแบบธรรมดา โดยกระบวนการนี้ เป็นการเชื่อมโดยใช้แก๊สเฉื่อยคลุมแนวเชื่อม แต่จะแตกต่างจากการเชื่อมมิกธรรมดาที่อุณหภูมิของกระบวนการอยู่ระหว่าง 1,030 – 1,080 °C ซึ่งยังไม่ถึงอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะ (1,500 °C) งานบริเวณแนวเชื่อมสังกะสีเคลือบ จะมีการระเหยไปบางส่วนเท่านั้น บริเวณขอบแนวเชื่อมสังกะสีเคลือบเกิดการระเหยไปมากเท่าไร โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดการสึกกร่อนก็มีมากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของรอยต่อของชิ้นงาน (สังกะสีจะหลอมละลายที่อุณหภูมิ 420°C และระเหยที่อุณหภูมิ 907 °C) และในการเชื่อม MIG-Brazing นั้น ข้อควรระวังคือท่อนำลวดต้องเปลี่ยนเป็น Teflon โดยมีอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมมิก [12]



รูป ก



รูป ข

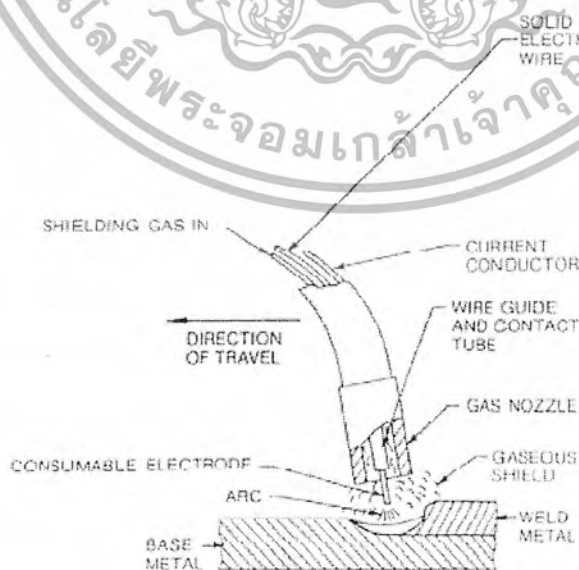
รูปที่ 2.7 แสดงแนวเชื่อมที่ใช้กระบวนการเชื่อมแบบ MIG-Brazing และ MIG [13]

ก. ใช้กระบวนการ MIG-Brazing

ข. ใช้กระบวนการ MIG

2.3.2 การเกิดอาร์ค

การเกิดอาร์คในการเชื่อมแบบ GMAW นั้น เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านกลุ่มอะตอม ของก๊าซที่มีประจุไฟฟ้า ทำให้โมเลกุลและอะตอมของก๊าซแตกตัว และมีสภาพไม่เป็นกลางทางไฟฟ้า เนื่องจากสูญเสียอิเล็กตรอนไปเป็นประจุไฟฟ้าบวก อีออนก๊าซที่เป็นบวกจะไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ส่วนอิเล็กตรอนจะไหลจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ปริมาณความร้อนประมาณ 95% จะถูกส่งผ่านโดยอิเล็กตรอน ความร้อนจากการอาร์ค จะทำให้สวดเต็มและโลหะชิ้นงานเกิดการหลอมเหลว ปลายของสวดเต็มส่วนที่หลอมจะถูกถ่ายโอนผ่านการอาร์คเข้าสู่หลอมเหลว ซึ่งข้อหลอมเหลวจะถูกปกป้องโดยแก๊สที่ออกจากหัวลิดดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเกิดอาร์คของกระบวนการประสานด้วยมิก [14]

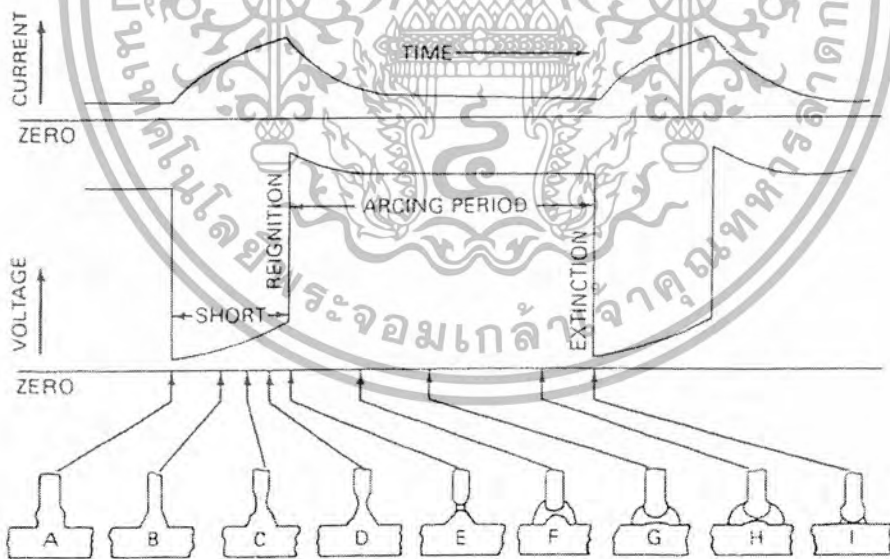
จากรูปที่ 2.8 พบว่าจะเกิดการเกิดอาร์คขึ้น ระหว่างปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ซึ่งลวดเชื่อมจะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรด ที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็น โลหะประสาน

2.4 การถ่ายโอนน้ำโลหะ (Metal Transfer)

กระบวนการ GMAW [14, 15] สามารถแบ่งการถ่ายโอนน้ำโลหะหลอมเหลวได้หลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ เช่น ชนิดของแก๊สคลุม กระแสเชื่อม แรงดึงผิว แรงโน้มถ่วงและแรงจากแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวกำหนดการถ่ายโอนน้ำโลหะ ในที่นี้จะขอกล่าวถึงการถ่ายโอนน้ำโลหะ 4 ลักษณะ

2.4.1 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร (Short circuit transfer)

วัฏจักรการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร จะเริ่มต้นเมื่อปลายของลวดเติมและโลหะงานถูกทำให้เกิดการอาร์คและมีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้ปลายลวดเติมเกิดการหลอมเหลวเป็นหยดน้ำโลหะขนาดเล็กขณะเดียวกันลวดเติมจะถูกป้อนเข้าสู่บ่อหลอมละลายด้วยอัตราเร็วสูง ทำให้หยดน้ำโลหะที่ปลายลวดเติมสัมผัสกับบ่อหลอมเหลวก่อนที่จะแยกออกจากปลายของลวดเติม และเกิดการลัดวงจร (Short Circuit) การอาร์คจะดับไปชั่วขณะ ในจังหวะที่เกิดการลัดวงจร กระแสจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ปลายของลวดเติมที่หลอมเป็นหยด จะถูกตัดออกแล้วถ่ายโอนสู่บ่อหลอมเหลวด้วยแรงโน้มถ่วง และแรงดึงผิว

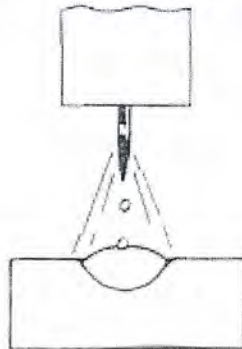


รูปที่ 2.9 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร [14]

2.4.2 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดน้ำขนาดใหญ่ (Globular Transfer)

การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดน้ำขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2.10 วัฏจักรการถ่ายโอนจะเริ่มต้นเมื่อปลายของลวดเติมถูกหลอมเป็นหยดน้ำโลหะ และหยดน้ำโลหะนี้จะหลุดจากปลายของลวดเติม แล้วถ่ายโอนผ่านอาร์คสู่ชิ้นงานนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

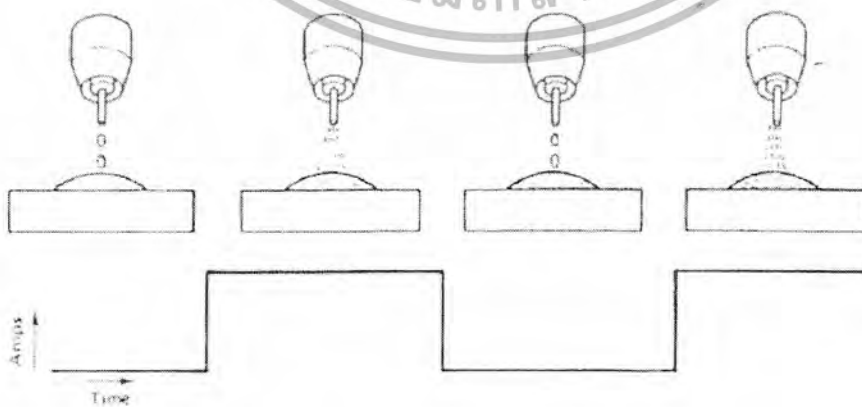
หยดน้ำโลหะที่มีขนาดเล็กนี้ จะไม่มีผลต่อเสถียรภาพของการอาร์ค ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่งานสูง แม้ลวดเติมจะมีขนาดใหญ่ก็สามารถหลอมเหลวเป็นหยดขนาดเล็กได้ทันที ซึ่งส่งผลให้เกิดการหลอมลึกของรอยต่อประสานมาก



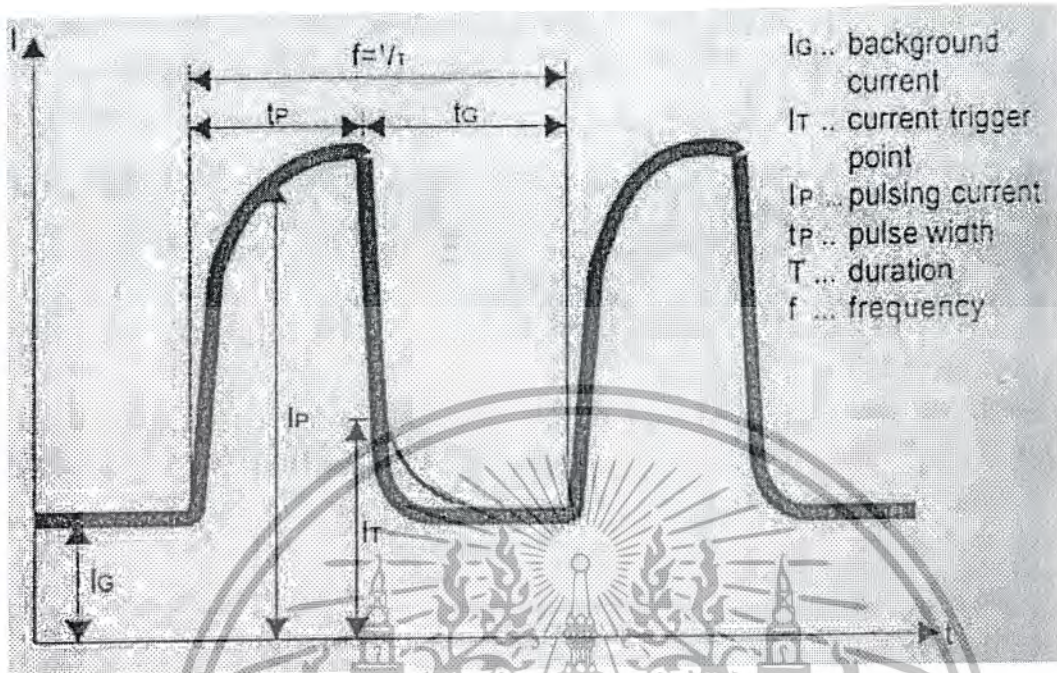
รูปที่ 2.11 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง [14]

2.4.4 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพัลส์ (Pulse Transfer)

Pulse Transfer เป็นกระบวนการที่พัฒนามาแทนการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งตัวเครื่อง (Power Source) จะเป็นตัวแปรที่สำคัญ เพราะการส่งถ่ายน้ำโลหะแบบพัลส์นี้ เพิ่งถูกนำมาใช้งานเมื่อไม่นาน อย่างไรก็ตาม การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบพัลส์ก็ยังคงเป็นการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละอองอยู่ (Pulse Spray) มีการเกิดพัลส์ของกระแสเชื่อมจากระดับต่ำสุดถึงระดับสูงสุดที่ 60 ไซเคิลต่อวินาที จึงหวั่นไหวการเกิดพัลส์แต่ละครั้ง จะทำให้ปลายลวดเป็นหยดน้ำโลหะได้หนึ่งหยด แล้วถ่ายโอนผ่านอาร์คสู่อหลอมเหลวด้วยความถี่ที่สม่ำเสมอต่อเนื่องกันไปอย่างเป็นระเบียบ การถ่ายโอนหยดน้ำโลหะจะเกิดขึ้นเมื่อการเกิดพัลส์กระแสถึงระดับสูงสุด หลังจากถ่ายโอนน้ำโลหะแล้วกระแสก็จะลดลงต่ำสุดตามที่ตั้งไว้ กระแสต่ำจะช่วยให้เกิดการอาร์คอยู่ตลอดเวลา ช่วงจังหวะนี้การถ่ายโอนน้ำโลหะจะไม่เกิดขึ้น การเกิดพัลส์ของกระแสสูงแล้วลดลงจะมีผลต่อการควบคุมปริมาณความร้อนที่เข้าสู่งานซึ่งความร้อนที่เข้าสู่งานจะมีน้อยกว่าการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง จึงเหมาะกับการประสานงานบาง ทุกตำแหน่งเชื่อมได้ง่าย การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบพัลส์มีรูปแบบกระแสพัลส์ที่เกิดจาก Power Source ซึ่งจะมืองค์ประกอบดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพัลส์ [14]



รูปที่ 2.13 รูปแบบกระแสพัลส์ของการเชื่อมแบบ GMAW-P [16]

จากรูปที่ 2.12 และ 2.13 เป็นลักษณะของรูปแบบกระแสพัลส์ ซึ่งเกิดจากการปรับตัวแปรของ Power Source ซึ่งจะได้ลักษณะของรูปแบบกระแสพัลส์ ที่มีรูปแบบเฉพาะ ความถี่ของกระแสพัลส์จะอยู่ในช่วงประมาณ 20-400 พัลส์ต่อวินาที อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า กระแสพัลส์ที่ใช้จะอยู่ในช่วงประมาณ 20-60 พัลส์ต่อวินาที หรือมากกว่า ซึ่งตัวแปรของกระแสพัลส์ที่สำคัญประกอบด้วย

- กระแสสูงสุด (Peak Current : I_p) หรือ Pulsing Current อยู่ในระหว่างการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละเอียด โดยสามารถควบคุมขนาดของหยดน้ำโลหะและระยะอาร์คที่สั้นลงได้ ในขณะที่กระแสสูงสุดมีค่าสูงมาก ในกรณีที่ระยะอาร์คมีความห่าง ขนาดของหยดน้ำโลหะจะมีขนาดโต ซึ่งอาจทำให้หยดน้ำโลหะกระเด็นออกจากบ่อหลอมเหลว แล้วกลายเป็นหยดน้ำโลหะที่เป็นละอองหรือเม็ดของหยดน้ำ
- กระแสต่ำสุด (Background Current : I_G) หรือ Low Current Pulse เป็นช่วงที่มีการรักษาการอาร์คไว้ให้ต่อเนื่อง และช่วยให้ปลายของลวดเติมนั้นร้อนและรักษาอาการอาร์คเอาไว้ ซึ่งช่วงกระแสต่ำนี้พลังงานที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถทำให้ลวดเติมหลอมเหลวได้และไม่มีการถ่ายโอนน้ำโลหะ อย่างไรก็ตามในกรณีที่กระแสอยู่ในช่วงกระแสต่ำ ถ้าปลายลวดเติมสัมผัสกับวัสดุงานแล้วเกิดการอาร์คก็จะเกิดการถ่ายโอนน้ำโลหะ ซึ่งมีแนวโน้มเป็นการถ่ายโอนที่เกิดขึ้นแบบลัดวงจร ฉะนั้นการควบคุมอัตราการป้อนลวด จะเป็นตัวเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของกระแสไฟเชื่อม นอกจากนั้นยังต้องมีการควบคุมระยะยื่นของลวดเติมควบคู่กันไป เพื่อรักษาระยะอาร์คและแรงดันอาร์คให้คงที่

- เวลากระแสสูงสุด (Peak Time : t_p) หรือ Pulse Width เป็นช่วงที่ควบคุมขนาดของหยดน้ำโลหะ ช่วงเวลากระแสสูงสุดจะมีเวลาดี้นมาก ซึ่งจะทำให้หยดน้ำโลหะเกิดขึ้นหนึ่งหยดต่อพัลส์ แต่ถ้าเวลากระแสสูงสุดเพิ่มขึ้น การถ่ายโอนของหยดน้ำโลหะก็จะมีมากกว่าหนึ่งหยดต่อพัลส์ ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้หยดน้ำโลหะกระเด็นออกจากบ่อหลอมเหลว
- ความถี่พัลส์ (Pulse Frequency : f) ความถี่พัลส์จะเป็นตัวควบคุมการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะ การปรับความถี่พัลส์ ก็เพื่อให้ได้การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหนึ่งหยดต่อพัลส์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการควบคุมช่วงเวลากระแสสูงและช่วงเวลากระแสต่ำ และสามารถปรับค่ากระแสสูงและกระแสต่ำให้ความสัมพันธ์กับความเร็วในการป้อนลวด เพื่อให้ได้การถ่ายโอนน้ำโลหะเป็นแบบหนึ่งหยดต่อพัลส์และขนาดของหยดน้ำโลหะมีความสม่ำเสมอและเป็นระเบียบ

เทคนิคการประสานด้วยกระแสพัลส์ (Pulse Arc) ได้รับการพัฒนาตั้งแต่ปี 1970 และต่อมาได้เรียกว่าการประสานแบบไซเนอจิก ซึ่งเป็นการทำงานแบบควบคุมกันของพารามิเตอร์ทั้งระบบ กระบวนการ GMAW-P เป็นการทำงานที่ควบคุมหรือสัมพันธ์กันระหว่าง Power Source และ Wire Feed Speed โดยอุปกรณ์ดังกล่าวถูกควบคุมด้วยโปรแกรมไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีความเหมาะสม และรูปแบบของกระแสพัลส์จะมีความสัมพันธ์กันและสามารถควบคุมด้วยปุ่มควบคุมเพียงปุ่มเดียว ซึ่งสามารถแสดงค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดวัสดุ ขนาดความหนาวัสดุ แก๊สคลุม ชนิดและขนาดของลวดเติมที่จะเลือกใช้ในกระบวนการประสานดังกล่าว

2.5 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหล่อเย็น (Cold Metal Transfer)

กระบวนการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหล่อเย็น (Cold Metal Transfer) [17] จะขึ้นอยู่กับวิธีการโอนถ่ายวงจรวัดไฟฟ้าอย่างแม่นยำสูง โดยระบบจะทำการควบคุมช่วงการอาร์ค ผลลัพธ์ของอุณหภูมิที่ได้จะอยู่ในรูปแบบสลับกันคือ "ร้อน-เย็น-ร้อน-เย็น" ใน 1 จังหวะ "ร้อน-เย็น" นั้นจะขึ้นอยู่กับระบบของแรงดัน อาร์ค ขณะที่อยู่ในช่วงอาร์คแบบปกติ หัวอิเล็กโทรดกำลังเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลว ณ ขณะนั้น หัวเชื่อมทำการจุ่มลงบนแผ่นเชื่อม และเกิดการหลอมละลายอย่างรวดเร็ว ในขณะที่แรงดันอาร์คที่สูง ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่คงที่สูง ทำให้ระบบบอโตเมชันหรือระบบหุ่นยนต์สามารถนำมาใช้ได้ในส่วนนี้ได้

ส่วนระบบการเคลื่อนที่ของลวดเชื่อมจะนำมาจากการคำนวณจากการอินทิเกรต จากกระบวนการเชื่อม โดยดูจากการละลายหัวเชื่อมของอุณหภูมิที่เหมาะสม ทุกๆช่วงเวลาของการลัดวงจรไฟฟ้า ระบบควบคุมดิจิทัล จะทำการประมวลผลเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่เก็บ ระยะหด เข้า- ออก ของลวดเชื่อม การหด เข้า- ออก ลวดเชื่อมมีความถี่อยู่ที่ 70 Hz การเคลื่อนที่ของลวดเชื่อมแบบนี้จะทำให้เกิดการแยกออกจากรอยเชื่อมขณะที่เกิดลัดวงจรอยู่

ตามความเป็นจริงพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนจะทำให้คุณสมบัติและผลข้างเคียงของการเชื่อมอาร์ค มีผลมาก ดังนั้นการใส่ความร้อนที่น้อยจึงมีข้อดีคือ เกิดการบิดตัวของชิ้นงานต่ำ ข้อต่อรอยเชื่อมจึงมีคุณภาพสูง จึงทำให้เชื่อมชิ้นงานที่มีความบางได้ รวมทั้งมีความสามารถในการเชื่อมระหว่างเหล็กชุบสังกะสีกับอะลูมิเนียมได้

2.6 ตัวแปรในการประสานรอยต่อ

ตัวแปรในการประสานรอยต่อเกี่ยวข้องกับกระบวนการควบคุมกระบวนการรวมถึงคุณภาพของรอยต่อ การเลือกตัวแปรที่เหมาะสม จะช่วยให้การประสานรอยต่อมีคุณภาพ ซึ่งตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดังกล่าวสามารถจำแนกได้ดังนี้

2.6.1 ลวดเติม (Filler Metal)

ลวดเติมที่ใช้กับกระบวนการ GMAW ต้องมีความบริสุทธิ์ทางเคมีสูง การเลือกลวดเติมที่ถูกต้องจะช่วยป้องกันไม่ให้ความบกพร่องที่เกิดขึ้นกับรอยต่อน้อยที่สุด สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่ง คือความต้านแรงดึงของลวดเติม ซึ่งถูกกำหนดจากความต้านทานแรงดึงของเนื้อโลหะประสาน ดังนั้นจึงต้องเก็บรักษาลวดเติมให้ถูกต้อง

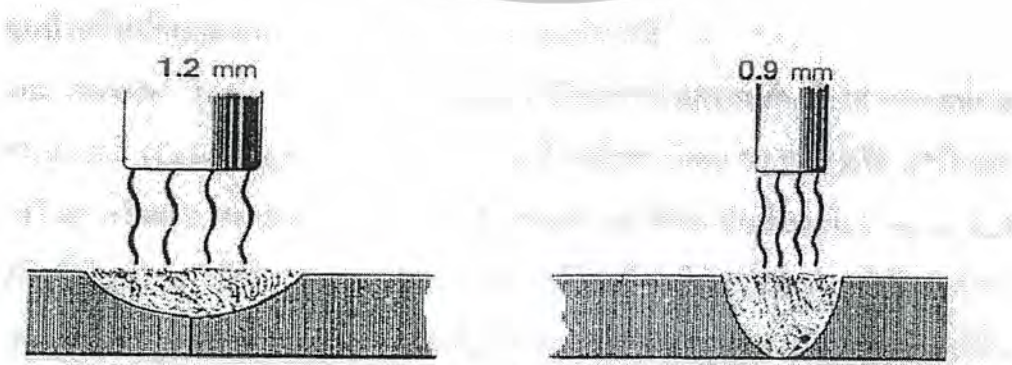
1) การเลือกใช้ลวดเติม มีสิ่งที่ต้องพิจารณาดังนี้ [14, 15, 17]

- คุณสมบัติทางกลของโลหะงานลวดเติมที่เลือกใช้ควรมีความต้านทานแรงดึงที่เหมาะสมกับโลหะงาน ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดของการเชื่อมประสาน

- ส่วนผสมทางเคมีของโลหะงาน ต้องเหมาะสมกับส่วนผสมทางเคมีของลวดเติม ซึ่งตัวอย่างในงานวิจัยนี้มีวัสดุงานเป็นแผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสี ลวดเติมที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อน และใช้ความร้อนในการประสานต่ำ

2) ชนิดของลวดเติม ลวดเติมที่ใช้ในการประสานรอยต่อ จะต้องมีส่วนผสมทางเคมีเหมือนหรือใกล้เคียงกับโลหะงาน การเลือกลวดเติมและความหนาของวัสดุงานก็มีผลเช่นกัน

3) ขนาดของลวดเติม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเติมจะมีผลต่อความกว้างของรอยต่อ ระยะการหลอมลึก อัตราเร็วในการเชื่อมประสาน ลวดเชื่อมโตจะใช้กระแสสูงและให้อัตราเติมเนื้อ โลหะมากกว่า อย่างไรก็ตาม ถ้าใช้กระแสเชื่อมคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ลวดเติมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าจะมีอัตราการเติมเนื้อ โลหะมากกว่า การหลอมลึกมากกว่าเมื่อเทียบกับขนาดของลวดเติมที่โตกว่าดังรูปที่ 2.14 ดังนั้นการเลือกลวดเติมจึงขึ้นอยู่กับความหนาของงาน ระยะการหลอมลึก อัตราการเติมเนื้อโลหะ ตำแหน่งของรอยต่อ และลักษณะของรอยต่อ ในการแล่นประสานด้วย MIG-Brazing นั้นลวดเชื่อมที่ใช้อยู่จะมีอยู่หลายชนิด แต่ที่นิยมสำหรับการแล่นประสานเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี คือ ลวดทองแดง-ซิลิกอน: Copper-Silicon (CuSi) สำหรับตารางลวดเติมมาตรฐาน ANSI/AWS.A5.7



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการหลอมลึกของลวดเติมขนาดต่างกันเมื่อกระแสเท่ากัน [15]

2.6.2 แก๊สคลุม (Shielding Gas)

กระบวนการประสานโลหะด้วยแก๊สคลุม (GMAW) [10, 14, 15] แก๊สคลุมจะมีผลต่อคุณสมบัติของเนื้อโลหะประสาน ซึ่งแก๊สคลุมที่ใช้ในกระบวนการ GMAW มีอยู่ 4 กลุ่ม คือ

- 1) แก๊สเฉื่อย (อาร์กอนและฮีเลียม)
- 2) แอคทีฟแก๊ส (คาร์บอน ไดออกไซด์)
- 3) อันรีแอคทีฟแก๊ส (ไนโตรเจน)
- 4) แก๊สผสม (อาร์กอน + คาร์บอน ไดออกไซด์, อาร์กอน + ออกซิเจน, อาร์กอน + ออกซิเจน + คาร์บอน ไดออกไซด์) การพิจารณาว่าจะเลือกแก๊สคลุมชนิดใด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานของแก๊สคลุมนั้น

คุณสมบัติพื้นฐานของแก๊สคลุมที่นำมาใช้ในการปกคลุมรอยต่อประสาน ได้แก่

- คุณสมบัติทางความร้อน ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน คุณสมบัติเหล่านี้จะมีผลต่อแรงเคลื่อนอาร์คและรูปร่างของรอยต่อประสาน

- ความสามารถในการปกคลุมบริเวณอาร์ค ซึ่งจะป้องกันอากาศภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะหลอมเหลว

- การเกิดปฏิกิริยาต่างๆ บริเวณผิวหน้ารอยต่อชิ้นงาน เช่น ปฏิกิริยาทำความสะอาดผิวชิ้นงาน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกต่าง ๆ

- การทำให้เกิดรูปแบบของการถ่ายโอนน้ำโลหะ (Metal Transfer) ในลักษณะต่าง ๆ เช่นถ้าแก๊สคลุมเป็นคาร์บอน ไดออกไซด์ จะทำให้เกิดการถ่ายโอนน้ำโลหะเป็นแบบลัดวงจร (Short Circuiting) หรือแบบหยดขนาดใหญ่ แต่ถ้าแก๊สคลุมเป็นอาร์กอน ฮีเลียม หรืออาร์กอนผสม คาร์บอน ไดออกไซด์ จะทำให้เกิดการถ่ายโอนน้ำโลหะเป็นแบบละออง (Spray Transfer)

Jönsson, Murphy และ Szekely [18] กล่าวว่า แก๊สคลุมที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมประสานรอยต่อของแผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสี (Galvanized Steel Sheet) นั้น จะเป็นแก๊สอาร์กอน 99.5% หรืออาร์กอน 97.5% กับคาร์บอน ไดออกไซด์ 2.5 % เพราะจะมีผลทางลบกับรอยต่อน้อยที่สุด แก๊สที่นิยมนำมาใช้เป็นแก๊สคลุมในการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสี ได้แก่ แก๊สอาร์กอนเป็นหลัก เพราะจะทำให้การอาร์คเรียบ มีความร้อนน้อยกว่าใช้แก๊สฮีเลียม มีการเริ่มต้นการอาร์คที่ตึกว่า และมีการหลอมลึกลงน้อยกว่า ในกระบวนการประสานโลหะด้วย GMAW ได้มีการนำแก๊สอาร์กอนซึ่งเป็นแก๊สเฉื่อยมาใช้นานแล้ว ในบรรยากาศของโลกมีแก๊สอาร์กอนอยู่ประมาณ 0.94 % โดยปริมาตร หรือ 1.3 % โดยน้ำหนัก มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ -189.2°C มีจุดเดือดอยู่ที่ -185.7°C มีน้ำหนักมากกว่าอากาศประมาณ 4 เท่า มีน้ำหนักมากกว่าฮีเลียมประมาณ 10 เท่า แก๊สอาร์กอนที่นำมาใช้ในกระบวนการเชื่อมประสานรอยต่อจะต้องมีความบริสุทธิ์ประมาณ 99.95 % แก๊สอาร์กอนมีศักย์การเกิดไอออนต่ำ (Low Ionization Potential) จึงทำให้มีความเสถียรต่อการอาร์คสูง การอาร์คเรียบนิ่ง การอาร์คสม่ำเสมอ แม้ว่าความยาวในการอาร์คจะสูงบ้างต่ำบ้าง ก็มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของกระแสเชื่อม น้อยมาก ลดการกระเด็นของสะเก็ดโลหะ การแกว่งของเปลวเชื่อมมีน้อยกว่าเพราะแก๊สอาร์กอนมีความหนาแน่นสูง (1.348 kg/m^3) การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแก๊สอาร์กอนที่ใช้ในกระบวนการประสานแสดงในตารางที่ 2.1

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของการใช้แก๊สอาร์กอน [19]

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - การเริ่มต้นอาร์คง่ายและสม่ำเสมอ - การอาร์คมีเสียงเบา - มี Spatter น้อยกว่า - อัตราการไหลของแก๊สต่ำ - ให้ปฏิกิริยาทำความสะอาดดี - ราคาถูก และหาได้ง่ายกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่เหมาะกับงานเชื่อมที่มีชิ้นงานหนา - กั้นแนวเชื่อมแคบ

อัตราการไหลของแก๊สคลุม [20] จะมีผลต่อคุณภาพของรอยต่อ ซึ่งแก๊สคลุมที่ไหลผ่านหัวฉีกมาที่บริเวณรอยประสานรอยต่อต้องไหลแบบราบเรียบ - หากเลือกใช้แก๊สที่มีอัตราการไหลสูงเกินไปจะทำให้การไหลของแก๊สคลุมเกิดการหมุนวน โดยแก๊สที่หมุนวนนี้จะผสมกับอากาศแล้วรวมตัวเข้ากับเนื้อโลหะประสานทำให้รอยต่อประสานสกปรก คุณสมบัติของรอยต่อลดลง หากแก๊สคลุมมีปริมาณน้อยจะทำให้รอยต่อมีรูพรุน โปร่งอากาศ ดังนั้น จึงควรเลือกอัตราการไหลของแก๊สคลุมให้เหมาะสมกับกระบวนการ ไม่ควรมากหรือน้อยจนเกินไป อัตราการไหลของแก๊สคลุมที่ใช้ในกระบวนการแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อัตราการไหลของแก๊สคลุมที่ใช้ในกระบวนการ GMAW [20]

Welding Current (A)	Gas Flow Rate (L/min)
100-200	15-25
200-300	20-30
- 300-500	20-30

2.6.3 กระแสเชื่อม (Welding Current)

กระแสเชื่อมที่ใช้จะมีผลกระทบต่ออัตราการเติมเนื้อโลหะลวดเติม ในระบบแรงดันคงที่ (Constant Voltage: CV) กระแสเชื่อมจะถูกควบคุมด้วยอัตราเร็วในการป้อนลวด (Wire Feed Speed) เมื่ออัตราการป้อนลวดเพิ่มขึ้นกระแสก็จะเพิ่มขึ้น

1) ระบบแรงดันคงที่ (Constant Voltage : CV) [21, 22] กระบวนการประสานนี้มีระยะอาร์ค หรือ อาร์คโวลต์คงที่ กรณีเชื่อมอัตโนมัติหรือค่อนข้างคงที่ ถ้าเชื่อมด้วยมือ การปรับกระแสเชื่อมเพื่อให้ได้ระยะอาร์คที่เสถียรทำได้โดยการปรับความเร็วในการป้อนลวดเพื่อให้ได้กระแสที่ดีที่สุด

2) กระแสสลับและกระแสตรง (AC, DC) เป็นตัวแปรอีกตัวแปรหนึ่ง ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ

แล่นประสานด้วย GMAW โดยการต่อสายเชื่อมที่งานเป็นขั้วลบ (DCEP) จะใช้กันแพร่หลายในกระบวนการ GMAW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

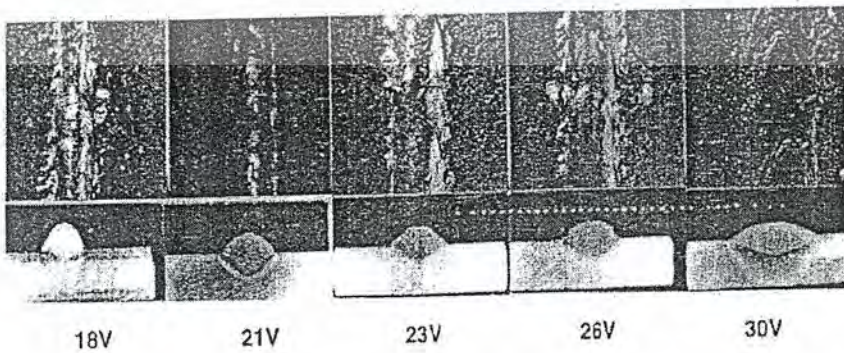
เพราะการอาร์คคองที่ การส่งถ่ายน้ำโลหะจะเสถียร การหลอมลึกดีกว่าส่วนการต่อสายเชื่อมแบบงานเป็นขั้วบวก (DCEN) ให้การหลอมลึกน้อย การส่งถ่ายน้ำโลหะส่วนใหญ่จะเป็นหยด สำหรับกระแสสลับจะไม่นิยมใช้ ในกระบวนการนี้ แต่อาจใช้กระแสสลับความถี่สูงในการประสานอลูมิเนียมหรืออลูมิเนียมผสม กระแสสลับจะทำให้การอาร์คไม่เสถียร การเพิ่มปริมาณกระแสเชื่อม ทำให้อัตราการหลอมของลวดเติมเพิ่มขึ้น และทำให้อัตราการเติมเนื้อโลหะสู่รอยต่อเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ถ้ากระแสเชื่อมที่ใช้มีค่าน้อยเกินไปจะทำให้การถ่ายโอนน้ำโลหะเข้าสู่รอยต่อช้า ทำให้การหลอมลึกของงานและแนวเชื่อมที่ได้ไม่สมบูรณ์ แต่ถ้าใช้กระแสสูงเกินไป จะทำให้ระยะเวลาหลอมลึกมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ระดับต่างกัน [19]

2.6.4 แรงดันอาร์ค (Arc Voltage)

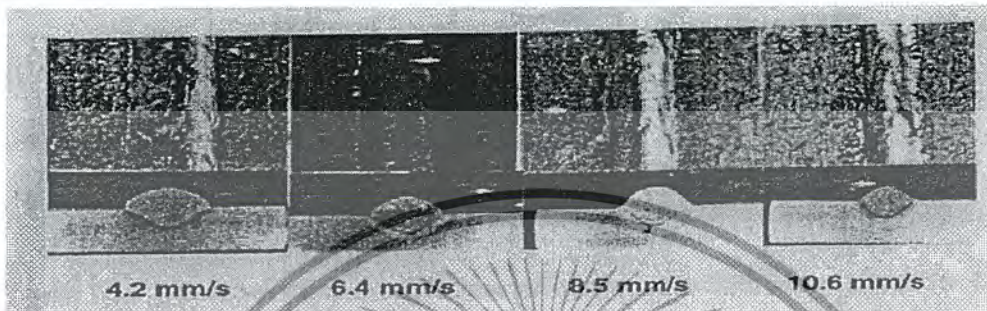
แรงดันอาร์คหรือแรงดันเชื่อม หาได้จากความยาวอาร์คระหว่างปลายลวดเติมกับงาน แรงดันอาร์คที่ต้องการใช้งานจะขึ้นอยู่กับขนาดของลวดเติม ชนิดแก๊สคลุม ตำแหน่งการเชื่อม ชนิดของรอยต่อและความหนาของโลหะงาน ถ้าแรงดันอาร์คสูงเกินไปจะทำให้เกิดประกายไฟมาก เกิดรุพรุนแรง ชิ้นงานมีการหลอมละลายมากยิ่งขึ้นและเกิดรอยกินลึกก้นขอบ (Undercut) ถ้าแรงดันอาร์คต่ำจะทำให้บ่อหลอมเหลวนิด ชิ้นงานมีการหลอมละลายต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 อย่างไรก็ตามในกระบวนการ GMAW แรงดันอาร์คเป็นแบบคงที่ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามกระแสเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.16 ผลกระทบของแรงดันอาร์คที่มีต่อรอยประสาน [22]

2.6.5 อัตราเร็วเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม (Welding Speeds : Travel Speeds)

เป็นอัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมต่อหนึ่งหน่วยเวลา อัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมจะถูกควบคุมโดยช่างเชื่อม กรณีการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติ หรือควบคุมด้วยกลไกจักรกล มีผลกระทบต่อระยะเวลาการหลอมลึกลงของรอยต่อ ขนาดของรอยต่อ ความต่อเนื่องของรอยต่อ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ผลกระทบจากอัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมที่ระดับต่างกัน [22]

จากรูปที่ 2.19 ตัวแปรทุกตัวยกเว้น อัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมเท่ากันที่มีค่าเท่ากัน จะเห็นว่าถ้าลดอัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม หรือถ้าหัวเชื่อมเคลื่อนที่ช้าเกินไป จะเกิดรอยกินลึกที่ขอบแนวเชื่อม การเติมน้ำโลหะที่ไม่สม่ำเสมอก็ทำให้ความต่อเนื่องของรอยต่อ ไม่สมบูรณ์

2.7 การออกแบบการทดลอง (Designing Experiments)

เนื่องด้วยทรัพยากรมีจำนวนจำกัด ดังนั้นการทดลองแต่ละครั้งจะต้องให้สาระข้อมูลที่สำคัญที่สุด ซึ่งการทดลองที่มีการวางแผนที่ดีจะทำให้ได้สาระข้อมูลที่สำคัญและมีคุณภาพมากกว่าการทดลองที่เกิดขึ้นจากงานที่ไม่ได้รับการวางแผนมาก่อน และ โดยเฉพาะการทดลองตามแผนที่วางไว้จะสามารถวิเคราะห์เกี่ยวกับอิทธิพลของปัจจัยที่ต้องการศึกษาได้ดีกว่าด้วย ตัวอย่างเช่น ถ้ามีสมมติฐานว่าอิทธิพลของ Interaction ระหว่างปัจจัยสองตัวมีนัยสำคัญ ควรที่จะทำการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ของอิทธิพล Interaction ด้วย และควรทำการทดลองแบบ Factorial มากกว่าการทดลองแบบ OFAT (One Factor at a Time) อิทธิพล Interaction จะเกิดขึ้นเมื่อปัจจัยตัวหนึ่งมีผลต่อปัจจัยอีกตัวหนึ่งที่ระดับต่างกันไป

การทดลองที่ได้รับการออกแบบมา [26] โดยมากจะมี 4 ขั้นตอนคือ การวางแผน (Planning) การคัดเลือก (Screening หรือ Process Characterization) การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) และการทวนสอบ (Verification) ตัวอย่างเช่น การออกแบบการทดลองจะประกอบด้วย การสร้าง (Creating) การวิเคราะห์ (Analyzing) และการผลิตผลการทดลอง

2.7.1 การวางแผน (Planning)

การวางแผน [26] ที่ดีจะช่วยทำให้เกิดปัญหาระหว่างการทำการทดลองน้อยลง ตัวอย่างเช่น บุคลากร อุปกรณ์ที่ทำการทดลอง เงินทุน และเรื่องกรรมวิธีการผลิตซึ่งอาจส่งผลให้ไม่สามารถทำการทดลองได้ครบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบูรณ์ ถ้าโครงการที่ทำการทดลองนี้มีความสำคัญอันดับรองลงมาอีกโครงการหนึ่ง ซึ่งทำให้ต้องมีการแบ่งใช้ทรัพยากรบางส่วนไป การแบ่งการทดลองเป็นส่วน ๆ ทำให้ผลการทดลองที่ได้มานั้น ยังสามารถนำไปใช้ได้ และเมื่อทรัพยากรที่ถูกแบ่งใช้ไปนั้นกลับคืนมาก็สามารถทำการทดลองได้เหมือนเดิมและดำเนินต่อจากตอนที่หยุดไว้ก่อนหน้า การเตรียมการทดลองขึ้นอยู่กับลักษณะปัญหาที่กำลังเจอ และนี่เป็นขั้นตอนที่อาจจะต้องทำการ

- กำหนดปัญหา (Define the problem) ขั้นตอนนี้คือการกำหนดปัญหา ซึ่งปัญหาที่มีขอบเขตชัดเจน จะช่วยให้การกำหนดตัวแปรที่ถูกต้อง เพื่อให้สามารถตอบคำถามได้ตามที่ต้องการ
- กำหนดวัตถุประสงค์ (Define the objective) ขั้นตอนนี้คือกำหนดวัตถุประสงค์ ซึ่งวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนจะทำให้มั่นใจได้ว่าการทดลองที่จะทำนั้นสามารถตอบคำถามได้ตรง และสาระข้อมูลที่จะได้มานี้ใช้ได้จริง
- การสร้างแผนการทดลองเพื่อให้ได้สาระข้อมูลที่ต้องการ ในขั้นตอนนี้ควรมีการทบทวนถึงสิ่งต่างๆที่มีความเกี่ยวข้อง เช่น หลักการทางทฤษฎี หรือข้อมูลในอดีต ตัวอย่างเช่น ต้องการหาว่าปัจจัยใดหรือเงื่อนไขของกระบวนการแบบใดที่มีผลต่อประสิทธิภาพและความแปรปรวนของกระบวนการ หรือทำการหาเงื่อนไขของกระบวนการที่ดีที่สุด
- กระบวนการและระบบการวัดจะต้องอยู่ภายใต้การควบคุม โดยหลักทางทฤษฎีทั้งกระบวนการและระบบการวัดควรจะอยู่ภายใต้การควบคุมทางสถิติด้วยการใช้หลักการทาง การควบคุมกระบวนการทางสถิติ (Statistical Process Control, SPC) ในกรณีที่กระบวนการไม่ได้อยู่ภายใต้การควบคุมแบบสมบูรณ์ แต่อย่างน้อยกระบวนการนั้นๆ ก็ควรที่จะสามารถทำซ้ำและให้ค่ากระบวนการแบบเดิมรวมทั้งต้องมีการวัดความแปรปรวนของกระบวนการ ซึ่งถ้าความแปรปรวนของกระบวนการนี้ที่ได้มามีค่ามากกว่าความแตกต่างหรืออิทธิพลที่กำลังพิจารณา ผลการทดลองที่ได้นี้อาจจะไม่ได้ประโยชน์มากนัก

2.7.2 การคัดเลือก (Screening)

ในงานพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมาก มีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุง การคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรนี้ [26] ทำให้สามารถจะพิจารณาเฉพาะที่ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้นได้ หรือ พิจารณาคตามหลักการ ความสำคัญจำนวนน้อย “Vital Few” การคัดเลือกอาจจะสามารถทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสม (Optimal) ของตัวแปรนั้นๆ รวมทั้งบอกด้วยว่าค่าตอบสนอง (Response) มีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งวิธีดังกล่าวต่อไป นี้มักจะใช้ในการคัดเลือก

- Two-Level full และ Fractional Factorial ซึ่งในวงการอุตสาหกรรมมีใช้กันแพร่หลาย
- Plackett-Burman แม้ว่าจะมี Resolution น้อย แต่ว่ามีประโยชน์อย่างมากต่อการทดลองเพื่อการคัดเลือก และการทดสอบเรื่อง Robustness ซึ่งใช้กันโดยทั่วไป
- General Full Factorial (ปัจจัยมีค่าระดับมากกว่า 2 ค่าขึ้นไป) อาจจะมีประโยชน์บ้างในการทำการทดลองเพื่อการคัดเลือกขนาดเล็ก

2.7.3 การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)

หลังจากที่มีการคัดเลือกตัวแปร [26] ที่มีความสำคัญจำนวนน้อย (Vital-Few) ก็จะทำการหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยเหล่านี้ ซึ่งค่าปัจจัยที่ดีที่สุดจะเป็นค่าอะไรขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการทดลองด้วย ตัวอย่างเช่น วัตถุประสงค์คือการหาค่า Yield ของกระบวนการที่มีค่ามากที่สุดและมีค่าความแปรปรวนของกระบวนการน้อยที่สุด

- ในหัวข้อภาพรวม Factorial Design เป็นการอธิบายถึงวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์รูปแบบของ Two-level factorial, Plackett-Burman และ General Full Factorial
- ในหัวข้อภาพรวม Response Surface Design เป็นการอธิบายถึงวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์รูปแบบของ Central composite design และ Box-Behnken Design
- ในหัวข้อ Response Optimization เป็นการอธิบายถึงวิธีการหาค่าที่ดีที่สุด ในกรณีที่มีค่าตอบสนองมากกว่าหนึ่งค่า (multiple responses) Minitab มีทั้งวิธี Numerical Optimization, Interactive Graph และ Overlaid Contour Plot ที่ไว้เพื่อช่วยในการหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อเป็นเงื่อนไขของการเกิดค่าตอบสนองหลายๆค่าไปพร้อมๆกัน

2.7.4 การทวนสอบ (Verification)

การทวนสอบเป็นการทำการทดลองซ้ำเพื่อดูว่าค่าที่วิเคราะห์มาเป็นค่าที่ดีที่สุดนั้น ยังคงให้ผลลัพธ์ที่ดีจริงๆ หรือไม่ ตัวอย่างเช่น ทำการทดลองที่มีเงื่อนไขตามค่าที่หามาจากการหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อหาขนาดของช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยค่าตอบสนอง

2.8 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs)

2.8.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs)

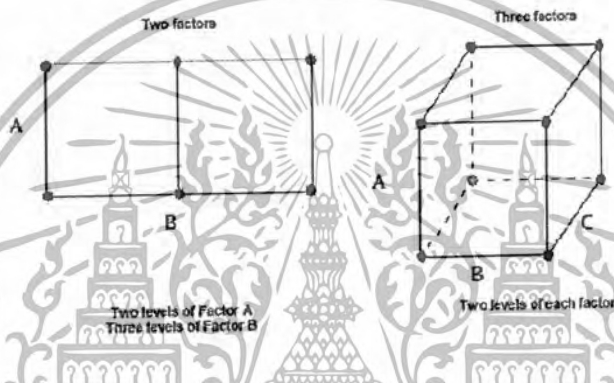
การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลจะสามารถทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการแลเกิดขึ้นพร้อมๆกันได้ เมื่อมีการทำการทดลอง ควรทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยไปพร้อมๆกันมากกว่าทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยตัวใดตัวหนึ่ง เพราะจะทำให้ได้งานที่มีประสิทธิภาพมากกว่าทั้งในเรื่องการประหยัดเวลาและต้นทุน และยังสามารถวิเคราะห์เรื่องอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยได้ด้วย โดยอิทธิพลร่วม (Interaction) คือผลของการที่ปัจจัยร่วมกันที่มีอยู่ในหลายๆกระบวนการ ถ้าไม่ได้ทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลอาจจะไม่เห็นผลของอิทธิพลร่วม (Interaction) ได้ชัดเจนนัก

2.8.2 การออกแบบเพื่อการคัดเลือก (Screening Design)

ในงานพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมาก มีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุงการคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรนี้ทำให้สามารถจะพิจารณาเฉพาะที่ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้นได้ หรือ พิจารณาตามหลักการ ความสำคัญจำนวนน้อย “Vital Few” การคัดเลือกอาจจะสามารถทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสม (Optimal) ของตัวแปรนั้นๆ รวมทั้งทำการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) เพื่อบอกว่าค่าตอบสนอง (Response) มีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง

2.8.3 การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial

ในการทดลองแบบ Full Factorial [26] ค่าตอบสนอง (Response) จะถูกวัดค่าที่ทุกๆ เงื่อนไขของทุกค่าระดับปัจจัยที่มีในการทดลอง โดยเงื่อนไขการทดลอง (Combination of Factor Levels) เป็นเงื่อนไขที่กำหนดให้ทำการทดลองเพื่อวัดค่าตอบสนอง โดยที่เงื่อนไขการทดลองแต่ละอันจะเรียกว่า รัน (Run) และมีการทำการทดลองเพื่อวัดค่าตอบสนอง และชุดข้อมูลทั้งหมดในทุกวันจะเรียกว่า แบบการทดลอง (Design) ในรูปภาพด้านล่างนี้เป็นรูปแสดงตัวแบบของการทดลองแบบ 2 และ 3 ปัจจัย โดยจุดจะเป็นแสดงถึงเงื่อนไขการทดลอง (Combination) แต่ละอันของการทดลอง ตัวอย่างเช่น ในตัวแบบ 2 ปัจจัย (Two-Factor Design) จุดที่มุมล่างด้านซ้าย และรันของการทดลองที่มีค่าระดับปัจจัย A เป็นค่าต่ำ (Low) และ ค่าระดับปัจจัย B เป็นค่าต่ำ เช่นกัน



รูปที่ 2.18 การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial ในแต่ละปัจจัย [26]

2.8.4 การออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial

ในการทดลองแบบ Full Factorial ค่าตอบสนองจะถูกวัดค่าในทุกๆ เงื่อนไขการทดลองซึ่งจะเป็นทุกๆค่าระดับของทุกปัจจัย ซึ่งอาจจะต้องมีการทำการทดลองจำนวนมากครั้ง ตัวอย่างเช่น การทดลองของ Two-Level Full Factorial ของ 6 ปัจจัย อย่างน้อยต้องมีการทดลองจำนวน 64 รัน หรือ กรณีที่มี 9 ปัจจัย จะมีการทดลองอย่างน้อย 512 รัน เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและต้นทุน อาจทำการออกแบบการทดลองให้มีการทำการทดลองเฉพาะบางเงื่อนไข ตัวแบบ Factorial ที่มีการทดลองไม่ครบทุกเงื่อนไขนี้เรียกว่า Fractional Factorial Designs โปรแกรม Minitab สามารถสร้างตัวแบบ Fractional Factorial ได้จนถึงจำนวนปัจจัย 15 ตัวต่อหนึ่งการทดลอง

Fraction Factorial [26] มีความสำคัญอย่างมากในการทดลองเพื่อการคัดเลือกปัจจัย (Screening) เพราะว่ามีผลการลดจำนวนรันลงจนเหลือขนาดการทดลองที่สามารถทำได้จริง รันที่ถูกเลือกมาทำการทดลองเป็นรันที่อยู่ในชุดการทดลองของตัวแบบ Full Factorial ซึ่งในกรณีที่ไม่ได้ทำการทดลองครบทุกเงื่อนไขของทุกปัจจัยจะทำให้เกิดผลอย่างหนึ่งซึ่งเรียกว่าคอนฟาวด์ (Confounded) ซึ่ง คอนฟาวด์ นี้หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยที่ไม่สามารถทำการประเมินค่าแยกออกมาได้เด็ดขาด และอาจเรียกว่าเป็น Aliased ที่อยู่ในรูปแบบของการคอนฟาวด์ เพราะว่าเรื่องของคอนฟาวด์ ทำให้อิทธิพล (Effects) บางตัวไม่สามารถหาค่าได้ทำให้การเลือกการทำ Fractional Factorial ต้องเลือกส่วนที่จะมาทำให้ออกต้องเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้งานได้ การเลือกส่วนการทดลองที่ดีที่สุด (Best Fraction) บางครั้งอาจจะต้องใช้ความรู้เฉพาะเกี่ยวกับกระบวนการและผลิตภัณฑ์เพื่อมาตัดสินใจด้วย

2.9 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression)

ในการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย [27] จะเป็นการวิเคราะห์กับตัวแปรตามหรือตัวแปรเกณฑ์ (Y) โดยมีตัวแปรอิสระหรือตัวแปรทำนาย (X) เพียงตัวเดียว อย่างไรก็ตาม ในบางปรากฏการณ์ที่ต้องอธิบายหรือทำนายทางสังคมศาสตร์ หากใช้ตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวจะมีข้อจำกัด ในการอธิบายพฤติกรรมของมนุษย์ซึ่งโดยมากจะมีความซับซ้อน การใช้ตัวแปรทำนายเพียงตัวเดียวจะไม่มีประสิทธิภาพพอที่จะอธิบายตัวแปรเกณฑ์ได้ ในกรณีที่จะพยายามอธิบายสัดส่วนความแปรปรวนของตัวแปรเกณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีตัวแปรทำนายมากกว่า 1 ตัว ซึ่งจะไปสู่การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเมื่อมีตัวแปรทำนายตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปใช้ในการทำนายตัวแปรเกณฑ์ ซึ่งโดยปกติตัวแปรทำนายหรือตัวแปรอิสระจะใช้สัญลักษณ์ X และตัวแปรเกณฑ์หรือตัวแปรตามจะใช้สัญลักษณ์ Y

2.9.1 สหสัมพันธ์แยกส่วน (Partial Correlation)

ในเบื้องต้นจะอธิบายแนวคิดของสหสัมพันธ์แยกส่วนเสียก่อน [27] กรณีที่ง่ายที่สุดจะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่าง 3 ตัวแปร ซึ่งให้ชื่อว่า X_1 , X_2 และ X_3 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แยกส่วนระหว่าง X_1 และ X_2 เมื่อ X_3 ถูกควบคุมเอาไว้หรือถูกขจัดออก นั่นคือ อิทธิพลของ X_3 ถูกขจัดออกจากทั้ง X_1 และ X_2 (ตัวแปรทั้งสองถูกปรับแก้ด้วย X_3) ดังนั้นสหสัมพันธ์แยกส่วนจะแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง X_1 และ X_2 ที่เป็นอิสระจากอิทธิพลของ X_3 สหสัมพันธ์แยกส่วนนี้ใช้สัญลักษณ์ว่า $r_{12.3}$ สังเกตว่า ในสัญลักษณ์ไม่แสดง X และมี . เป็นตัวแบ่งระหว่างตัวแปรที่สัมพันธ์กับตัวแปรที่ถูกควบคุม วิธีการคำนวณ $r_{12.3}$ มีสูตรดังนี้

$$r_{12.3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2)(1 - r_{23}^2)}}$$

สังเกตว่าในสูตรคำนวณนี้จะใช้สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว

2.9.2 สหสัมพันธ์ครึ่งส่วน (Semipartial (Part) Correlation)

แนวคิดถัดมาคือสหสัมพันธ์ครึ่งส่วน (Semipartial or Part Correlation) กรณีที่ง่าย [27] คือกรณีที่มีตัวแปรเพียง 3 ตัว ซึ่งให้ชื่อว่า X_1 , X_2 และ X_3 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ครึ่งส่วนจะเป็นการหาสหสัมพันธ์ระหว่าง X_1 และ X_2 เมื่อ X_3 ถูกขจัดออกจาก X_2 เท่านั้น นั่นคือ อิทธิพลของ X_3 จะถูกขจัดออกจาก X_2 เท่านั้น ดังนั้น สหสัมพันธ์ครึ่งส่วนจึงเป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง X_1 และ X_2 หลังจากสัดส่วนความแปรปรวนของ X_2 ที่สามารถทำนายได้จาก X_3 ถูกขจัดออกจาก X_2 สหสัมพันธ์ครึ่งส่วนจะใช้สัญลักษณ์ว่า $r_{1(2.3)}$ เมื่อ X จะไม่แสดงในสัญลักษณ์และจุดที่คั่นหมายถึงการขจัดอิทธิพลของตัวแปร วิธีการคำนวณมีสูตรดังนี้

$$r_{1(2.3)} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{1 - r_{23}^2}}$$

สังเกตว่าสูตรคำนวณจะใช้ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเพียง 2 ตัว

2.9.3 สมการถดถอยที่อยู่ในรูปคะแนนดิบ (Unstandardized Regression Equation)

พิจารณาสมการถดถอยเชิงเส้นของกลุ่มตัวอย่าง [26] สำหรับการถดถอย Y บน $X_{1,2,\dots,m}$ คือ

$$Y_i = b_1X_{1i} + b_2X_{2i} + \dots + b_mX_{mi} + a + e_i$$

เมื่อ Y คือตัวแปรเกณฑ์ และ X_k คือตัวแปรพยากรณ์ เมื่อ $k = 1, \dots, m$, b_k คือความชัน (Partial Slope) ของเส้นถดถอยสำหรับ Y ที่ถูกทำนายด้วย X_k , a คือจุดตัดของเส้นถดถอยสำหรับ Y ที่ถูกทำนายด้วย X_k , e_i คือความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ของ Y ที่ไม่สามารถพยากรณ์ได้ด้วย X_k และ i คือสัญลักษณ์แทนตัวอย่างที่ i โดยที่ i มีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง n เมื่อ n แทนขนาดของกลุ่มตัวอย่าง (โดยปกติเขียน $i = 1, \dots, n$) มีการใช้ความชัน (Partial Slope) เพราะว่าจะแสดงถึงความชันของ Y บน X_k เฉพาะตัวนั้น ๆ ซึ่งมีการจัดอิทธิพลของ X_k ตัวอื่นๆออก จึงเป็นเหตุให้มีการใช้สหสัมพันธ์แยกส่วน

สมการทำนายของกลุ่มตัวอย่าง [27] คือ

$$Y'_i = b_1X_{1i} + b_2X_{2i} + \dots + b_mX_{mi} + a$$

เมื่อ Y'_i คือค่าที่ถูกทำนายของ Y เมื่อมีการแทนค่า X_k และค่าอื่น ๆ ในสมการ สามารถคำนวณความคลาดเคลื่อน e_i สำหรับแต่ละตัวอย่างจากสมการทำนาย โดยการหาความแตกต่างระหว่าง Y จริงกับ Y' ที่ถูกทำนาย จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวอย่างด้วยสมการ

$$e_i = Y_i - Y'_i$$

สำหรับทุกค่า $i = 1, \dots, n$

ในการคำนวณความชันและจุดตัดในการถดถอยพหุคูณกรณีมีตัวแปรทำนาย 2 ตัว โดยปกติจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ

สำหรับกรณีมีตัวแปรทำนาย 2 ตัวแล้ว ความชันและจุดตัดสามารถคำนวณได้ด้วยสูตร

$$b_1 = [(r_{Y1} - r_{Y2}r_{12})s_Y] / [(1 - r_{12}^2)s_1]$$

$$b_2 = [(r_{Y2} - r_{Y1}r_{12})s_Y] / [(1 - r_{12}^2)s_2]$$

$$a = \bar{Y} - b_1\bar{X}_1 - b_2\bar{X}_2$$

ความชัน b_1 อ้างอิงว่าเป็น 1) ค่าคาดหวังหรือการเปลี่ยนแปลงใน Y เมื่อ X_1 เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย โดยที่ X_2 คงที่ 2) อิทธิพลของ X_1 ที่มีต่อ Y เมื่อ X_2 คงที่ และ 3) สัมประสิทธิ์การถดถอยในรูปของคะแนนดิบ สำหรับ b_2 ก็อ้างอิงทำนองเดียวกัน จุดตัดอ้างอิงว่าเป็น 1) ค่าของ Y เมื่อ X_1 และ X_2 เป็น 0 และ 2) ค่าเฉลี่ยของ Y เมื่อ X_1 และ X_2 เป็น 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกวิธีสำหรับการคำนวณความชันจะเกี่ยวข้องกับการใช้สหสัมพันธ์แยกส่วน มีสูตรการคำนวณ

ดังนี้

$$b_1 = r_{Y1.2} \{s_Y \sqrt{(1-r_{Y2}^2)} / [s_1 \sqrt{(1-r_{12}^2)}]\}$$

$$b_2 = r_{Y1.2} \{s_Y \sqrt{(1-r_{Y2}^2)} / [s_1 \sqrt{(1-r_{12}^2)}]\}$$

มีอยู่หลายวิธีในการคำนวณหาความชันและจุดตัด สำหรับเกณฑ์นั้น โดยปกติจะใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น ซึ่งใช้เกณฑ์กำลังสองต่ำสุด เกณฑ์กำลังสองต่ำสุดจะเป็นการคำนวณหาค่าสำหรับความชันและจุดตัดที่เป็นผลรวมของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการทำนายคือค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด นั่นคือต้องคำนวณหาสมการถดถอยที่นิยามว่าเป็นชุดของความชันและจุดตัดที่มีผลรวมของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนต่ำสุด

2.9.4 สมการการถดถอยในรูปของคะแนนมาตรฐาน (Standardized Regression Equation)

จากข้างต้นทั้งหมดที่กล่าวมา เป็นการคำนวณการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นที่เกี่ยวข้องกับการใช้คะแนนดิบในการคำนวณ ดังนั้นสมการการถดถอยที่ได้จะเรียกว่าเป็นสมการถดถอยในรูปของคะแนนดิบ [26] ความชันจะประมาณค่าได้จากคะแนนดิบ เพราะว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงคะแนนดิบใน Y เมื่อค่าคะแนนในตัวแปร X_k เปลี่ยนแปลง 1 หน่วย เมื่อมีการควบคุมตัวแปร X_k อื่น ๆ เอาไว้ มีบางครั้งที่อาจต้องการแสดงการถดถอยในรูปของคะแนนมาตรฐาน z (z-score) มากกว่า ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของตัวแปรที่อยู่ในรูปของคะแนนมาตรฐาน (z_1, z_2 และ z_y) มีค่าเป็น 0 และ 1 ตามลำดับ สมการทำนายเชิงเส้นในรูปของคะแนนมาตรฐานจะกลายเป็น

$$z(Y_i) = \beta_1 z_{1i} + \beta_2 z_{2i} + \dots + \beta_m z_{mi}$$

เมื่อ β_k คือความชันในรูปมาตรฐานและเทอมอื่นๆ ก็ทำนองเดียวกับที่กล่าวไปข้างต้นในกรณีที่เป็น การถดถอยอย่างง่าย จะไม่มีจุดตัดในสมการทำนายรูปคะแนนมาตรฐานเพราะว่ามีค่าเฉลี่ยของคะแนนมาตรฐานในทุกตัวแปรเป็น 0 ความชันมาตรฐานโดยทั่วไปคำนวณได้ว่า

$$\beta_k = b_k (s_k / s_Y)$$

สำหรับกรณีมีตัวแปรพยากรณ์ 2 ตัว ความชันมาตรฐานสามารถคำนวณได้ว่า

$$\beta_1 = b_1 (s_1 / s_Y)$$

$$= (r_{Y1} - r_{Y2} r_{12}) / (1 - r_{12}^2)$$

$$\beta_2 = b_2 (s_2 / s_Y)$$

$$= (r_{Y2} - r_{Y1} r_{12}) / (1 - r_{12}^2)$$

ถ้า $r_{12} = 0$ แล้วแสดงว่าตัวแปรพยากรณ์ทั้งสองตัวไม่มีความสัมพันธ์กันแล้ว $\beta_1 = r_{Y1}$ และ $\beta_2 = r_{Y2}$

2.9.5 การทดสอบนัยสำคัญ

2.9.5.1 การทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอยทั้งหมด

การทดสอบแรกเป็นการทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอยทั้งหมดหรือเรียกอีกอย่างว่าการทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์การอธิบาย [27] เป็นการทดสอบที่จำเป็นในการทดสอบค่า b_k ทั้งหมดที่อยู่ในสมการ สามารถเขียนสมมติฐานศูนย์และสมมติฐานอื่น ได้ดังนี้

$$H_0 : \rho_{Y1, \dots, m}^2 = 0$$

$$H_1 : \rho_{Y1, \dots, m}^2 \neq 0$$

ถ้า H_0 ถูกปฏิเสธแล้วแสดงว่า มีสัมประสิทธิ์การถดถอยอยู่ 1 ตัวหรือมากกว่า (b_k) อาจจะมีนัยสำคัญทางสถิติแตกต่างจาก 0 อย่างไรก็ตาม เป็นไปได้ที่จะมีนัยสำคัญของ R^2 ทั้งหมดเมื่อไม่มีตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัวมีนัยสำคัญ ซึ่งจะบ่งชี้ว่าไม่มีตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัวที่มีความแรงเหนือตัวแปรอื่น ๆ แต่อย่าลืมว่าตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัวอาจจะสัมพันธ์กัน ดังนั้น "ต้องควบคุมตัวแปรพยากรณ์อื่น" ซึ่งเป็นความสำคัญอันดับแรก ถ้า H_0 ไม่ถูกปฏิเสธแต่ไม่มีสัมประสิทธิ์การถดถอยที่มีนัยสำคัญทางสถิติแตกต่างจากศูนย์

การทดสอบอยู่บนพื้นฐานสถิติที่ว่า

$$F = \frac{[R^2/m]}{[(1-R^2)/(n-m-1)]}$$

เมื่อ F คือสถิติทดสอบ F ส่วน R^2 คือสัมประสิทธิ์การอธิบาย (สัดส่วนความแปรปรวนใน Y ที่ถูกทำนายได้ด้วย X_k) ส่วน $1 - R^2$ คือสัมประสิทธิ์การไม่อธิบาย (สัดส่วนความแปรปรวนใน Y ที่ไม่สามารถทำนายได้ด้วย X_k) m คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ และ n คือขนาดของกลุ่มตัวอย่าง สถิติทดสอบ F จะถูกเปรียบเทียบกับ F วิกฤติที่ได้จากตารางสถิติเป็นแบบทิศทางเดียว โดยมีองศาแห่งความเป็นอิสระเท่ากับ m และ $(n - m - 1)$ ค่าวิกฤติ F จะเท่ากับ $(1-\alpha)F_{m,(n-m-1)}$ สถิติทดสอบสามารถเขียนได้ในรูปหนึ่งว่า

$$F = \frac{(SS_{reg} / df_{reg})}{(SS_{res} / df_{res})}$$

$$= MS_{reg} / MS_{res}$$

เมื่อ $df_{reg} = m$ และ $df_{res} = (n - m - 1)$

2.9.5.2 การทดสอบนัยสำคัญของ b^k

การทดสอบที่สองเป็นการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติของความชันและสัมประสิทธิ์การถดถอย b^k ในอีกกรณีหนึ่ง [27] สัมประสิทธิ์การถดถอยที่อยู่ในรูปคะแนนดิบมีนัยสำคัญทางสถิติแตกต่างจากศูนย์หรือไม่ ซึ่งจะเหมือนกับการทดสอบ β_k แต่จะไม่แสดงการทดสอบแยกส่วนออกมา สมมติฐานศูนย์และสมมติฐานอื่นสามารถเขียนได้ดังนี้

$$H_0 : \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_k \neq 0$$

เมื่อ β_k คือความชันของประชากรในตัวแปร X_k

การถดถอยพหุคูณจำเป็นที่จะต้องคำนวณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานสำหรับแต่ละ b_k

ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$s_{res}^2 = SS_{res}/df_{res} = MS_{res}$$

เมื่อ $df_{res} = (n - m - 1)$ องศาแห่งความเป็นอิสระจะสูญหายไปเพราะมีการประมาณค่าความชันของประชากรและจุดตัด นั่นคือ β_k และ α ตามลำดับ จากข้อมูลตัวอย่าง ความคลาดเคลื่อนของความแปรปรวนของการประมาณค่าหาได้จากปริมาณของความแปรปรวนในความคลาดเคลื่อน ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าได้โดยการถอดรากที่สองของความคลาดเคลื่อนของความแปรปรวนของการประมาณค่า และสามารถได้โดยผ่านความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่า เรียกว่า ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า ใช้สัญลักษณ์ว่า s_{res}

ท้ายสุดจะคำนวณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของ b_k แต่ละตัว ใช้สัญลักษณ์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของ b_k ว่า $s(b_k)$ คำนวณได้ดังนี้

$$s(b_k) = s_{res} / \sqrt{[(n-1)s_k^2(1-R_k^2)]}$$

เมื่อ s_k คือความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่างสำหรับตัวแปรทำนาย X_k และ R_k^2 คือกำลังสองของสหสัมพันธ์พหุคูณระหว่าง X_k ตัวหนึ่งกับ X_k ที่เหลือ R_k^2 จะแสดงถึงการซ้อนทับกันระหว่างตัวแปรพยากรณ์ (X_k) ในกรณีที่มีตัวแปรพยากรณ์ 2 ตัว R_k^2 จะเท่ากับ r_{12}^2

ต่อมาเป็นการทดสอบทางสถิติสำหรับการทดสอบนัยสำคัญของ b_k ในการทดสอบทางสถิตินี้จะใช้อัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยหารด้วยความคลาดเคลื่อนมาตรฐานดังสูตร

$$t = b_k/s(b_k)$$

สถิติทดสอบ t จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าวิกฤติแบบสองหางกับระดับนัยสำคัญที่ $(n - m - 1)$ โดยเปิดจากตารางสถิติ ว่าวิกฤติจะเท่ากับ $\pm_{(\alpha/2)}t_{(n-m-1)}$ กรณีแบบสองทาง

ในการหาช่วงความเชื่อมั่นของ b_k โดยการนำ b_k มาบวกและลบออกจากค่าวิกฤติที่เปิดจากตาราง แล้วคูณด้วยความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ช่วงความเชื่อมั่นของ b_k คำนวณได้ด้วยสูตร

$$CI(b_k) = b_k \pm (\alpha/2)t_{(n-m-1)}s(b_k)$$

จำได้ว่าสมมติฐานศูนย์คือ β_k เท่ากับ 0 ($H_0 : \beta_k = 0$) ดังนั้น ถ้าช่วงความเชื่อมั่นครอบคลุมแล้ว b_k จะไม่มีนัยสำคัญทางสถิติแตกต่างจากศูนย์ที่ระดับนัยสำคัญ นั่นคือแปลความหมายได้ว่า เมื่อเก็บข้อมูลซ้ำกับกลุ่มตัวอย่างหลาย ๆ กลุ่ม จะมีจำนวน $(1 - \alpha)$ เปอร์เซ็นต์ ที่ค่า β_k จะตกอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นนี้ รูปแบบโดยทั่วไปของการทดสอบทั้งสองนี้จะแสดงเป็นสมมติฐานได้ว่า

$$H_0 : \beta_k = \beta_0$$

$$H_1 : \beta_k \neq \beta_0$$

เมื่อ β_0 คือค่าที่ β_k ถูกสมมติให้เท่ากับ เมื่อ $\beta_0 = 0$ แล้ว ก็จะทดสอบเหมือนกับที่กล่าวไว้ข้างต้น รูปแบบการทดสอบโดยทั่วไปของ b_k คือ

$$t = (b_k - \beta_0) / s(b_k)$$

ในรูปแบบโดยมากของช่วงความเชื่อมั่น ก็จะรวม β_0 ไว้ในด้วย

2.9.6 การทดสอบการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้

การทดสอบที่สาม เป็นการทดสอบการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้ [27] ด้วยตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัว ตัวอย่างที่เป็น โมเดลมีตัวพยากรณ์ 2 ตัว สามารถทดสอบการเพิ่มขึ้นได้ เป็นสัดส่วนของความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปร 2 ตัวเปรียบเทียบกับตัวแปร 1 ตัว ซึ่งเป็นความจำเป็นในกรณีที่มี โมเดลตัวแปรพยากรณ์ 2 ตัวกับ โมเดลที่มีตัวแปรพยากรณ์ 1 ตัว การทดสอบการเพิ่มขึ้นของ X_1 มีสถิติทดสอบคือ

$$F = \frac{[(R_{Y.12}^2 - R_{Y.2}^2)/(m_2 - m_1)]}{[(1 - R_{Y.12}^2)/(n - m_2 - 1)]}$$

เมื่อ $R_{Y,2}^2 = r_{Y,2}^2$ แล้ว m_2 คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ในโมเดลที่มีตัวพยากรณ์ 2 ตัว และ m_1 คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ในโมเดลที่มีตัวพยากรณ์ 1 ตัว สถิติ F จะนำไปเปรียบเทียบกับ F วิกฤตที่เปิดจากตารางแบบทิศทางเดียว ใช้สัญลักษณ์ว่า $(1-\alpha)F_{(m_2-m_1, n-m_2-1)}$ ทดสอบการเพิ่มขึ้นของ X_2 ใช้สถิติทดสอบ

$$F = \frac{[(R_{Y,12}^2 - R_{Y,1}^2)/(m_2 - m_1)]}{[(1 - R_{Y,12}^2)/(n - m_2 - 1)]}$$

เมื่อ $R_{Y,1}^2 = r_{Y,1}^2$ แล้ว m_2 คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ในโมเดลที่มีตัวพยากรณ์ 2 ตัว และ m_1 คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ในโมเดลที่มีตัวพยากรณ์ 1 ตัว สถิติ F จะนำไปเปรียบเทียบกับ F วิกฤตที่เปิดจากตารางแบบทิศทางเดียว ใช้สัญลักษณ์ว่า $(1-\alpha)F_{(m_2-m_1, n-m_2-1)}$

โดยทั่วไป สามารถเปรียบเทียบโมเดลการถดถอย 2 โมเดลสำหรับกลุ่มตัวอย่างเดียวกันเมื่อโมเดลเต็มรูปแบบ (full model) นิยามว่ามีตัวแปรพยากรณ์ทุกตัวอยู่ในโมเดล และโมเดลที่ลดรูป (reduced model) นิยามว่าเป็นโมเดลที่มีเพียงบางชุดของตัวแปรพยากรณ์ในโมเดล นั่นคือสำหรับโมเดลลดรูปอาจจะมีตัวแปรพยากรณ์เพียง 1 ตัวหรือมากกว่า ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโมเดลเต็มรูปแบบที่มีการลดตัวแปรพยากรณ์ลงบางตัว สถิติทดสอบโดยทั่วไปเขียนได้ว่า

$$F = \frac{[(R_{full}^2 - R_{red}^2)/(m_{full} - m_{red})]}{[(1 - R_{full}^2)/(n - m_{full} - 1)]}$$

เมื่อ "full" และ "red" เป็นสัญลักษณ์ของ โมเดลเต็มรูปแบบ (full model) และ โมเดลลดรูป (reduced model) ส่วน m_{full} คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ใน โมเดลเต็มรูปแบบ และ m_{red} คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ในโมเดลลดรูป สถิติ F จะนำไปเปรียบเทียบกับ F วิกฤตที่เปิดจากตารางแบบทิศทางเดียว ใช้สัญลักษณ์ว่า $(1-\alpha)F_{(m_{full}-m_{red}, n-m_{full}-1)}$

2.9.7 ข้อตกลงเบื้องต้นทางสถิติ

ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณจะเหมือนกับข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย แต่มีบางข้อตกลงเบื้องต้นที่แตกต่างออกไปตามตาราง 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 ข้อตกลงเบื้องต้นและผลของการละเมิดข้อตกลงเบื้องต้นในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ

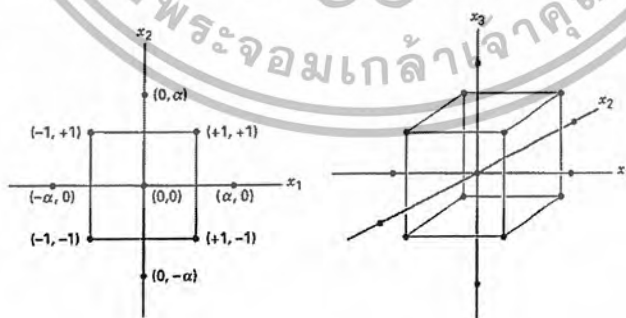
ข้อตกลงเบื้องต้น	ผลการละเมิดข้อตกลงเบื้องต้น
1. การถดถอย Y บน X_k เป็นเชิงเส้น	เกิดความลำเอียงในความชันและจุดตัด
2. ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระจากกัน	มีอิทธิพลของความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของโมเดล
3. ความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเป็น 0	มีความลำเอียงใน Y'

ข้อตกลงเบื้องต้น	ผลการละเมิดข้อตกลงเบื้องต้น
4. ความเป็นเอกพันธ์ของความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน	มีความลำเอียงใน S_{res}^2
5. ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงเป็น โคนึงปกติ	มีความเที่ยงตรงต่ำในค่าของความชันและสัมประสิทธิ์การอธิบาย
6. ค่าของ X_k เป็นแบบกำหนด	ความคลาดเคลื่อนในการทำนายมีค่าสูง มีความลำเอียงในความชันและจุดตัด
7. ไม่เกิด Multicollinearity ระหว่าง X_k	สัมประสิทธิ์การถดถอยไม่คงที่ R^2 รวม อาจมีน้อยสำคัญใน ขณะที่ตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัวอาจไม่มีนัยสำคัญ มีข้อจำกัดในการสรุปอ้างอิงของ โมเดล

2.10 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม

ในการออกแบบการทดลองเพื่อการพิตแบบจำลองอันดับที่สอง การออกแบบที่นิยมใช้สำหรับพิตแบบจำลองที่สองนี้ใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เป็นวิธีที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไปตำแหน่งจุดของ CCD จะประกอบด้วย 2^k แฟกทอเรียลที่มี n_f รัน 2^k รันในแนวแกนหรือแนวรูปดาว (Star) และ n_f รันที่จุดศูนย์กลาง ดังรูปที่ 2.19 แสดง CCD สำหรับ $k=2$ และ $k=3$ บ้าง

การพัฒนาของ CCD ในทางปฏิบัติส่วนมากจะเกิดขึ้นจากการทดลองแบบเป็นอันดับ นั่นคือ การออกแบบ 2^k ถูกนำมาใช้เพื่อพิต แบบจำลองอันดับที่หนึ่ง แล้วพบว่า แบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับข้อมูล ดังนั้นจึงมีการรันการทดลองเพิ่มในแนวแกนเพื่อทำให้สามารถใส่พจน์ควอดราติกในแบบจำลองได้ CCD เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากในการพิตแบบจำลองอันดับที่สอง โดยต้องกำหนดการออกแบบพหุนามดีกรี 2 ตัว นั่นคือ ระยะทาง α ของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ และจำนวนของจุดศูนย์กลาง n_f



รูปที่ 2.19. การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k=2$ และ $k=3$ [28]

2.10.1 ความสามารถในการหมุน

เป็นความสำคัญอย่างหนึ่งของแบบจำลองอันดับที่สอง ที่จะต้องมีความสามารถในการพยากรณ์ได้

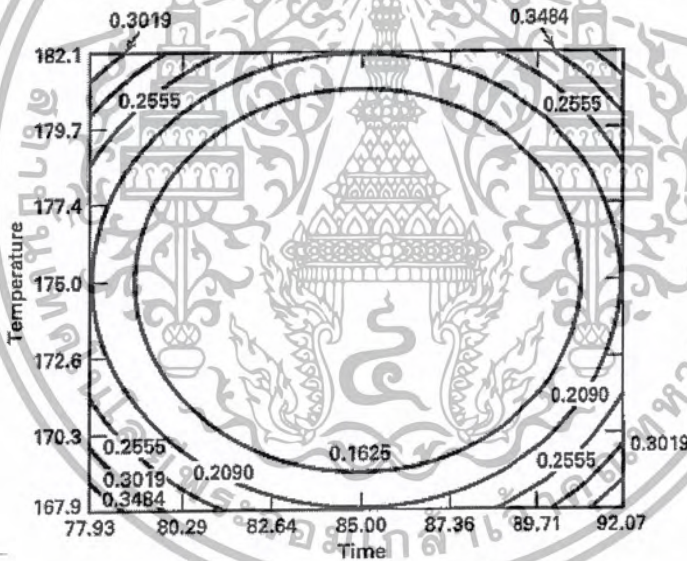
ตลอดบริเวณที่สนใจอยู่ วิธีการหนึ่งที่จะบอกว่า แบบจำลองนี้ “ดี” คือ แบบจำลองจะต้องอยู่กับร่องกับรอยอย่างมี

เหตุผล และมีความแปรปรวนที่มีเสถียรภาพของผลตอบที่จุด x ซึ่งอยู่ในความสนใจ ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าคงตัวบนรูปทรงกลม นั่นคือ

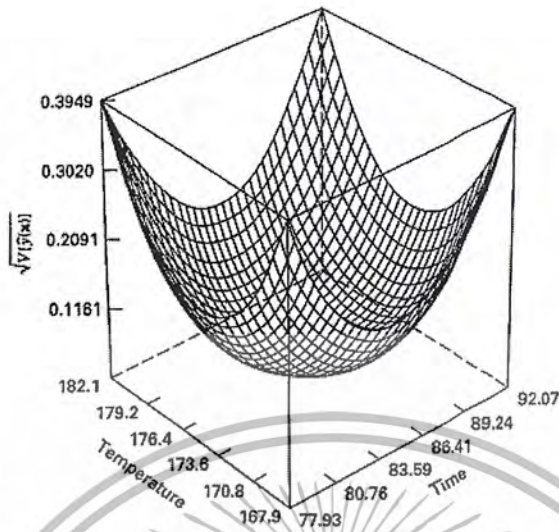
$$V[\hat{y}(x)] = \sigma^2 x'(X'X)^{-1}x$$

$V[\hat{y}(x)]$ คือ จุด x ทุกจุดที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน

รูปที่ 2.20 แสดงเส้นโครงร่างของค่าคงตัว $\sqrt{V[\hat{y}(x)]}$ สำหรับแบบจำลองอันดับที่สองที่ถูกพิดโดยใช้ CCD สังเกตว่า เส้นโครงร่างของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าคงตัวของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะเป็นวงกลมที่มีศูนย์กลางอยู่ร่วมกัน การออกแบบที่มีคุณสมบัติเช่นนี้จะทำให้ค่าความแปรปรวนของ \hat{y} ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อการออกแบบถูกหมุนรอบจุดศูนย์กลาง $(0, 0, \dots, 0)$ เราเรียกการออกแบบเช่นนี้ว่า การออกแบบที่สามารถหมุนได้



รูปที่ 2.20 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่ ซึ่งถูกทำนายสำหรับ CCD ที่สามารถหมุนได้ [31]



รูปที่ 2.20 [ต่อ] เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่ ซึ่งถูกทำนายสำหรับ CCD ที่สามารถหมุนได้ [31]

การออกแบบส่วนประสมกลาง สามารถทำให้หมุนได้โดยการเลือกค่าของ α ค่าของ α สำหรับความสามารถหมุนได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดในส่วนของแฟกทอเรียลของการออกแบบหมายความว่า $\alpha = (n_f)^{1/4}$ จะทำให้เกิดการออกแบบส่วนประสมกลางที่สามารถหมุนได้ โดยที่ n_f คือ จำนวนของจุดที่ใช้ในส่วนแฟกทอเรียลของการออกแบบ

2.11 แบบจำลองการทดลองสำหรับ Central Composite Design

เนื่องจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central Composite Design มีการทำการทดลองไม่พอเพียงที่จะทำให้เกิด Cubic Model ได้ [28] ดังนั้นแบบจำลองการทดลองจึงมีทั้งหมด 3 แบบ ดังนี้

- 1) Linear Model

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i X_i$$

- 2) 2FI (two-factor interaction) Model

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \sum_{i < j} \sum_{j=1}^p \beta_{ij} X_i X_j$$

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$$

3) Quadratic Model

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \sum_{i < j}^p \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^p \beta_{ii} X_i^2 \quad [29]$$

2.12 พื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology)

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย x และ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon$$

ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = f(x_1, x_2)$$

ซึ่งจะเรียกว่า “พื้นผิวผลตอบ (Response Surface)” โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปของกราฟฟิค ดังรูปที่ 2.21 โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบดังแสดงในรูปที่ 2.22 ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบของ x_1 และ x_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง

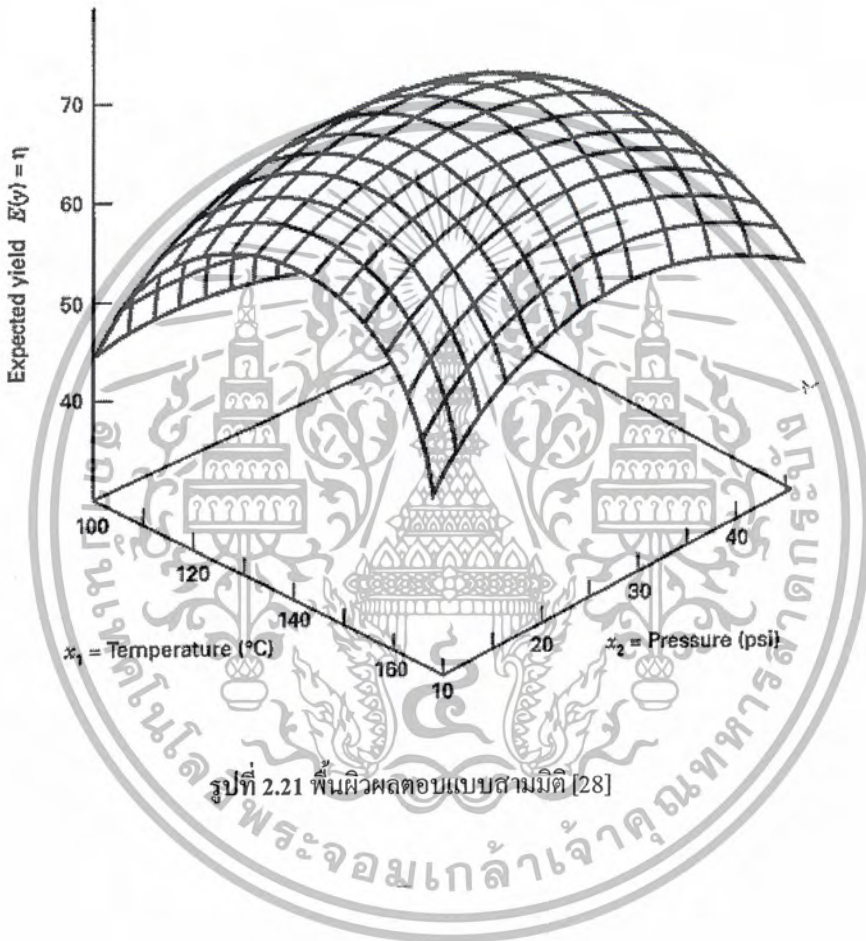
โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

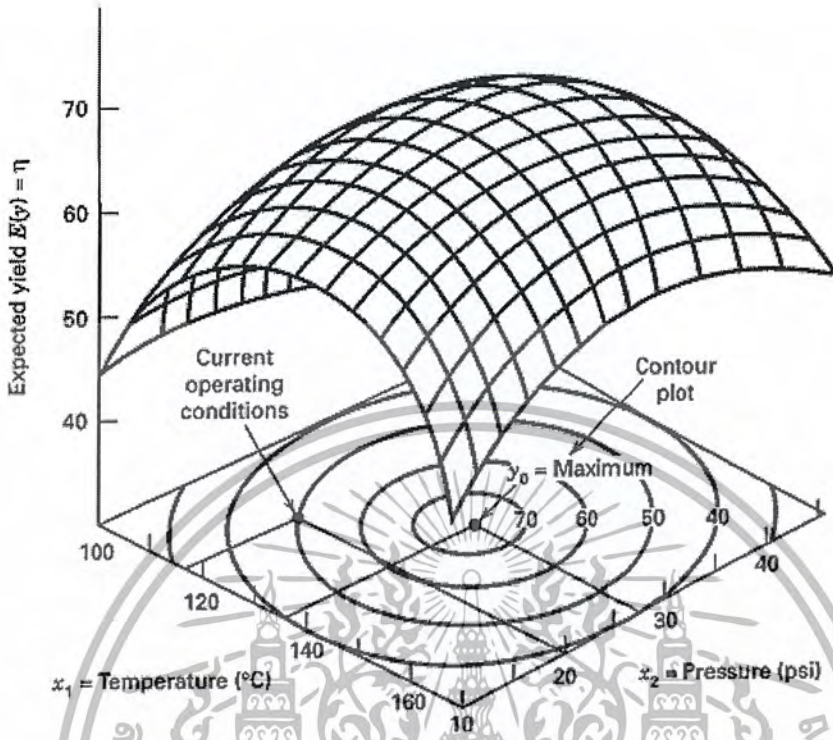
แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องกับระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดัง

สมการ

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$



รูปที่ 2.21 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ [28]



รูปที่ 2.22 เส้น โคจรร่างของพื้นผิวผลตอบ [28]

อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาโดยใช้วิธีการแสดงพื้นผิวผลตอบจำเป็นต้องค้นหาฟังก์ชันที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตามหรือค่าผลตอบ ต่อตัวแปรอิสระต่างๆ เป็นลำดับแรก ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันในการประมาณความสัมพันธ์นี้คือ แบบจำลองกำลังหนึ่ง (First order) ตัวอย่างดังรูปที่ 2.23

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$$

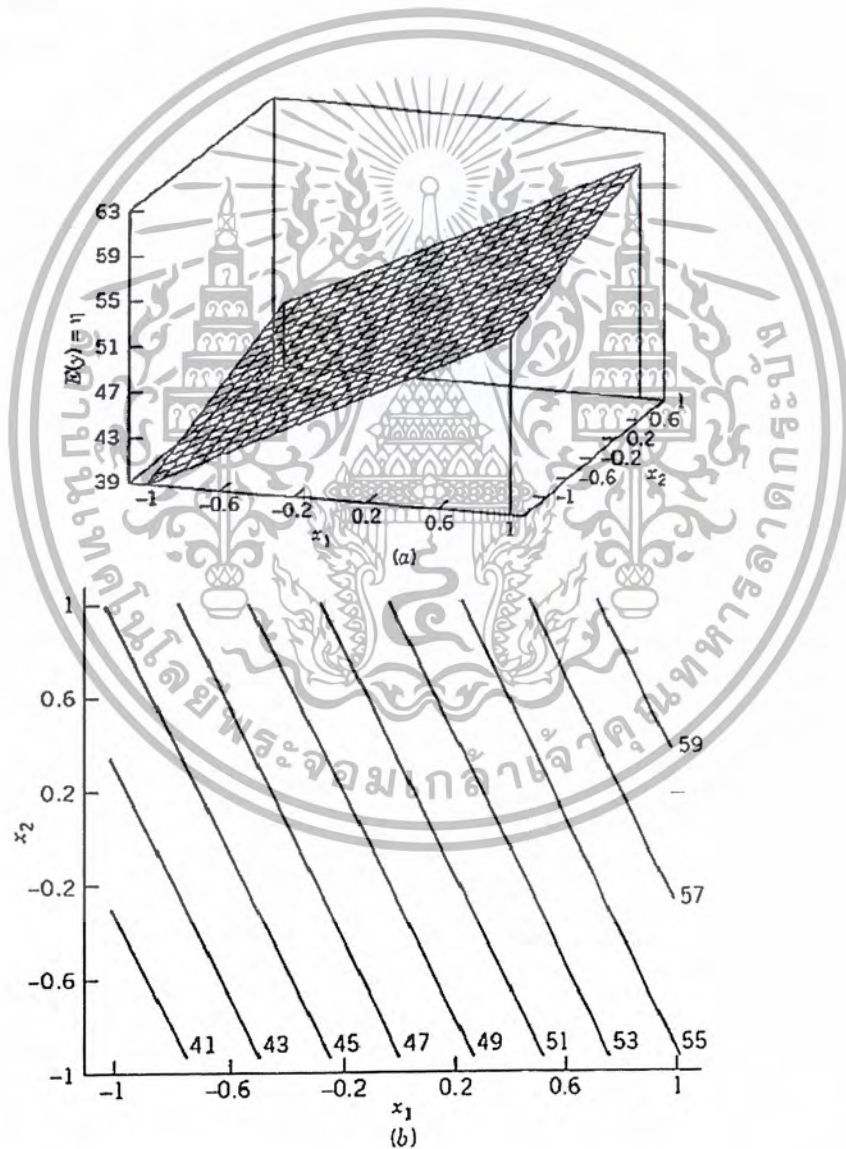
หากตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันระหว่างกัน ต้องทำการเพิ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกันเข้าไปอีกหนึ่งตัวแปร (First order with interaction) ตัวอย่างดังรูปที่ 2.24

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j$$

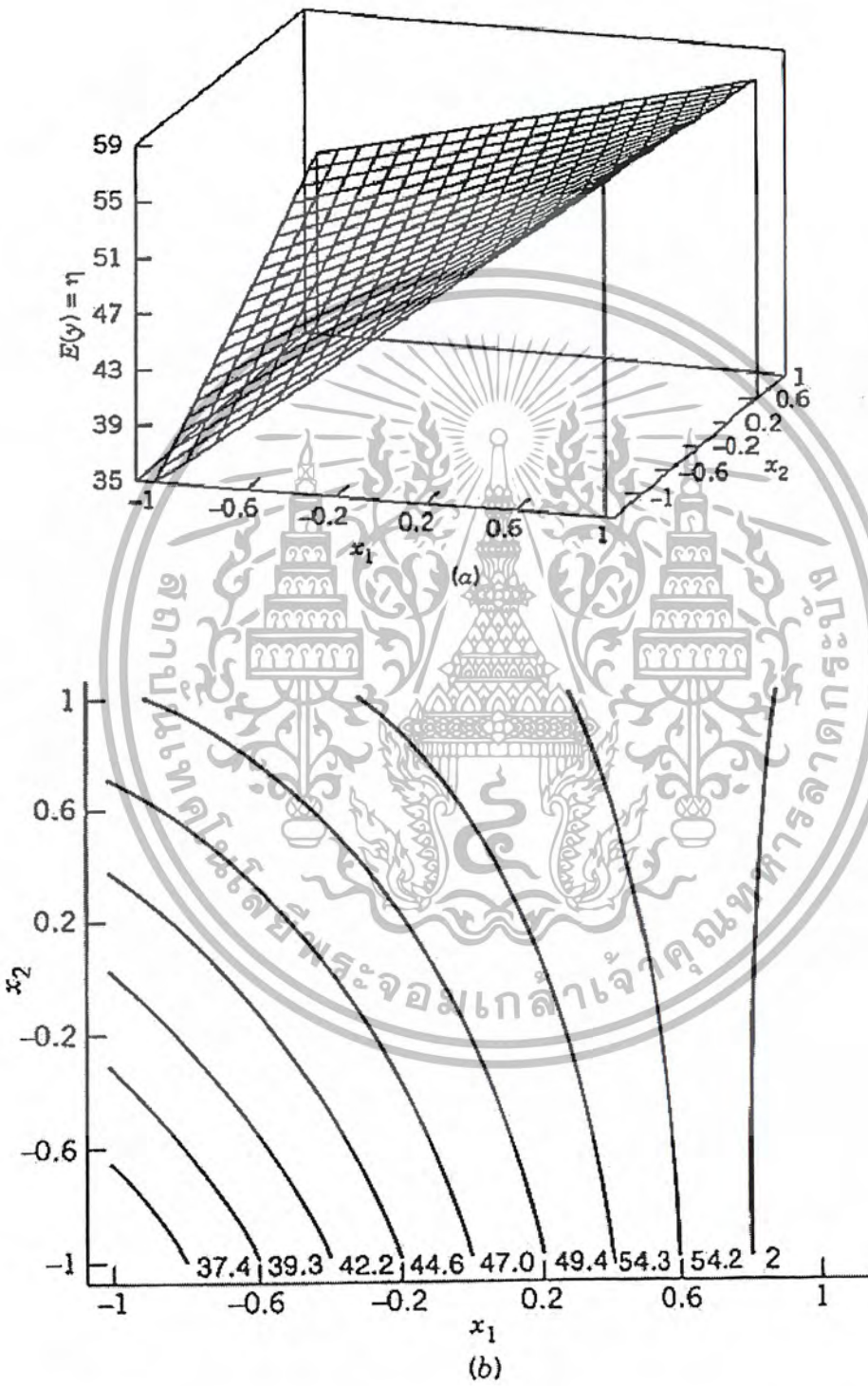
สำหรับระบบที่มีลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง ต้องใช้แบบจำลองที่มีลำดับสูงขึ้น เช่น ลำดับสอง (Second order) ตัวอย่างดังรูปที่ 2.25 นอกจากนี้ แบบจำลองลำดับสอง ยังมีรูปแบบพื้นผิวผลตอบที่มีความหลากหลาย ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.26

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j$$

การได้มาของฟังก์ชันต่างๆ มักได้มาจากสมการถดถอย

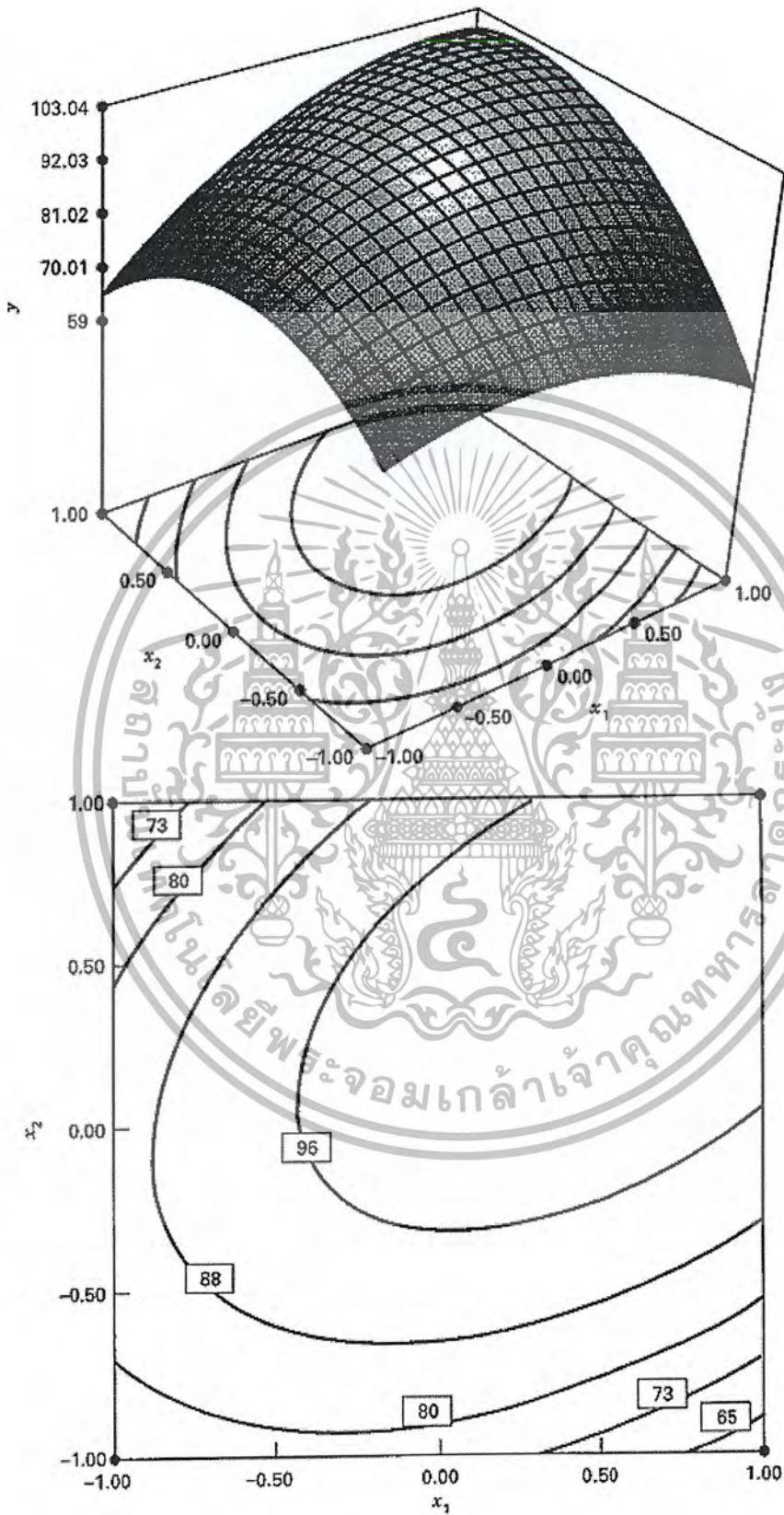


รูปที่ 2.23 เส้น โครงร่างของพื้นผิวผลตอบแบบ First Order Model [30]



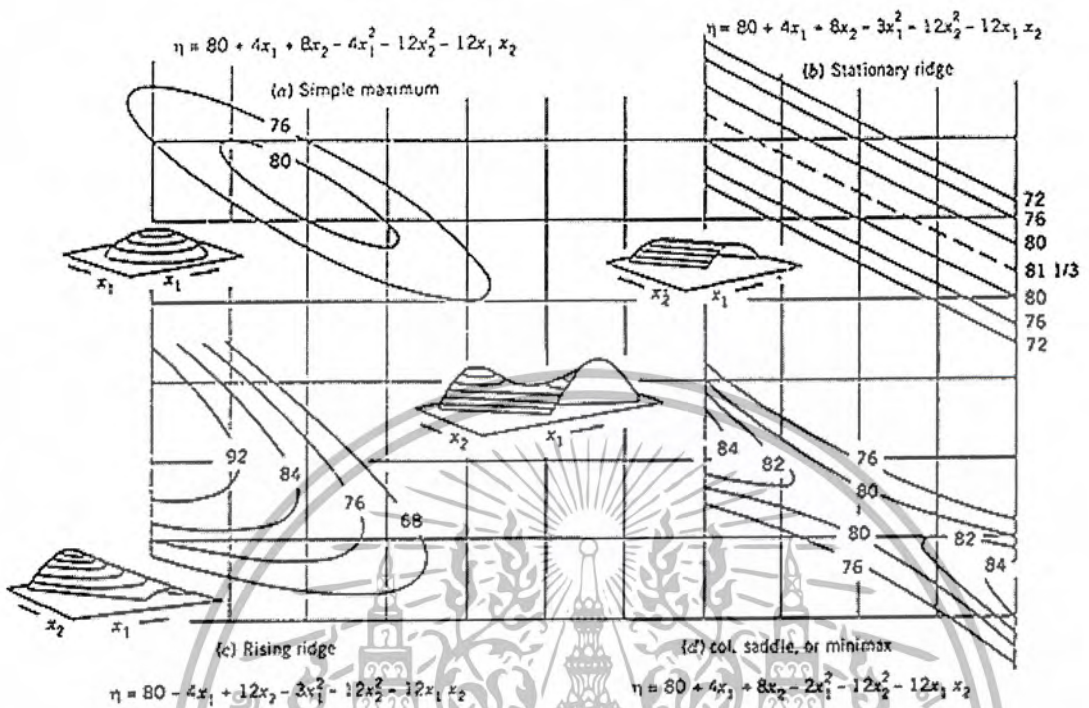
รูปที่ 2.24 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบแบบ First Order with Interaction [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 เส้น โครงร่างของพื้นผิวผลตอบแบบ Second Order [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบในลักษณะหลากหลายแบบของ Second Order [30]

บทที่ 3

การออกแบบและวิธีการดำเนินงาน

3.1 กล่าวนำ

การศึกษาการออกแบบการทดลอง ทางผู้ทำการวิจัยได้กำหนดขั้นตอนหลัก ๆ ไว้ 4 ขั้นตอนคือ จัดเตรียมเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ การทดลอง การตรวจสอบคุณภาพของรอยต่อ และการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสม ไปจนถึงการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ ดังรูปที่ 3.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.1 แสดงการออกแบบการทดลองนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ

3.2.1 วัสดุงาน

3.2.1.1 แผ่นเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี

วัสดุงาน (แผ่นเหล็กกล้า) วัสดุที่ใช้ในการวิจัยเป็นแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชุบสังกะสี (Galvanized steel sheet) ซึ่งมีคุณสมบัติเชื่อมได้ง่าย ใช้งานกันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ โดยเฉพาะการประกอบตัวถังรถยนต์ โดยแผ่นเหล็กที่เลือกใช้มีความหนา 1 มิลลิเมตร โดยคุณสมบัติต่างๆ ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของวัสดุงานเหล็กกล้าชุบสังกะสี (Electro Galvanized Steel Sheet)

ส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนัก					Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
C	Mn	P	S	Fe		
0.05	0.24	0.015	0.016	Bal.	320	42

3.2.1.2 แผ่นอลูมิเนียม

วัสดุงาน (แผ่นอลูมิเนียม) วัสดุที่ใช้เป็นอลูมิเนียมอัลลอยชนิด 5052 (5052 Aluminium alloy) ซึ่งอลูมิเนียม 5xxx เป็นอลูมิเนียมที่มีส่วนผสมของแมกนีเซียม สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด เหมาะสมกับการเชื่อม ขึ้นรูปได้ดี และนิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ความหนาของวัสดุชิ้นงานคือ 1.2 มิลลิเมตร โดยคุณสมบัติต่างๆ ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของวัสดุงาน อลูมิเนียมอัลลอยชนิด 5052 (5052 Aluminium alloy)

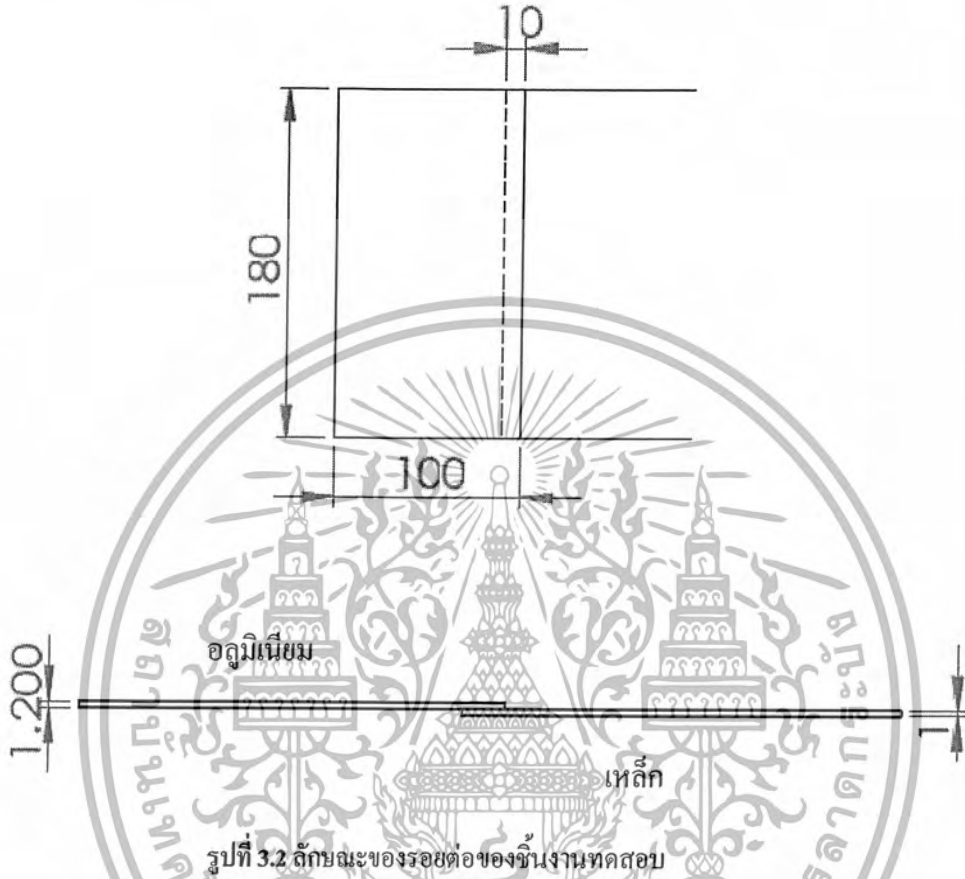
ส่วนผสมทางเคมี (%wt)								Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Al		
0.20	0.01	0.32	2.38	0.03	0.10	0.012	Bal.	225	15

เมื่อทราบถึงวัสดุงานและส่วนผสมต่างๆแล้ว จึงได้วางแผนการทดลองต่อโดยมีการเตรียมการดังนี้ การเตรียมรอยต่อในงานแผ่นประสาน ลักษณะของรอยต่อที่นำมาศึกษาเป็นรอยต่อแบบเกย (Lap joint) โดยมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลองดังต่อไปนี้

- 1) ตัดแผ่นชิ้นงานของเหล็กและอลูมิเนียมตามกำหนดไว้คือขนาด 180 x 100 มิลลิเมตร
- 2) ทำความสะอาดชิ้นงานโดยการเช็ดด้วยอะซิโตน (Acetone) เพื่อดูดซับความชื้นหรือคราบน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) นำชิ้นงานวางบนอุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานให้ชิ้นงานเกยทับกันประมาณ 10 มิลลิเมตร โดยให้แผ่นอลูมิเนียมอยู่ด้านบนของแผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสี



3.2.2 ลวดเติม

ลวดเติม (Filler Metal) ที่ใช้ในการทดลองเป็นลวดเชื่อมอลูมิเนียมไฟฟ้า ANSI/AWS A5.10 ER/R 4043 ซึ่งมีส่วนผสมหลักเป็นอลูมิเนียมและซิลิกอน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร โดยลวดเติมชนิดนี้สมบัติการไหลเมื่อเกิดการหลอมได้ดี และเกิดความหนาของชั้นประกอบเชิงโลหะน้อย สมบัติของลวดเติมแสดงในตาราง 3.4

ตารางที่ 3.3 สมบัติของลวดเติมเกรด ANSI/AWS A5.10 ER/R 4043 ตามน้ำหนัก

ส่วนผสมทางเคมี (%wt)							จุดหลอม ละลาย °C	สมบัติเชิงกล	
Si	Fe	Cu	Zn	Mn	Mg	Al		Tensile Strength (MPa)	Elongation
4.5-6.0	0.80	0.30	0.10	0.05	0.50	Bal.	577 - 638	190	8%

3.2.3 แก๊สสำหรับปกคลุมรอยต่อ

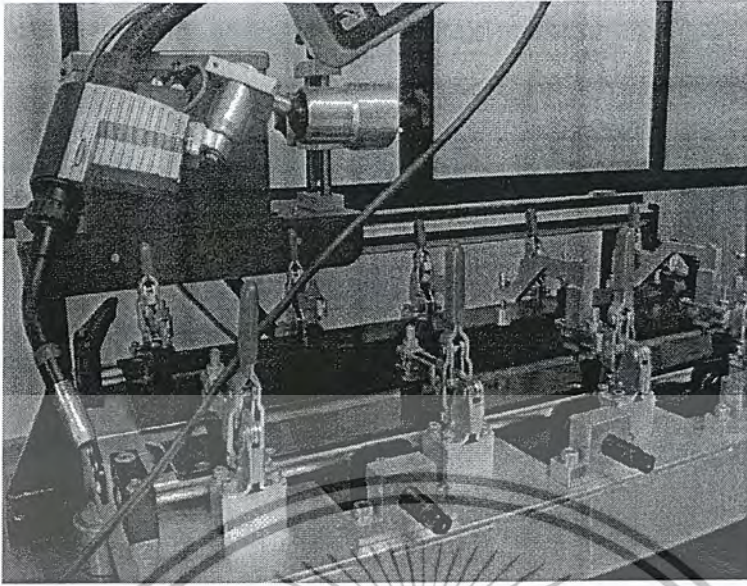
แก๊สที่ใช้ปกคลุมการแผ่นประสานรอยต่อคือแก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ 100% เนื่องจากเป็นแก๊สเฉื่อยสามารถปกป้องรอยต่อจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโลหะเหลวกับบรรยากาศระหว่างการเชื่อม ความเข้มของความร้อนมีน้อยกว่าแก๊สฮีเลียม การเริ่มต้นอาร์กดีกว่า มีการหลอมลึกลงน้อยกว่าแก๊สฮีเลียม มีราคาถูกและสามารถหาซื้อได้ง่ายกว่า

3.2.4 เครื่องเชื่อมมิกอัตโนมัติ

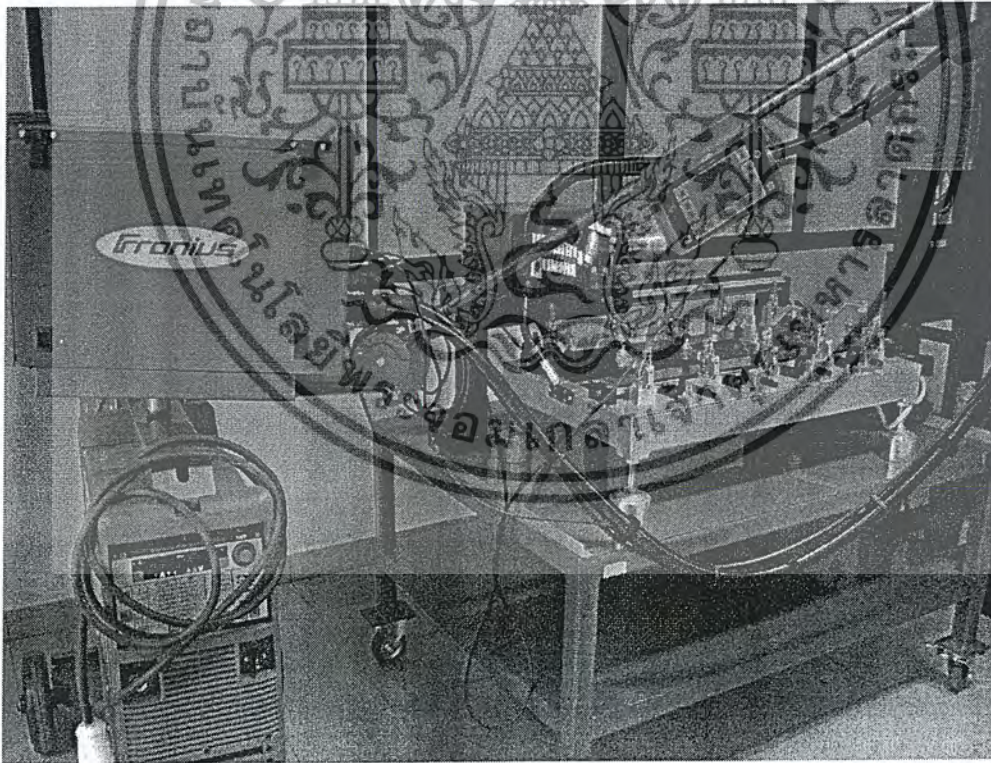
เครื่องที่ใช้เป็น Fronius รุ่น Trans Synergic 4000 ประกอบด้วยเครื่องเชื่อม ชุดจับยึดชิ้นงานแบบเชื่อมในแนวแกน X และแกน Y และชุดจับยึดหัวเชื่อมที่ออกแบบสำหรับการทดลองนี้ ซึ่งสามารถปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน อัตราป้อนลวด ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าอื่นๆ โดยระบบที่ใช้ในการเชื่อมในการทดลองนี้จะใช้ระบบ Cold Metal Transfer (CMT) ซึ่งมีข้อดีหลัก ๆ คือเรื่องของอุณหภูมิที่น้อยกว่าการเชื่อมมิกแบบธรรมดา



รูปที่ 3.4 ตัวจ่ายกระแสและตัวจ่ายลวดของเครื่องเชื่อมมิกอัตโนมัติ (Power Source and Wire Feeder)



รูปที่ 3.5 ชุดยึดจับชิ้นงานและชุดยึดจับหัวเชื่อม



รูปที่ 3.6 ภาพโดยรวมทั้งหมดของตัวเครื่องเชื่อมมิกอิတ် โนมัติ

3.2.5 เครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Cut EDM)

หลังจากทำการเชื่อมบัดกรีชิ้นทดสอบจะทดสอบจะถูกตัดด้วยเครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Cut EDM) ยี่ห้อ Socick รุ่น AQ535L เพื่อทำเป็นชิ้นทดสอบแรงดึงและชิ้นวัดขนาดของรอยเชื่อมในขั้นต่อไป โดยเหตุผลที่ใช้เครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้าเพราะว่ารอยเชื่อมจะเสียรูปน้อยกว่าการตัดด้วยวิธีอื่นๆ

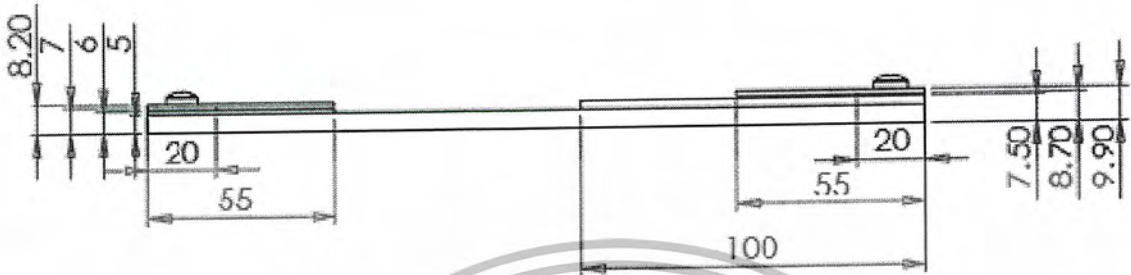


รูปที่ 3.7 เครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Cut EDM) ยี่ห้อ Socick รุ่น AQ535L

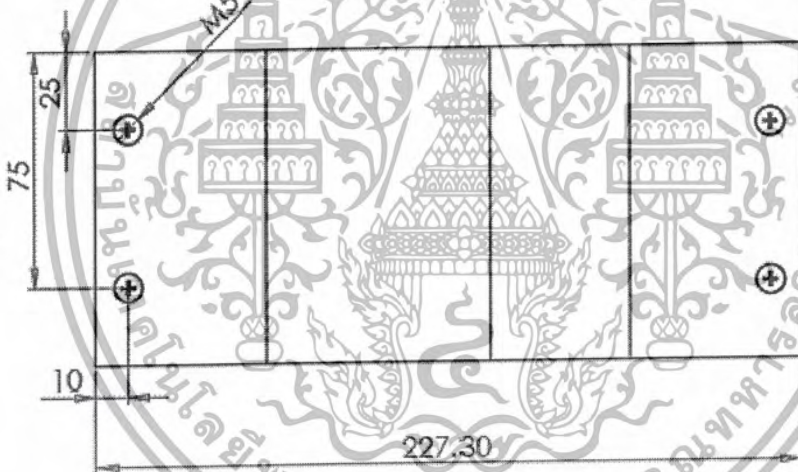
3.2.6 จิกที่ใช้ในการยึดจับชิ้นงาน

เนื่องจากจิกของตัวเครื่องเชื่อมไม่สามารถจับชิ้นงานให้เป็นไปตามความต้องการ ได้จึงได้มีการ

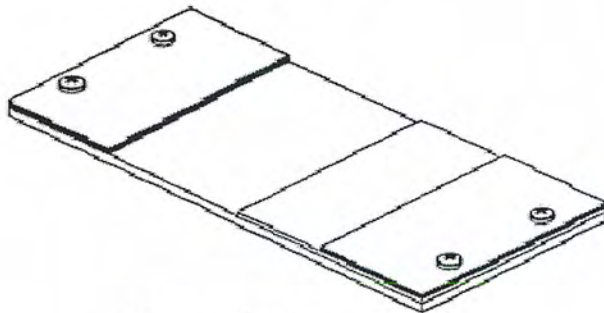
จัดทำจิกขึ้น



รูปที่ 3.8 จิกที่ใช้ในการยึดจับชิ้นงาน



หมายเหตุ หน่วยเป็นมิลลิเมตร



รูปที่ 3.8 [ต่อ] จิกที่ใช้ในการยึดจับชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 46 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Testing Machine)

ค่าตอบสนอง (Output) ที่ต้องการคือความต้านทานแรงดึง ดังนั้นจึงได้ใช้เครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-X ในการทดสอบวัดค่าความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-X

3.3 การควบคุมพารามิเตอร์ของการเชื่อมประสาน

ในการเชื่อมประสานรอยต่อ ในตำแหน่งทำงานนอนด้วยกระบวนการ GMAW-P โดยการเดินแนวเชื่อมจะใช้เป็นแบบเดินไปข้างหน้าในทุกการทดลอง เพราะเป็นการเชื่อมเหล็กแผ่นบาง โดยจะสามารถมองเห็นรอยเชื่อมได้ง่ายและการหลอมลึกลงจะน้อย โดยจะมีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ ความเร็วในการเชื่อมประสาน (Travel speed) ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน (Nozzle to work) และมุมงาน (Work angle) ซึ่งค่าที่นอกเหนือจากที่กล่าวมานี้จะเป็นค่าคงที่คือ กระแสในการเชื่อมประสาน (Brazing current) แรงดันไฟฟ้า (Voltage) อัตราการป้อนลวด (Feed rate) และอัตราการไหลของแก๊ส (Gas flow)

ตารางที่ 3.4 ค่าของปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ค่าของปัจจัย
ความเร็วที่ใช้ในการแล่นประสาน (Travel Speed)	455 มิลลิเมตร / นาที , 565 มิลลิเมตร / นาที
ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน (Nozzle to Work)	10 มิลลิเมตร , 14 มิลลิเมตร
มุมงาน (Work Angle)	-15 องศา , 15 องศา
กระแสในการแล่นประสาน (Brazing Current)	50 แอมแปร์
แรงดันไฟฟ้า (Voltage)	11.2 โวลต์
อัตราการป้อนลวด (Feed Rate)	3.2 เมตร / นาที
อัตราการไหลของแก๊ส (Gas Flow)	16 ลิตร / นาที



รูปที่ 3.10 พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมในการแล่นประสาน

3.4 การออกแบบการทดลอง

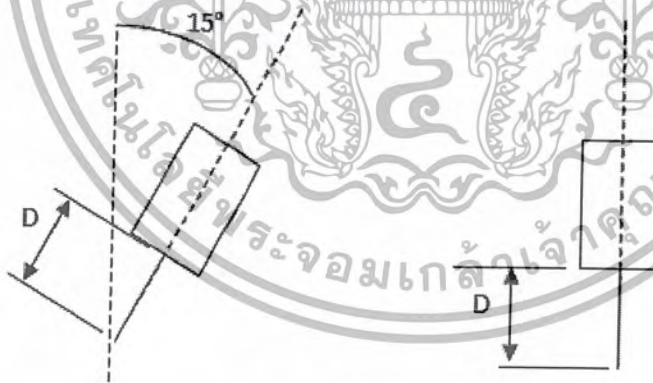
ในการทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อรอยเชื่อม ในการถนอมประสาน ทางกลุ่มได้มี การหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อรอยเชื่อม โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial 2^k

3.4.1 การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial 2^k

จากตัวแปรทั้งหมด 3 ตัวแปรซึ่งใช้เป็นวิธี Full Factorial ทั้งหมด 2^3 หรือ 8 ครั้ง โดยจะมีการทดลองซ้ำ 3 รอบ รวมการทดลองแล้วมีทั้งหมด 24 ครั้ง โดยได้แสดงค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของแต่ละปัจจัยไว้ดังตารางที่ 3.5 ซึ่งค่าเหล่านี้ได้มาจากการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้งเพื่อดูช่วงของค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

ตารางที่ 3.5 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง 2^k Factorial design

ลำดับ	ปัจจัย	หน่วย	สัญลักษณ์	ระดับปัจจัย	
				Low (-)	High (+)
1	ความเร็วในการเชื่อม	mm/min	S	455	565
2	ระยะหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน	mm	D	10	14
3	มุมงาน	degrees	A	-15	15



ใช้ทิศทางการเดินหัวเชื่อม แบบ Forehand

รูปที่ 3.11 ลักษณะของมุมงานและทิศทางการเชื่อม

ตารางที่ 3.6 ตารางการออกแบบลำดับการทดลอง 2^k Factorial Design

Run Order	Std.Order	Treat Combo Symbol	Parameter and their level			Tensile Strength
			S	D	A	
1	1	-1	-	-	-	
2	4	S	+	-	-	
3	3	D	-	+	-	
4	24	A	-	-	+	
5	5	SD	+	+	-	
6	9	SA	+	-	+	
7	15	DA	-	+	+	
8	11	SDA	+	+	+	
9	20	-1	-	-	-	
10	6	S	+	-	-	
11	8	D	-	+	-	
12	13	A	-	-	+	
13	23	SD	+	+	-	
14	19	SA	+	-	+	
15	10	DA	-	+	+	
16	7	SDA	+	+	+	
17	12	-1	-	-	-	
18	18	S	+	-	-	
19	21	D	-	+	-	
20	17	A	-	-	+	
21	14	SD	+	+	-	
22	16	SA	+	-	+	
23	22	DA	-	+	+	
24	2	SDA	+	+	+	

3.5 การตรวจสอบคุณภาพของงานแผ่นประสาน

3.5.1 ตรวจสอบรอยต่อด้วยสายตา (Visual Inspection)

หลังจากทำการเชื่อมเรียบร้อยแล้วจะมีการตรวจสอบด้วยสายตาก่อนเป็นขั้นแรก โดยการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) จะเป็นไปตามมาตรฐานของการตรวจสอบรอยเชื่อม ANSI โดยสังเกตตั้งแต่เริ่มต้นการแผ่นประสานจนจบการแผ่นประสาน โดยสังเกตผลจากการเลือกพารามิเตอร์ต่างๆกัน ตรวจสอบหลังจากการแผ่นประสานเสร็จ ดูความสมบูรณ์ที่ขอบหน้า และด้านหลังรอยต่อ สังเกตความสูง ความกว้าง ความนูน ความต่อเนื่อง การไม่เต็มเต็มขอบรอยต่อ (Under Fill) สีของรอยต่อและเม็ดโลหะกระเด็น (Spatters) โดยถ้ารอยต่อไม่สมบูรณ์ก็จะไม่นำมาพิจารณาในการทดลองต่อไป

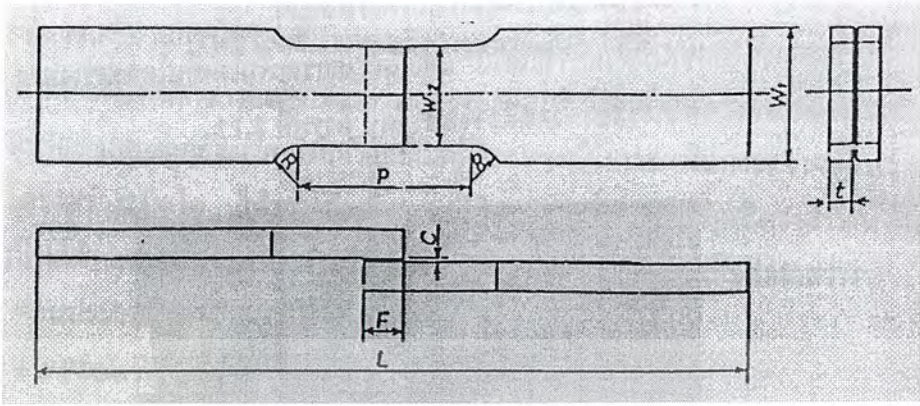


รูปที่ 3.12 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้ว

3.5.2 การเตรียมการเพื่อทำการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

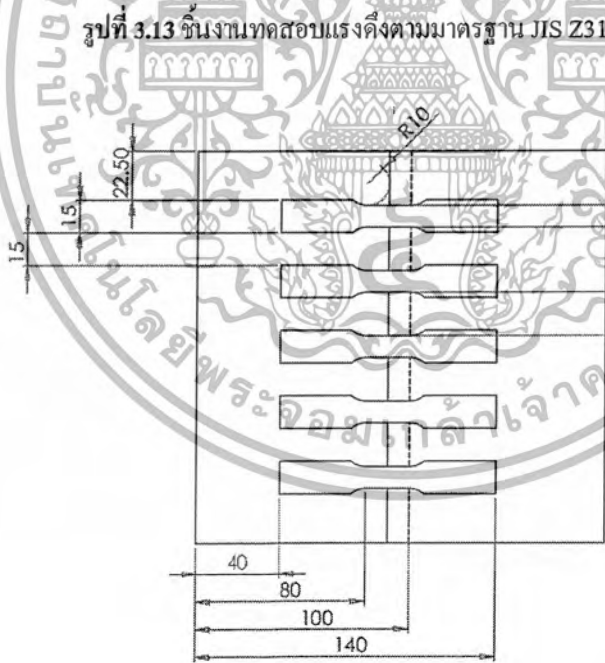
เมื่อรอยต่อผ่านการตรวจสอบด้วยสายตาแล้ว นำชิ้นงานไปเตรียมการในการทดสอบแรงดึงโดยขั้นตอนมีดังนี้

- 1) ตัดชิ้นงานตรวจสอบโดยแบ่งออกเป็นส่วนๆ โดยใช้เครื่องมือตัดด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Cut EDM) โดยต้องตัดในส่วนที่ห่างจากจุดเริ่มและจุดสิ้นสุดรอยต่อ 22.5 มิลลิเมตร โดยขนาดของชิ้นงานตรวจสอบเป็นรูป Specimen มีขนาด 15 x 100 มิลลิเมตรตามมาตรฐานของการทดสอบแรงดึง JIS Z3192 จำนวน 5 ชิ้นต่อชิ้นงานทดสอบ 1 ชิ้น



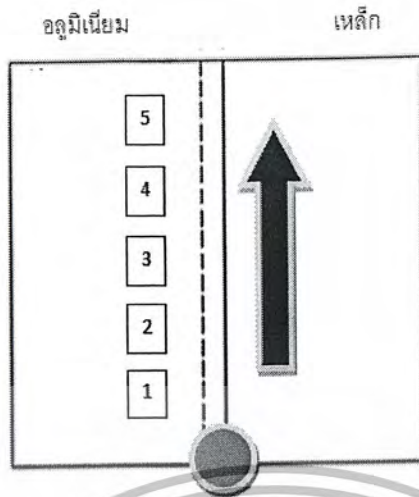
โดย $W_1 = 15$ มิลลิเมตร
 $W_2 = 10$ มิลลิเมตร
 $F = 10$ มิลลิเมตร
 $L = 100$ มิลลิเมตร
 $P = 20$ มิลลิเมตร

รูปที่ 3.13 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน JIS Z3192



รูปที่ 3.14 ชิ้นงานทดสอบที่จะนำมาตัดเป็นชิ้นงานตรวจสอบตามมาตรฐาน JIS Z3192

โดยในขั้นตอนนี้มีข้อที่ควรระวังไว้คือ หมายเลขของชิ้นงานทดสอบแรงดึงจะขึ้นอยู่กับทิศทางการเชื่อมและมุมงาน คังภาพ



รูปที่ 3.15 ชิ้นงานความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการเดินของหัวเชื่อมและลำดับของชิ้นงานทดสอบแรงดึง ที่มุมงาน 15 องศา



รูปที่ 3.16 ชิ้นงานความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการเดินของหัวเชื่อมและลำดับของชิ้นงานทดสอบแรงดึง ที่มุมงาน - 15 องศา

- 2) ชิ้นงานตรวจสอบ 5 ชิ้นมาทดสอบแรงดึง (Tensile test) โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ดึงชิ้นงานด้วยแรงดึงที่สม่ำเสมอ คงที่ที่ 1.27 mm/min จนชิ้นงานตรวจสอบในส่วนของเหล็กและอลูมิเนียมขาดออกจากกันแล้วบันทึกผลที่ได้

3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าผลตอบสนอง (Output)

- 1) จากค่า Output ที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยใช้โปรแกรมมินิแทบ (MINITAB) โดยจะวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีผลน้อยต่อรอยเชื่อมในการเล่นประสานออก (Screening) จากตาราง ANOVA
- 2) เมื่อได้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อรอยเชื่อม จะนำปัจจัยนั้น ๆ มาวิเคราะห์เพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ต่อไป



บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

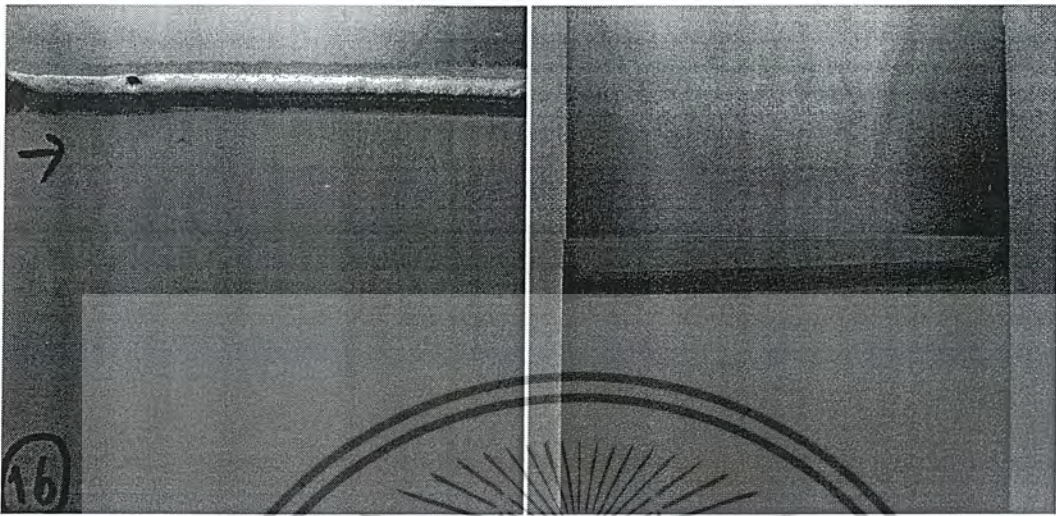
เนื้อหาในบทที่จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานจากแผนการดำเนินงานที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 โดยจะครอบคลุมถึงลักษณะของรอยเชื่อมที่ได้เมื่อเปลี่ยนค่าของปัจจัย การวิเคราะห์ จนถึงสมการการถดถอยที่ได้ทำการวิเคราะห์ออกมา

4.1 การเปรียบเทียบลักษณะของรอยเชื่อม

ในการเชื่อมชิ้นงานทางกลุ่มในมีการเชื่อมเป็นไปตามตารางการออกแบบการทดลอง ซึ่งมีตัวแปรที่ต้องควบคุมคือ ความเร็วในการเล่นประสาน ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน และมุมงาน โดยจะได้ลักษณะของรอยเชื่อมดังรูปที่ 4.1



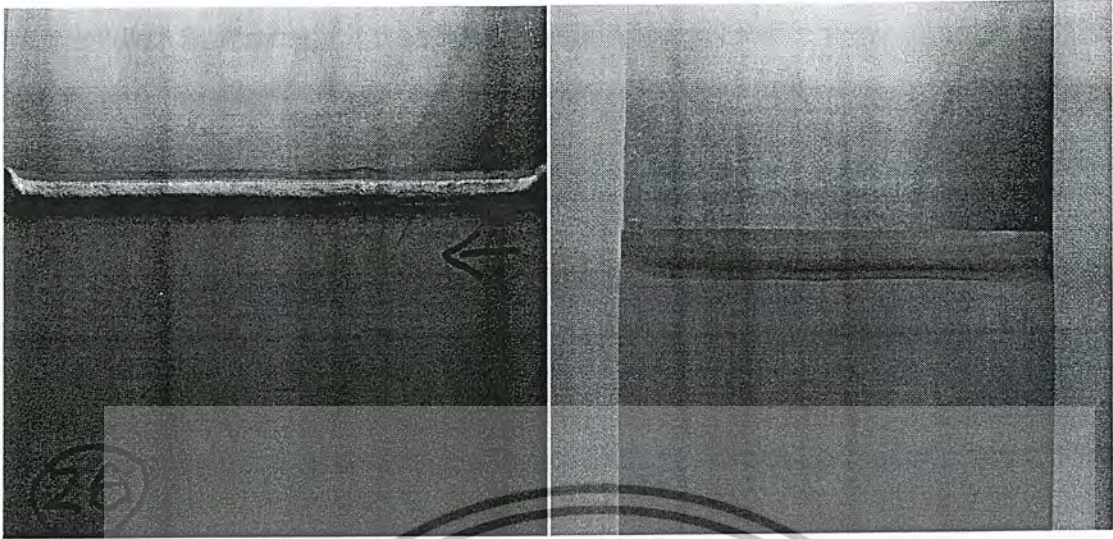
รูปที่ 4.1 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 455 มิลลิเมตร/นาที ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ -15 องศา



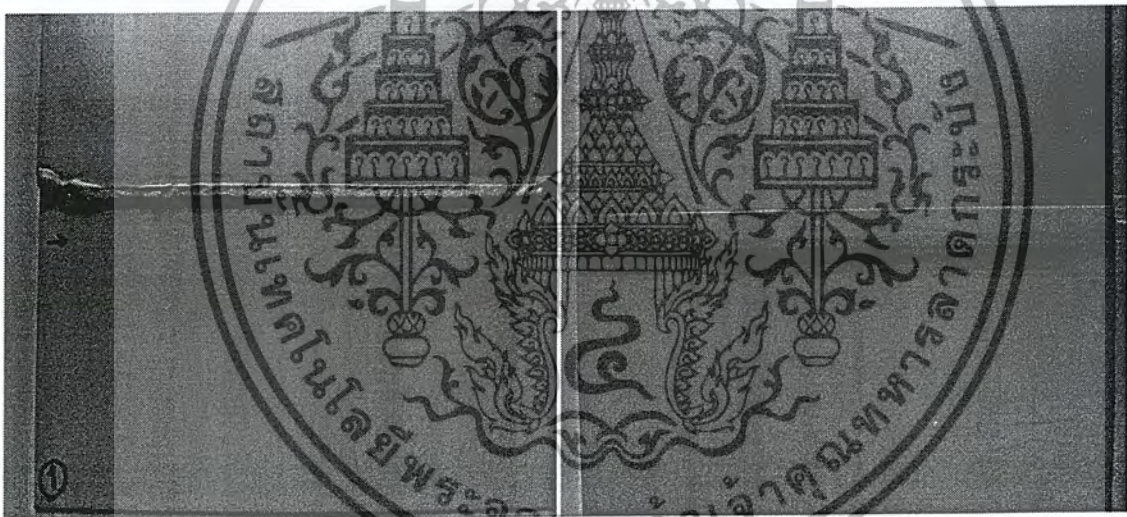
รูปที่ 4.2 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 565 มิลลิเมตร/นาที่ ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ -15 องศา



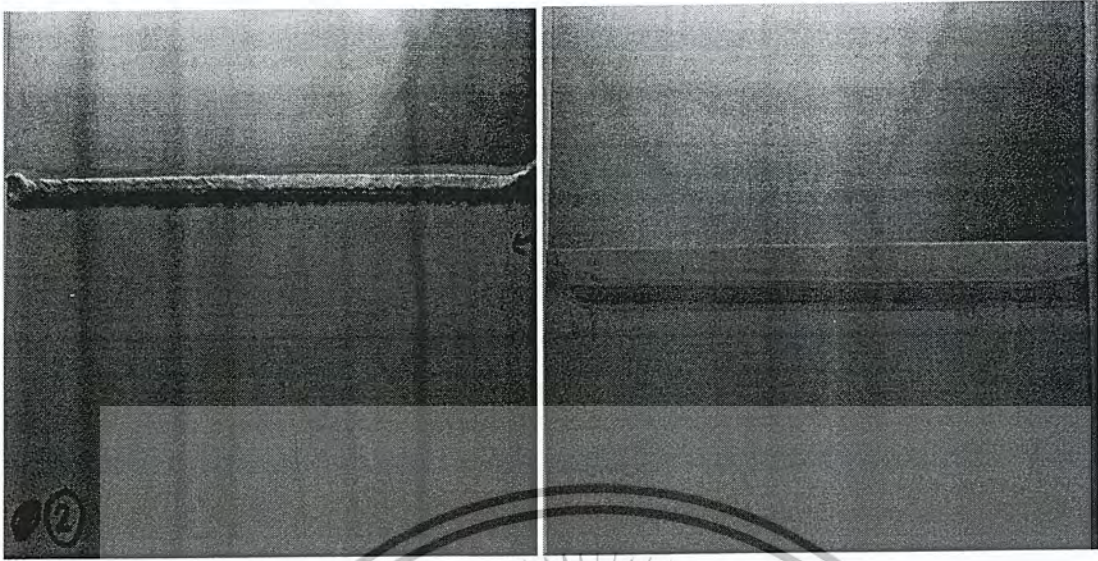
รูปที่ 4.3 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 455 มิลลิเมตร/นาที่ ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ -15 องศา



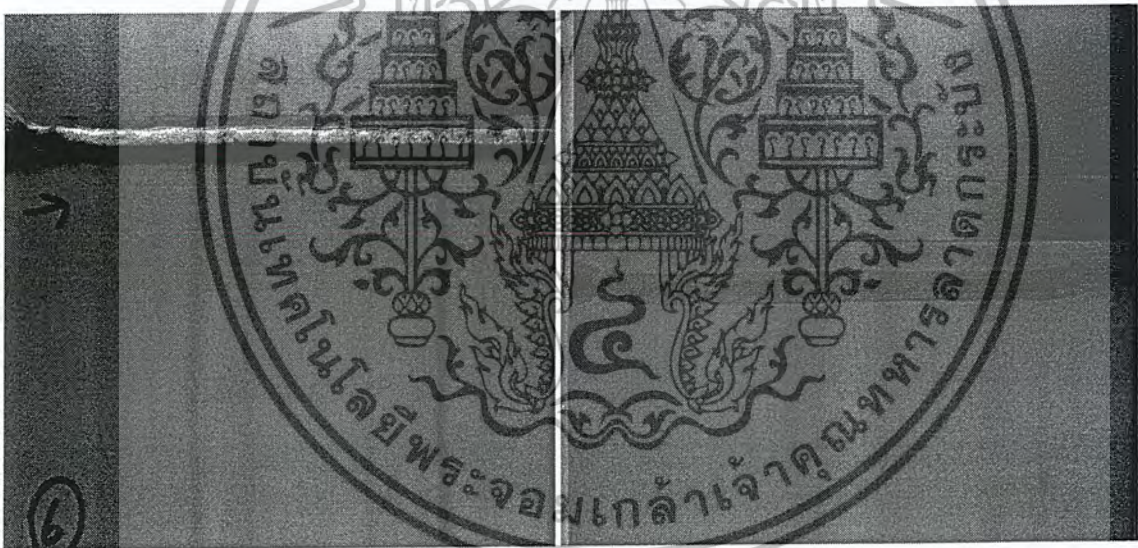
รูปที่ 4.4 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 455 มิลลิเมตร/นาที ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ 15 องศา



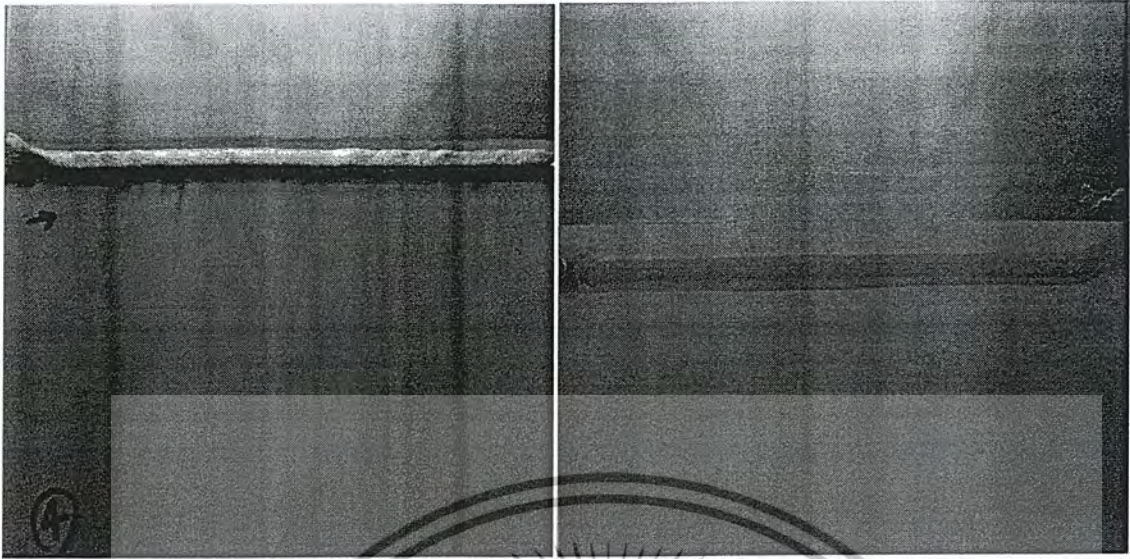
รูปที่ 4.5 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 565 มิลลิเมตร/นาที ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ -15 องศา



รูปที่ 4.6 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 565 มิลลิเมตร/นาที ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ 15 องศา



รูปที่ 4.7 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 455 มิลลิเมตร/นาที ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ 15 องศา



รูปที่ 4.8 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการแล่นประสานเท่ากับ 565 มิลลิเมตร/นาที ระยะจากหัวเชื่อมถึงจันทันเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และนุ้มนงานเท่ากับ 15 องศา

4.2 การวัดค่าตอบสนอง (Output)

หลังจากได้ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าชุบสังกะสีและอลูมิเนียมอัลลอยเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอน
 ต่อมาจึงได้มีการวัดค่าความต้านทานแรงดึงเพื่อนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกค่าความต้านทานแรงดึง

Run Order	Std.Order	ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) หน่วย นิวตัน					เฉลี่ย
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
1	1	1658.49	1678.29	1833.42	2307.98	2391.65	1973.97
2	2	2085.54	1858.54	1974.57	1801.92	1937.62	1931.64
3	3	2504.7	2112.93	2268.67	2376.56	2251.76	2302.92
4	4	1819.41	1828.01	1414.91	1599.79	1504.29	1633.28
5	5	1879.53	1940.84	1899.6	1569.5	1683.76	1794.65
6	6	1722.07	1762.74	1541.31	1600.45	1602.64	1645.84
7	7	1772.38	1840.02	2061.92	1506.04	1681.53	1772.38

Run Order	Std.Order	ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) หน่วย นิวตัน					
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	เฉลี่ย
8	8	1627.34	1594.68	1300.54	1593.72	1780.12	1579.28
9	9	2061.51	1868.23	1953.21	1980.56	1965.88	1965.88
10	10	1947.17	1777.46	1499.32	1738.63	1924.72	1777.46
11	11	2057.35	2014.92	1968.33	2080.38	2200.74	2064.34
12	12	1861.53	1690.32	1660.65	2230.47	2274.4	1943.47
13	13	1958.39	1404.72	1830.4	1873.64	2011.06	1815.64
14	14	1179.06	1545.22	1302.75	1724.12	1664.84	1483.20
15	15	2086.98	1254.01	1705.83	1655.09	1851.52	1710.69
16	16	1798.3	1839.24	1965.15	2100.64	2208.4	1982.35
17	17	1461.43	1639.72	1695.31	1446.04	1778.39	1604.18
18	18	1848.75	1955.86	2010.35	1809.15	1727.24	1870.27
19	19	1730.39	1835.63	1634.07	1936.92	2041.15	1835.63
20	20	2176.65	2117.82	1852.17	1304.6	1622.61	1814.77
21	21	1721.03	2172.2	2080.47	2005.73	2040.23	2003.93
22	22	1941.07	1917.86	1792.25	1903.96	2150.2	1941.07
23	23	1591.03	1535.51	1558.49	1492.54	1451.81	1525.88
24	24	1622.24	1959.8	1788.82	1932.62	2232.34	1907.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมมินิแทบ (MINITAB)

จากผลการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ได้นำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์การทดลองโดยกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ใช้ในการทดลองและตัวแปรที่ใช้ในโปรแกรมมินิแทบ ไว้ดังตารางที่ 4.2 โดยได้มีการกำหนดค่าความเชื่อมั่นไว้ที่ 95 % หรือที่ $\alpha = 0.05$

ตารางที่ 4.2 แสดงการกำหนดตัวแปรลงในโปรแกรมมินิแทบ

ปัจจัย	ตัวแปร
ความเร็วในการเล่นประสาน (Travel Speed)	A
ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน (Nozzle to Work)	B
มุมงาน (Work Angle)	C

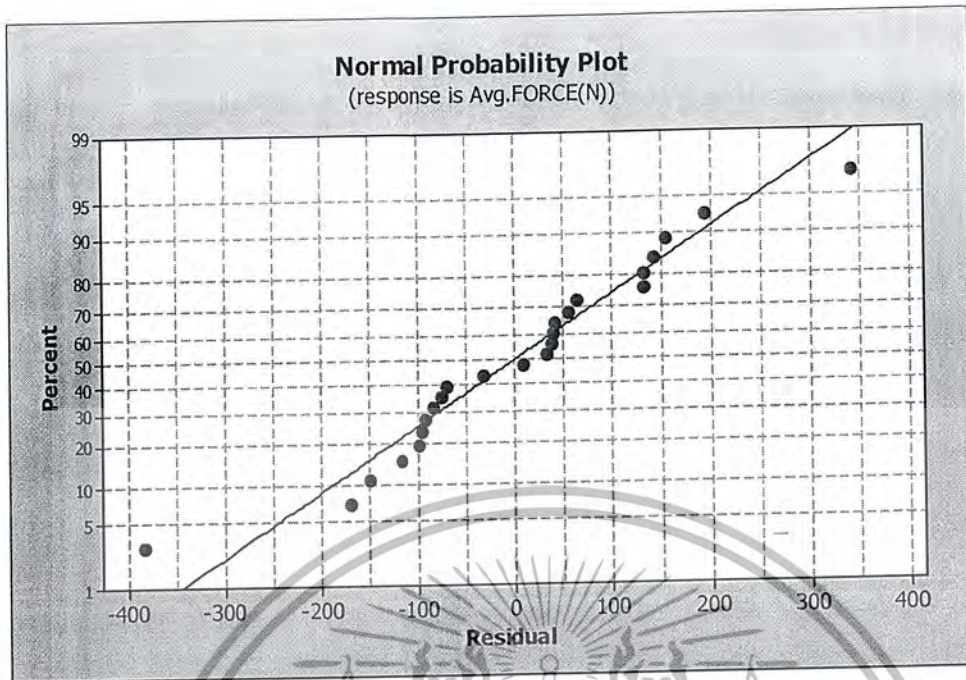
4.3.1 การทดสอบสมมติฐานเพื่อคัดเลือกปัจจัยโดยใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design)

การทดสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนว่ามีความถูกต้อง และเหมาะสมหรือไม่ (Model Adequacy Checking) จะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

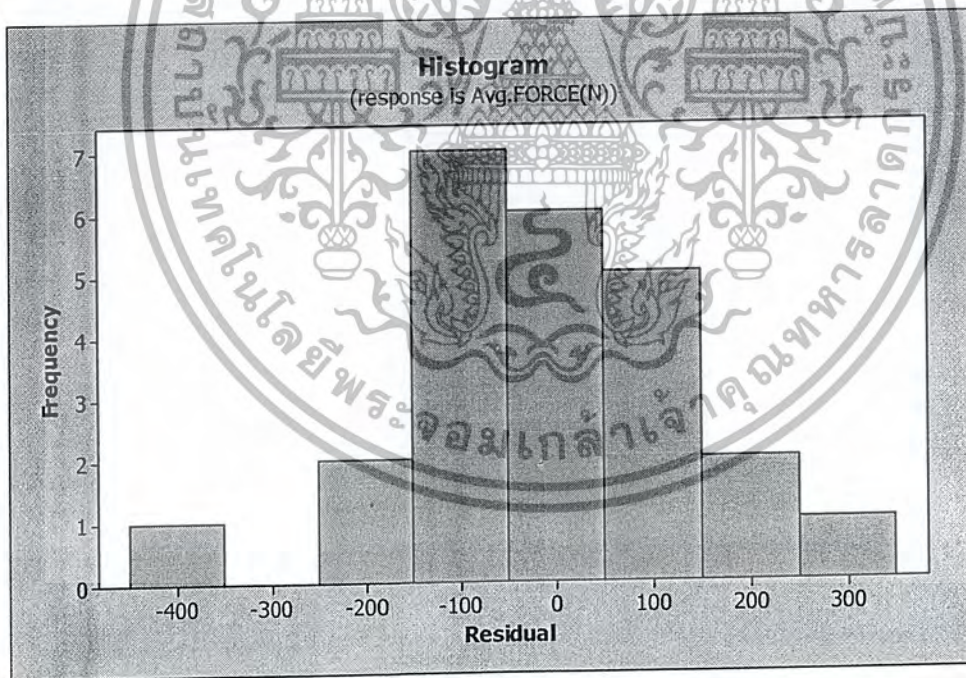
- 1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residuals)
- 2) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง
- 3) การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง
- 4) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability)

4.3.1.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residual)

ถ้าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ค่าส่วนตกค้างจากกราฟ Normal Probability จะมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และอาจพิจารณาได้จากฮิสโตแกรม ถ้าพื้นที่ใต้กราฟเป็นรูประฆังคว่ำสามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติได้เช่นกัน จากกราฟดังรูปที่ 4.9 จะสังเกตได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และจากกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 4.10 พื้นที่ใต้กราฟเป็นรูประฆังคว่ำ ทำให้สรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ



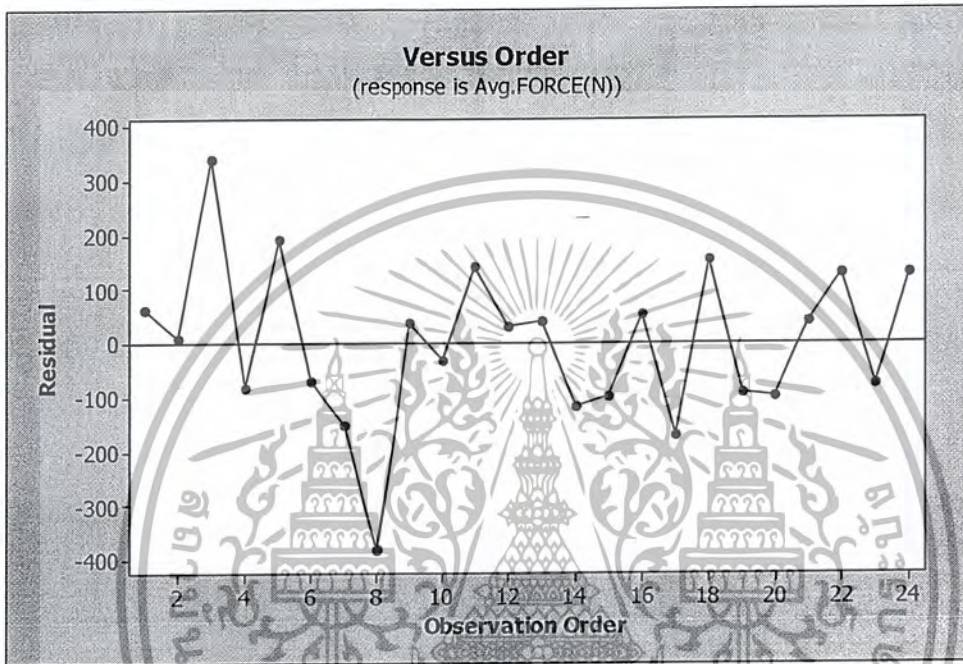
รูปที่ 4.9 แสดงการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล



รูปที่ 4.10 ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล

4.3.1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independence) ของค่าส่วนตกค้าง

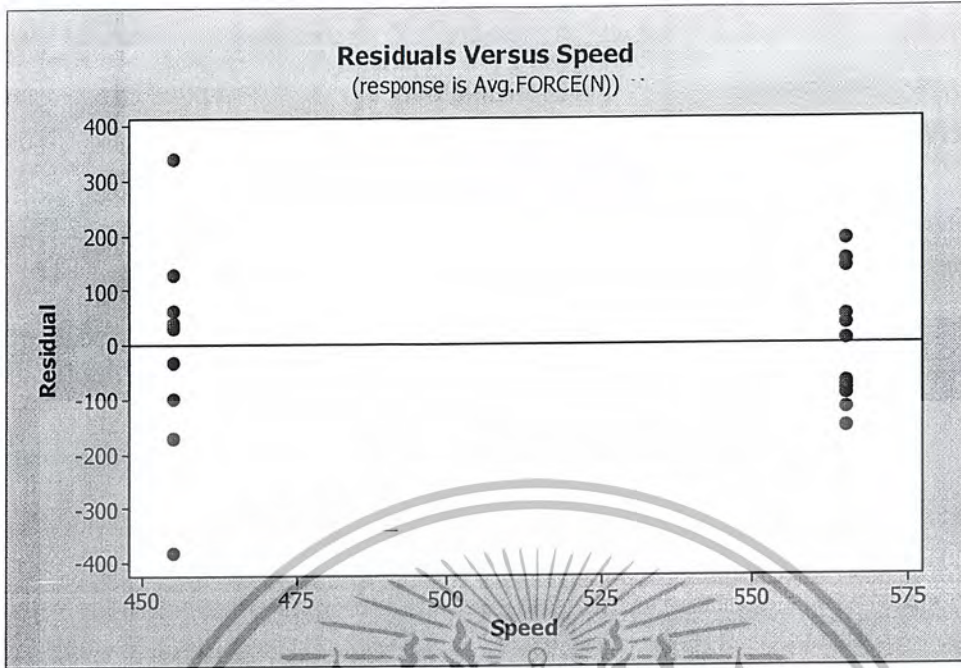
ถ้าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้จะสามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน โดยจากกราฟดังรูปที่ 4.11 จะสังเกตได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน



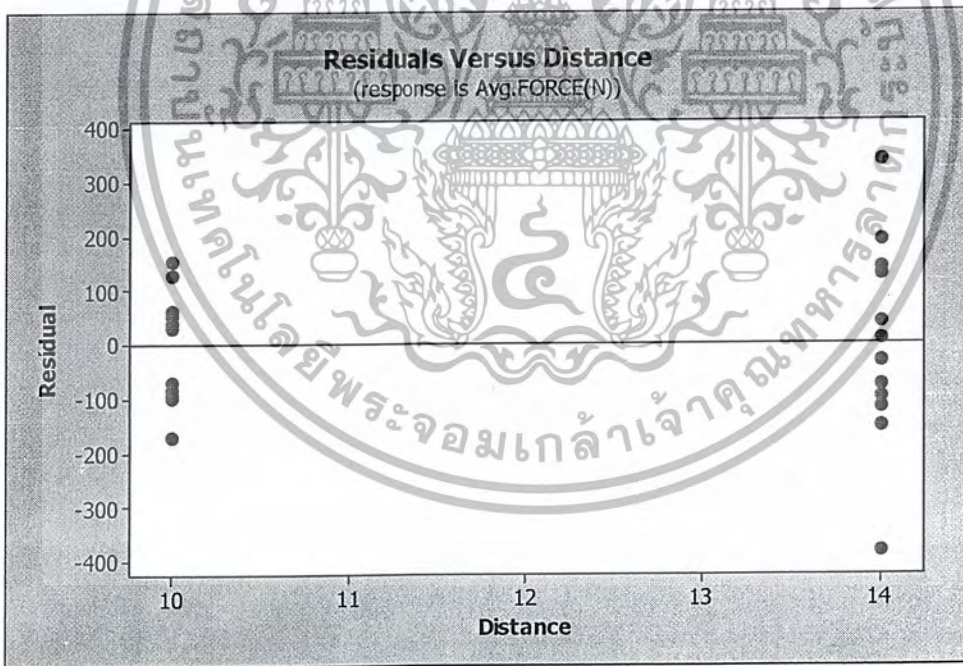
รูปที่ 4.11 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Observation Order จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล

4.3.1.3 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง

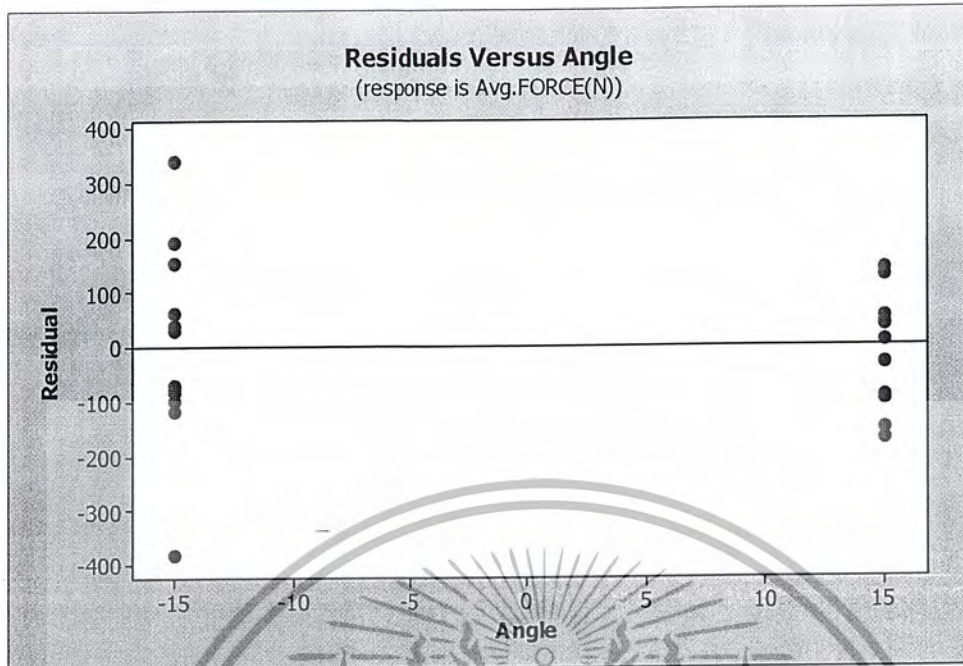
จากแผนภูมิการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับค่าของปัจจัยต่างๆ ดังรูปที่ 4.12 พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน จะสามารถประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้างมีใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์ (0)



รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่าปัจจัยต่างๆ จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล



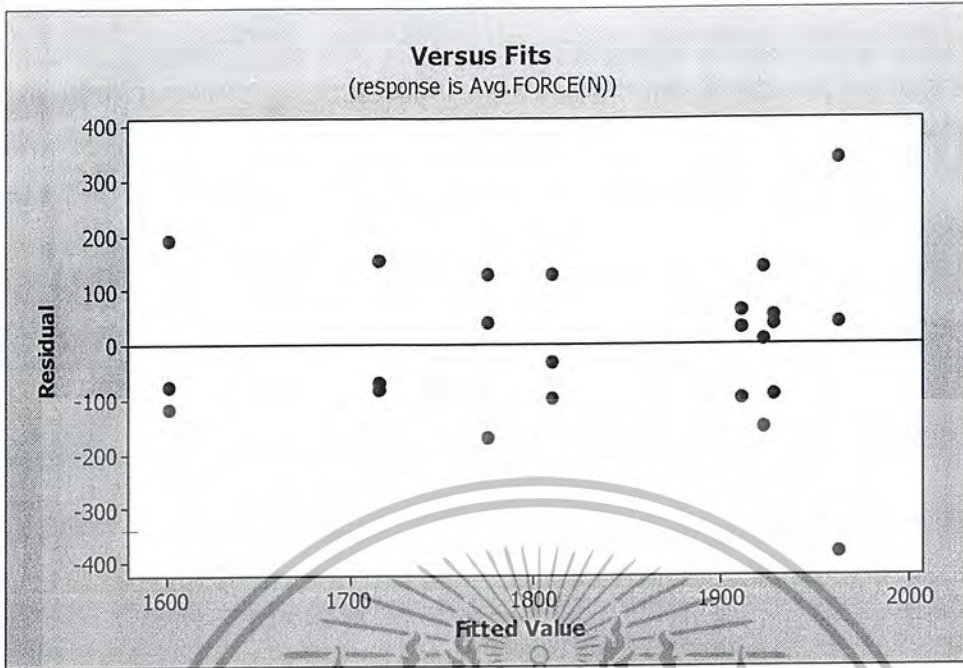
รูปที่ 4.12 [ต่อ] แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับค่าปัจจัยต่างๆ จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล



รูปที่ 4.12 [ต่อ] แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับค่าปัจจัยต่างๆ จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล

4.3.1.4 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability)

จากแผนภูมิการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับ Fitted Value ดังรูปที่ 4.13 พบว่าค่าของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่พบว่ามีรูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

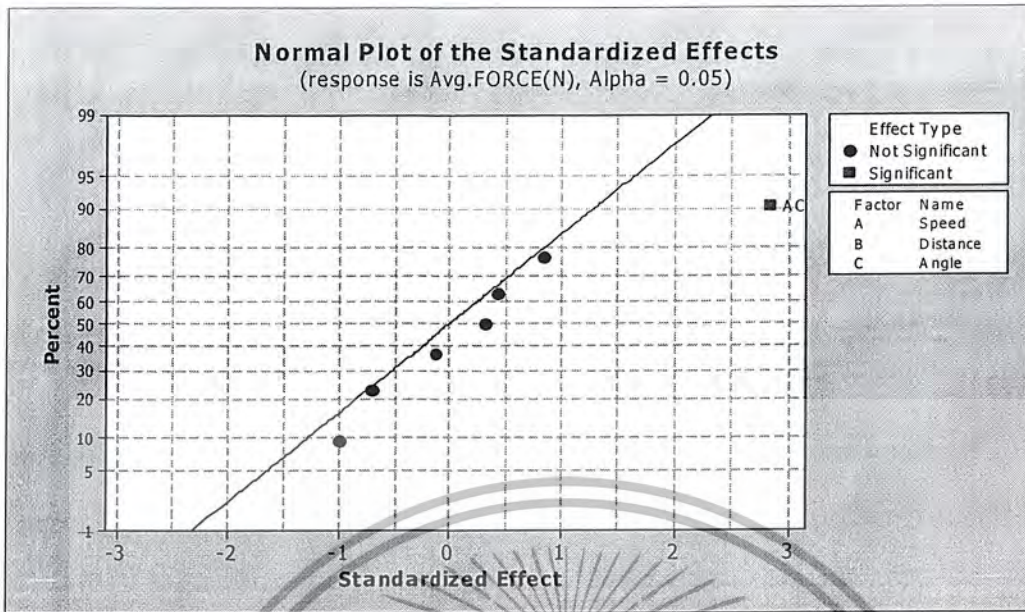


รูปที่ 4.13 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่า Fitted Value หรือค่าความต้านทานแรงดึง จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล

4.3.2 การคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง (Screening)

ในการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสามารถพิจารณาได้ 2 วิธีคือ ดูจากกราฟ Effects Plot ดังรูปที่ 4.14 หรือดูจากค่า P-Values จากการวิเคราะห์ผลกระทบ ดังตารางที่ 4.3 โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงจะมีค่า P-Values < 0.05 และสามารถวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ได้จากตารางที่ 4.4

โดยจากกราฟ Effects Plot และการวิเคราะห์ผลกระทบ (ที่ $P < 0.05$) สรุปได้ว่าปัจจัยร่วม (Interaction) ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงคือ ความเร็วในการเล่นประสาน (Travel Speed) กับมุมงาน (Work Angle) ซึ่งจะต้องนำปัจจัยหลัก (Main Effects) มาพิจารณาในขั้นตอนต่อไป ได้แก่ ความเร็วในการเล่นประสาน และมุมงาน



รูปที่ 4.14 กราฟ Effect Plot แสดงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล

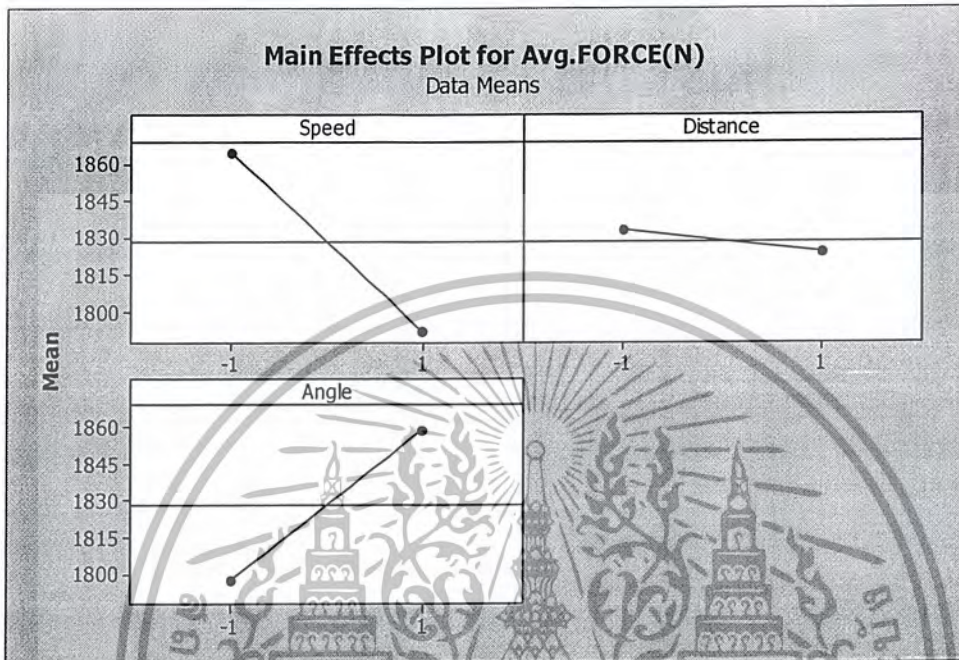
ตารางที่ 4.3 แสดงค่า P-Values จากตาราง Estimated Effects and Coefficients

Estimated Effects and Coefficients for Avg.FORCE(N) (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		1828.33	36.21	50.50	0.000
Speed	-72.43	-36.22	36.21	-1.00	0.332
Distance	-8.75	-4.38	36.21	-0.12	0.905
Angle	61.41	30.71	36.21	0.85	0.409
Speed*Distance	-51.44	-25.72	36.21	-0.71	0.488
Speed*Angle	205.10	102.55	36.21	2.83	0.012
Distance*Angle	23.21	11.60	36.21	0.32	0.753
Speed*Distance*Angle	31.82	15.91	36.21	0.44	0.666

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

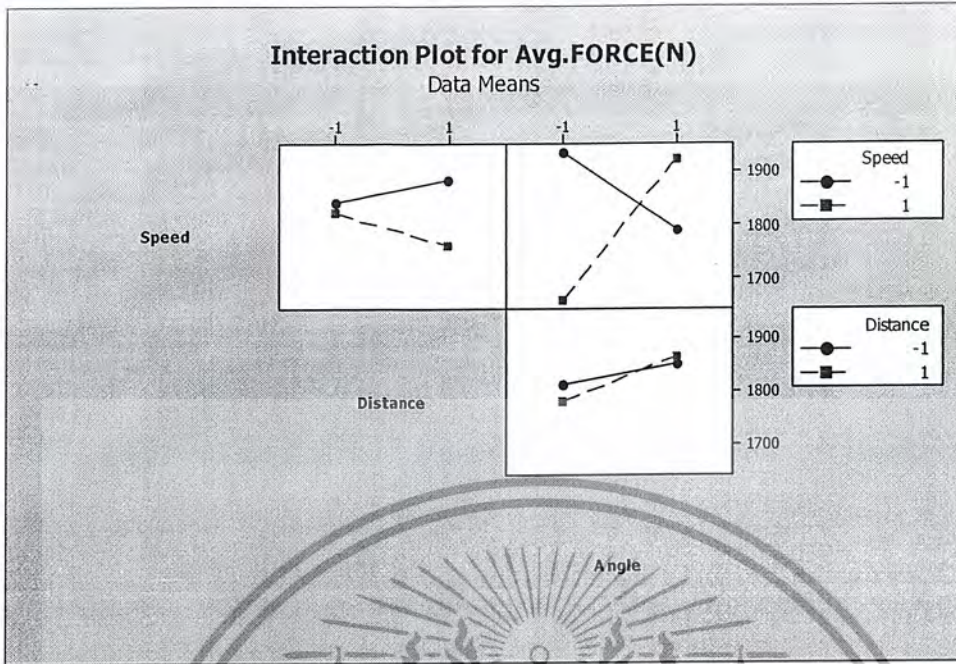
Analysis of Variance for Avg.FORCE(N) (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	54569	54569	18190	0.58	0.638
2-Way Interactions	3	271516	271516	90505	2.88	0.069
3-Way Interactions	1	6076	6076	6076	0.19	0.666
Residual Error	16	503382	503382	16	31461	
Pure Error	16	503382	503382	31461		
Total	23	835544				

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.15 พบว่าความเร็วในการเคลื่อนประสานและมุมงานเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึง เนื่องจากกราฟที่ความชันมาก ส่วนระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน (Nozzle to Work) ไม่เป็นปัจจัยหลัก เนื่องจากกราฟมีความชันน้อยมาก



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักต่างๆ กับค่าความต้านทานแรงดึง (Main Effects Plot) จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.16 พบว่าปัจจัยที่มีผลร่วมกันต่อค่าความต้านทานแรงดึงคือความเร็วในการเคลื่อนประสานกับค่ามุมงานด้วยมีความสัมพันธ์เป็นแบบแปรผกผันตรง



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักต่างๆ กับค่าความต้านทานแรงดึง (Interaction Plot) จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล

4.3.3 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Analysis) เพื่อหาสมการการถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์จะเป็นในรูปแบบ Linear โดยจากการวิเคราะห์ปัจจัยในส่วนของ Factorial Design พบว่าปัจจัยระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน ไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ดังนั้นจึงสามารถตัดด้วยแปรนี้ออกไปได้

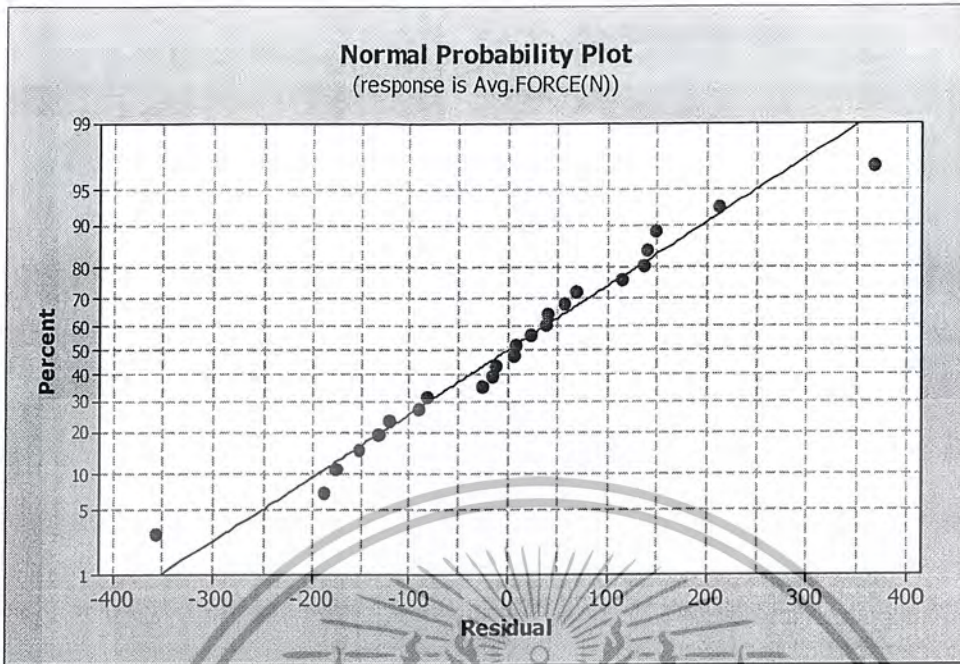
4.3.3.1 การทดสอบสมมติฐานในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

การทดสอบสมมติฐานในรูปแบบของ Linear จะประกอบไปด้วย

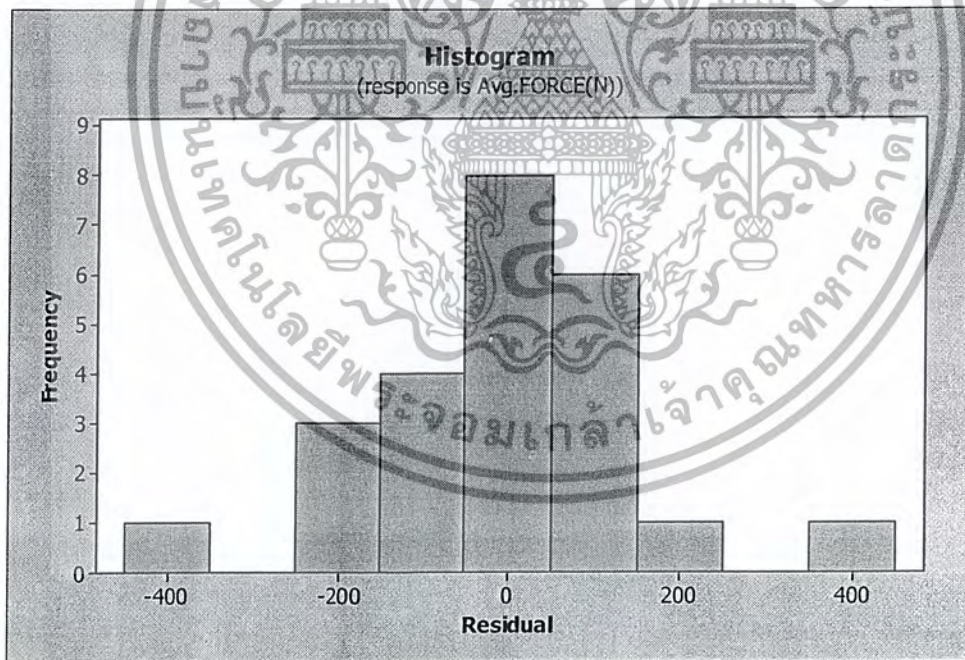
- 1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง
- 2) การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง
- 3) การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง
- 4) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

พิจารณาจากรูปที่ 4.17 พบว่าการกระจายตัวของค่าส่วนเกินกระจายอยู่ตามแนวเส้นตรงส่วนรูปที่

4.18 พบว่าพื้นที่ได้กราฟเป็นรูประฆังคว่ำ ดังนั้นการกระจายตัวจึงเป็นแบบปกติ

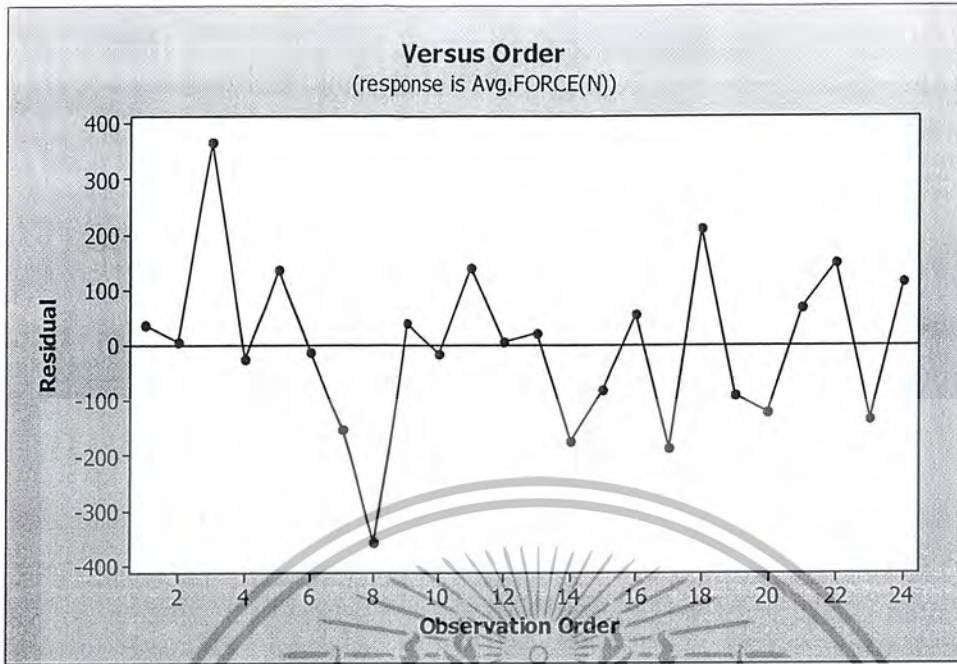


รูปที่ 4.17 แสดงการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง



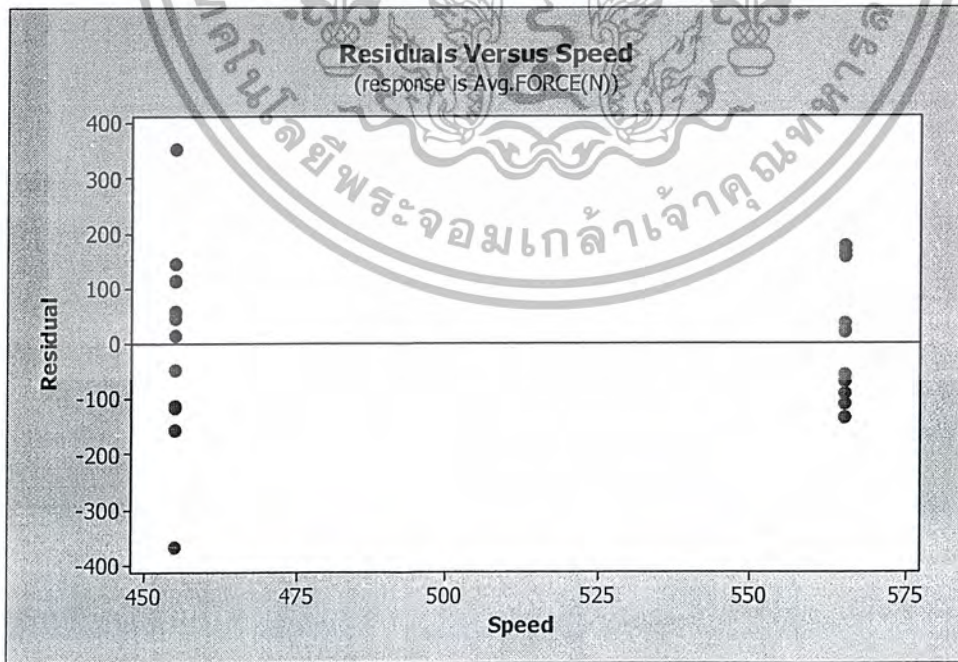
รูปที่ 4.18 ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

พิจารณารูปที่ 4.19 พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่
สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้จะสามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

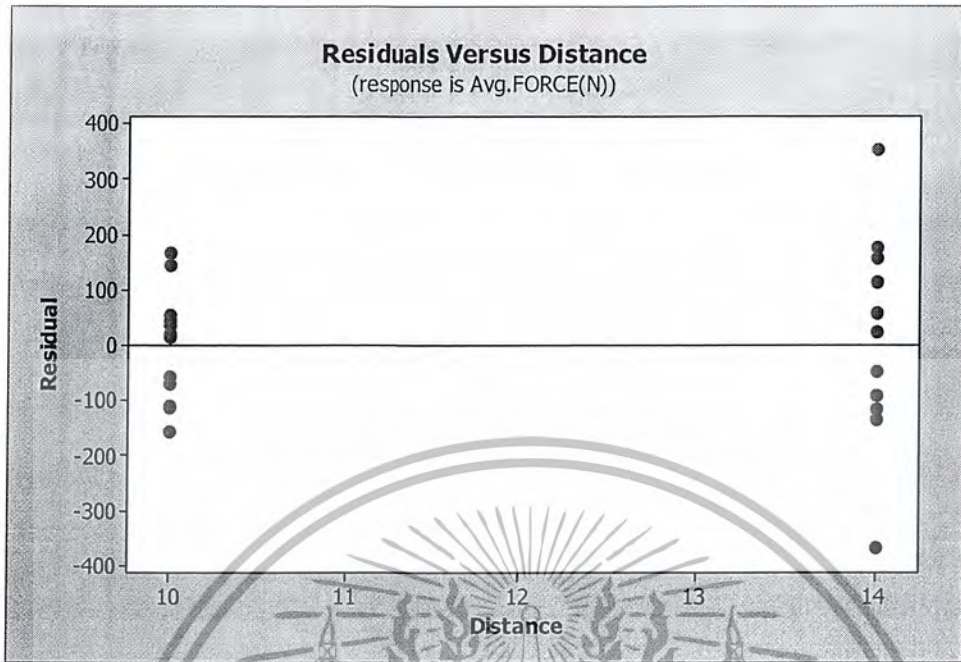


รูปที่ 4.19 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Observation Order ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

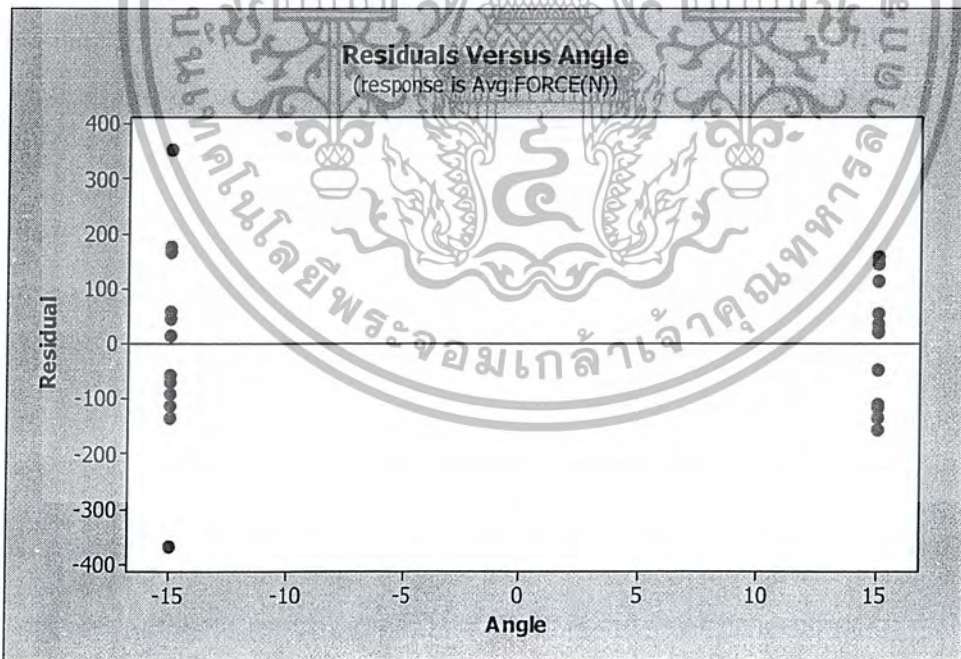
พิจารณารูปที่ 4.20 พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน จะสามารถประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้างมีใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์ (0)



รูปที่ 4.20 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่าปัจจัยต่างๆ ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

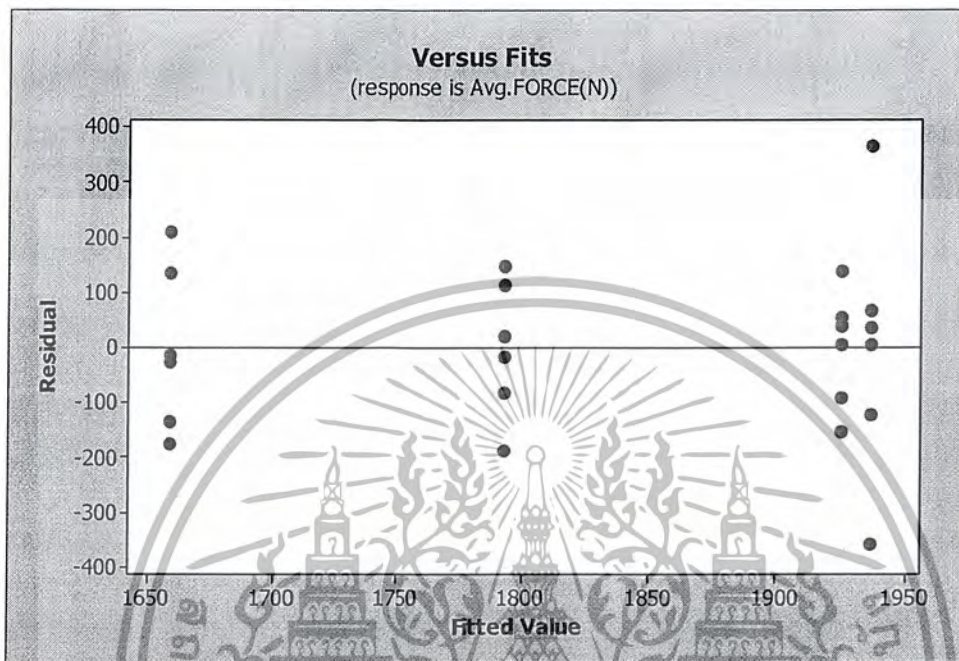


รูปที่ 4.20 [ต่อ] แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับค่าปัจจัยต่างๆ ในการวิเคราะห์พื้นผิว
ตอบสนอง



รูปที่ 4.20 [ต่อ] แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับค่าปัจจัยต่างๆ ในการวิเคราะห์พื้นผิว
ตอบสนอง

จากแผนภูมิการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับ Fitted Value ดังรูปที่ 4.21 พบว่าค่าของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่งและไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



รูปที่ 4.21 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่า Fitted Value หรือค่าความต้านทานแรงดึง ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

4.3.3.2 การวิเคราะห์หาสมการการถดถอย (Regression Analysis)

ในการวิเคราะห์หาสมการการถดถอยเราสามารถดูค่าของสัมประสิทธิ์การถดถอยได้จากข้อมูลในโปรแกรมมินิแทบ ดังตารางที่ 4.5

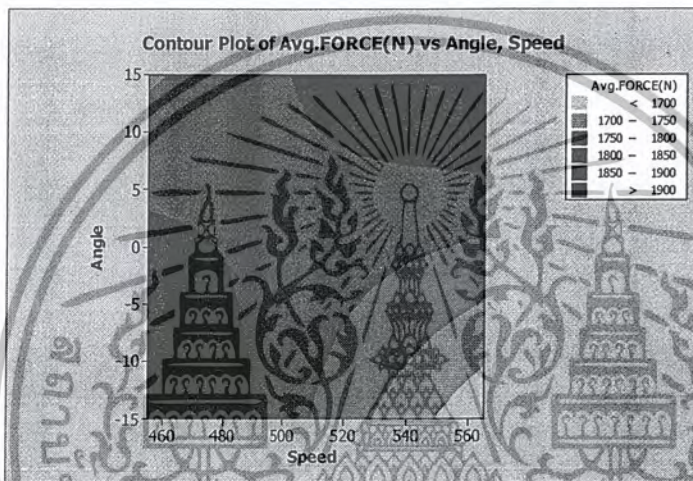
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการในรูปแบบเส้นตรง

The analysis was done using uncoded units. Estimated Regression Coefficients for Avg.FORCE (N)				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2164.16	309.626	6.990	0.000
Speed	-0.66	0.604	-1.091	0.288
Angle	-61.35	20.642	-2.972	0.008
Speed*Angle	0.12	0.040	3.089	0.006

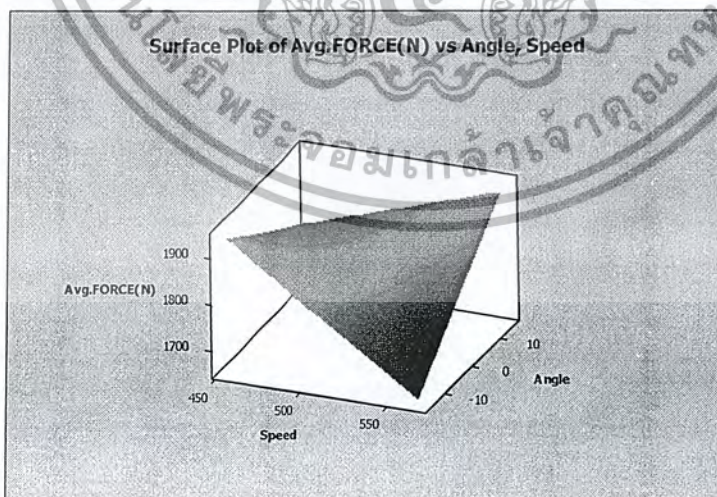
ดังนั้นจะได้สมการการถดถอยในรูปของสมการเส้นตรง ดังสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$Y = 2164.16 - 0.66 * \text{Speed} - 61.35 * \text{Angle} + 0.12 * (\text{Speed} * \text{Angle}) \quad (4.1)$$

โดยในการทดลองเบื้องต้นพบว่าช่วงของความเร็วในการแล่นประสานที่ใช้งานได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 400 ถึง 650 มิลลิเมตร/นาที และมุมงานจะมีค่าอยู่ระหว่าง -15 ถึง 15 องศา ถ้ามีค่าที่นอกเหนือจากที่ได้กล่าวไว้ รอยเชื่อมอาจจะไม่สวยงาม หรือเกิดปัญหาบางประการ เช่น รอยเชื่อมมีรูพรุน โดยแนวโน้มของค่าความต้านทานแรงดึงที่เป็นไปได้แสดงไว้ในกราฟ Contour Plot และ Surface Plot ดังรูปที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ



รูปที่ 4.22 แสดงแนวโน้มของค่าความต้านทานแรงดึง โดย Contour Plot



รูปที่ 4.23 แสดงแนวโน้มของค่าความต้านทานแรงดึง โดย Surface Plot

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของรอยต่อในงานแผ่นประสานแบบมีกระหว่างเหล็กกล้าชุบสังกะสีและอลูมิเนียมอัลลอย 5052 ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ความเร็วในการแผ่นประสาน (Travel speed) ระยะห่างจากหัวเชื่อม (Nozzle to work) และ มุมงาน (Work angle) โดยแต่ละปัจจัยมีสองระดับคือ ระดับสูงและระดับต่ำ

5.1 สรุปผล

1. เครื่องเชื่อมอ็อกโนมิก CMT สามารถแผ่นประสานแบบมีกระหว่างเหล็กกล้าชุบสังกะสีและอลูมิเนียมอัลลอย 5052 โดยที่ปราศจาก สะเก็ดรอยเชื่อม (Spatter) ทำให้ได้รอยเชื่อมที่สมบูรณ์
2. ปัจจัยหลักที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของรอยต่อในงานแผ่นประสานแบบมีกระหว่างเหล็กกล้าชุบสังกะสีและอลูมิเนียมอัลลอย 5052 คือ ความเร็วในการแผ่นประสาน (Travel speed) และ มุมงาน (Work angle) ส่วนปัจจัยร่วมได้แก่ ความเร็วในการแผ่นประสานกับมุมงาน
3. ค่าความต้านทานแรงดึงสามารถพยากรณ์ได้จากสมการ

$Y = 2164.16 - 0.66 * \text{Speed} - 61.35 * \text{Angle} + 0.12 * (\text{Speed} * \text{Angle})$ ซึ่งขอบเขตของความเร็วในการแผ่นประสานที่ทำให้รอยเชื่อมไม่เกิดปัญหาจะมีค่าอยู่ในช่วง 400 ถึง 650 มิลลิเมตร/นาที และมุมงานมีค่าอยู่ในช่วง -15 ถึง 15 องศา

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการพัฒนาประสิทธิภาพของตัวจับชิ้นงานที่ใช้ในงานแผ่นประสานครั้งนี้ เพื่อให้เกิดความเที่ยงตรงต่อการใช้งานได้มากที่สุด เนื่องจากเกิดการแอ่นตัวของชิ้นงานแผ่นประสานของชิ้นงานที่บิดเบี้ยว ซึ่งเกิดการสะสมความร้อนจากรอยเชื่อมที่ใช้งานอย่างต่อเนื่อง
2. ควรมีการทดลองเชื่อมต่อไปในวัสดุที่หลากหลายมากขึ้น เช่น การเชื่อมวัสดุต่างชนิดกัน และในแนวเชื่อมอื่นๆที่ ใช้งานกันในอุตสาหกรรมยานยนต์
3. ควรนำปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมมาทำการทดลองซ้ำเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น

หนังสืออ้างอิง

- [1] นายวัชร พระณชัยฐ์, การผลิตรถยนต์, สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ, 24, พ.ศ.2542.
<<http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK24/chapter4/t2-4-13.htm>>
- [2] ณัฐวุฒิ ถมจอหอ, สุริเยนทร์ อุดมจิตร, อนุวัตร วังหนองลาด ,The Webpage Assisted Instruction For ALUMINUM, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี.
<http://www.aluminiumlearning.com/html/index_introduction.html>
- [3] กรรณชัย กัลยาศิริ, การเล่นประสาน, กรรมวิธีการผลิต, พิมพ์ครั้งที่ 1, พ.ศ.2551, กรุงเทพฯ: วีเจ.พรินต์ติ้ง
- [4] อุทิศ ศรีประเสริฐ, การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพของรอยต่องานเล่นประสานที่เกิดจากการใช้ สวดเชื่อม ER CuSi-A และสวดเชื่อม ER CuAl-AI ในกระบวนการเชื่อม MIG Brazing, วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ 6, 1-2(2550): 74-82.
- [5] Thomas, R., 2000, A Flexible Joining Process Made Possible by High-tech [Online], Available: www.fronius.de/weld.vision/october2000/mig_1oefcn.htm [2001, January, 23].
- [6] นริศ ศรีเมฆ และ พิชัย โอภาสอนันต์, 2542, งานเชื่อมโลหะและโลหะแผ่นทั่วไป, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์เอ็มพันธ์ จำกัด, กรุงเทพฯ, หน้า 164-167.
- [7] American Welding Society, 2000, Brazing Handbook, Chapman and Hall, Florida, pp. 2-15.
- [8] Brazing Experts, 2000, The Brazing Book, Handy and Harman, Precious Metals Fabrication Group, Lucas-Milhaupt, pp. 10-15.
- [9] มานะศิษฏ์ พิมพ์สาร, 2542, คู่มือการเชื่อมมิก-แมก, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์เอ็มแอนไอ จำกัด, กรุงเทพมหานคร, หน้า 1-3.
- [10] Yamamoto, S., 1999, The ABCD's of Arc Welding and Inspection, Shinko Welding Service Co., Ltd., Yoghama, pp. 5-7
- [11] Gartner, W., 1999, Mig-Brazing of Galvanized Light- Gauge Sheet [Online], Available : <http://www.fronius.com/weld>, [2002, June 6].
- [12] American Welding Society, 2000, Welding Handbook, 8th ed., Vol. 2, pp. 110-120.
- [13] I-car, 2004, Brazing As a Substitute for GMA (MIG) Welding [Online] , Available: <http://www.i-cara>About I-CAR - Current Events-News e-newsletters Advantage Online July 20, 2004.htm>.
- [14] Stinchcomb, C., 1989, Welding Technology, A Division of Simon and Schuster Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 188-210.
- [15] Peter, H. and Robert, J., 1989, Welding and Cutting, Industrial Press, New York, pp. 75-80.
- [16] Fronius, 1996, Instruction Manual Programming Trans Pulse Synergic 450, pp. 71-73.

- [17] RobotWorx, 2010, Welding Application - Cold Metal Transfer [Online], Available : <http://www.welding-robots.com/applications.php?app=cold+metal+transfer> , [2010, December 8]
- [18] Jonsson, P.G., Murphy, A.B. and Szekely, J., 1995, "The Influence of Oxygen Additions on Argon-Shielded GMAW processes", Welding Journal, Vol. 74, No.2, pp. 48S-58S.
- [19] Yamamoto, S., 2000, Essertial Factors in Gas Metal Arc Welding, Shinko Welding Service Co., Ltd., Yogohama, p. 3
- [20] ANSI/AWS C5. 10-94, An American National Standard, Recommend Practices for Shielding Gases for Welding and Plasma Arc Cutting. AWS, pp. 105-115.
- [21] Davies, A.C., 1989, The Science and Practice of Welding, 9th ed., Vol. 2, Printed in Great Britain at the University Perss, Cambridge, pp. 96-99.
- [22] Howard, B.C., 1979, Modern Welding Technology, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 131-177.
- [23] เขมมศักดิ์ ส่งสอน, การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพรอยต่องานแผ่นประสานเหล็กกล้าชุบสังกะสีด้วย GMAW-P, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ. 2546
- [24] นายปริญญา แสงทอง, ผลการแปรพารามิเตอร์การเชื่อม MIG ต่อโครงสร้าง และสมบัติของงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม, วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พ.ศ. 2549.
- [25] Joseph A., Variable Polarity Improves Weld Brazing of Galvanized Sheet, Welding Journal, Vol: 81(2003), No. 11: 36-40.
- [26] Solution Center, Design of Experiment, คู่มือการใช้ Minitab, Solution Center Co., Ltd., กรุงเทพมหานคร, บท 1-2.
- [27] Lomax, Richard G., 1992, Statistical Concepts : A Second Course for Education and the Behavioral Sciences, London, Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- [28] ปารเมศ ชูติมา, 2545, การออกแบบการทดลอง, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร:542.
- [29] L.M.M. Tijskens, M.L.A.T.M. Hertog and B. Nicolai, Food Process Modelling, Cambridge:Woodhead, 2001.
- [30] Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery., 1995, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [31] D. C. Montgomery, 2004, Design and Analysis of Experiments, 5th ed: John Wiley & Sons.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HENAN MINGTAI AL. INDUSTRIAL CO., LTD
 HUIGUO ZHEN, GONGYI, HENAN, CHINA 451283
 TEL:+86-371-67898715 FAX:86-371-67898612

MILL INSPECTION CERTIFICATE

INVOICE NO.: MTOK100501
 L/C NO.: TF1009804109
 CONTRACT NO.: MTOK1004-1
 DATE: MAY-14 2010

DESCRIPTION OF GOODS:

31.699MT ALUMINIUM (AA5052 H32)
 AS PER PURCHASE CONFIRMATION NO.MTOK1004-1
 TRADE TERM:CIF BANGKOK ,THAILAND
 ACTUAL MILL CHEMICAL UNIT:%

ASTM-B209

Alloy No. Temper	Lot No.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others	Al
5052H32	B10041148	0.110	0.299	0.014	0.038	2.359	0.199	<0.001	0.010	0.03	REMAIN
5052H32	B10041149	0.113	0.363	0.010	0.029	2.337	0.207	<0.001	0.010	0.03	REMAIN
5052H32	B10041166	0.107	0.334	0.012	0.025	2.268	0.208	<0.001	0.012	<0.15	REMAIN
5052H32	B10041151	0.082	0.296	0.011	0.036	2.379	0.190	0.005	0.013	<0.15	REMAIN
5052H32	B10031345	0.088	0.343	0.010	0.034	2.430	0.208	0.005	0.012	<0.15	REMAIN
5052H32	B10041152	0.090	0.318	0.007	0.032	2.301	0.198	0.004	0.016	<0.15	REMAIN
5052H32	B10041150	0.082	0.296	0.011	0.036	2.379	0.190	0.005	0.013	<0.15	REMAIN

MECHANICAL PROPERTY TEST REPORTS

Alloy No.	Lot No.	Temper	Specified	Tensile strength	Elongation
				(MPa)	(%)
5052	B10041148	H32	1.5*1219.2*2438.4	226	14
5052	B10041149	H32	1.0*1219.2*2438.4	230	13
5052	B10041166	H32	2.0*1219.2*2438.4	227	14
5052	B10041151	H32	2.0*1219.2*2438.4	225	14
5052	B10031345	H32	2.0*1219.2*2438.4	225	15
5052	B10041152	H32	3.0*1219.2*2438.4	226	14
5052	B10041150	H32	2.5*1280°C	222	14

PRODUCER: HENAN MINGTAI AL. INDUSTRIAL CO., LTD

HENAN MINGTAI AL. INDUSTRIAL CO., LTD

吴艳地

บริษัท โดชิน อินเตอร์เนชั่นแนล คอร์ปอเรชั่น จำกัด

ที่อยู่บริษัท: 246 นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง จลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กทม. 10520

โทรศัพท์: 02-739-6396

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

