

รายงานการวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานแบบมิกที่มีต่อรูปร่าง คุณสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมในการเชื่อมประสานเหล็กกล้าเข้ากับอลูมิเนียมเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์

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

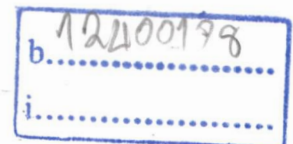


RCH นายกรรณชัย กัลยาศิริ

TA 465 กวิ4ก

ศ.1

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 121356  
วัน, เดือน, ปี 4 ก.ค. 2555



ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2554



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานแบบมิกที่มีต่อรูปร่าง คุณสมบัติทางกล และ โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมในการเชื่อมประสานเหล็กกล้าเข้ากับอลูมิเนียมเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์

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

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2554 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 483,500 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2553 ถึง 30 กันยายน 2554

หัวหน้าโครงการ นายกรรณชัย กัลยาศิริ

หน่วยงานต้นสังกัด สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
โทรศัพท์ 02-329-8339 อีเมล [kkkannac@kmitl.ac.th](mailto:kkkannac@kmitl.ac.th)

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

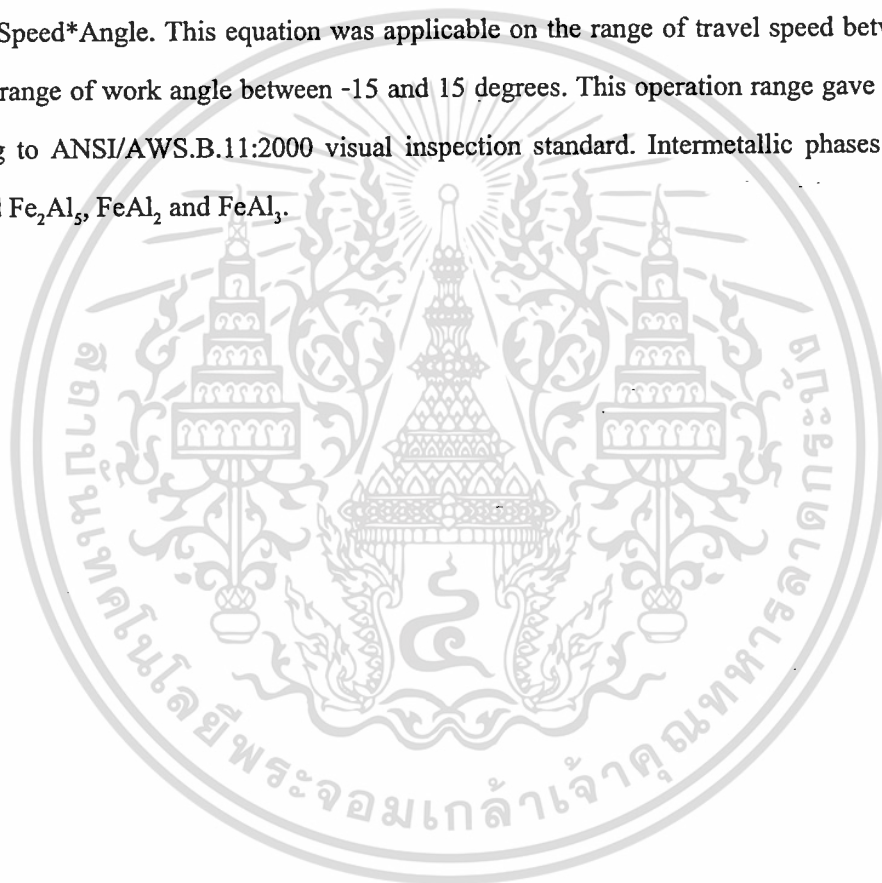
#### บทคัดย่อ

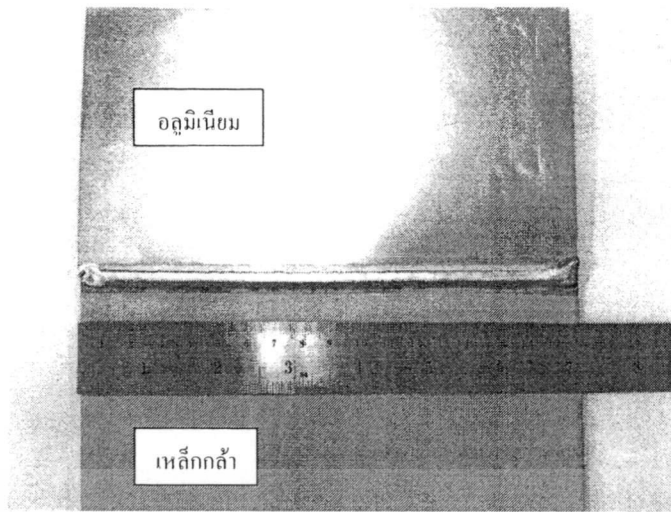
โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเล่นประสานแบบมิกที่มีต่อรูปร่าง คุณสมบัติทางกล และ โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมในการเชื่อมประสานเหล็กกล้าเข้ากับอลูมิเนียม เพื่อนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอื่นๆที่เกี่ยวข้อง ในการศึกษาได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design และ Central Composite Design ช่วยในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยตัวแปรหรือปัจจัยที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ความเร็วในการเล่นประสาน (Travel speed) ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน (Nozzle to work distance) และมุมงาน (Work angle) โดยให้แรงดันไฟฟ้า (Voltage) กระแสไฟฟ้า (Current) อัตราการป้อนลวด (Wire feed rate) และอัตราการไหลของแก๊สคลุม (Gas flow rate) มีค่าคงที่ จากการทดลองและการวิเคราะห์ผลพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล (ความต้านทานแรงดึงของรอยต่อ) คือ ความเร็วในการเล่นประสาน และมุมงาน ส่วนปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานแรงดึงของรอยต่อ คือ ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วในการเล่นประสานและมุมงาน และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการพยากรณ์ค่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อ คือ  $Y = 2164.16 - 0.66 * \text{Speed} - 61.35 * \text{Angle} + 0.12 * \text{Speed} * \text{Angle}$  โดยข้อจำกัดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ คือ ขอบเขตของปัจจัยความเร็วในการเล่นประสาน จะอยู่ในช่วง 400 ถึง 650 มิลลิเมตร/นาที และขอบเขตของมุมงาน จะอยู่ในช่วง -15 ถึง 15 องศา โดยที่ความเร็วในการเล่นประสานและมุมงานที่ใช้ในช่วงนี้ได้กล่าวมานี้ เป็นช่วงที่ใหรูปร่างของรอยเชื่อมที่สมบูรณ์ตามมาตรฐานการตรวจสอบรอยเชื่อม ANSI/AWS.B.11:2000 สำหรับสารประกอบเชิงโลหะที่พบในรอยต่อจากการเล่นประสานในการศึกษานี้ ได้แก่  $\text{Fe}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{FeAl}_2$  และ  $\text{FeAl}_3$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

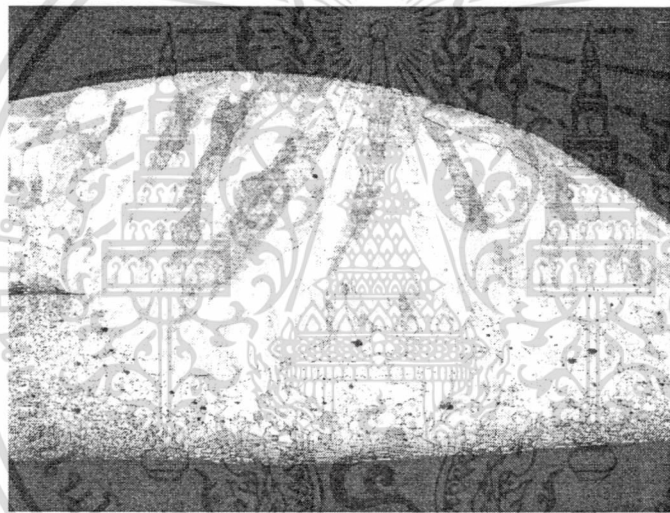
## Abstract

This research was aimed to investigate influence of MIG brazing parameters on bead shape, mechanical properties, and microstructure of brazed joint between galvanized steel and 5052 aluminum alloy. The experiment was designed, performed, and analyzed based on full factorial experimental design and central composite design. The experimental parameters were travel speed, nozzle to work distance, and work angle. Brazing voltage, brazing current, wire feed rate, and gas flow rate was kept at a constant value throughout the experiment. Results showed that main factors affecting tensile strength of brazed joints are travel speed, and work angle, and the significant interaction is the interaction between the travel speed and the work angle. The statistical model for predicting tensile strength of brazed joints can be described as  $Y = 2164.16 - 0.66*Speed - 61.35*Angle + 0.12*Speed*Angle$ . This equation was applicable on the range of travel speed between 400 and 650 mm/min and the range of work angle between -15 and 15 degrees. This operation range gave an acceptable bead shape according to ANSI/AWS.B.11:2000 visual inspection standard. Intermetallic phases found in the brazed joints included  $Fe_2Al_3$ ,  $FeAl_2$  and  $FeAl_3$ .

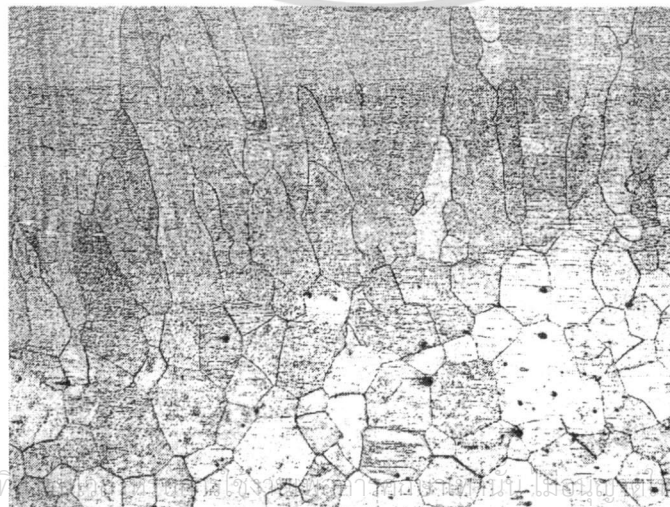




ลักษณะของรอยต่อและขนาดของชิ้นงานจากการเล่นประสานแบบมิก



ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่ได้จากการเล่นประสานที่กำลังขยาย 50 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่ได้จากการเล่นประสานที่กำลังขยาย 200 เท่า

## สารบัญ

	หน้า
<b>บทที่ 1</b>	<b>บทนำ</b>
1.1	ที่มาและปัญหาของโครงการ..... 1
1.2	วัตถุประสงค์..... 2
1.3	ขอบเขตของโครงการ..... 2
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2
<b>บทที่ 2</b>	<b>ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>
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	การเกิดอาร์ก..... 9
2.4	การถ่ายโอนน้ำโลหะ (Metal Transfer)..... 10
2.4.1	การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร (Short circuit transfer)..... 10
2.4.2	การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดน้ำขนาดใหญ่ (Globular Transfer)..... 10
2.4.3	การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง (Spray Transfer) ..... 11
2.4.4	การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพัลส์ (Pulse Transfer)..... 12
2.5	การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหล่อเย็น (Cold Metal Transfer)..... 14
2.6	ตัวแปรในการเล่นประสานรอยต่อ..... 15
2.6.1	ลวดเติม (Filler Metal)..... 15
2.6.2	แก๊สคลุม (Shielding Gas)..... 16
2.6.3	กระแสในการเชื่อม (Welding Current)..... 17
2.6.4	แรงดันอาร์ก (Arc Voltage)..... 18
2.6.5	อัตราเร็วเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม (Welding Speeds : Travel Speeds)..... 19
2.7	การออกแบบการทดลอง (Designing Experiments)..... 19
2.7.1	การวางแผน (Planning)..... 19
2.7.2	การคัดเลือก (Screening)..... 20
2.7.3	การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) ..... 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.4 การทวนสอบ (Verification).....	21
2.8 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design).....	21
2.8.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design).....	21
2.8.2 การออกแบบเพื่อคัดเลือก (Screening Design).....	21
2.8.3 การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial.....	22
2.8.4 การออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial.....	22
2.9 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression).....	23
2.9.1 สหสัมพันธ์แยกส่วน (Partial Correlation).....	23
2.9.2 สหสัมพันธ์ครึ่งส่วน (Semipartial (Part) Correlation).....	23
2.9.3 สมการถดถอยที่อยู่ในรูปคะแนนดิบ (Unstandardized Regression Equation).....	24
2.9.4 สมการการถดถอยในรูปของคะแนนมาตรฐาน (Standardized Regression Equation).....	25
2.9.5 การทดสอบนัยสำคัญ.....	26
2.9.5.1 การทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอยทั้งหมด.....	26
2.9.5.2 การทดสอบนัยสำคัญของ $b^k$ .....	27
2.9.6 การทดสอบการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้.....	28
2.9.7 ข้อตกลงเบื้องต้นทางสถิติ.....	29
2.10 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม.....	30
2.10.1 ความสามารถในการหมุน.....	30
2.11 แบบจำลองการถดถอยสำหรับ Central Composite Design.....	32
2.12 พื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology).....	33
<b>บทที่ 3 การออกแบบและวิธีการดำเนินงาน</b>	
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.5 เครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Cut EDM).....	45
3.2.6 จิ๊กที่ใช้ยึดจับชิ้นงาน.....	46
3.2.7 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Testing Machine).....	47
3.3 การควบคุมพารามิเตอร์ของการแล่นประสาน.....	47
3.4 การออกแบบการทดลอง.....	49
3.4.1 การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial 2 <sup>k</sup> .....	49
3.5 การตรวจสอบคุณภาพของงานแล่นประสาน.....	51
3.5.1 ตรวจสอบรอยต่อด้วยสายตา (Visual Inspection).....	51
3.5.2 การเตรียมการเพื่อทำการทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	51
3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าผลตอบสนอง (Output).....	54
3.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างจุดภาค.....	54
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน</b>	
4.1 การเปรียบเทียบลักษณะของรอยเชื่อม.....	55
4.2 การวัดค่าตอบสนอง (Output).....	59
4.3 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมมินิแทบ (MINITAB).....	61
4.3.1 การทดสอบสมมติฐานเพื่อคัดเลือกปัจจัยโดยใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียล.....	61
(Factorial Design)	
4.3.1.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residual).....	61
4.3.1.2 แผ่นการตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง.....	63
4.3.1.3 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง.....	63
4.3.1.4 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability).....	65
4.3.2 การคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง (Screening).....	66
4.3.3 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Respond Surface Analysis) เพื่อหาสมการการถดถอย.....	69
(Regression Analysis)	
4.3.3.1 การทดสอบสมมติฐานในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง.....	69
4.3.3.2 การวิเคราะห์หาสมการการถดถอย (Regression Analysis).....	73
4.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุดภาค.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของการใช้แก๊สอาร์กอน.....	17
ตารางที่ 2.2 อัตราการไหลของแก๊สคลุมที่ใช้ในกระบวนการ GMAW.....	17
ตารางที่ 2.3 ข้อตกลงเบื้องต้นและผลของการละเมิดข้อตกลงเบื้องต้นในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ.....	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 แสดงการกำหนดตัวแปรลงในโปรแกรมมินิแทบ.....	61
ตารางที่ 4.3 แสดงค่า P-Values จากตาราง Estimated Effects and Coefficients.....	67
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA).....	67
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการในรูปเส้นตรง.....	73

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การแทรกตัวของลวดเคมเข้าไปในช่องรอยต่อ.....	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 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบฟลัส.....	12
รูปที่ 2.13 รูปแบบกระแสพัลส์ของการเชื่อมแบบ GMAW-P.....	13
รูปที่ 2.14 ระหว่างระยะการหลอมลึกลงของลวดเคมขนาดต่างกันเมื่อกระแสเท่ากัน.....	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1. ที่มาและปัญหาของโครงการ

รถยนต์เป็นสินค้าอุตสาหกรรมที่ประเทศไทยผลิตและส่งออกเป็นจำนวนมาก และมีมูลค่าการส่งออกที่สูงมากในแต่ละปี เช่น ในปี 2551 มีมูลค่าการส่งออกมากกว่าห้าแสนล้านบาท [1] และเนื่องจากปัญหาราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นที่ทุกประเทศในโลกกำลังเผชิญอยู่ในปัจจุบัน การลดอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงของรถยนต์จึงอยู่ในความสนใจเป็นอย่างมากของนักวิจัยในสาขาต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการผลิตรถยนต์ วิธีหนึ่งที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถใช้ลดอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงของรถยนต์ได้ คือ การลดน้ำหนักของรถยนต์โดยนำวัสดุที่มีน้ำหนักเบามาใช้แทนชิ้นส่วนเหล็กกล้าที่ใช้ในส่วนต่างๆของรถยนต์ วัสดุเหล่านี้ ได้แก่ อลูมิเนียม พลาสติก และ วัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) อย่างไรก็ตามข้อจำกัดบางประการของวัสดุเหล่านี้ เช่น ในเรื่องของราคา หรือ คุณสมบัติ ทำให้ไม่สามารถนำวัสดุเหล่านี้มาทดแทนเหล็กกล้าในรถยนต์ได้ทั้งหมด จึงยังมีความจำเป็นที่ต้องใช้วัสดุเหล่านี้ร่วมกับเหล็กกล้าอยู่ ดังนั้นการเชื่อมประสาน (Joining) วัสดุเหล่านี้เข้ากับเหล็กกล้าจึงมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับรถยนต์ที่ต้องการลดอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิง นอกจากนี้การลดอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงของรถยนต์ยังช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมโดยการลดมลพิษในอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงอีกด้วย

อลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีศักยภาพเป็นอย่างมากในการนำมาใช้ร่วมกับเหล็กกล้าในส่วนต่างๆของรถยนต์เนื่องจากเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา ทนต่อการเกิดสนิมได้ดี และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [2, 3] แต่ปัญหาสำคัญในการนำอลูมิเนียมมาใช้ร่วมกับเหล็กกล้า คือ การเชื่อมประสานวัสดุสองชนิดนี้เข้าด้วยกันทำได้ยาก และสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compounds) ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมประสานโลหะสองชนิดนี้เป็นสารประกอบที่มีความแข็งแรงและความเปราะสูงมาก เช่น  $Fe_2Al_3$  ที่มีค่าความแข็งแรงถึง 1050 HV หรือ  $FeAl_3$  ที่มีค่าความแข็งแรงถึง 900 HV [3, 4] ซึ่งสารประกอบเชิงโลหะเหล่านี้จะทำให้รอยเชื่อมประสานที่เกิดขึ้นเกิดการแตกหักเสียหายได้ง่ายเมื่อเผชิญกับความเค้น และเนื่องจากความเชื่อถือได้ (Reliability) ของรอยเชื่อมประสานเหล่านี้มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินของผู้ขับขี่รถยนต์ ดังนั้นการลดปริมาณการเกิดสารประกอบเชิงโลหะเหล่านี้จึงเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถลดโอกาสการเกิดความเสียหายของรอยเชื่อมประสานได้ [5, 6]

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการเชื่อมประสานอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กกล้าโดยใช้วิธีการเชื่อมประสานแบบมิก (MIG brazing) ซึ่งเป็นวิธีการเชื่อมประสานที่ผสมกันระหว่างการเชื่อมประสาน (Brazing) และการเชื่อมแบบมิก (Metal inert gas welding) ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการเชื่อมประสานแบบมิกที่มีผลต่อความสมบูรณ์และรูปร่างของรอยเชื่อม คุณสมบัติทางกล (ความแข็งแรงของรอยเชื่อม) และการเกิดโครงสร้างจุลภาคภายในรอยเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดสารประกอบเชิงโลหะชนิดต่างๆ โดยตัวแปรที่จะทำการศึกษา ได้แก่ ความเร็วในการเชื่อมประสาน (Travel speed) ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน (Nozzle to work distance) และมุมงาน (Work angle) โดยให้แรงดันไฟฟ้า (Voltage) กระแสไฟฟ้า (Current) อัตราการป้อนลวด (Wire feed rate) และอัตราการไหลของแก๊สคลุม (Gas flow rate) เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

flow rate) มีค่าคงที่ ซึ่งผลจากงานวิจัยนี้จะเป็นองค์ความรู้ทางการเล่นประสานและ โลหะวิทยาของการเล่นประสานแบบมิกระหว่างอลูมิเนียมกับเหล็กกล้าที่มีประโยชน์สำหรับภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ของประเทศ

## 1.2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการเล่นประสานแบบมิกกับความสมบูรณ์และรูปร่างของรอยเชื่อม
2. เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการเล่นประสานแบบมิกที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล คือ ความแข็งแรงของรอยเชื่อม
3. เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการเล่นประสานแบบมิกที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและการเกิดสารประกอบเชิงโลหะภายในรอยเชื่อม

## 1.3. ขอบเขตของโครงการ

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการเล่นประสานแบบมิกระหว่างแผ่นอลูมิเนียม (A1 5052) กับแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนเคลือบสังกะสี (Galvanized steel) ภายใต้บรรยากาศแก๊สอาร์กอน (Ar) โดยใช้รอยต่อแบบต่อเกย (Lap joint) และใช้โลหะเติม Al-Si แบบลวดในการเชื่อมประสาน

## 1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการวิจัยที่ได้คาดว่าจะสามารถตีพิมพ์เผยแพร่ได้ทั้งในการประชุมวิชาการ และวารสารวิชาการ ทั้งในระดับชาติและนานาชาติ รวมทั้งผลการวิจัยที่ได้จะเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญทางการเล่นประสานและ โลหะวิทยาของการเล่นประสานแบบมิก และเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญของอุตสาหกรรมยานยนต์หรืออุตสาหกรรมอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

## บทที่ 2

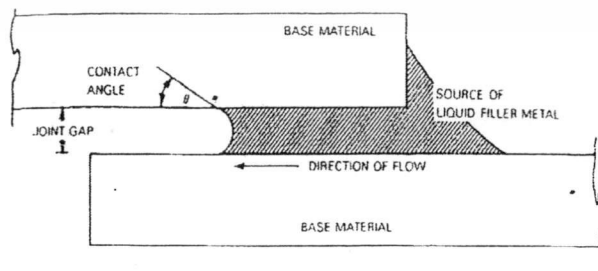
### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการประสานรอยต่อแผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสี

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

#### 2.2 การแล่นประสาน

การแล่นประสาน (Brazing) [6] เป็นการประสานรอยต่อ โดยใช้ลวดเติมที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า  $450^{\circ}\text{C}$  แต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะงาน โลหะเติมจะเกิดการแทรกตัวเข้าไปในช่องรอยต่อด้วยแรงปฏิกิริยาดึงดูด (Capillary Attraction) ปฏิกิริยา Capillary Attraction [7] เป็นความสามารถของของเหลวที่สามารถไหลเข้าไปในซอกแคบ ๆ หรือ รูเล็ก ๆ ในทิศทางต้านแรงโน้มถ่วงโลก ในการแล่นประสานรอยต่อนั้น ลวดเติมที่หลอมจะทำหน้าที่ไหลแทรกเข้าไปในช่องรอยต่อของชิ้นงานสองชิ้นดังปรากฏในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การแทรกตัวของลวดเติมเข้าไปในช่องรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
3  
ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 กระบวนการเชื่อมประสาน

กระบวนการเชื่อมประสาน สามารถแบ่งตามกระบวนการให้ความร้อน ออกเป็นหลายวิธี [6, 7] ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้ประกอบด้วย

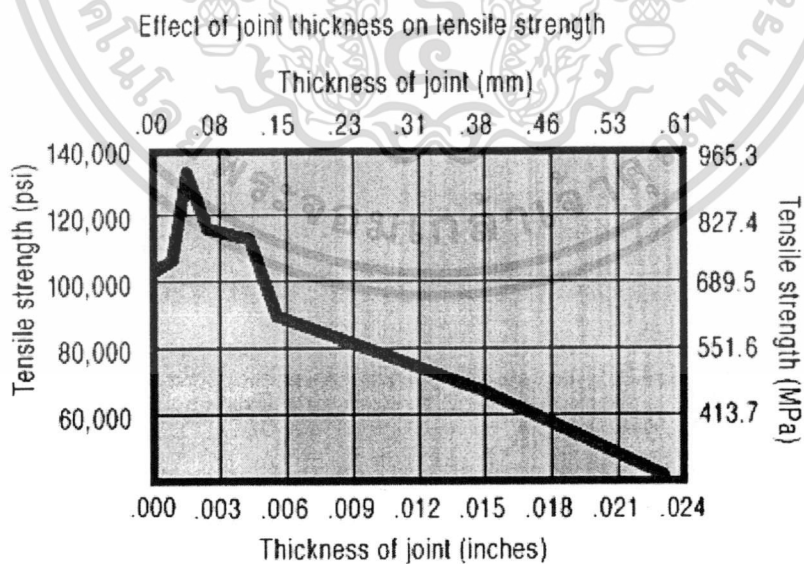
- 1) การเชื่อมประสานด้วยหัวเชื่อมแก๊ส (Torch Brazing)
- 2) การเชื่อมประสานในเตา (Furnace Brazing)
- 3) การเชื่อมประสานโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Brazing)
- 4) การเชื่อมประสานด้วยการจุ่ม (Dip Brazing)
- 5) การเชื่อมประสานด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared Brazing)

สำหรับในที่นี้จะไม่ขอกล่าวถึงรายละเอียดในแต่ละวิธี โดยการเลือกใช้วิธีใดนั้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของชิ้นงาน

### 2.2.2 องค์ประกอบในการเชื่อมประสาน

ในการเชื่อมประสานแต่ละครั้งจะมีองค์ประกอบต่างๆที่ต้องพิจารณาดังนี้

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



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะห่างของช่องรอยต่อกับค่าความแข็งแรงทางการดึง [8]

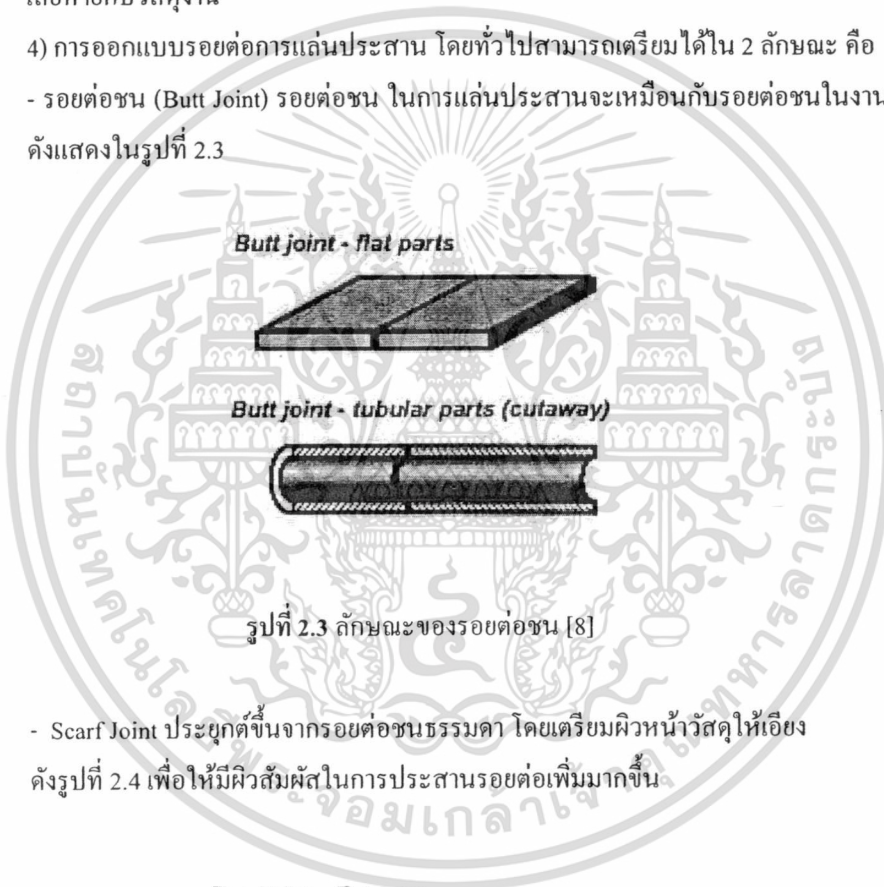
จากรูปที่ 2.2 ระยะห่างของช่องรอยต่อที่แคบ จะมีค่าความแข็งแรงทางการดึง (Tensile Strength) มากกว่าระยะห่างของช่องรอยต่อที่กว้าง ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า เมื่อค่าระยะห่างของช่องรอยต่อมากขึ้นค่าความแข็งแรงทางการดึงจะลดลง

3) การเลือกขนาดเติมที่เหมาะสม มีสิ่งที่ควรพิจารณาดังต่อไปนี้

- ความเหมาะสมกับวัสดุงานและการออกแบบรอยต่อ
- สภาพการใช้งาน เช่น แรงกระทำ อายุการใช้งาน สภาพการกัดกร่อน
- อุณหภูมิที่ต้องการ การแล่นประสานต้องการอุณหภูมิต่ำเพื่อให้เกิดความร้อนน้อยที่สุด
- วิธีการให้ความร้อน ต้องเลือกวิธีการให้ความร้อน ให้เหมาะสมกับวัสดุงานเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับวัสดุงาน

4) การออกแบบรอยต่อการแล่นประสาน โดยทั่วไปสามารถเตรียมได้ใน 2 ลักษณะ คือ

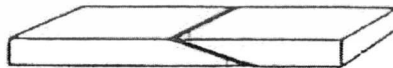
- รอยต่อชน (Butt Joint) รอยต่อชน ในการแล่นประสานจะเหมือนกับรอยต่อชนในงานเชื่อมทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะของรอยต่อชน [8]

- Scarf Joint ประยุกต์ขึ้นจากรอยต่อชนธรรมดา โดยเตรียมผิวหน้าวัสดุให้เอียง ดังรูปที่ 2.4 เพื่อให้มีผิวสัมผัสในการประสานรอยต่อเพิ่มมากขึ้น

Scarf joint - flat parts

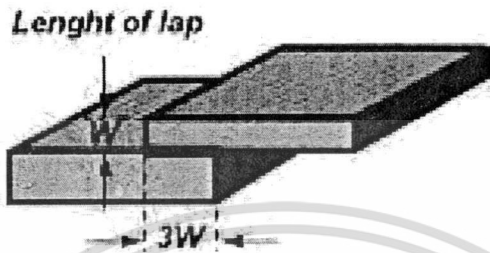


Scarf joint - tubular parts (cutaway)



รูปที่ 2.4 ลักษณะของรอยต่อ Scarf joint [9]

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



รูปที่ 2.5 ลักษณะของรอยต่อที่ใช้ในการเล่นประสาน [9]

การออกแบบรอยต่อ เพื่อให้ได้รอยต่อในการเล่นประสานที่แข็งแรงที่สุด โดยใช้วัสดุเสริมที่น้อยที่สุด สามารถคำนวณระยะเกยจากการคำนวณระยะเกยสำหรับงานแผ่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

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

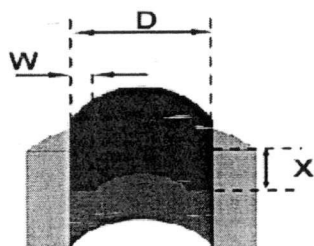
X = Length of lap

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



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
6  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$X$  = 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) ข้อดีของการแล่นประสานเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมด้วยวิธีอื่นมีดังนี้

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

การแล่นประสานที่ใช้งานมากที่สุด คือการแล่นประสานด้วยหัวเชื่อมแก๊ส เนื่องจากไม่ยุ่งยาก แต่ในปัจจุบันวิธีการแล่นประสานอีกวิธีหนึ่ง ที่มักจะนำมาใช้งานต่าง ๆ คือ การแล่นประสานด้วยมิกโดยจะกล่าวในตอนต่อไป

### 2.3 การแล่นประสานด้วยมิก (Metal Inert Gas Brazing)

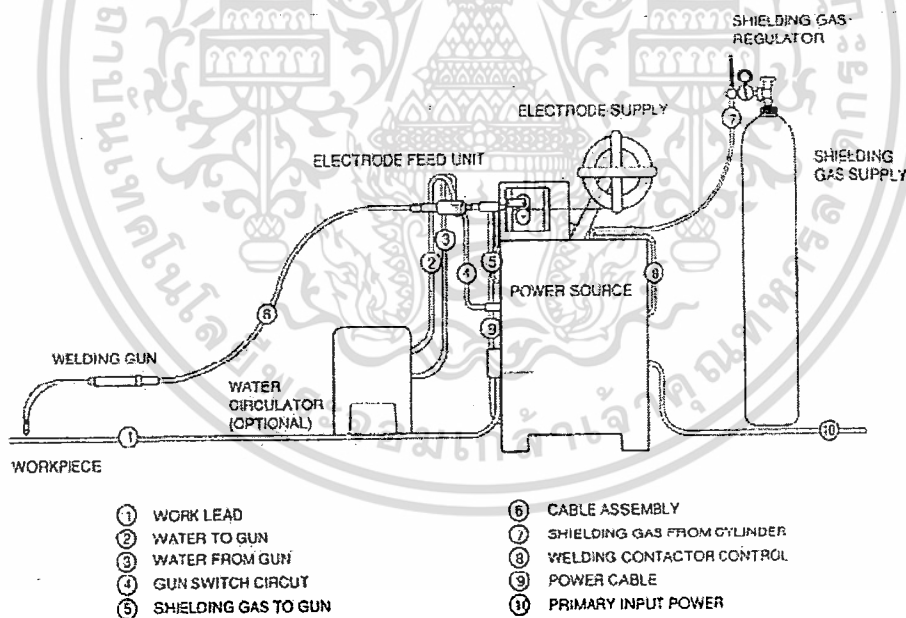
MIG-Brazing เป็นกระบวนการประสานโลหะที่อาศัยหลักการของกระบวนการเชื่อมมิก และการแล่นประสานรวมกัน โดยนำข้อดีของทั้งสองกระบวนการมารวมไว้ด้วยกัน MIG-Brazing ใช้หลักการพื้นฐานของการเชื่อมโลหะด้วยเส้นลวดตันภายใต้แก๊สคลุมแบบพัลส์ (Pulsed Gas Metal Arc Welding : GMAW-P) กระบวนการดังกล่าวถูกออกแบบ ให้กระแสเชื่อมมีพลังงานเพียงเปิดผิวเคลือบของโลหะงานตรงบริเวณรอยต่อ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

#### 2.3.1 การเชื่อมแบบ GMAW-P บนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี

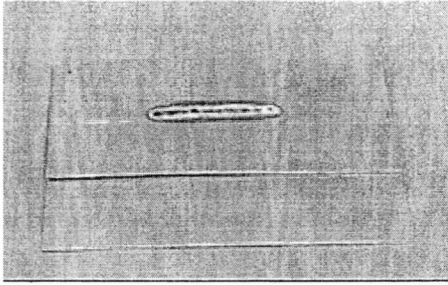
เป็นการเชื่อมโลหะด้วยเส้นลวดตันภายใต้แก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding) ซึ่งจะมีการเรียกชื่อแตกต่างกัน ตามแก๊สที่ใช้ปกคลุมรอยเชื่อม โดยการเชื่อมมิก (MIG: Metal Inert Gas Arc Welding) จะใช้แก๊สเฉื่อยใน

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

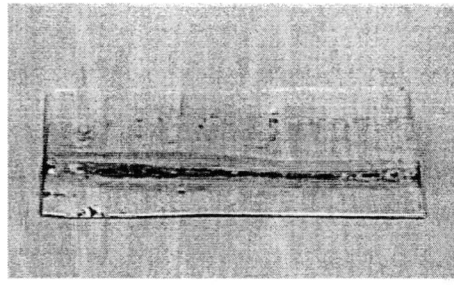
การเชื่อมมิก (MIG welding) [10] ลวดเติมจะหลอมเหลว และเติมเนื้อโลหะเชื่อม สร้างเป็นแนวเชื่อมเหมือนกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ทั่วไป เพียงแต่กระบวนการเชื่อมมิกนั้น ใช้แก๊สปกป้องแทนฟลักซ์ ทำให้รอยเชื่อมที่ได้ไม่มีสแลก (Slag) ลวดเติมจะถูกป้อนไปตามท่อนำลวดผ่านไปยังหัวเชื่อม ที่หัวเชื่อมจะมีท่อนำกระแส (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 โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดการสึกกร่อนก็ยิ่งมากขึ้น 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

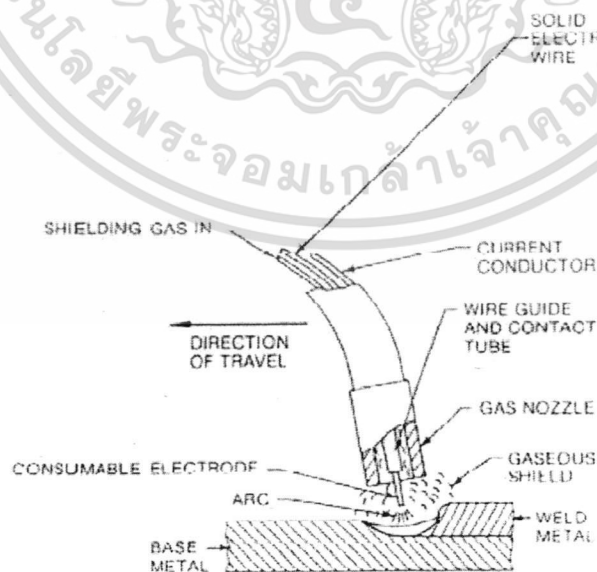
รูปที่ 2.7 แสดงแนวเชื่อมที่ใช้กระบวนการเชื่อมแบบ MIG-Brazing และ MIG [13]

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 จะทำให้ลวดเติมและโลหะชิ้นงานเกิดการหลอมเหลว ปลายของลวดเติมส่วนที่หลอมจะถูกถ่ายโอนผ่านการอาร์คเข้าสู่บ่อหลอมเหลว ซึ่งบ่อหลอมเหลวจะถูกปกป้องโดยแก๊สที่ออกจากหัวฉีดดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเกิดอาร์คของกระบวนการประสานด้วยมิก [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

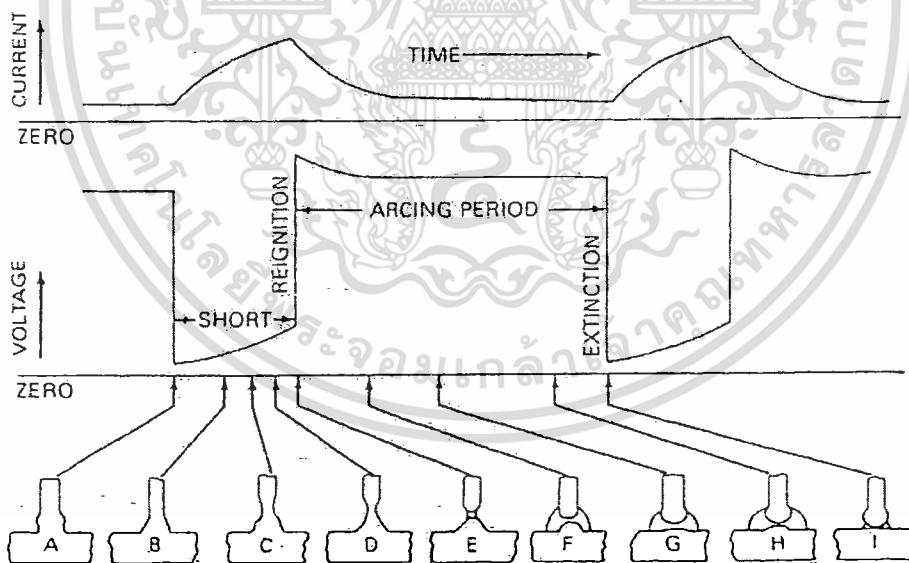
จากรูปที่ 2.8 พบว่าจะเกิดการเกิดอาร์คขึ้น ระหว่างปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ซึ่งลวดเชื่อมจะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรด ที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็น โลหะประสาน

## 2.4 การถ่ายโอนน้ำโลหะ (Metal Transfer)

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

### 2.4.1 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร (Short circuit transfer)

วัฏจักรการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร จะเริ่มต้นเมื่อปลายของลวดเดิมและโลหะงานถูกทำให้เกิดการอาร์คและมีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้ปลายลวดเดิมเกิดการหลอมเหลวเป็นหยดน้ำโลหะขนาดเล็กขณะเดียวกันลวดเดิมจะถูกป้อนเข้าสู่บ่อหลอมละลายด้วยอัตราเร็วสูง ทำให้หยดน้ำโลหะที่ปลายลวดเดิมสัมผัสกับบ่อหลอมเหลว ก่อนที่จะแยกออกจากปลายของลวดเดิม และเกิดการลัดวงจร (Short Circuit) การอาร์คจะดับไปชั่วขณะ ในจังหวะที่เกิดการลัดวงจร กระแสจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ปลายของลวดเดิมที่หลอมเป็นหยด จะถูกตัดออกแล้วถ่ายโอนสู่บ่อหลอมเหลวด้วยแรงโน้มถ่วง และแรงตึงผิว



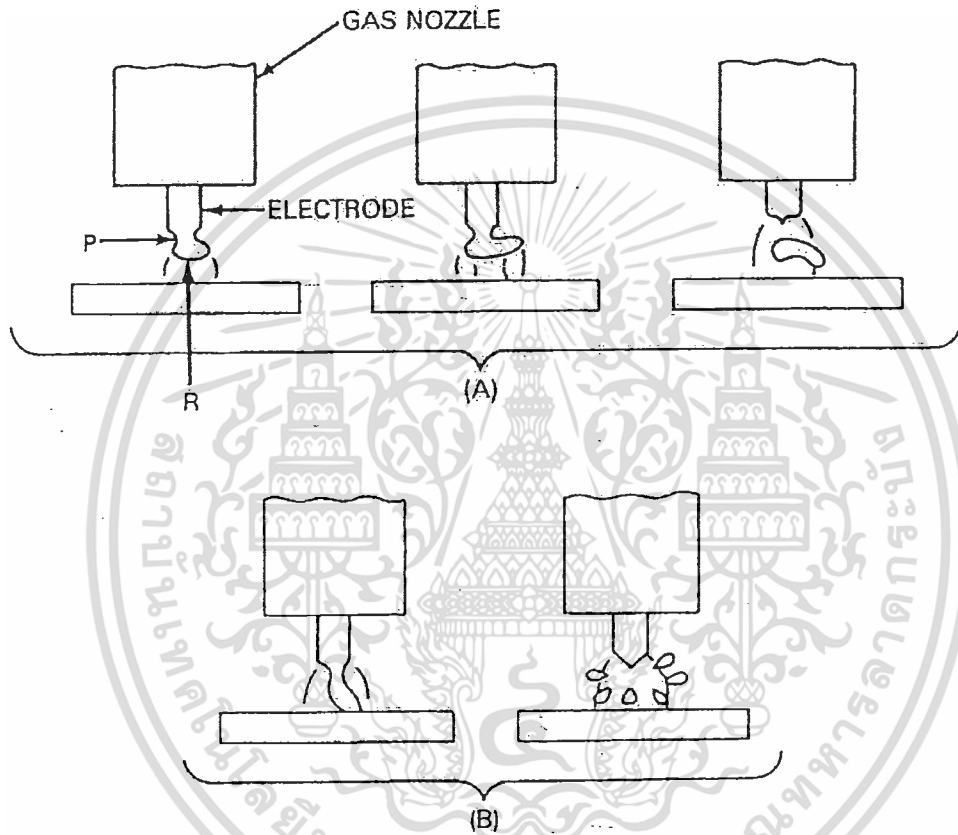
รูปที่ 2.9 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร [14]

### 2.4.2 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดน้ำขนาดใหญ่ (Globular Transfer)

การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดน้ำขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2.10 วัฏจักรการถ่ายโอนจะเริ่มต้นเมื่อปลายของลวดเดิมถูกหลอมเป็นหยดน้ำโลหะ และหยดน้ำโลหะนี้จะหลุดจากปลายของลวดเดิม แล้วถ่ายโอนผ่านอาร์คสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
10  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บ่อหลอมเหลวด้วยแรงโน้มถ่วง และแรงตึงผิว ซึ่งจะทำให้มีอัตราการเติมเนื้อโลหะมากและมีความร้อนสูงกว่าการส่งถ่ายไอออนน้ำโลหะแบบลัดวงจร กระแสและแรงดันเชื่อม ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนแบบหยดน้ำขนาดใหญ่นี้จะต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังสูงกว่าการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร พฤติกรรมการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบนี้ จึงมีกระแสเชื่อมอยู่ระหว่าง 165-240 แอมป์ อัตราการถ่ายโอนน้ำโลหะต่อวินาทีที่กระแสต่ำจะมีเพียง 2-3 หยดเท่านั้น ขณะที่หยดน้ำโลหะขนาดเล็กจำนวนมากถูกถ่ายโอนไปก่อนแล้วตอนที่กระแสเพิ่มสูงขึ้น การส่งถ่ายไอออนน้ำโลหะเมื่อหยดน้ำโลหะขนาดโตพอแล้ว ก็จะแยกตัวออกจากปลายลวดถ่ายโอนผ่านอาร์คสู่บ่อหลอมเหลว หยดน้ำโลหะจะมีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ

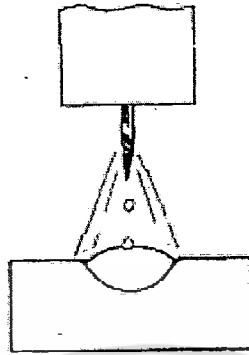


รูปที่ 2.10 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดขนาดใหญ่ [14]

#### 2.4.3 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง (Spray Transfer)

การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง เป็นดังรูปที่ 2.11 วัฏจักรการถ่ายโอนจะเริ่มขึ้นเมื่อปลายของลวดเติมถูกหลอมเหลวแล้วก่อตัวเป็นหยดน้ำโลหะขนาดเล็ก หรือเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเติม หยดน้ำโลหะจะรีเวเล็กตรงส่วนที่ต่ออยู่ระหว่างปลายลวดเติม และหยดน้ำนี้จะแตกตัว หรือหลุดออกจากปลายลวดเติม ด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro Magnetic Forces) หยดน้ำโลหะถูกถ่ายโอนอย่างรวดเร็ว ผ่านพลาสมาอาร์คสู่บ่อหลอมเหลว อย่างคงที่ และต่อเนื่องตลอดเวลาที่กระแสยังไหลผ่านลวดเติมอยู่ วัฏจักรการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละอองนี้ ต้องใช้ความหนาแน่นของกระแสสูงเพื่อให้ลวดเติมหลอมเป็นหยดขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเติมอย่างรวดเร็ว

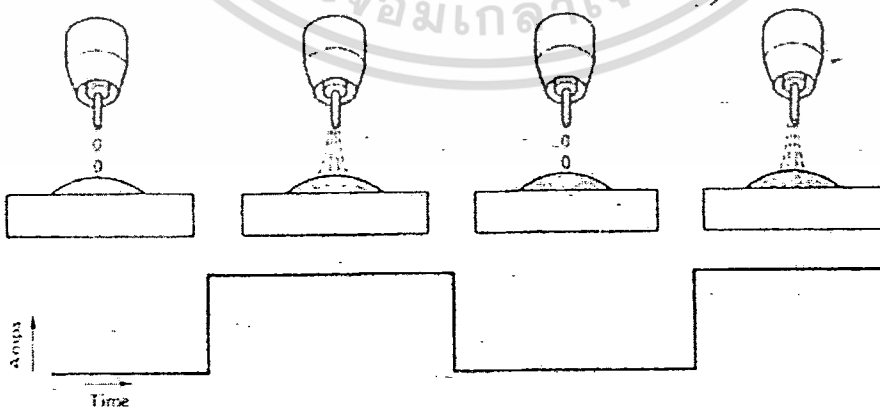
หยดน้ำโลหะที่มีขนาดเล็กนี้ จะไม่มีผลต่อเสถียรภาพของการอาร์ค ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่งานสูง แม้ลวดเติมจะมีขนาดใหญ่ก็สามารถหลอมเหลวเป็นหยดขนาดเล็กได้ทันที ซึ่งส่งผลให้เกิดการหลอมลึกของรอยต่อประสานมาก



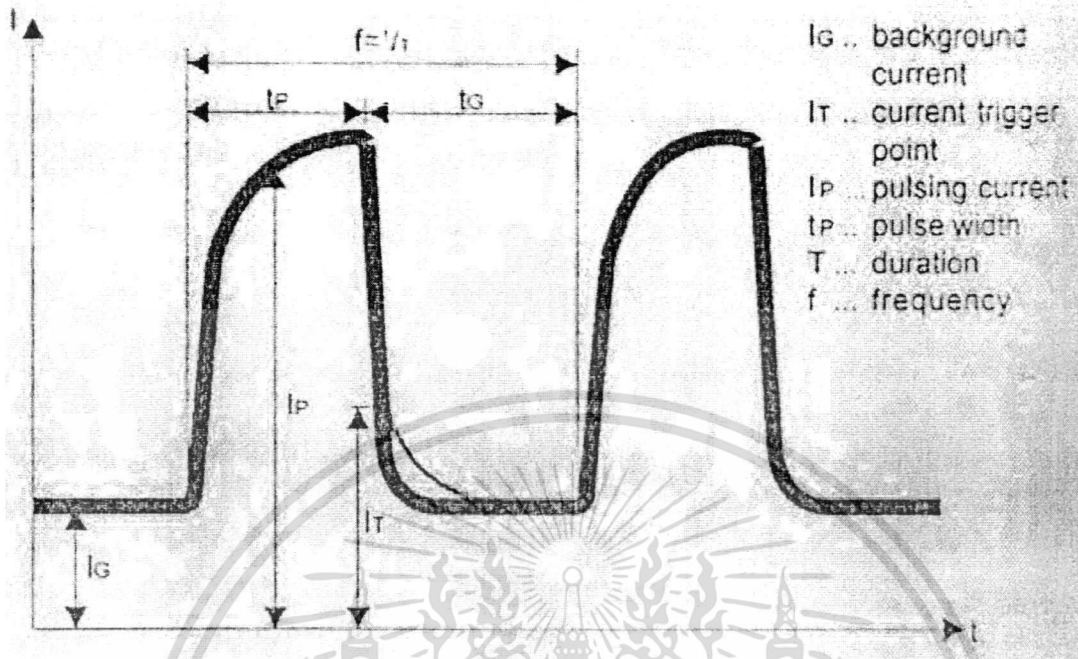
รูปที่ 2.11 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง [14]

#### 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 จังหวะการเกิดพัลส์แต่ละครั้ง จะทำให้ปลายลวดเป็นหยดน้ำโลหะได้หนึ่งหยด แล้วถ่ายโอนผ่านอาร์คสู่บ่อหลอมเหลวด้วยความถี่ที่สม่ำเสมอต่อเนื่องกันไปอย่างเป็นระเบียบ การถ่ายโอนหยดน้ำโลหะจะเกิดขึ้นเมื่อการเกิดพัลส์กระแสถึงระดับสูงสุด หลังจากถ่ายโอนน้ำโลหะแล้วกระแสจะลดลงต่ำสุดตามที่ตั้งไว้ กระแสต่ำจะช่วยให้เกิดการอาร์คอยู่ตลอดเวลา ช่วงจังหวะนี้การถ่ายโอนน้ำโลหะจะไม่เกิดขึ้น การเกิดพัลส์ของกระแสสูงแล้วลดลงจะมีผลต่อการควบคุมปริมาณความร้อนที่เข้าสู่งานซึ่งความร้อนที่เข้าสู่งานจะมีน้อยกว่าการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง จึงเหมาะกับการประสานงานบาง ทุกตำแหน่งเชื่อมได้ง่าย การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบพัลส์มีรูปแบบกระแสพัลส์ที่เกิดจาก Power Source ซึ่งจะมียุคประกอบดังรูปที่ 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 อยู่ในระหว่างการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง โดยสามารถควบคุมขนาดของหยดน้ำโลหะและระยะอาร์คที่สั้นลงได้ ในขณะที่กระแสสูงสุดมีค่าสูงมาก ในกรณีที่ระยะอาร์คมีความห่าง ขนาดของหยดน้ำโลหะจะมีขนาดโต ซึ่งอาจทำให้หยดน้ำโลหะกระเด็นออกจากบ่อหลอมเหลว แล้วกลายเป็นหยดน้ำโลหะที่เป็นละอองหรือเม็ดของหยดน้ำ
- กระแสต่ำสุด (Background Current :  $I_G$ ) หรือ Low Current Pulse เป็นช่วงที่มีการรักษาการอาร์คไว้ให้ต่อเนื่อง และช่วยให้ปลายของลวดเดิมนั้นร้อนและรักษาอาการอาร์คเอาไว้ ซึ่งช่วงกระแสต่ำนี้ พลังงานที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถทำให้ลวดเดิมหลอมเหลวได้และไม่มีการถ่ายโอนน้ำโลหะ อย่างไรก็ตามในกรณีที่กระแสอยู่ในช่วงกระแสต่ำ ถ้าปลายลวดเดิมนั้นสัมผัสกับวัสดุงานแล้วเกิดการอาร์คก็จะเกิดการถ่ายโอนน้ำโลหะ ซึ่งมีแนวโน้มเป็นการถ่ายโอนที่เกิดขึ้นแบบลัดวงจร ฉะนั้นการควบคุมอัตราการป้อนลวด จะเป็นตัวเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของกระแสไฟเชื่อม นอกจากนั้นยังต้องการควบคุมระยะขึ้นของลวดเดิมนั้นควบคู่กันไปด้วย เพื่อรักษาการระยะอาร์คและแรงดันอาร์คให้คงที่

- เวลากระแสสูงสุด (Peak Time : tp) หรือ Pulse Width เป็นช่วงที่ควบคุมขนาดของหยดน้ำโลหะ ช่วงเวลากระแสสูงสุดจะมีเวลานั้นมาก ซึ่งจะทำให้หยดน้ำโลหะเกิดขึ้นหนึ่งหยดต่อพัลส์ แต่ถ้าเวลากระแสสูงสุดเพิ่มขึ้น การถ่ายโอนของหยดน้ำโลหะก็จะยิ่งมีมากกว่าหนึ่งหยดต่อพัลส์ ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้หยดน้ำโลหะกระเด็นออกจากบ่อหลอมเหลว

- ความถี่พัลส์ (Pulse Frequency : f) ความถี่พัลส์จะเป็นตัวควบคุมการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะ การปรับความถี่พัลส์ ก็เพื่อให้ได้การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหนึ่งหยดต่อพัลส์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการควบคุมช่วงเวลากระแสสูงและช่วงเวลากระแสต่ำ และสามารถปรับค่ากระแสสูงและกระแสต่ำให้ความสัมพันธ์กับความเร็วในการป้อนลวด เพื่อให้ได้การถ่ายโอนน้ำโลหะเป็นแบบหนึ่งหยดต่อพัลส์และขนาดของหยดน้ำโลหะมีความสม่ำเสมอและเป็นระเบียบ

เทคนิคการประสานด้วยกระแสพัลส์ (Pulse Arc) ได้รับการพัฒนาตั้งแต่ปี 1970 และต่อมาได้เรียกว่าการประสานแบบไซเนอจิก ซึ่งเป็นการทำงานแบบควบคู่กันของพารามิเตอร์ทั้งระบบ กระบวนการ GMAW-P เป็นการทำงานที่ควบคู่หรือสัมพันธ์กันระหว่าง 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] จะขึ้นอยู่กับวิธีการโอนถ่ายวงจรไฟฟ้าอย่างแม่นยำสูง โดยระบบจะทำการควบคุมช่วงการอาร์ค ผลลัพธ์ของอุณหภูมิที่ได้จะอยู่ในรูปแบบสลับกันคือ "ร้อน-เย็น-ร้อน-เย็น" ใน 1 จังหวะ "ร้อน-เย็น" นั้นจะขึ้นอยู่กับระบบของแรงดัน อาร์ค ขณะที่อยู่ในช่วงอาร์คแบบปกติ หัวอิเล็กโทรดกำลังเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลว ณ ขณะนั้น หัวเชื่อมทำการจุ่มลงบนแผ่นเชื่อม และเกิดการหลอมละลายอย่างรวดเร็ว ในขณะที่แรงดันอาร์คที่สูง ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่คงที่สูง ทำให้ระบบอัตโนมัติขั้นหรือระบบหุ่นยนต์สามารถนำมาใช้ได้ในส่วนนี้ได้

ส่วนระบบการเคลื่อนที่ของลวดเชื่อมจะนำมาจากการคำนวณจากการอินทิเกรต จากกระบวนการเชื่อมโดยดูจากการละลายหัวเชื่อมของอุณหภูมิที่เหมาะสม ทุกๆช่วงเวลาของการตัดวงจรไฟฟ้า ระบบควบคุมดิจิทัล จะทำการประมวลผลเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับ ระยะหัด เข้า- ออก ของลวดเชื่อม การหัด เข้า- ออก ลวดเชื่อม มีความถี่อยู่ที่ 70 Hz การเคลื่อนที่ของลวดเชื่อมแบบนี้จะทำให้เกิดการแยกออกจากรอยเชื่อมขณะที่เกิดลวดวงจรอยู่

ตามความเป็นจริงพลังงาน ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนจะทำให้คุณสมบัติ และผลข้างเคียงของการเชื่อมอาร์ค มีผลมาก ดังนั้นการใส่ความร้อนที่น้อยจึงมีข้อดีคือ เกิดการบิดตัวของชิ้นงานต่ำ ข้อต่อรอยเชื่อมจึงมีคุณภาพสูง จึงทำให้เชื่อมชิ้นงานที่มีความบางได้ รวมทั้งมีความสามารถในการเชื่อมระหว่างเหล็กชุบสังกะสีกับอะลูมิเนียมได้

## 2.6 ตัวแปรในการประสานรอยต่อ

ตัวแปรในการประสานรอยต่อเกี่ยวข้องกับการควบคุมกระบวนการรวมถึงคุณภาพของรอยต่อ การเลือกตัวแปรที่เหมาะสม จะช่วยให้การประสานรอยต่อมีคุณภาพ ซึ่งตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดังกล่าวสามารถจำแนกได้ดังนี้

### 2.6.1 ลวดเติม (Filler Metal)

ลวดเติมที่ใช้กับกระบวนการ GMAW ต้องมีความบริสุทธิ์ทางเคมีสูง การเลือกลวดเติมที่ถูกต้องจะช่วยป้องกันไม่ให้ความบกพร่องที่เกิดขึ้นกับรอยต่อน้อยที่สุด สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่ง คือความต้านแรงดึงของลวดเติม ซึ่งถูกกำหนดจากความต้านทานแรงดึงของเนื้อโลหะประสาน ดังนั้นจึงต้องเก็บรักษาลวดเติมให้ถูกต้อง

1) การเลือกใช้ลวดเติม มีสิ่งที่ต้องพิจารณาดังนี้ [14, 15, 17]

- คุณสมบัติทางกลของโลหะงานลวดเติมที่เลือกใช้ต้องมีความต้านทานแรงดึงที่เหมาะสมกับโลหะงาน ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดของการเชื่อมประสาน

- ส่วนผสมทางเคมีของโลหะงาน ต้องเหมาะสมกับส่วนผสมทางเคมีของลวดเติม ซึ่งตัวอย่างในงานวิจัยนี้มีวัสดุงานเป็นแผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสี ลวดเติมที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อน และใช้ความร้อนในการประสานต่ำ

2) ชนิดของลวดเติม ลวดเติมที่ใช้ในการประสานรอยต่อ จะต้องมีส่วนผสมทางเคมีเหมือนหรือใกล้เคียงกับโลหะงาน การเลือกลวดเติมและความหนาของวัสดุงานก็มีผลเช่นกัน

3) ขนาดของลวดเติม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเติมจะมีผลต่อความกว้างของรอยต่อ ระยะการหลอมลึก อัตราเร็วในการเชื่อมประสาน ลวดเชื่อม โดจะ ใช้กระแสสูงและให้อัตราเติมเนื้อโลหะมากกว่า อย่างไรก็ตาม ถ้าใช้กระแสเชื่อมที่ค่าใดค่าหนึ่ง ลวดเติมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าจะมีอัตราการเติมเนื้อโลหะมากกว่า การหลอมลึกมากกว่าเมื่อเทียบกับขนาดของลวดเติมที่โตกว่าดังรูปที่ 2.14 ดังนั้นการเลือกลวดเติมจึงขึ้นอยู่กับความหนาของงาน ระยะการหลอมลึก อัตราการเติมเนื้อโลหะ ตำแหน่งของรอยต่อ และลักษณะของรอยต่อในการเล่นประสานด้วย MIG-Brazing นั้นลวดเชื่อมที่ใช้อยู่จะมีอยู่หลายชนิด แต่ที่นิยมสำหรับการเล่นประสานเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี คือ ลวดทองแดง-ซิลิกอน: Copper-Silicon ( $\text{CuSi}_3$ ) สำหรับตารางลวดเติมมาตรฐาน ANSI/AWS.A5.7



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการหลอมลึกของลวดเติมขนาดต่างกันเมื่อกระแสเท่ากัน [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 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
- การเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ บริเวณผิวหน้ารอยต่อชิ้นงาน เช่น ปฏิกิริยาทำความสะอาดผิวชิ้นงาน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกต่าง ๆ
- การทำให้เกิดรูปแบบของการถ่ายโอนน้ำโลหะ (Metal Transfer) ในลักษณะต่าง ๆ เช่น ถ้าแก๊สคลุมเป็นคาร์บอน ไดออกไซด์ จะทำให้เกิดการถ่ายโอนน้ำโลหะเป็นแบบลัดวงจร (Short Circuiting) หรือแบบหยดขนาดใหญ่ แต่ถ้าแก๊สคลุมเป็นอาร์กอน ฮีเลียม หรืออาร์กอนผสมคาร์บอน ไดออกไซด์ จะทำให้เกิดการถ่ายโอนน้ำโลหะเป็นแบบสละอง (Spray Transfer)

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

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของการใช้แก๊สอาร์กอน [19]

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

อัตราการไหลของแก๊ส [20] จะมีผลต่อคุณภาพของรอยต่อ ซึ่งแก๊สที่ไหลผ่านหัวอิเล็กโทรดที่บริเวณรอยประสานรอยต่อต้องไหลแบบราบเรียบ หากเลือกใช้แก๊สที่มีอัตราการไหลสูงเกินไปจะทำให้การไหลของแก๊สเกิดการหมุนวน โดยแก๊สที่หมุนวนนี้จะผสมกับอากาศแล้วรวมตัวเข้ากับเนื้อโลหะประสานทำให้รอยต่อประสานสกปรก คุณสมบัติของรอยต่อลดลง หากแก๊สมีปริมาณน้อยจะทำให้รอยต่อมีรูพรุนโพรงอากาศ ดังนั้น จึงควรเลือกอัตราการไหลของแก๊สให้เหมาะสมกับกระบวนการ ไม่ควรมากหรือน้อยจนเกินไป อัตราการไหลของแก๊สที่ใช้ในกระบวนการแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อัตราการไหลของแก๊สที่ใช้ในกระบวนการ GMAW [20]

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

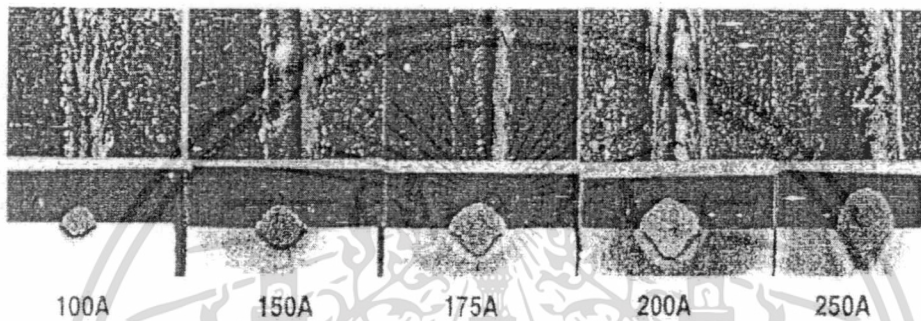
### 2.6.3 กระแสเชื่อม (Welding Current)

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

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

2) กระแสสลับและกระแสตรง (AC, DC) เป็นตัวแปรอีกตัวแปรหนึ่ง ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแล่นประสานด้วย GMAW โดยการต่อสายเชื่อมที่งานเป็นขั้วลบ (DCEP) จะใช้กันแพร่หลายในกระบวนการ GMAW เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อเอกสารนี้ รวมถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

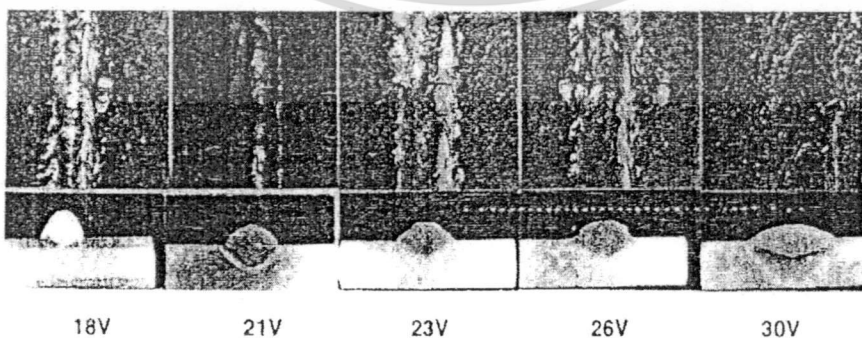
เพราะการอาร์คคงที่ การส่งถ่ายน้ำโลหะจะเสถียร การหลอมลึกดีกว่าส่วนการต่อสายเชื่อมแบบงานเป็นขั้วบวก (DCEN) ให้การหลอมลึกน้อย การส่งถ่ายน้ำโลหะส่วนใหญ่จะเป็นหยด สำหรับกระแสสลับจะไม่นิยมใช้ในกระบวนการนี้ แต่อาจใช้กระแสสลับความถี่สูงในการประสานอลูมิเนียมหรืออลูมิเนียมผสม กระแสสลับจะทำให้การอาร์คไม่เสถียร การเพิ่มปริมาณกระแสเชื่อม ทำให้อัตราการหลอมของลวดเติมเพิ่มขึ้น และทำให้อัตราการเติมเนื้อโลหะสู่รอยต่อเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ถ้ากระแสเชื่อมที่ใช้มีค่าน้อยเกินไป จะทำให้การถ่ายโอนน้ำโลหะเข้าสู่รอยเชื่อมช้า ทำให้การหลอมลึกของงานและแนวเชื่อมที่ได้ไม่สมบูรณ์ แต่ถ้าใช้กระแสสูงเกินไป จะทำให้ระยะเวลาการหลอมลึกมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ระดับต่างกัน [19]

#### 2.6.4 แรงดันอาร์ค (Arc Voltage)

แรงดันอาร์คหรือแรงดันเชื่อม หาได้จากความยาวอาร์คระหว่างปลายลวดเติมกับงาน แรงดันอาร์คที่ต้องการใช้งานจะขึ้นอยู่กับขนาดของลวดเติม ชนิดแก๊สคลุม ตำแหน่งการเชื่อม ชนิดของรอยต่อและความหนาของโลหะงาน ถ้าแรงดันอาร์คสูงเกินไปจะทำให้เกิดประกายไฟมาก เกิดรุพรุน ชิ้นงานมีการหลอมละลายมากยิ่งขึ้นและเกิดรอยกินลึกก้นขอบ (Undercut) ถ้าแรงดันอาร์คต่ำจะทำให้บ่อหลอมเหลวหนืด ชิ้นงานมีการหลอมละลายต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 อย่างไรก็ตามในกระบวนการ GMAW แรงดันอาร์คเป็นแบบคงที่ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามกระแสเล็กน้อย

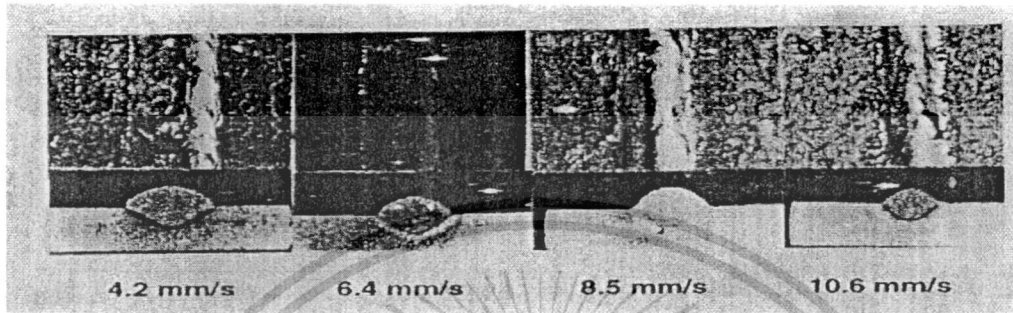


รูปที่ 2.16 ผลกระทบของแรงดันอาร์คที่มีต่อรอยประสาน [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
18  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.5 อัตราเร็วเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม (Welding Speeds : Travel Speeds)

เป็นอัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมต่อหนึ่งหน่วยเวลา อัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมจะถูกควบคุมโดยช่างเชื่อม กรณีการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติ หรือควบคุมด้วยกลไกจักรกล มีผลกระทบต่อระยะการหลอมลึกของรอยต่อ ขนาดของรอยต่อ ความต่อเนื่องของรอยต่อ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ผลกระทบจากอัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมที่ระดับต่างกัน [22]

จากรูปที่ 2.19 ตัวแปรทุกตัวเกี่ยวกัน อัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมเท่านั้นที่มีค่าเท่ากัน จะเห็นว่าถ้าลดอัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม หรือถ้าหัวเชื่อมเคลื่อนที่ช้าเกินไป จะเกิดรอยกินลึกที่ขอบแนวเชื่อม การเติมน้ำโลหะที่ไม่สม่ำเสมอก็ทำให้ความต่อเนื่องของรอยต่อไม่สมบูรณ์

## 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
19  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบูรณ์ ถ้าโครงการที่ทำการทดลองนี้มีความสำคัญอันดับรองลงมาอีกโครงการหนึ่ง ซึ่งทำให้ต้องมีการแบ่งใช้ทรัพยากรบางส่วนไป การแบ่งการทดลองเป็นส่วน ๆ ทำให้ผลการทดลองที่ได้มานั้น ยังสามารถนำไปใช้ได้ และเมื่อทรัพยากรที่ถูกแบ่งใช้ไปนั้นกลับคืนมาก็สามารถทำการทดลอง ได้เหมือนเดิมและดำเนินต่อจากตอนที่หยุดไว้ก่อนหน้านี้ การเตรียมการทดลองขึ้นอยู่กับลักษณะปัญหาที่กำลังเจอ และนี่เป็นขั้นตอนที่อาจจะต้องทำการ

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

### 2.7.2 การคัดเลือก (Screening)

ในงานพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมาก มีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุง การคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรนี้ [26] ทำให้สามารถจะพิจารณาเฉพาะที่ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้นได้ หรือ พิจารณาตามหลักการ ความสำคัญจำนวนน้อย “Vital Few” การคัดเลือกอาจจะสามารถทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสม (Optimal) ของตัวแปรนั้นๆ รวมทั้งบอกได้ว่าค่าตอบสนอง (Response) มีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งวิธีดังกล่าวต่อไป นี้ มักจะใช้ในการคัดเลือก

- 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] ที่มี ความสำคัญจำนวนน้อย (Vital-Few) ก็จะทำการศึกษาหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยเหล่านี้ ซึ่งค่าปัจจัยที่ดีที่สุดจะเป็นค่าอะไรขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการทดลองด้วย ตัวอย่างเช่น วัตถุประสงค์คือการหาค่า Yield ของกระบวนการที่มีค่ามากที่สุดและมีค่าความแปรปรวนของกระบวนการน้อยที่สุด

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

### 2.7.4 การทวนสอบ (Verification)

การทวนสอบเป็นการทำการทดลองซ้ำเพื่อดูว่าค่าที่วิเคราะห์มาเป็นค่าที่ดีที่สุดนั้น ยังคงให้ผลลัพธ์ที่ดีจริงๆ หรือไม่ตัวอย่างเช่น ทำการทดลองที่มีเงื่อนไขตามค่าที่หามาจากการหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อหาขนาดของช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยค่าตอบสนอง

## 2.8 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs)

### 2.8.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs)

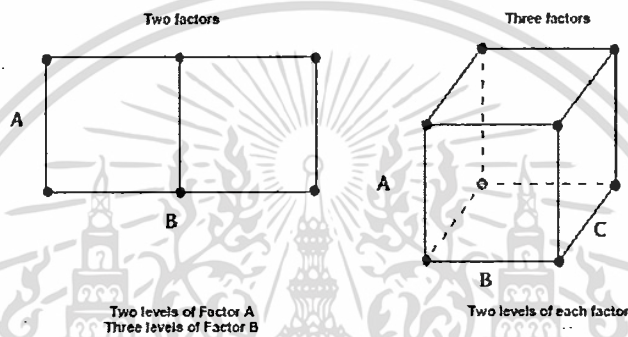
การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลจะสามารถทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการแลเกิดขึ้นพร้อมๆกันได้ เมื่อมีการทำการทดลอง ควรทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยไปพร้อมๆกันมากกว่าทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยตัวใดตัวหนึ่ง เพราะจะทำให้ได้งานที่มีประสิทธิภาพมากกว่าทั้งในเรื่องการประหยัดเวลาและต้นทุน และยังสามารถวิเคราะห์เรื่องอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยได้ด้วยโดยอิทธิพลร่วม (Interaction) คือ ผลของการที่ปัจจัยร่วมกันที่มีอยู่ในหลายๆกระบวนการ ถ้าไม่ได้ทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลอาจจะไม่เห็นผลของอิทธิพลร่วม (Interaction) ได้ชัดเจนนัก

### 2.8.2 การออกแบบเพื่อการคัดเลือก (Screening Design)

ในงานพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมาก มีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุงการคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรนี้ทำให้สามารถจะพิจารณาเฉพาะที่ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้น ได้ หรือ พิจารณาตามหลักการ ความสำคัญจำนวนน้อย “Vital Few” การคัดเลือกอาจจะสามารถทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสม (Optimal) ของตัวแปรนั้นๆ รวมทั้งทำการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) เพื่อบอก ว่าค่าตอบสนอง (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 และชุดข้อมูลทั้งหมดในทุกรันจะเรียกว่า 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 เงื่อนไขการทดลองซึ่งจะเป็นทุกๆ ค่าระดับของทุกปัจจัย ซึ่งอาจจะต้องมีการทำการทดลองจำนวนมากครั้ง ตัวอย่างเช่น การทดลองของ Two-Level Full Factorial ของ 6 ปัจจัย อย่างน้อยก็จะต้องมีการทดลองจำนวน 64 รัน หรือ กรณีที่มี 9 ปัจจัย จะมีการทดลองอย่างน้อย 512 รัน เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและต้นทุน อาจทำการออกแบบการทดลองให้มีการทำการทดลองเฉพาะบางเงื่อนไขตัวแบบ Factorial ที่มีการทดลองไม่ครบทุกเงื่อนไขนี้เรียกว่า Fractional Factorial Designs โปรแกรม Minitab สามารถสร้างตัวแบบ Fractional Factorial ได้จนถึงจำนวนปัจจัย 15 ตัวต่อหนึ่งการทดลอง

Fraction Factorial [26] มีความสำคัญอย่างมากในการทดลองเพื่อการคัดเลือกปัจจัย (Screening) เพราะว่ามีกรลดจำนวนรันลงจนเหลือขนาดการทดลองที่สามารถทำได้จริง รันที่ถูกเลือกมาทำการทดลองเป็นรันที่อยู่ในชุดการทดลองของตัวแบบ Full Factorial ซึ่งในกรณีที่ไม่ได้ทำการทดลองครบทุกเงื่อนไขของทุกปัจจัยจะทำให้เกิดผลอย่างหนึ่งซึ่งเรียกว่าคอนฟาวด์ (Confounded) ซึ่ง คอนฟาวด์ นี้หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยที่ไม่สามารถทำการประเมินค่าแยกออกมาได้เดี่ยวๆ และอาจเรียกว่าเป็น Aliased ที่อยู่ในรูปแบบของการคอนฟาวด์ เพราะว่าเรื่องของคอนฟาวด์ ทำให้อิทธิพล (Effects) บางตัวไม่สามารถหาค่าได้ทำให้การเลือกการทำ Fractional Factorial ต้องเลือกส่วนที่จะมาทำให้ถูกต้องเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้งานได้ 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 ซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเมื่อมีตัวแปรทำนายตั้งแต่ 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

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

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

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

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  $Y_i'$  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

ดังนี้

อีกวิธีสำหรับการคำนวณความชันจะเกี่ยวข้องกับการใช้สหสัมพันธ์แยกส่วน มีสูตรการคำนวณ

$$b_1 = r_{Y1.2} \{ [s_Y \sqrt{(1-r_{Y2}^2)}] / [s_1 \sqrt{(1-r_{12}^2)}] \}$$
$$b_2 = r_{Y1.2} \{ [s_Y \sqrt{(1-r_{Y2}^2)}] / [s_1 \sqrt{(1-r_{12}^2)}] \}$$

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 มีบางครั้งที่ต้องการแสดงการถดถอยในรูปของคะแนนมาตรฐาน z (z-score) มากกว่า ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของตัวแปรที่อยู่ในรูปของคะแนนมาตรฐาน ( $z_1, z_2$  และ  $z_k$ ) มีค่าเป็น 0 และ 1 ตามลำดับ สมการทำนายเชิงเส้นในรูปของคะแนนมาตรฐานจะกลายเป็น

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

เมื่อ  $\beta_k$  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  $b_k$  ทั้งหมดที่อยู่ในสมการสามารถเขียนสมมติฐานศูนย์และสมมติฐานอื่น ได้ดังนี้

$$H_0 : \rho_{Y.1\dots m}^2 = 0$$

$$H_1 : \rho_{Y.1\dots m}^2 \neq 0$$

ถ้า  $H_0$  ถูกปฏิเสธแล้วแสดงว่า มีสัมประสิทธิ์การถดถอยอยู่ 1 ตัวหรือมากกว่า ( $b_k$ ) อาจจะมีนัยสำคัญทางสถิติแตกต่างจาก 0 อย่งไรก็ตาม เป็นไปได้ที่จะมีนัยสำคัญของ  $R^2$  ทั้งหมดเมื่อไม่มีตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัวมีนัยสำคัญ ซึ่งจะบ่งชี้ว่าไม่มีตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัวที่มีความแข็งแรงเหนือตัวแปรอื่น 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  $(\alpha)F_{m,(n-m-1)}$  สถิติทดสอบสามารถเขียนได้ในรูปหนึ่งว่า

$$\begin{aligned} F &= \frac{(SS_{reg} / df_{reg})}{(SS_{res} / df_{res})} \\ &= MS_{reg} / MS_{res} \end{aligned}$$

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

### 2.9.5.2 การทดสอบนัยสำคัญของ $b^k$

การทดสอบที่สองเป็นการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติของความชันและสัมประสิทธิ์การถดถอย  $b^k$  ในอีกกรณีหนึ่ง [27] สัมประสิทธิ์การถดถอยที่อยู่ในรูปคะแนนดิบมีนัยสำคัญทางสถิติแตกต่างจากศูนย์หรือไม่ ซึ่งจะเหมือนกับการทดสอบ  $\beta_k$  แต่จะไม่แสดงการทดสอบแยกส่วนออกมา สมมติฐานศูนย์และสมมติฐานอื่นสามารถเขียนได้ดังนี้

$$H_0 : \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_k \neq 0$$

เมื่อ  $\beta_k$  คือความชันของประชากรในตัวแปร  $X_k$  การถดถอยพหุคูณจำเป็นที่จะต้องคำนวณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานสำหรับแต่ละ  $b_k$  ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

เมื่อ  $df_{res} = (n - m - 1)$  องศาแห่งความเป็นอิสระจะสูญหายไปเพราะมีการประมาณค่าความชันของประชากรและจุดตัด นั่นคือ  $\beta_k$  และ  $\alpha$  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  $b_k$  ในการทดสอบทางสถิตินี้จะเป็นอัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยหารด้วยความคลาดเคลื่อนมาตรฐานดังสูตร

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

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

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

$$H_0 : \beta_k = \beta_0$$

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

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

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

ในรูปแบบโดยมากของช่วงความเชื่อมั่น ก็จะรวม  $\beta_0$  ไว้ในด้วย

### 2.9.6 การทดสอบการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้

การทดสอบที่สาม เป็นการทดสอบการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้ [27] ด้วยตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัว ตัวอย่างที่เป็นโมเดลมีตัวพยากรณ์ 2 ตัว สามารถทดสอบการเพิ่มขึ้นได้ เป็นสัดส่วนของความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปร 2 ตัวเปรียบเทียบกับตัวแปร 1 ตัว ซึ่งเป็นความจำเป็นในกรณีที่มีโมเดลตัวแปรพยากรณ์ 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  $F$  วิกฤติที่เปิดจากตารางแบบทิศทางเดียว 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  $F$  วิกฤติที่เปิดจากตารางแบบทิศทางเดียว 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" เป็นสัญลักษณ์ของโมเดลเต็มรูปแบบ (full model) และโมเดลลดรูป (reduced model) ส่วน  $m_{full}$  คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ในโมเดลเต็มรูปแบบ และ  $m_{red}$  คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ในโมเดลลดรูป สถิติ  $F$  จะนำไปเปรียบเทียบกับ  $F$  วิกฤติที่เปิดจากตารางแบบทิศทางเดียว 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

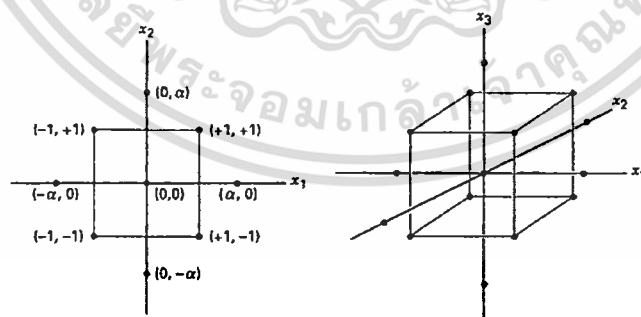
ข้อตกลงเบื้องต้น	ผลการละเมิดข้อตกลงเบื้องต้น
1. การถดถอย $Y$ บน $X_i$ เป็นเชิงเส้น	เกิดความลำเอียงในความชันและจุดตัด
2. ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระจากกัน	มีอิทธิพลของความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของ โมเดล
3. ความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเป็น 0	มีความลำเอียงใน $Y'$

ข้อตกลงเบื้องต้น	ผลการละเมิดข้อตกลงเบื้องต้น
4. ความเป็นเอกพันธ์ของความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน	มีความลำเอียงใน $S^2_{res}$
5. ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงเป็นโค้งปกติ	มีความเที่ยงตรงต่ำในค่าของความชันและสัมประสิทธิ์การอธิบาย
6. ค่าของ $X_k$ เป็นแบบกำหนด	ความคลาดเคลื่อนในการทำนายมีค่าสูง มีความลำเอียงในความชันและจุดตัด
7. ไม่เกิด Multicollinearity ระหว่าง $X_k$	สัมประสิทธิ์การถดถอยไม่คงที่ $R^2$ รวม อาจมีนัยสำคัญในขณะที่ตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัวอาจไม่มีนัยสำคัญ มีข้อจำกัดในการสรุปอ้างอิงของโมเดล

## 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 ดังนั้นจึงมีการรันการทดลองเพิ่มในแนวแกนเพื่อทำให้สามารถได้พจน์ควอดราติกลงในแบบจำลองได้ CCD เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากในการพิตแบบจำลองอันดับที่สอง โดยต้องกำหนดการออกแบบพารามิเตอร์ 2 ตัว นั่นคือ ระยะทาง  $\alpha$  ของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ และจำนวนของจุดศูนย์กลาง  $n_f$



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

### 2.10.1 ความสามารถในการหมุน

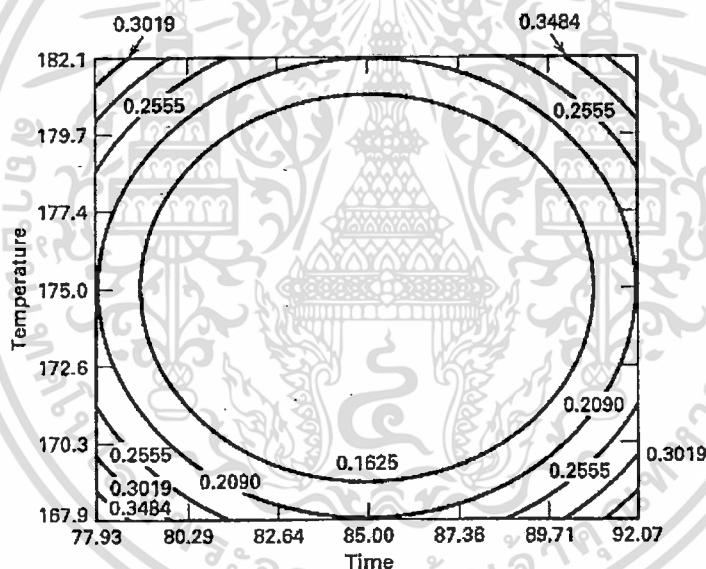
เป็นความสำคัญอย่างหนึ่งของแบบจำลองอันดับที่สอง ที่จะต้องมีความสามารถในการพยากรณ์ได้ตลอดบริเวณที่สนใจอยู่ วิธีการหนึ่งที่จะบอกว่า แบบจำลองนี้ “ดี” คือ แบบจำลองจะต้องอยู่กับร่องกับรอยอย่างมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 30 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุผล และมีความแปรปรวนที่มีเสถียรภาพของผลตอบที่จุด  $x$  ซึ่งอยู่ในความสนใจ ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าคงตัวบนรูปทรงกลม นั่นคือ

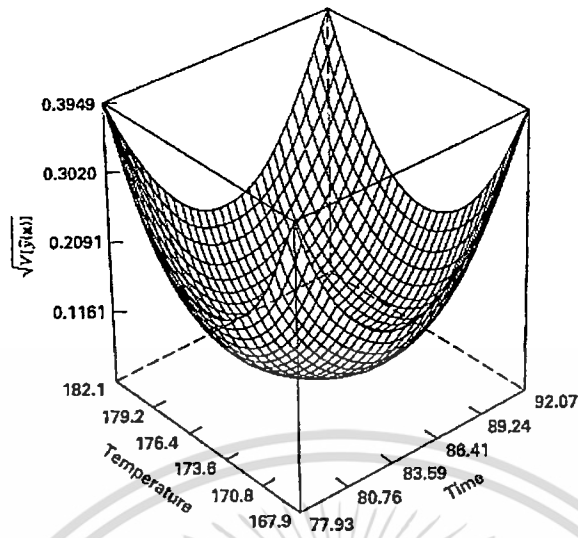
$$V[\hat{y}(x)] = \sigma^2 \mathbf{x}'(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{x}$$

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

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



รูปที่ 2.20 เส้น โครงร่างของพื้นผิวผลตอบที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่ ซึ่งถูกทำนายสำหรับ CCD ที่สามารถหมุนได้ [31]



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

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

### 2.11 แบบจำลองการถดถอยสำหรับ Central Composite Design

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

- 1) Linear Model

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

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

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

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

### 3) Quadratic Model

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

## 2.12 พื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology)

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย  $x$  และ  $\varepsilon$  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)” โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปของกราฟฟิก ดังรูปที่ 2.21 โดยที่  $\eta$  จะถูกพล็อตกับระดับของ  $x_1$  และ  $x_2$  เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบดังแสดงในรูปที่ 2.22 ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบของ  $x_1$  และ  $x_2$  เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง

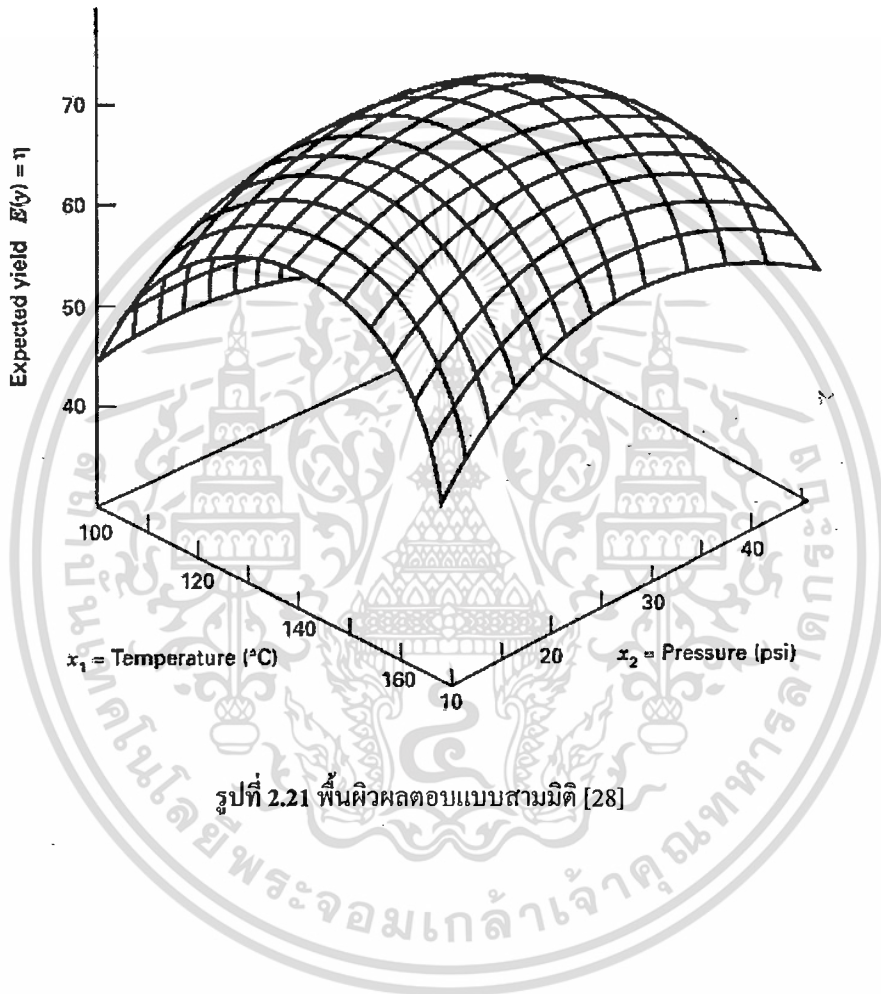
โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง  $y$  และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่างๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

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

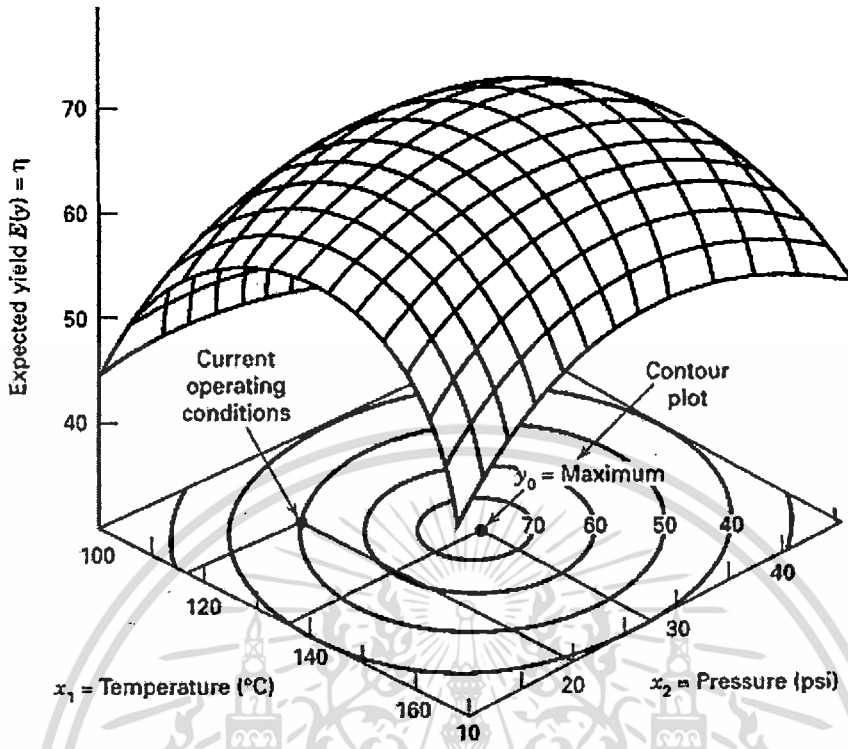
แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องกับระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดัง

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 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ [28]

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

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

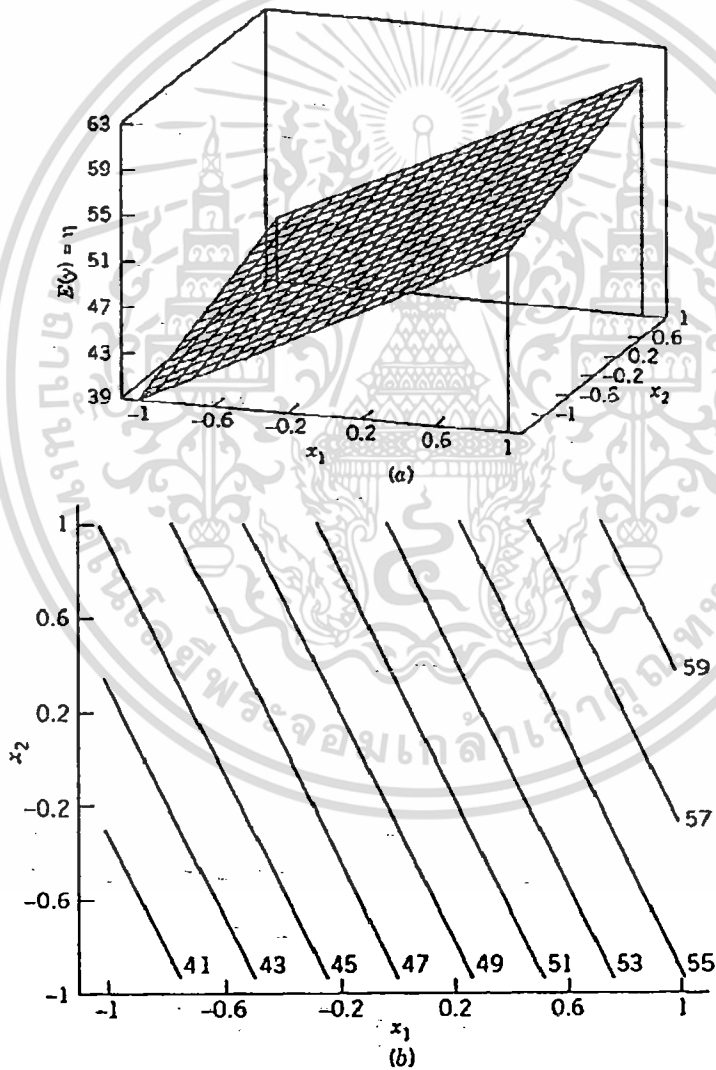
หากตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันระหว่างกัน ต้องทำการเพิ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกันเข้าไปอีกหนึ่งตัวแปร (First order with interaction) ตัวอย่างดังรูปที่ 2.24

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

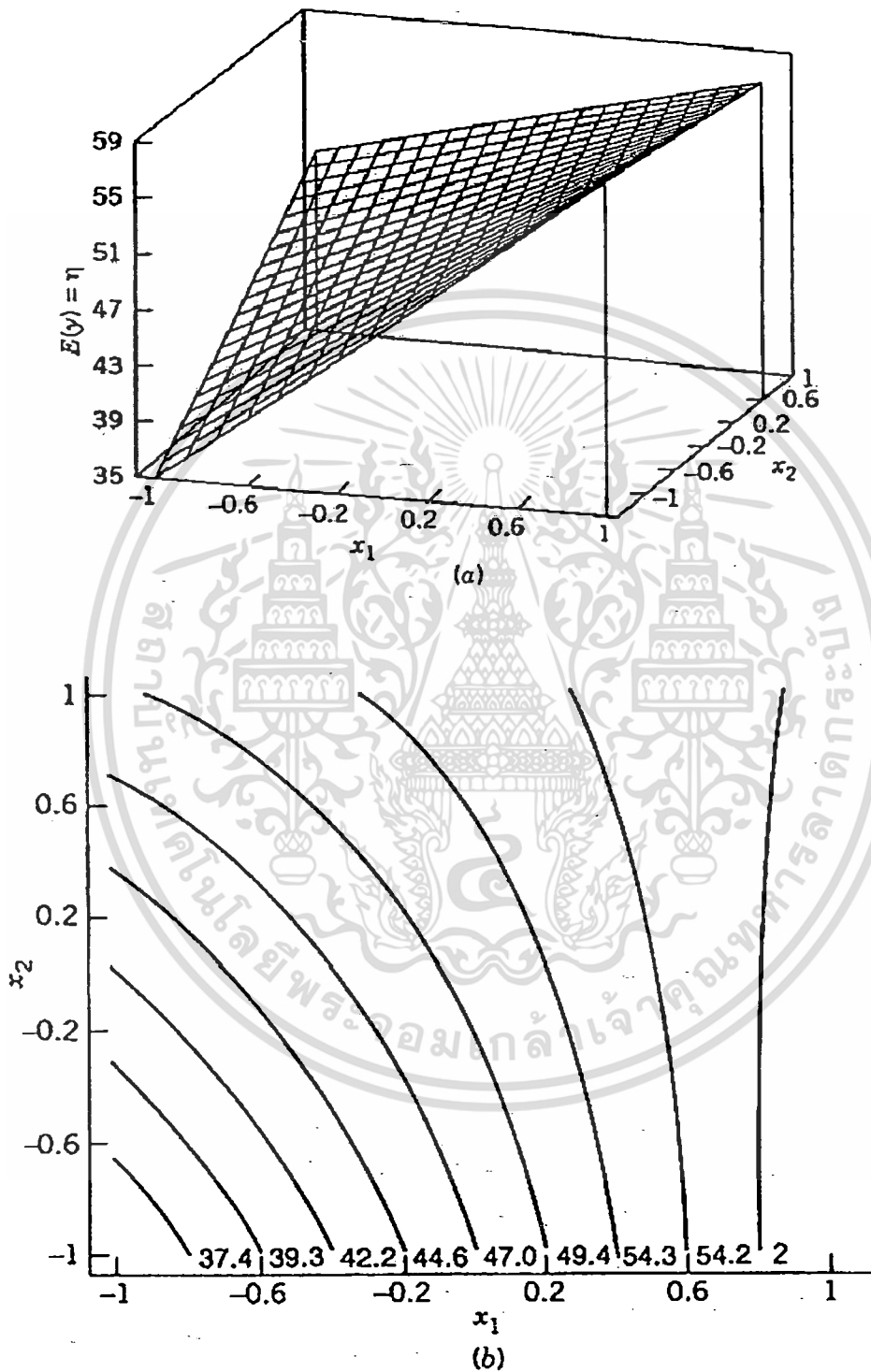
สำหรับระบบที่มีลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง ต้องใช้แบบจำลองที่มีลำดับสูงขึ้น เช่น ลำดับสอง (Second order) ตัวอย่างดังรูปที่ 2.25 นอกจากนี้ แบบจำลองลำดับสอง ยังมีรูปแบบพื้นผิวผลตอบที่มีความหลากหลาย ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.26

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

การได้มาของฟังก์ชันต่างๆ มักได้มาจากสมการลดถอย

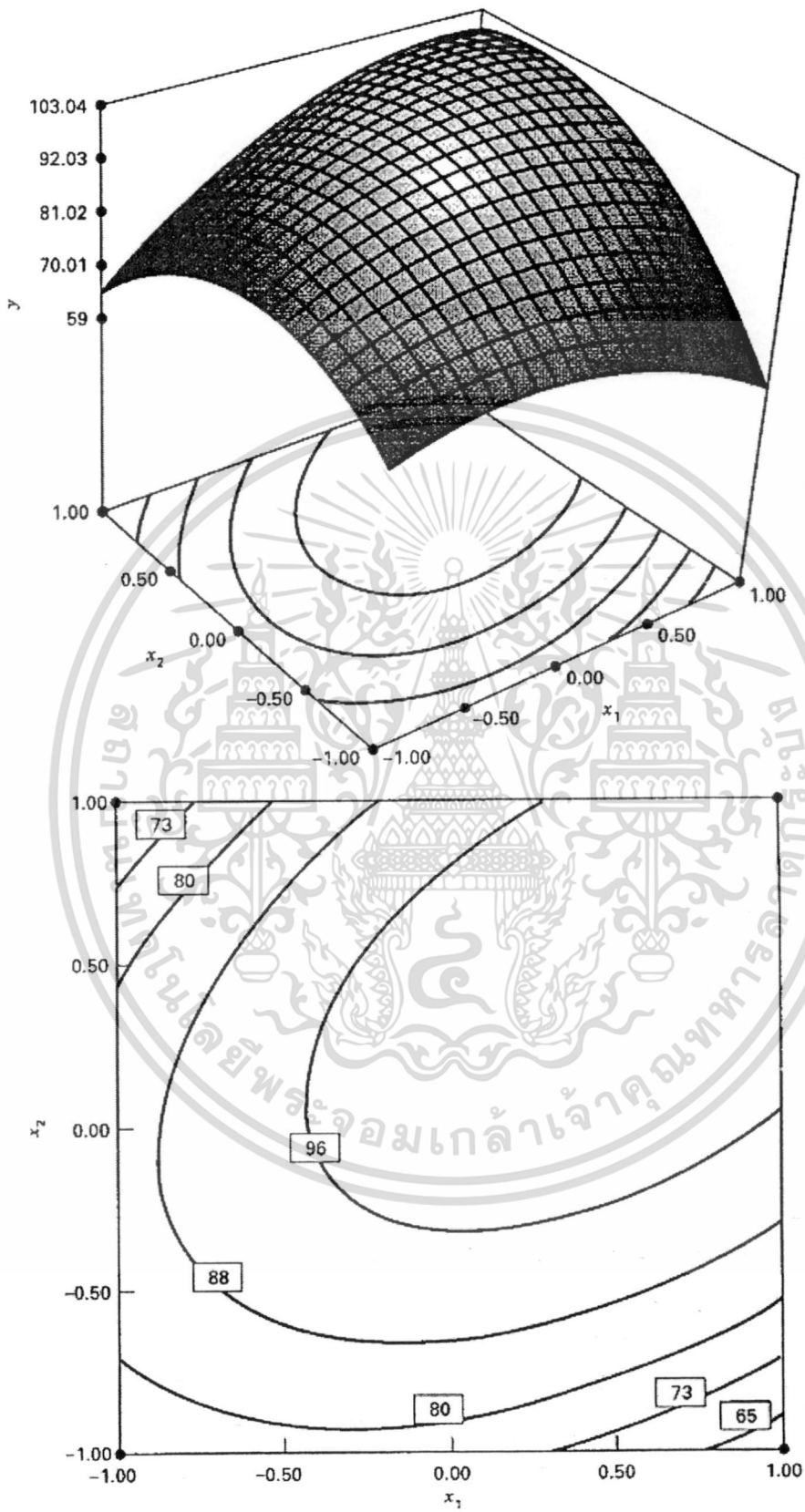


รูปที่ 2.23 เส้น โครงร่างของพื้นผิวผลตอบแบบ First Order Model [30]



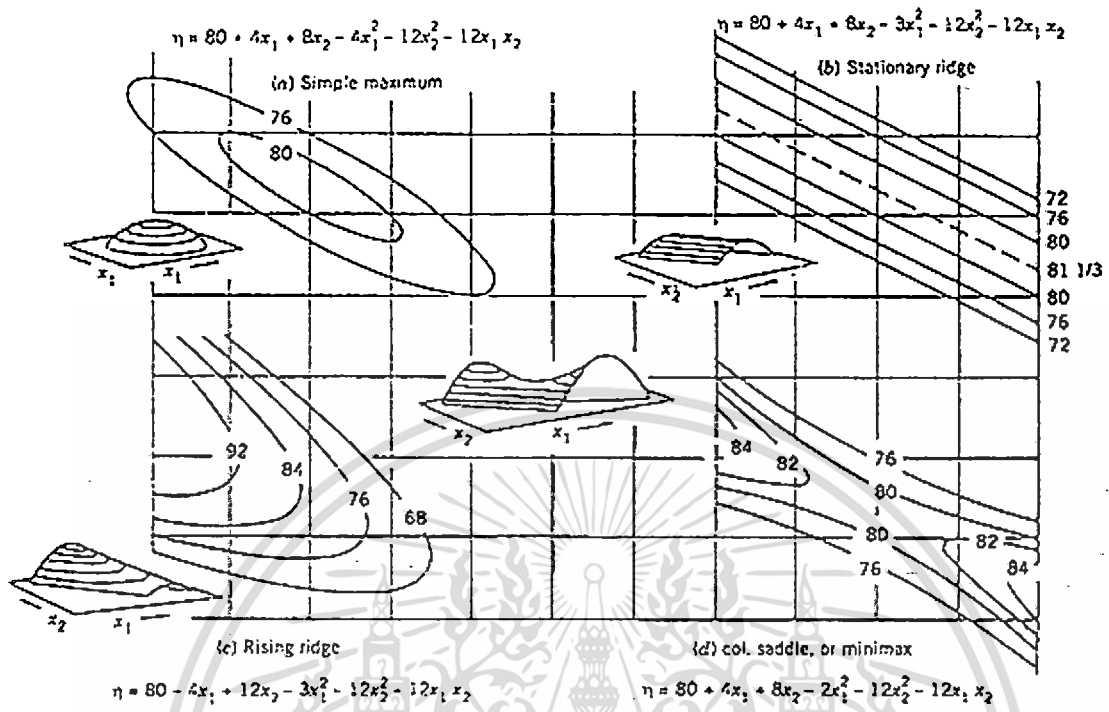
รูปที่ 2.24 เส้น โครงร่างของพื้นผิวผลตอบแบบ First Order with Interaction [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 37  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบแบบ Second Order [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ <sup>38</sup>ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



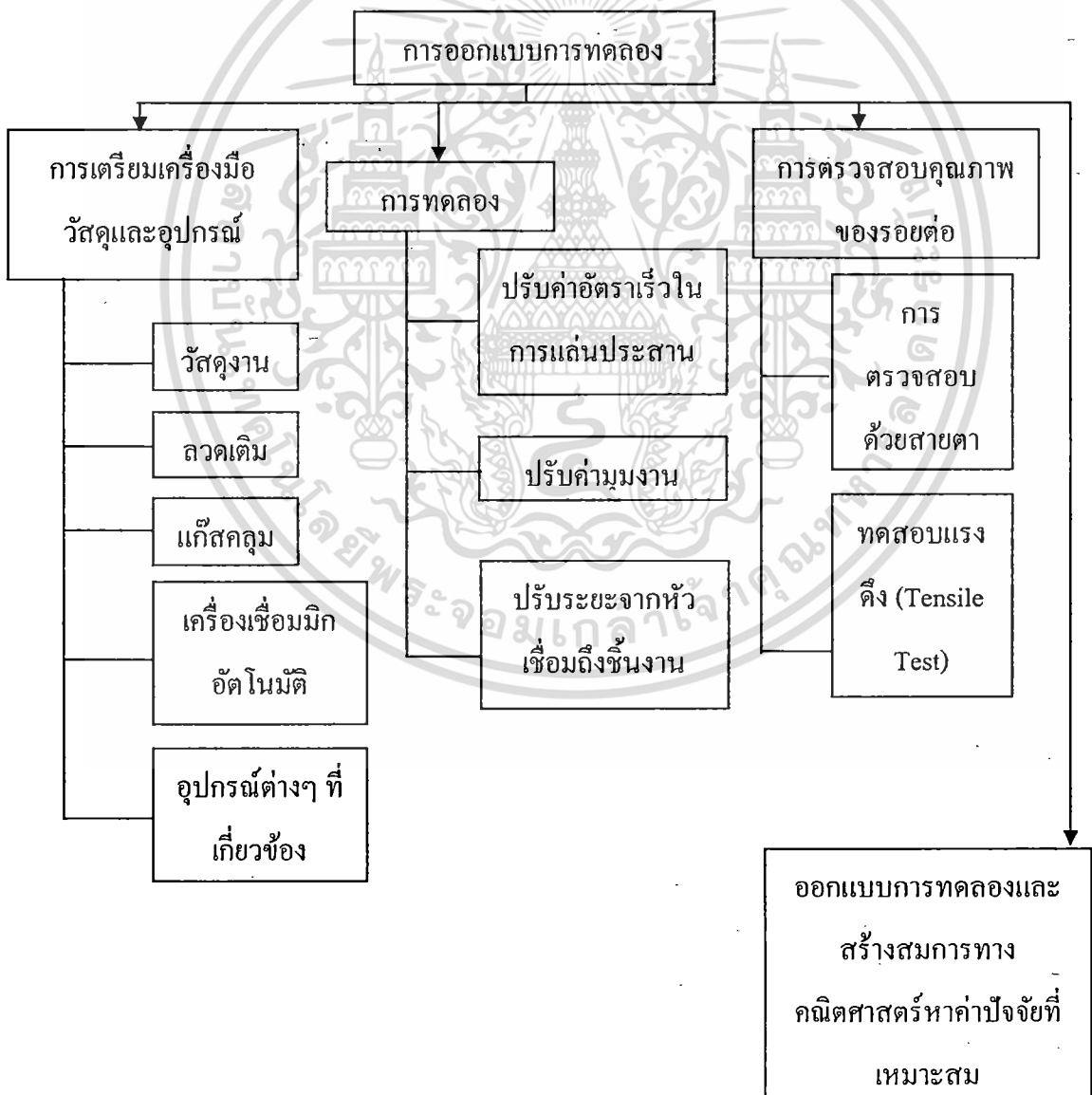
รูปที่ 2.26 เส้น โครงร่างของพื้นผิวผลตอบ ในลักษณะหลากหลายแบบของ Second Order [30]

# บทที่ 3

## การออกแบบและวิธีการดำเนินงาน

### 3.1 กล่าวนำ

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



รูปที่ 3.1 แผนผังการออกแบบการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 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 ได้แสดง ไว้ดังตารางที่ 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 ได้แสดง ไว้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของวัสดุงาน อลูมิเนียมอัลลอยชนิด 5052 (5052 Aluminium alloy)

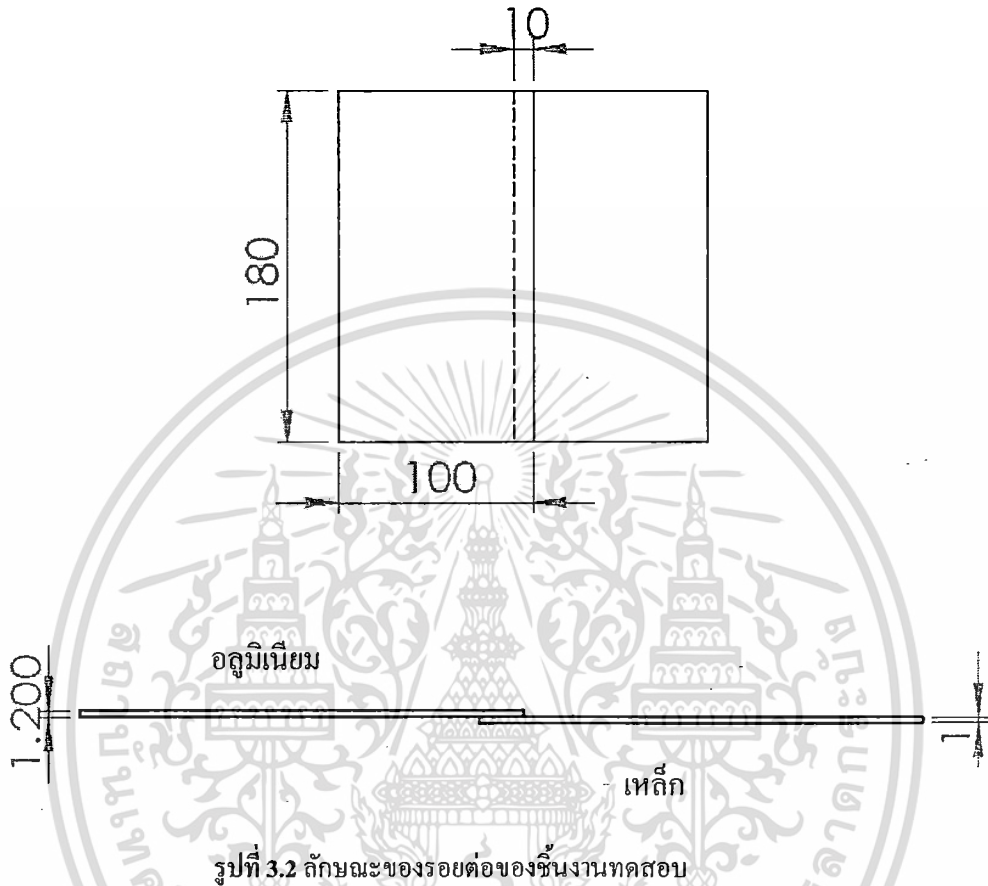
ส่วนผสมทางเคมี (%wt)								Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Al		
0.20	0.01	0.32	2.38	0.03	0.10	0.012	Bal.	225	15

เมื่อทราบถึงวัสดุงานและส่วนผสมต่างๆแล้ว จึงได้วางแผนการทดลองต่อ โดยมีการเตรียมการตั้งนี้ การเตรียมรอยต่อในงานเล่นประสาน ลักษณะของรอยต่อที่นำมาศึกษาเป็นรอยต่อแบบเกย (Lap joint) โดยมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลองดังต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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)							จุดหลอมละลาย °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

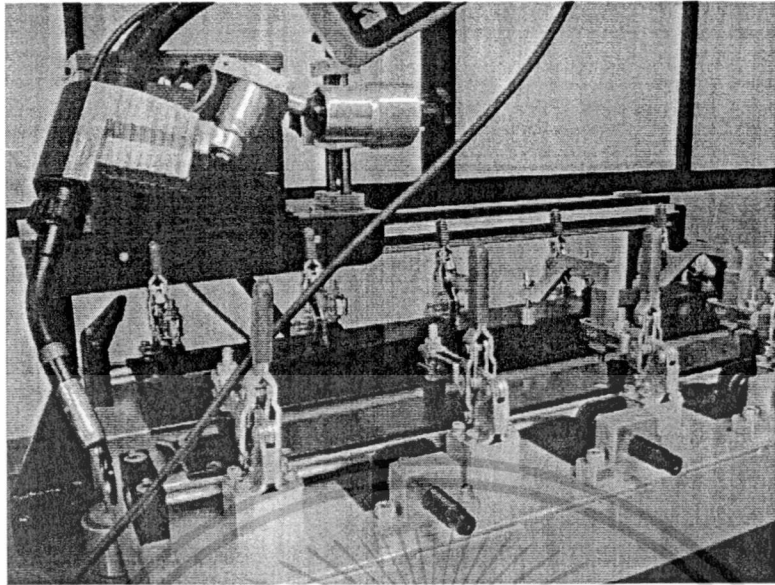
แก๊สที่ใช้ปกคลุมการแล่นประสานรอยต่อคือแก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ 100% เนื่องจากเป็นแก๊สเฉื่อยสามารถปกป้องรอยต่อจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโลหะเหลวกับบรรยากาศระหว่างการเชื่อม ความเข้มของความร้อนมีน้อยกว่าแก๊สฮีเลียม การเริ่มต้นอาร์กดีกว่า มีการหลอมลึกลงน้อยกว่าแก๊สฮีเลียม มีราคาสูงและสามารถหาซื้อได้ง่ายกว่า

### 3.2.4 เครื่องเชื่อมมิกอัตโนมติ

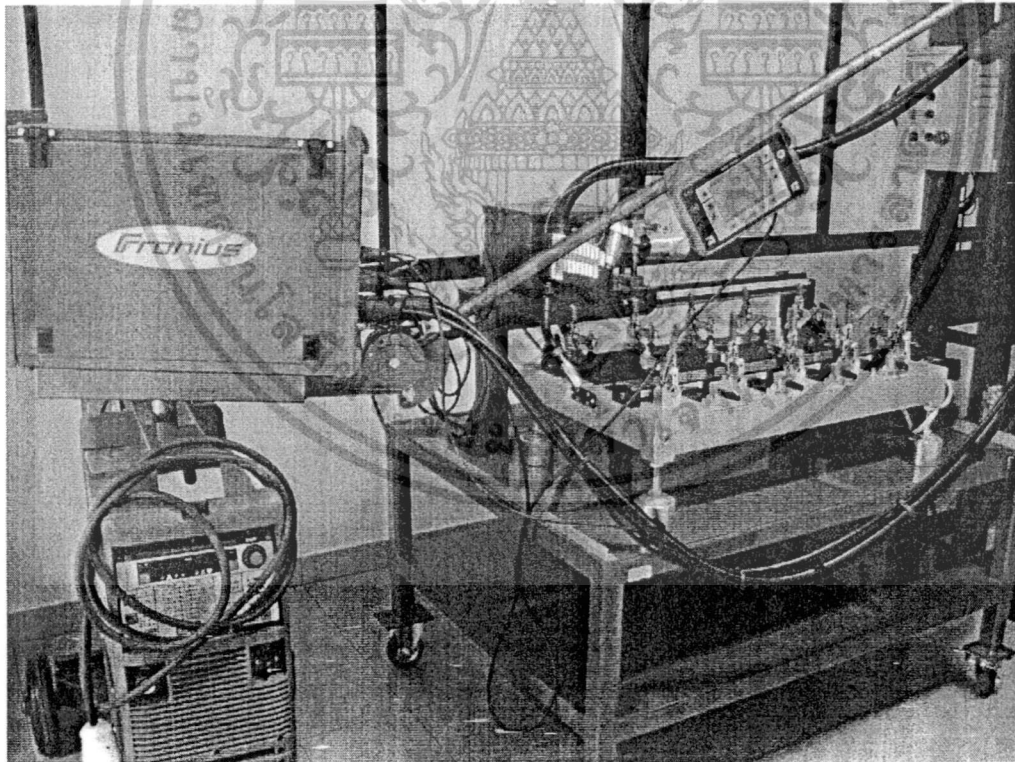
เครื่องที่ใช้เป็น Fronius รุ่น Trans Synergic 4000 ประกอบด้วยเครื่องเชื่อม ชุดจับยึดชิ้นงานแบบเชื่อมในแนวแกน X และแกน Y และชุดจับยึดหัวเชื่อมที่ออกแบบสำหรับการทดลองนี้ ซึ่งสามารถปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน อัตราป้อนลวด ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าอื่นๆ โดยระบบที่ใช้ในการเชื่อมในการทดลองนี้จะใช้ระบบ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



รูปที่ 3.4 ตัวจ่ายกระแสและตัวจ่ายลวดของเครื่องเชื่อมมิกอัตโนมติ (Power Source and Wire Feeder)



รูปที่ 3.5 ชุดยึดจับชิ้นงานและชุดยึดจับหัวเชื่อม

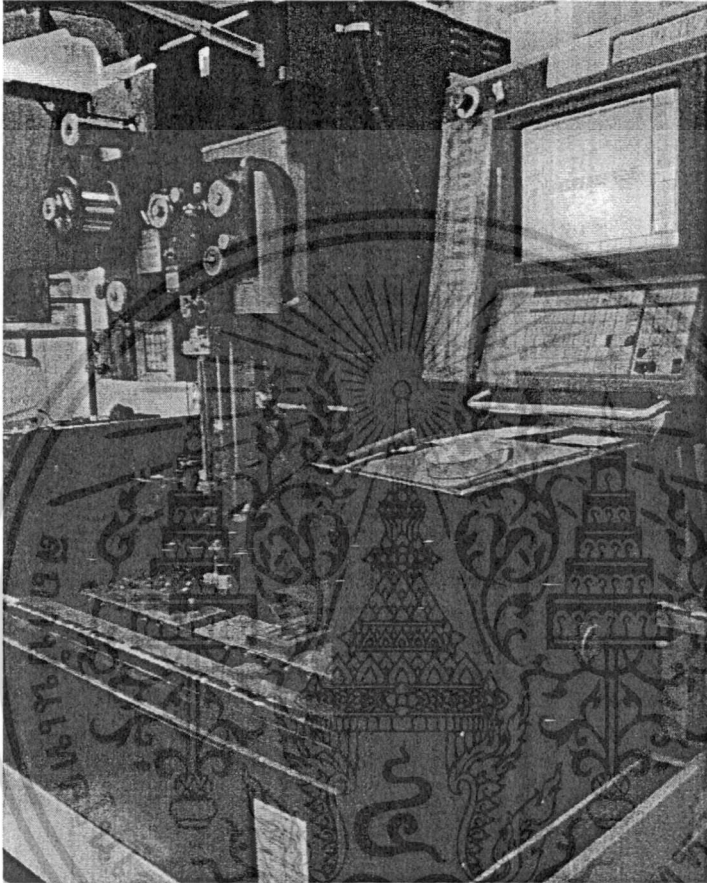


รูปที่ 3.6 ภาพโดยรวมทั้งหมดของตัวเครื่องเชื่อมมิกอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
44  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.5 เครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Cut EDM)

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

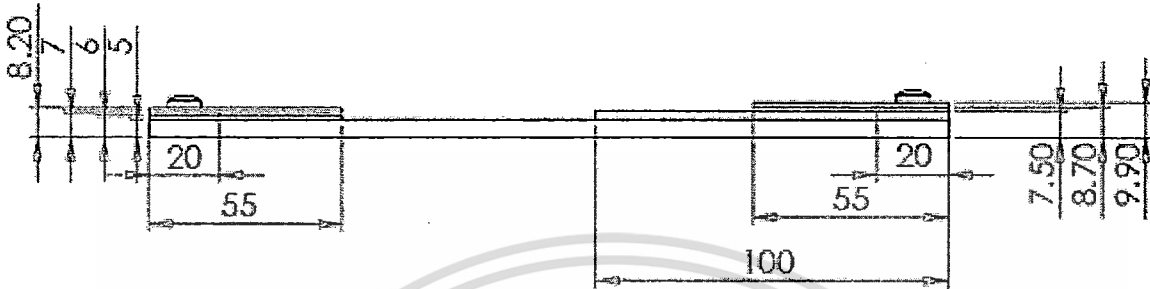


รูปที่ 3.7 เครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Cut EDM) ยี่ห้อ Socick รุ่น AQ535L

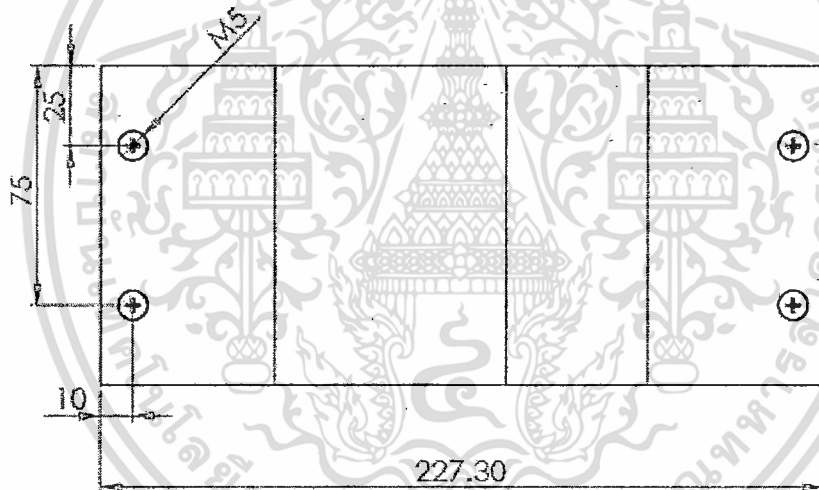
### 3.2.6 จิกที่ใช้ในการยึดจับชิ้นงาน

เนื่องจากจิกของตัวเครื่องเชื่อมไม่สามารถจับชิ้นงานให้เป็นไปตามความต้องการ ได้จึงได้มีการ

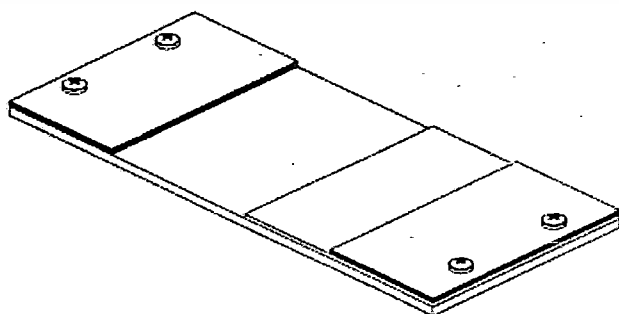
จัดทำจิกขึ้น



รูปที่ 3.8 จิกที่ใช้ในการยึดจับชิ้นงาน



หมายเหตุ หน่วยเป็นมิลลิเมตร

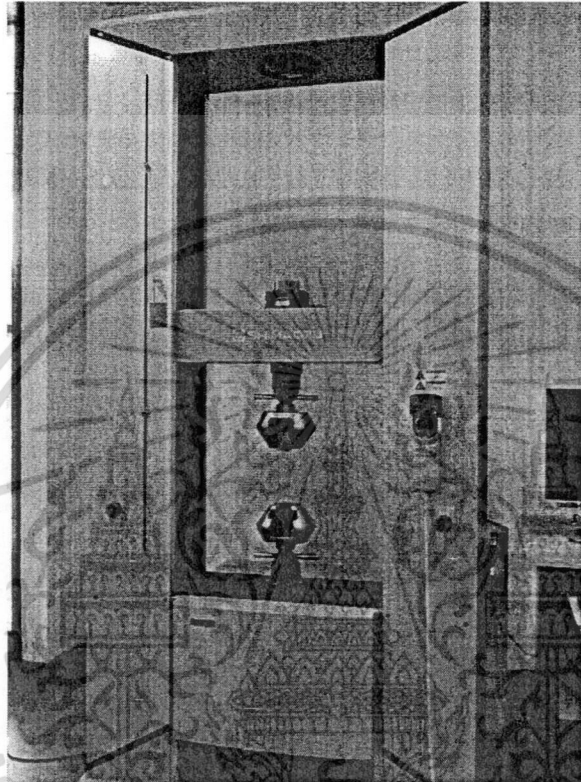


รูปที่ 3.8 (ต่อ) จิกที่ใช้ในการยึดจับชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.7 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Testing Machine)

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



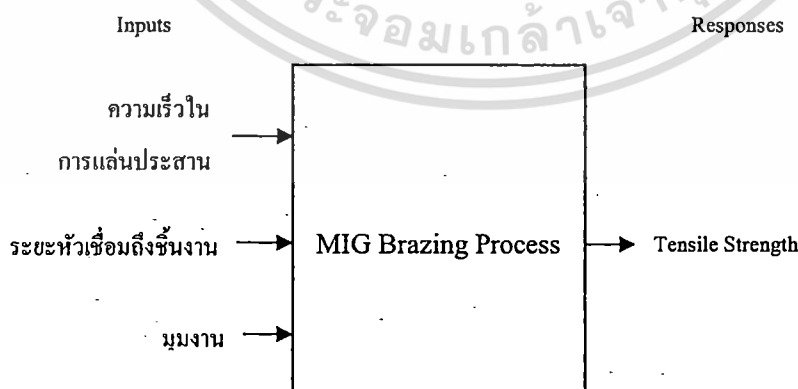
รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-X

### 3.3 การควบคุมพารามิเตอร์ของการเชื่อมประสาน

ในการเชื่อมประสานรอยต่อ ในตำแหน่งทำขานนอนด้วยกระบวนการ GMAW-P โดยการเดินแนวเชื่อมจะใช้เป็นแบบเดินไปข้างหน้าในทุกการทดลอง เพราะเป็นการเชื่อมเหล็กแผ่นบาง โดยจะสามารถมองเห็นรอยเชื่อมได้ง่ายและการหลอมล็กจะน้อย 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

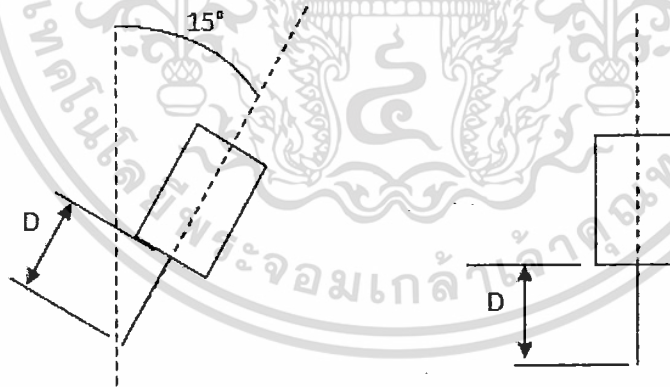
ในการทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อรอยเชื่อมในการถนอมประสาน ทางกลุ่มได้มีการหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อรอยเชื่อม โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial  $2^k$

#### 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



ให้ทิศทางการเดินหัวเชื่อม 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	-I	-	-	-	
2	4	S	+	-	-	
3	3	D	-	+	-	
4	24	A	-	-	+	
5	5	SD	+	+	-	
6	9	SA	+	-	+	
7	15	DA	-	+	+	
8	11	SDA	+	+	+	
9	20	-I	-	-	-	
10	6	S	+	-	-	
11	8	D	-	+	-	
12	13	A	-	-	+	
13	23	SD	+	+	-	
14	19	SA	+	-	+	
15	10	DA	-	+	+	
16	7	SDA	+	+	+	
17	12	-I	-	-	-	
18	18	S	+	-	-	
19	21	D	-	+	-	
20	17	A	-	-	+	
21	14	SD	+	+	-	
22	16	SA	+	-	+	
23	22	DA	-	+	+	
24	2	SDA	+	+	+	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 50 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การตรวจสอบคุณภาพของงานแผ่นประสาน

#### 3.5.1 ตรวจสอบรอยต่อด้วยสายตา (Visual Inspection)

หลังจากทำการเชื่อมเรียบร้อยแล้วจะมีการตรวจสอบด้วยสายตา ก่อนเป็นขั้นแรก โดยการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) จะ เป็นไปตามมาตรฐานของการตรวจสอบรอยเชื่อม ANSI โดยสังเกตตั้งแต่เริ่มต้นการแผ่นประสานจนจบการแผ่นประสาน โดยสังเกตผลจากการเลือกพารามิเตอร์ต่างๆกัน ตรวจสอบหลังจากการแผ่นประสานเสร็จ ดูความสมบูรณ์ที่ขอบหน้า และด้านหลังรอยต่อ สังเกตความสูง ความกว้าง ความนูน ความต่อเนื่อง การไม่เต็มเต็มขอบรอยต่อ (Under Fill) สีของรอยต่อและเม็ดโลหะกระเด็น (Spatters) โดยถ้ารอยต่อไม่สมบูรณ์ก็จะไม่นำมาพิจารณาในการทดลองต่อไป

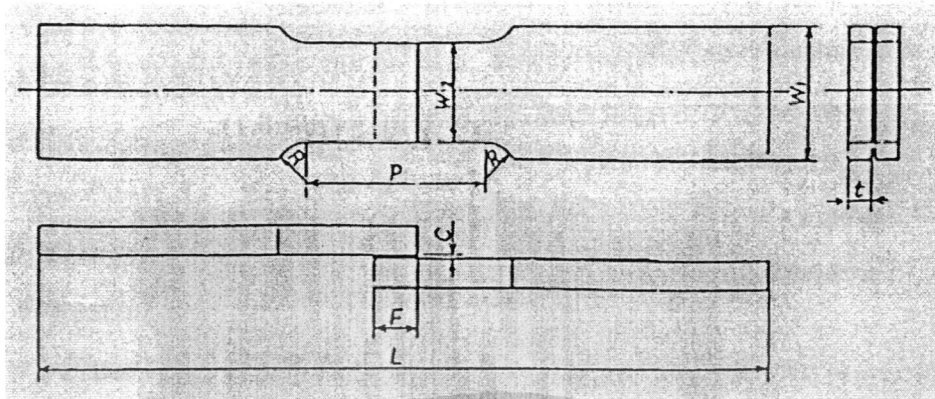


รูปที่ 3.12 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้ว

#### 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

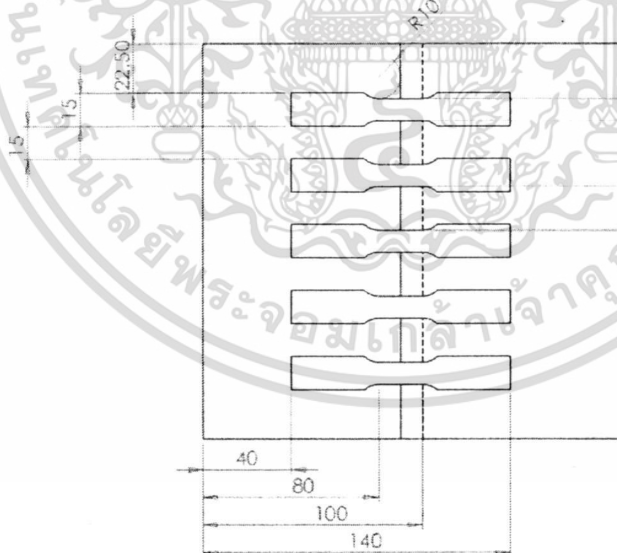
$W_2 = 10$  มิลลิเมตร

$F = 10$  มิลลิเมตร

$L = 100$  มิลลิเมตร

$P = 20$  มิลลิเมตร

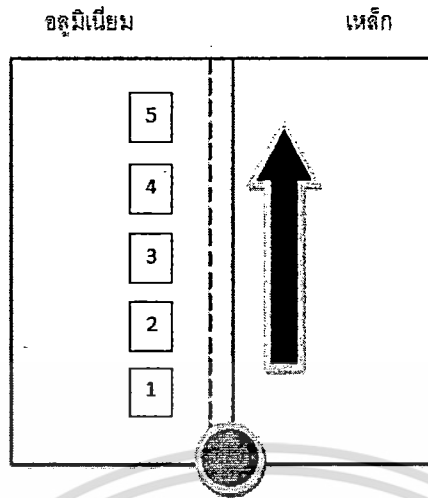
รูปที่ 3.13 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน JIS Z3192



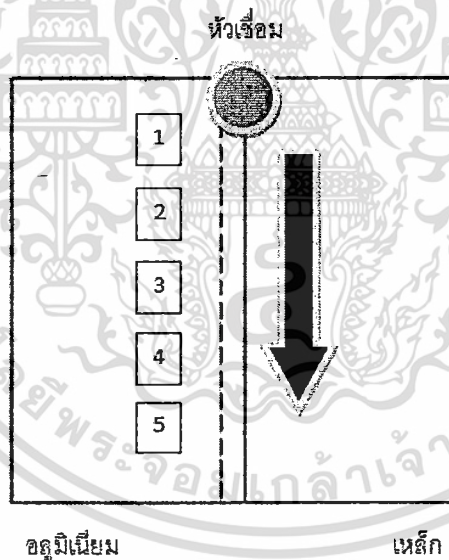
รูปที่ 3.14 ชิ้นงานทดสอบที่จะนำมาตัดเป็นชิ้นงานตรวจสอบตามมาตรฐาน JIS Z3192

โดยในขั้นตอนนี้มีข้อที่ควรระวังไว้คือ หมายเลขของชิ้นงานทดสอบแรงดึงจะขึ้นอยู่กับทิศทาง การเชื่อมและมุมงาน ดังภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 52 ศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ชั้นงานความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการเดินของหัวเชื่อมและลำดับของชั้นงานทดสอบแรงดึง ที่มุงงาน 15 องศา



รูปที่ 3.16 ชั้นงานความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการเดินของหัวเชื่อมและลำดับของชั้นงานทดสอบแรงดึง ที่มุงงาน - 15 องศา

- 2) ชั้นงานตรวจสอบ 5 ชั้นมาทดสอบแรงดึง (Tensile test) โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ดึงชั้นงานด้วยแรงดึงที่สม่ำเสมอ คงที่ที่ 1.27 mm/min จนชั้นงานตรวจสอบในส่วนของเหล็กและอลูมิเนียมขาดออกจากกันแล้วบันทึกผลที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ 53 ารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าผลตอบสนอง (Output)

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

### 3.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคทำโดยใช้ Scanning electron microscope (SEM) และ Energy dispersive X-ray spectrometry (EDX) ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและปริมาณของสารประกอบเชิงโลหะ ในการศึกษาสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบทางเคมี จะทำการศึกษาโดยใช้ SEM ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800LV และใช้ EDX ยี่ห้อ JEOL รุ่น Link ISIS Series 300



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

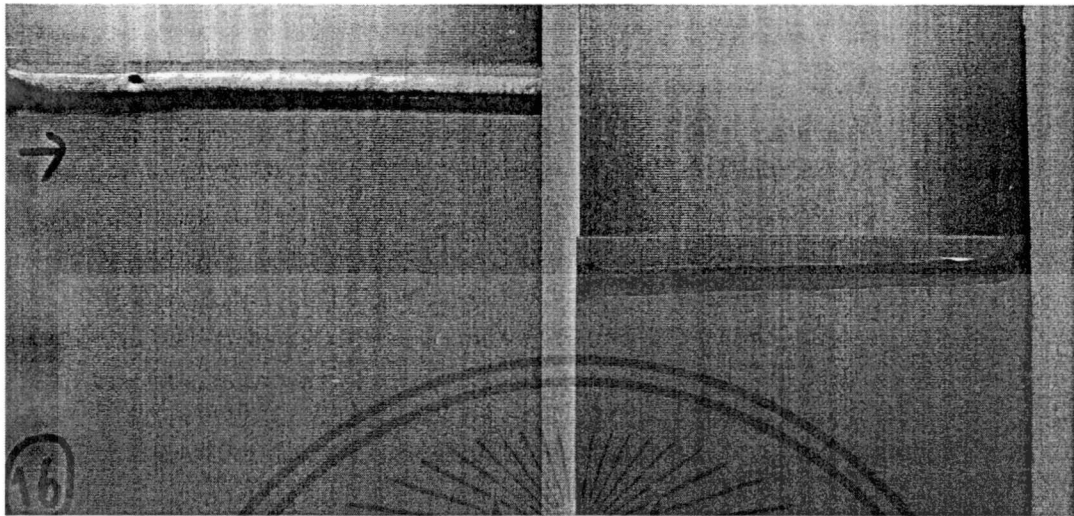
เนื้อหาในบทที่จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานจากแผนการดำเนินงานที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 โดยจะครอบคลุมถึงลักษณะของรอยเชื่อมที่ได้เมื่อเปลี่ยนค่าของปัจจัย การวิเคราะห์ จนถึงสมการการถดถอยที่ได้ทำการวิเคราะห์ออกมา

#### 4.1 การเปรียบเทียบลักษณะของรอยเชื่อม

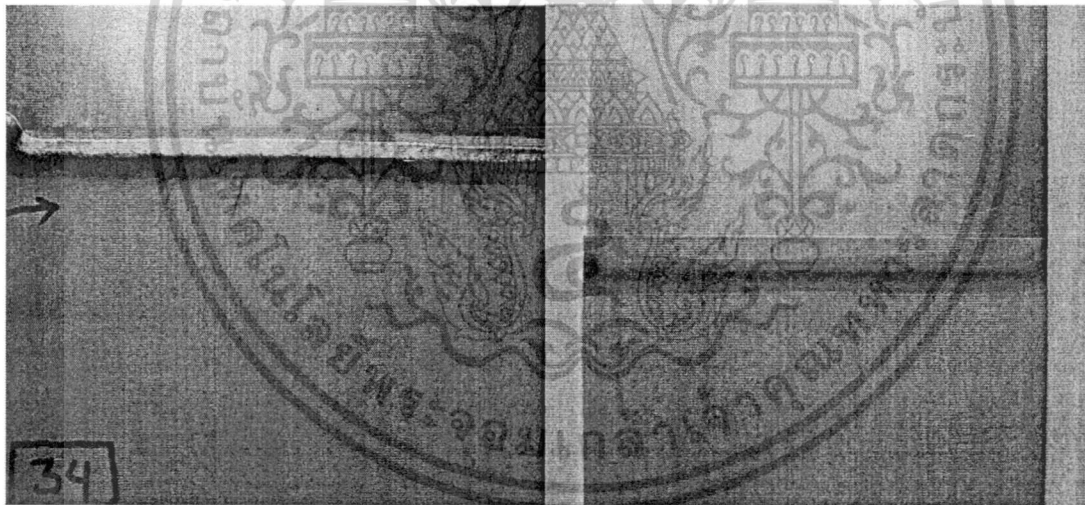
ในการเชื่อมชิ้นงานทางกลุ่มในมีการเชื่อมเป็นไปตามตารางการออกแบบการทดลอง ซึ่งมีตัวแปรที่ต้องควบคุมคือ ความเร็วในการแล่นประสาน ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน และมุมงาน โดยจะได้ลักษณะของรอยเชื่อมดังรูปที่ 4.1



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

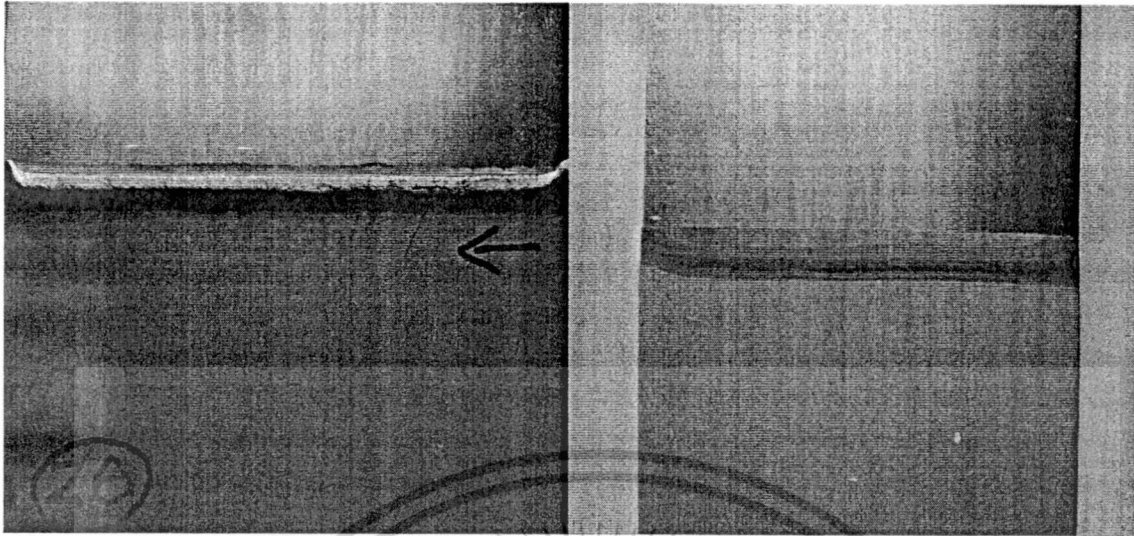


รูปที่ 4.2 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 565 มิลลิเมตร/นาที ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ -15 องศา

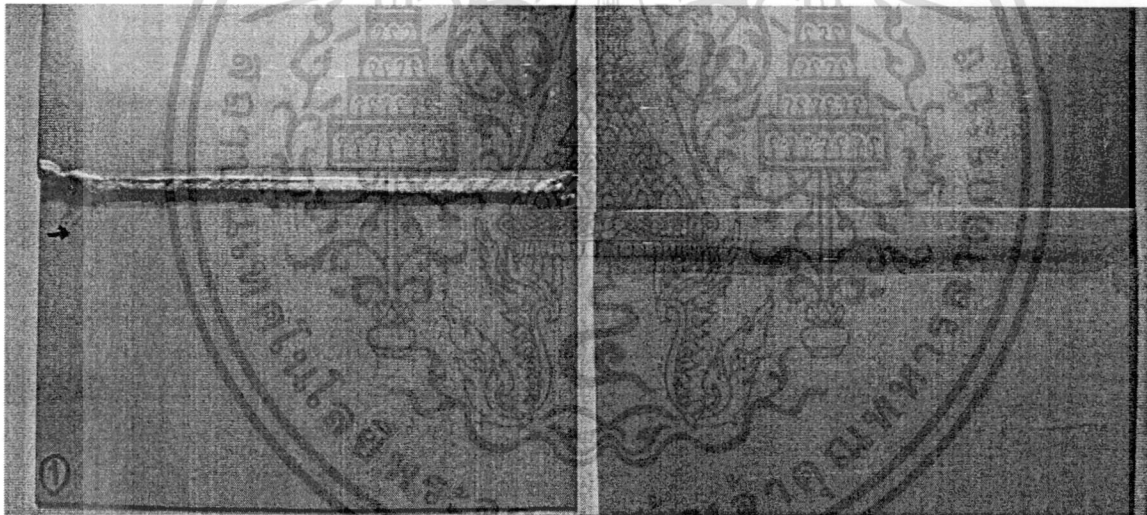


รูปที่ 4.3 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 455 มิลลิเมตร/นาที ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ -15 องศา

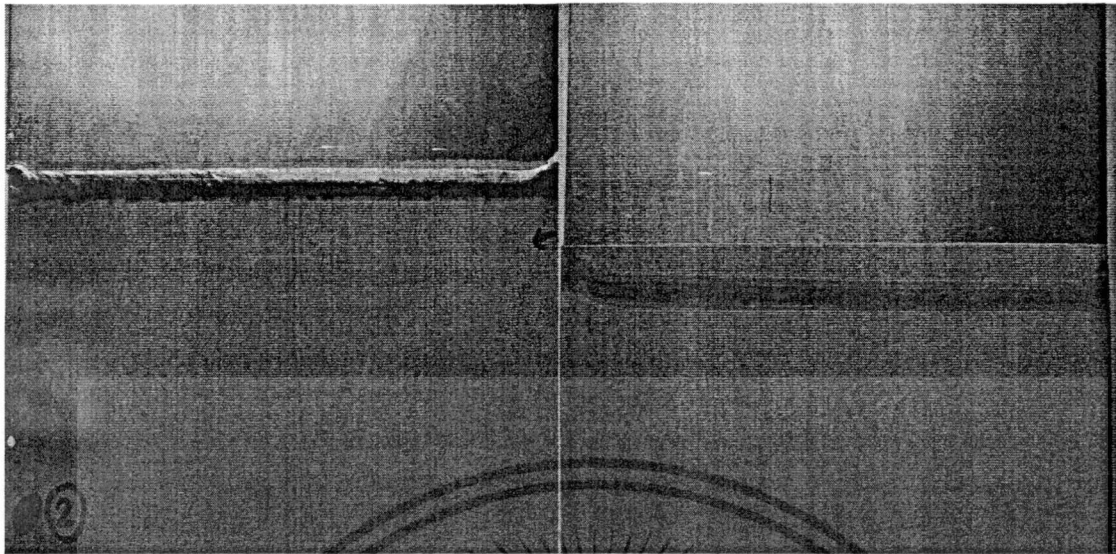
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

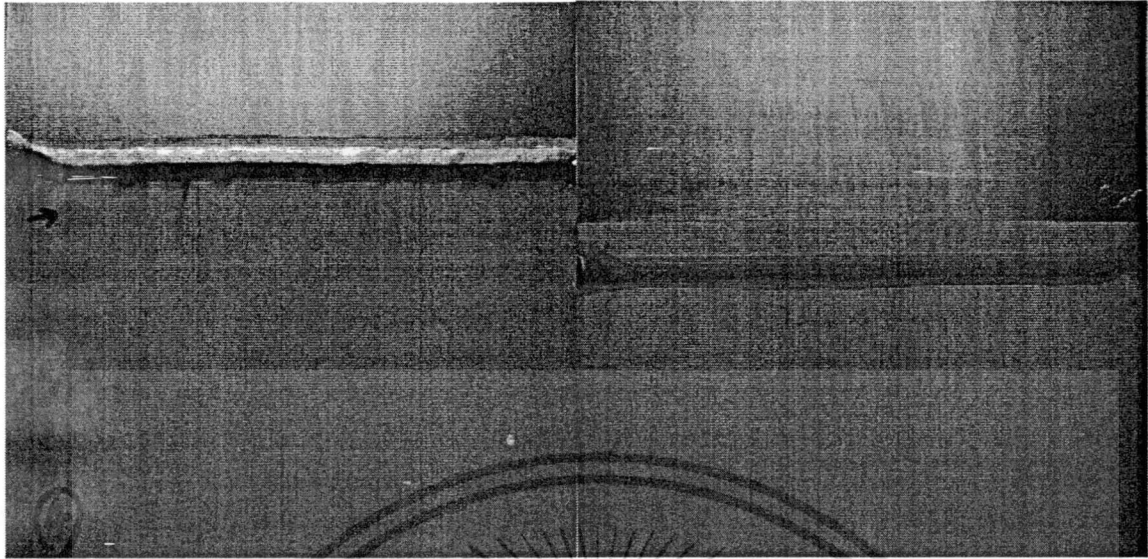


รูปที่ 4.6 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเล่นประสานเท่ากับ 565 มิลลิเมตร/นาทึ ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 10 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ 15 องศา



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 58 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ลักษณะด้านหน้าและด้านหลังของรอยเชื่อมที่ความเร็วในการแล่นประสานเท่ากับ 565 มิลลิเมตร/นาที ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงานเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมุมงานเท่ากับ 15 องศา

#### 4.2 การวัดค่าตอบสนอง (Output)

หลังจากได้ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าชุบสังกะสีและอลูมิเนียมอัลลอยเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อมาจึงได้มีการวัดค่าความต้านทานแรงดึง เพื่อนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 59 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 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

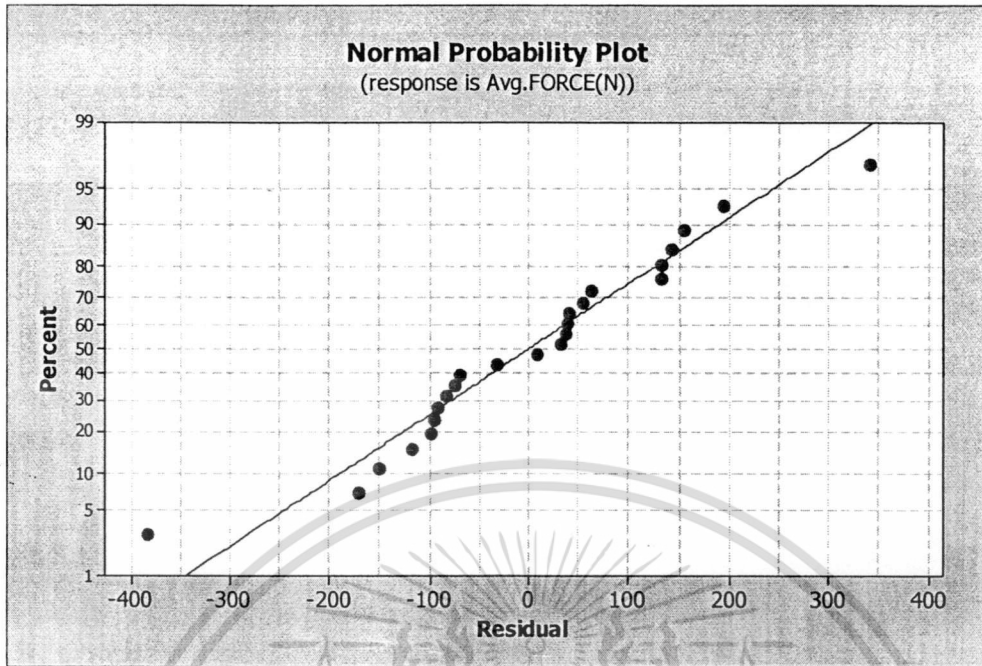
#### 4.3.1 การทดสอบสมมติฐานเพื่อคัดเลือกปัจจัยโดยใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design)

การทดสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนว่ามีความถูกต้อง และเหมาะสมหรือไม่ (Model Adequacy Checking) จะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

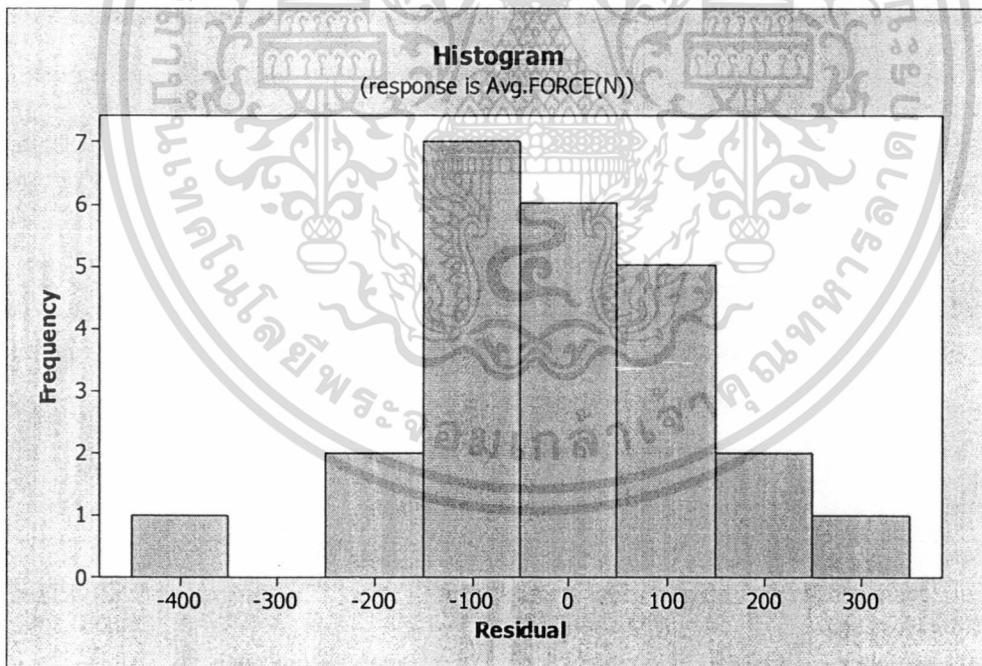
- 1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residuals)
- 2) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง
- 3) การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง
- 4) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability)

##### 4.3.1.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residual)

ถ้าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ค่าส่วนตกค้างจากกราฟ Normal Probability จะมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และอาจพิจารณาได้จากฮิสโตแกรม ถ้าพื้นที่ใต้กราฟเป็นรูปประฆังคว่ำสามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติได้เช่นกัน จากกราฟดังรูปที่ 4.9 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และจากกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 4.10 พื้นที่ใต้กราฟเป็นรูปประฆังคว่ำ ทำให้สรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ



รูปที่ 4.9 แสดงการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล

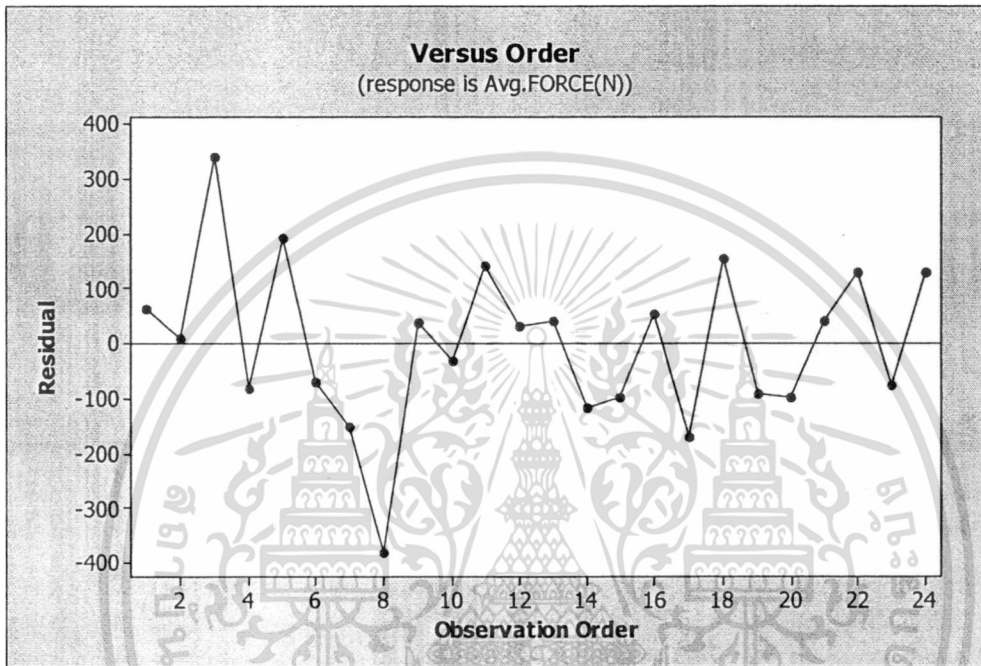


รูปที่ 4.10 ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 62  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independence) ของค่าส่วนตกค้าง

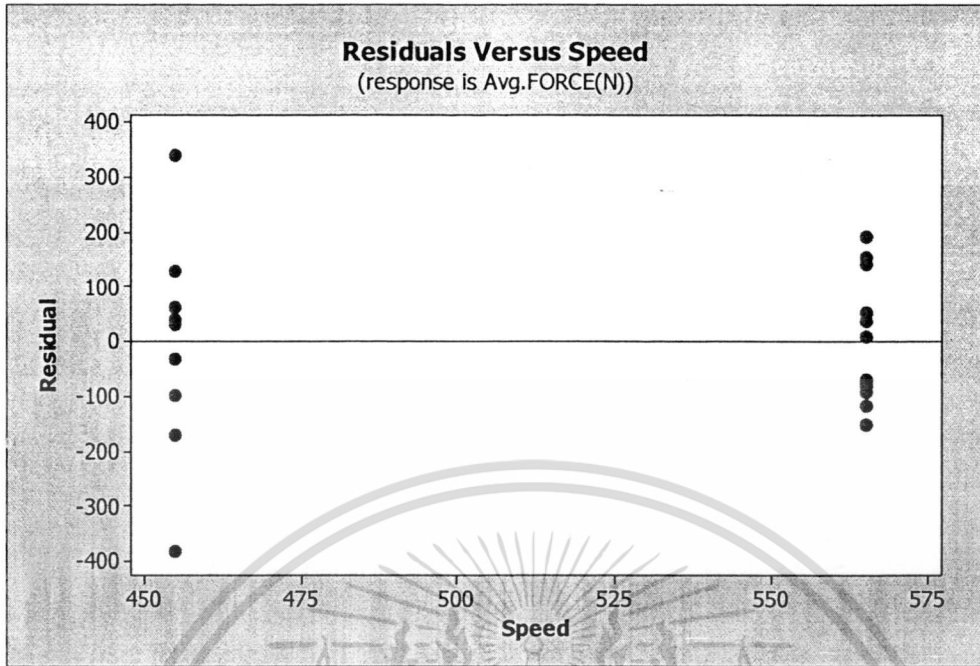
ถ้าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้จะสามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน โดยจากกราฟดังรูปที่ 4.11 จะสังเกตได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน



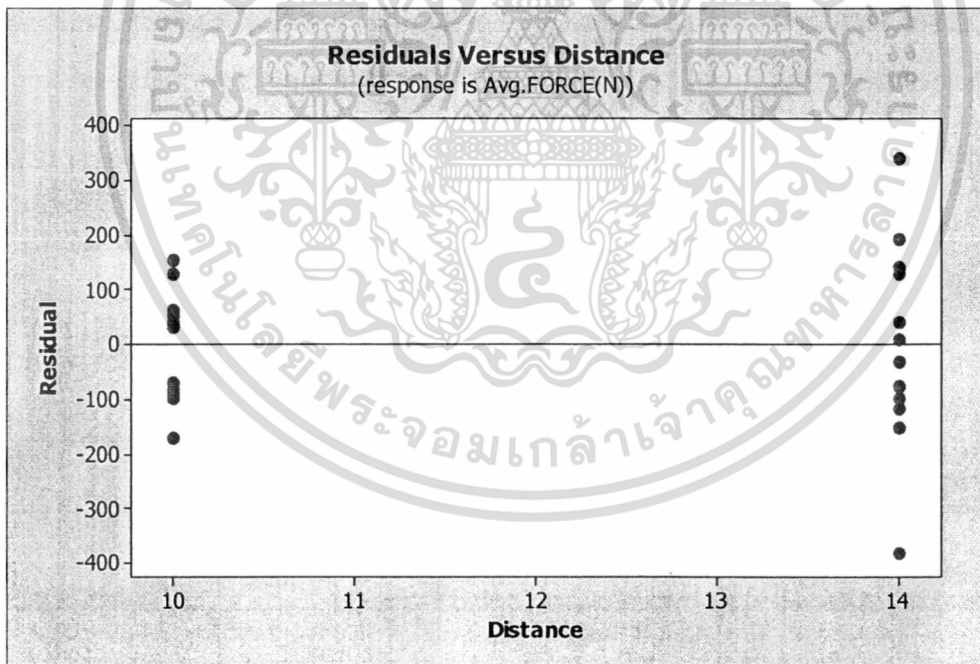
รูปที่ 4.11 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Observation Order จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล

#### 4.3.1.3 การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง

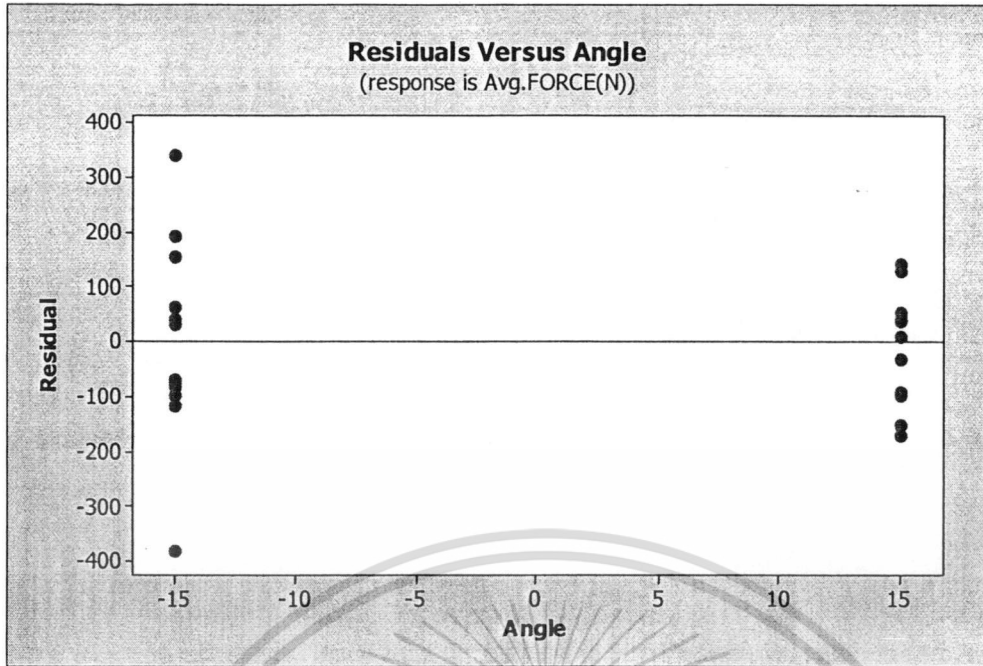
จากแผนภูมิการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับค่าของปัจจัยต่างๆ ดังรูปที่ 4.12 พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน จะสามารถประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้างมีใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์ (0)



รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่าปัจจัยต่างๆ จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล



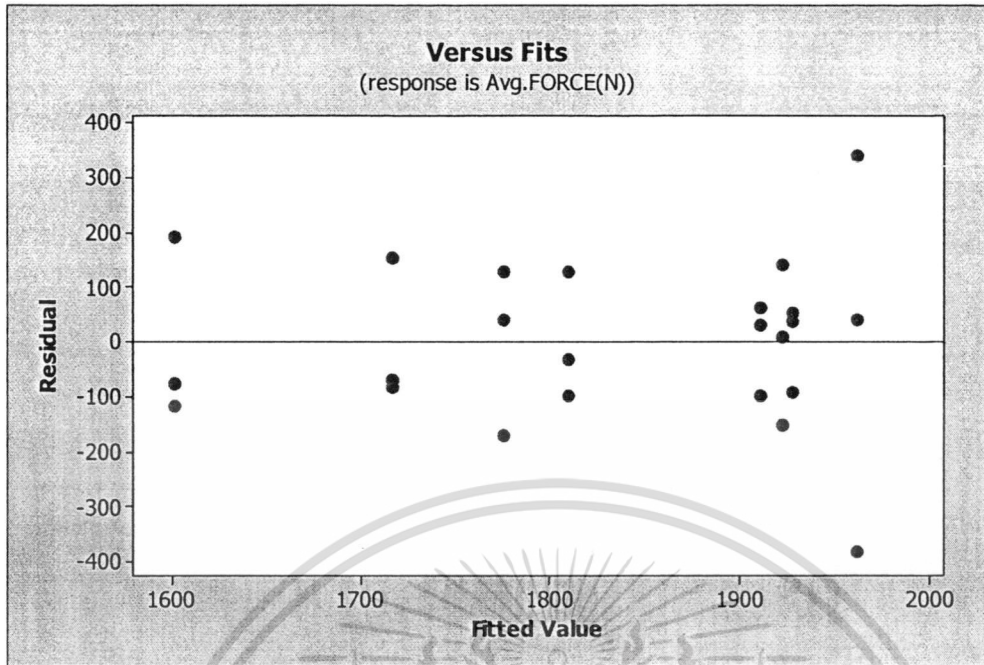
รูปที่ 4.12 (ต่อ) แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับค่าปัจจัยต่างๆ จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล



รูปที่ 4.12 [ต่อ] แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับค่าปัจจัยต่างๆ จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล

4.3.1.4 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability)

จากแผนภูมิการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับ Fitted Value ดังรูปที่ 4.13 พบว่าค่าของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



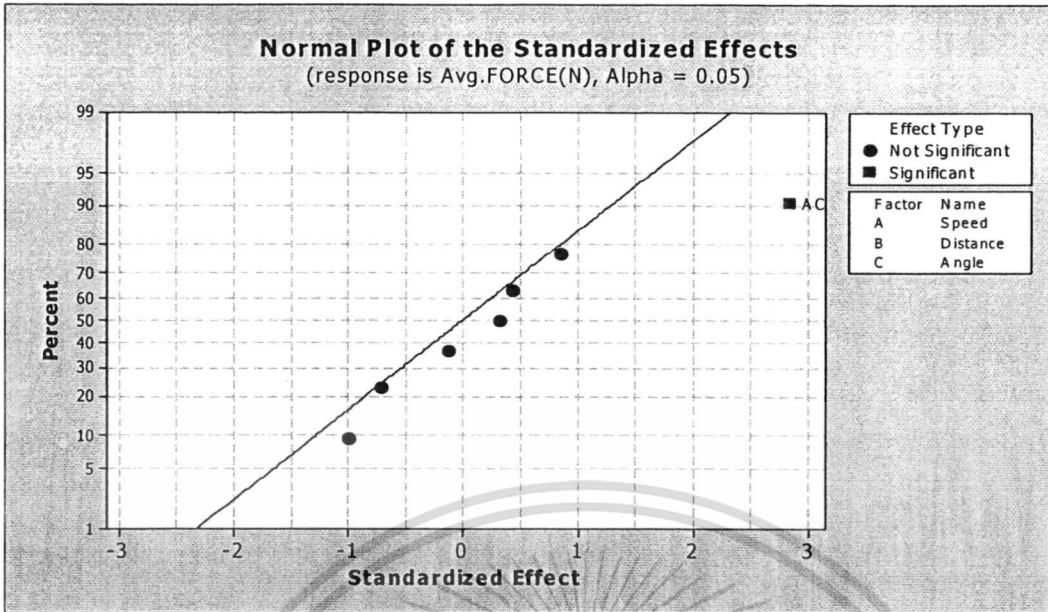
รูปที่ 4.13 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่า Fitted Value หรือค่าความต้านทานแรงดึง จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล

**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 ความเร็วในการแล่นประสาน (Travel Speed) กับมุมงาน (Work Angle) ซึ่งจะต้องนำปัจจัยหลัก (Main Effects) มาพิจารณาในขั้นตอนต่อไป ได้แก่ ความเร็วในการแล่นประสาน และมุมงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 66 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า - ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟ Effect Plot แสดงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า P-Values จากตาราง Estimated Effects and Coefficients

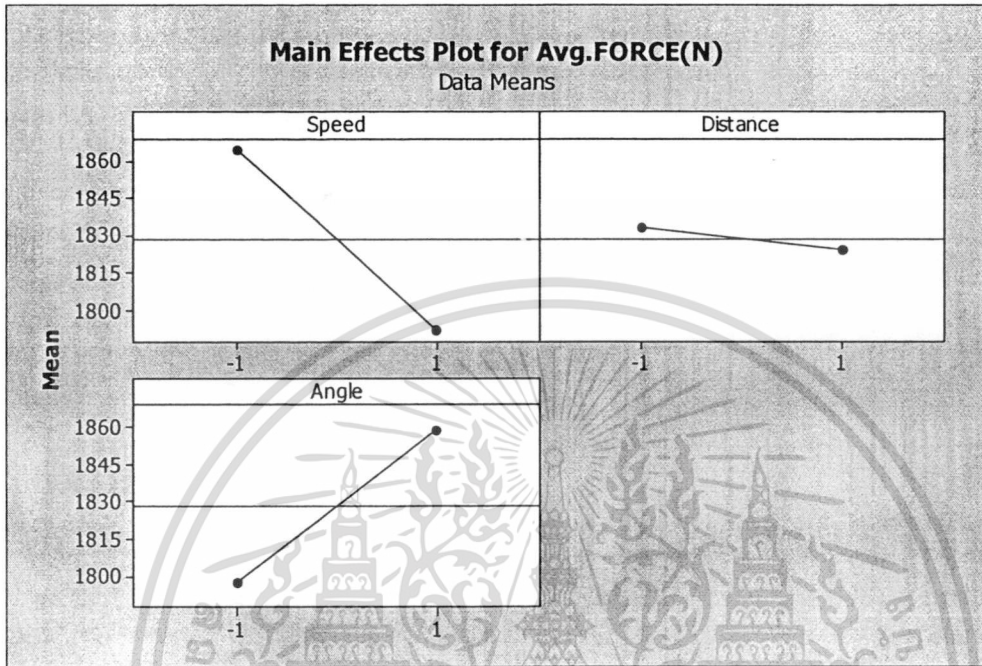
Estimated Effects and Coefficients for Avg.FORCE(N) (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		1828.33	36.21	50.50	0.000
Speed	-72.43	-36.22	36.21	-1.00	0.332
Distance	-8.75	-4.38	36.21	-0.12	0.905
Angle	61.41	30.71	36.21	0.85	0.409
Speed*Distance	-51.44	-25.72	36.21	-0.71	0.488
Speed*Angle	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				

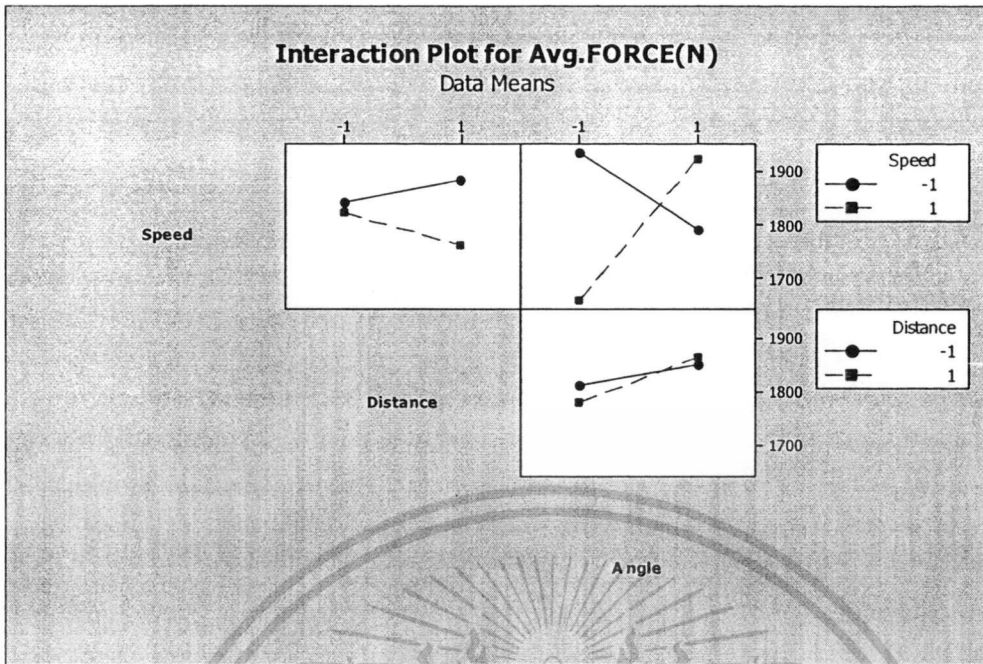
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 67 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักต่างๆ กับค่าความต้านทานแรงดึง (Main Effects Plot) จากการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียล

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.16 พบว่าปัจจัยที่มีผลร่วมกันต่อค่าความต้านทานแรงดึงคือความเร็วในการเล่นประสานกับค่ามุมงานด้วยมีความสัมพันธ์เป็นแบบแปรผกผันตรง



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

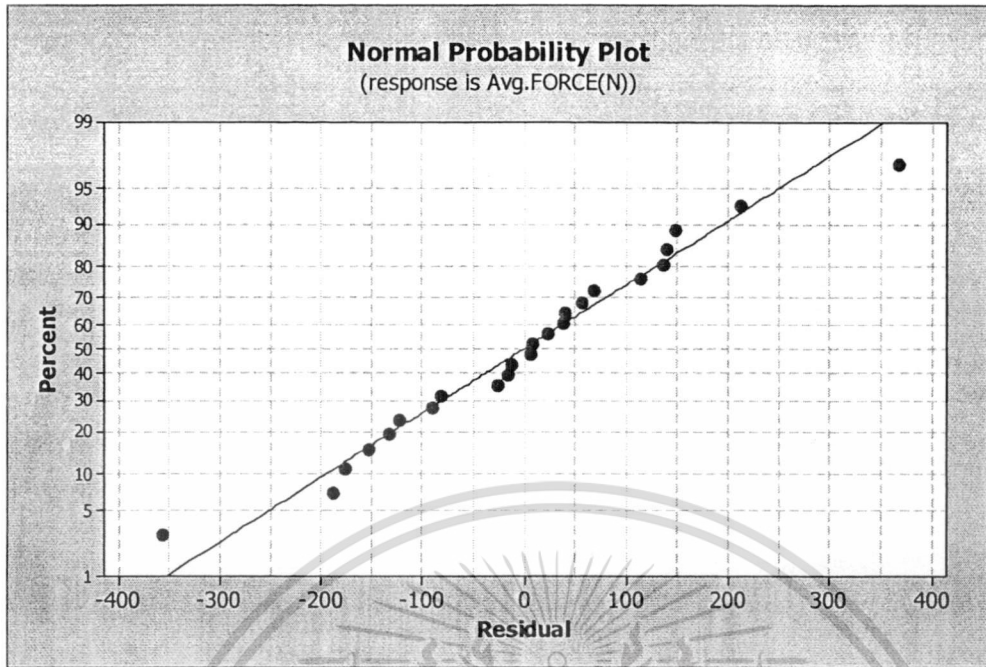
##### 4.3.3.1 การทดสอบสมมติฐานในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

การทดสอบสมมติฐานในรูปแบบของ Linear จะประกอบไปด้วย

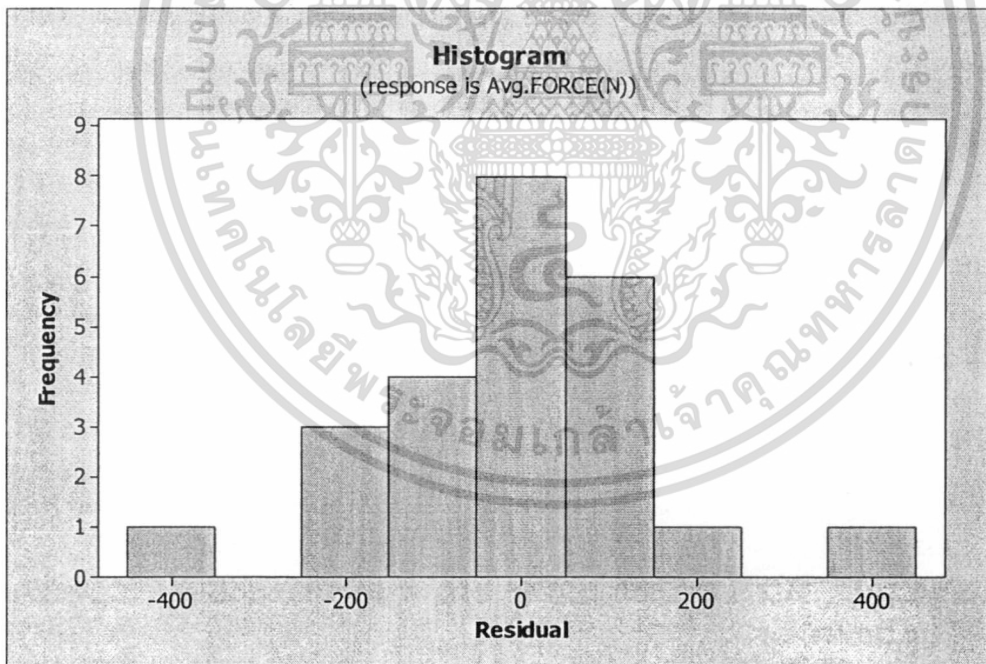
- 1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง
- 2) การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง
- 3) การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง
- 4) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

พิจารณาจากรูปที่ 4.17 พบว่าการกระจายตัวของค่าส่วนเกินกระจายอยู่ตามแนวเส้นตรงส่วนรูปที่

4.18 พบว่าพื้นที่ใต้กราฟเป็นรูปประฆังคว่ำ ดังนั้นการกระจายตัวจึงเป็นแบบปกติ



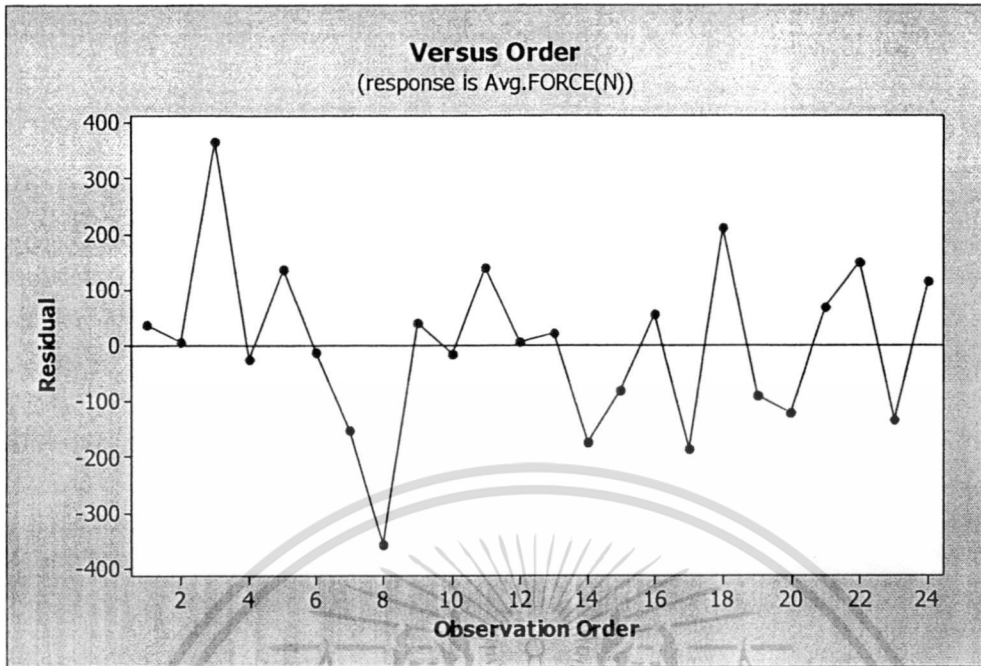
รูปที่ 4.17 แสดงการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง



รูปที่ 4.18 ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

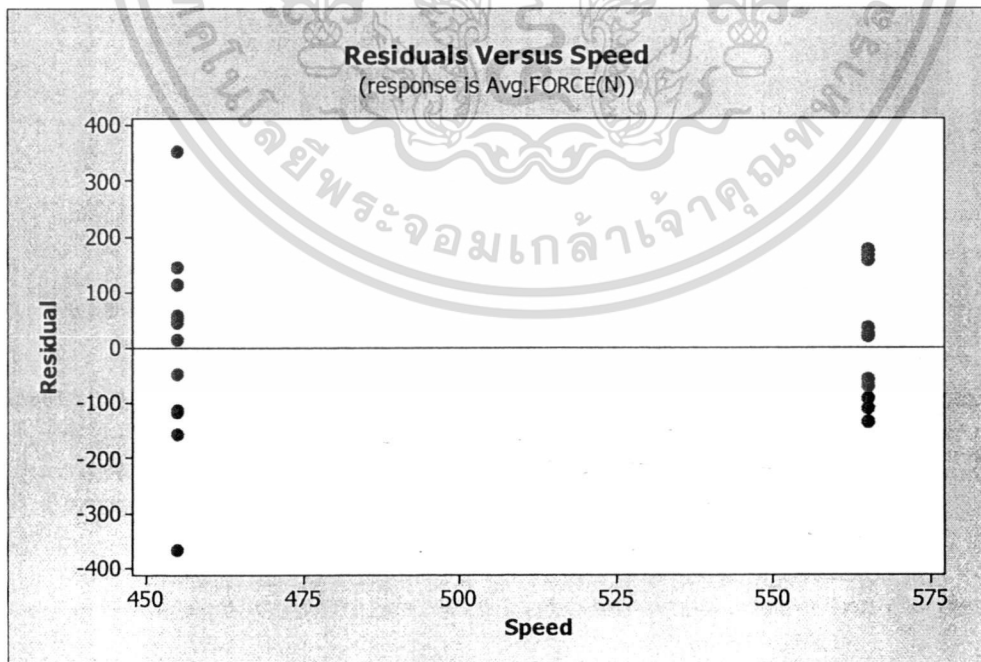
พิจารณารูปที่ 4.19 พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้จะสามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 70 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

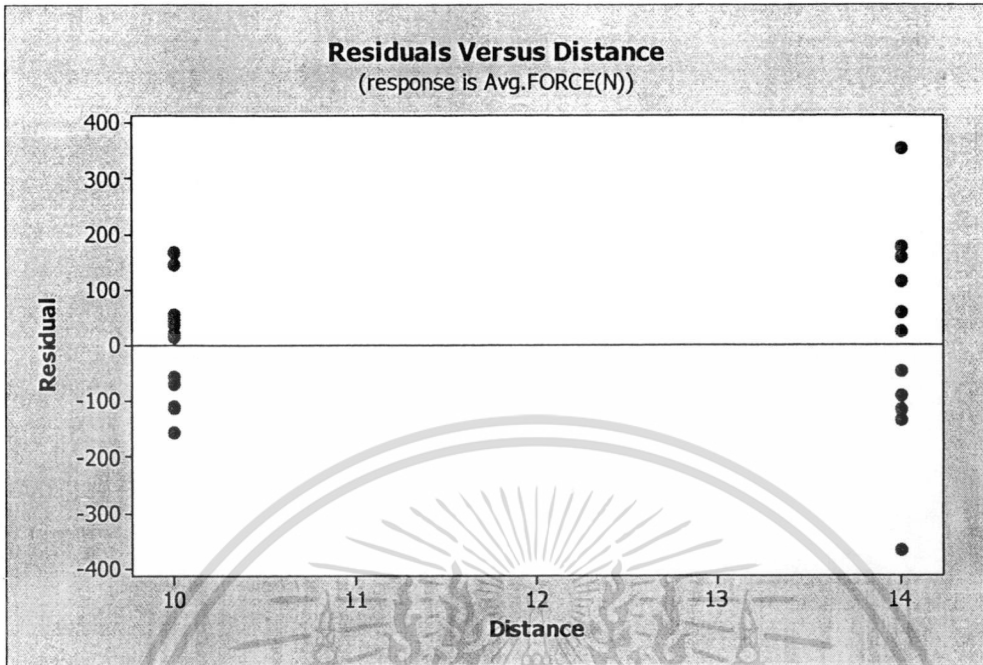


รูปที่ 4.19 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Observation Order ในการวิเคราะห์พื้นผิว  
 ตอบสนอง

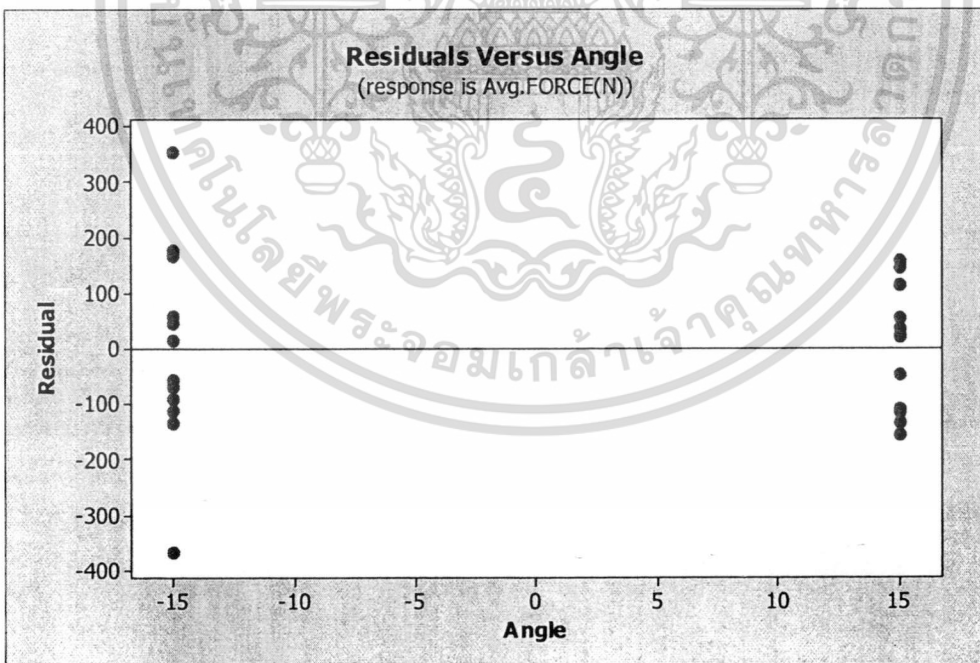
พิจารณารูปที่ 4.20 พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน จะสามารถประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้างมีใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์ (0)



รูปที่ 4.20 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่าปัจจัยต่างๆ ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 71 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

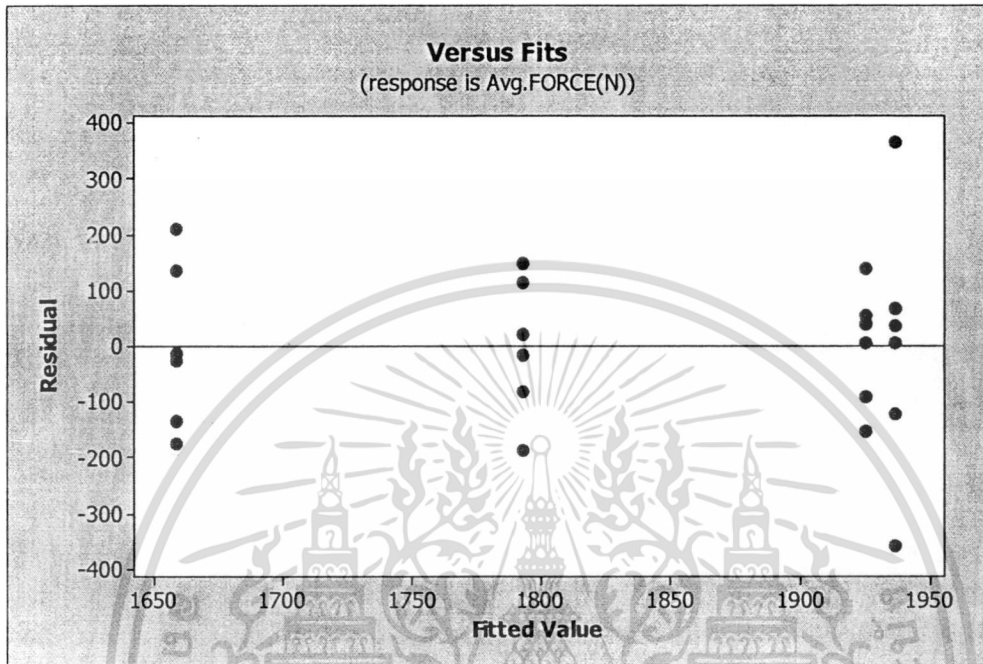


รูปที่ 4.20 [ต่อ] แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับค่าปัจจัยต่างๆ ในการวิเคราะห์พื้นผิว  
ตอบสนอง



รูปที่ 4.20 [ต่อ] แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับค่าปัจจัยต่างๆ ในการวิเคราะห์พื้นผิว  
ตอบสนอง

จากแผนภูมิการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับ Fitted Value ดังรูปที่ 4.21 พบว่าค่าของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่พบว่ามีรูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



รูปที่ 4.21 แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับค่า Fitted Value หรือค่าความต้านทานแรงดึง ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวดอกสนอง

#### 4.3.3.2 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Analysis)

ในการวิเคราะห์สมการการถดถอย ค่าของสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทบ แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการในรูปแบบเส้นตรง

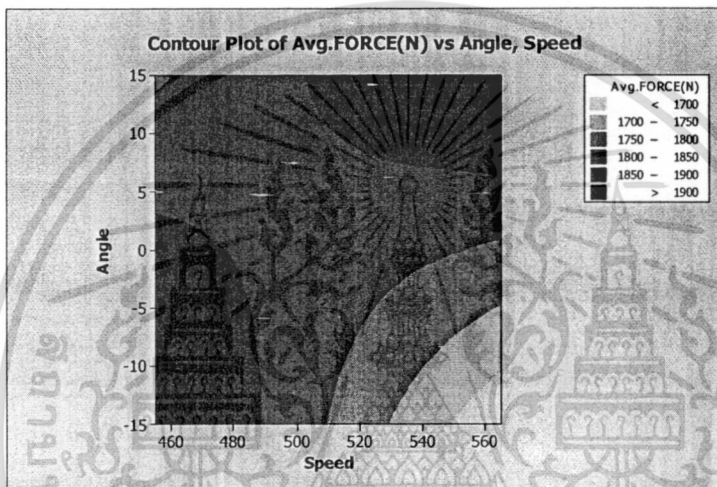
The analysis was done using uncoded units. Estimated Regression Coefficients for Avg.FORCE(N)				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2164.16	309.626	6.990	0.000
Speed	-0.66	0.604	-1.091	0.288
Angle	-61.35	20.642	-2.972	0.008
Speed*Angle	0.12	0.040	3.089	0.006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 73 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

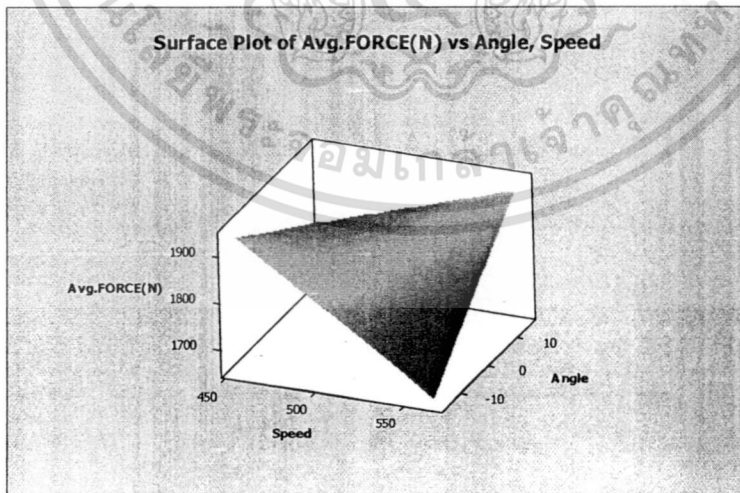
ดังนั้นจะได้สมการการถดถอยในรูปของสมการเส้นตรง ดังสมการที่ 4.1 ดังนี้

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

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

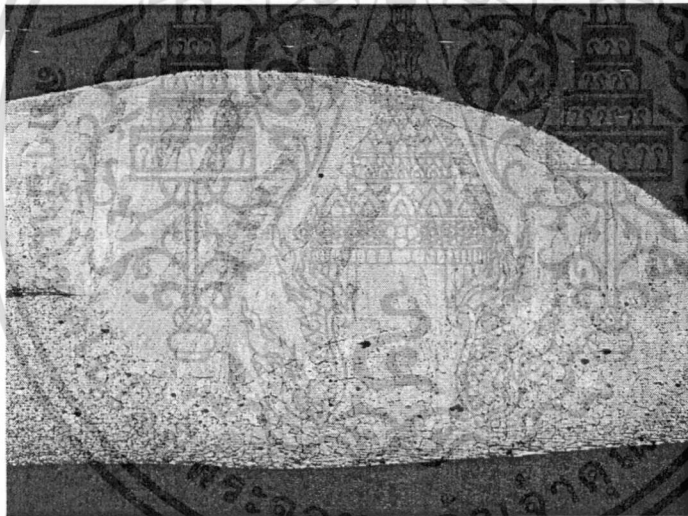


รูปที่ 4.23 แสดงแนวโน้มของค่าความต้านทานแรงดึง โดย Surface Plot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 74 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

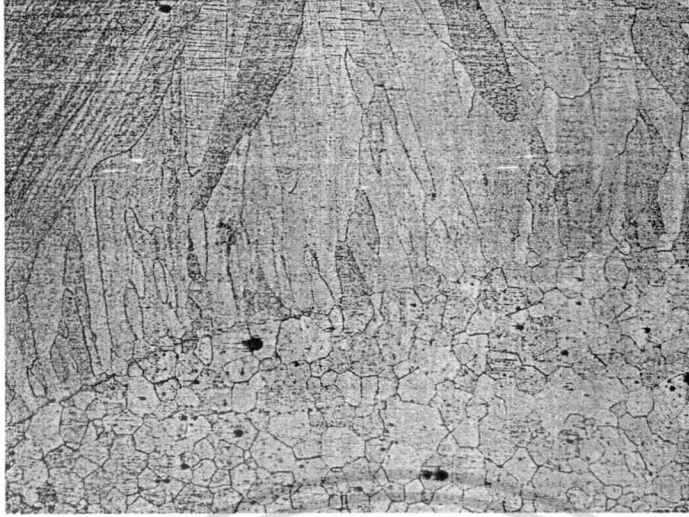
#### 4.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทำโดยใช้ SEM และ EDX ช่วยในการตรวจสอบ สำหรับในการแล่นประสานแบบมีกระหว่างเหล็กกล้าชุบสังกะสีและอลูมิเนียมอัลลอย 5052 นั้น พบว่ามีสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นสามชนิดด้วยกันในรอยต่อที่ได้จากการแล่นประสาน คือ  $Fe_2Al_5$ ,  $FeAl_2$  และ  $FeAl_3$  ในงานวิจัยนี้พบว่าการเกิดสารประกอบเชิงโลหะที่รอยต่อขึ้นอยู่กับตัวแปรในการแล่นประสาน คือ ความเร็วในการแล่นประสาน และไม่พบว่าการเกิดขึ้นของสารประกอบเชิงโลหะขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่น ๆ ที่ทำการศึกษา โดยที่  $Fe_2Al_5$  เกิดขึ้นที่การแล่นประสานที่ใช้ความเร็วในการแล่นประสานสูง ในขณะที่  $FeAl_2$  และ  $FeAl_3$  เกิดขึ้นเมื่อใช้ความเร็วในการแล่นประสานต่ำ เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าความร้อนที่เกิดขึ้นกับรอยต่อในระหว่างการแล่นประสานจะแปรผกผันกับความเร็วในการแล่นประสาน ซึ่งหมายความว่า  $Fe_2Al_5$  ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นที่ระดับความร้อนต่ำ ส่วน  $FeAl_2$  และ  $FeAl_3$  เกิดขึ้นเมื่อมีระดับความร้อนในการแล่นประสานที่สูงขึ้น รูปที่ 4.24 - 4.26 แสดง โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในรอยต่อที่ได้จากการแล่นประสาน

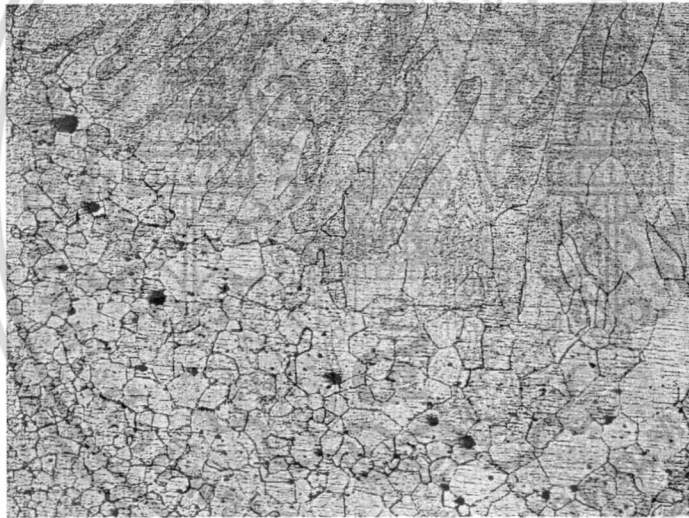


รูปที่ 4.24 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่ได้จากการแล่นประสานที่ก่าลึงขยาย 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่ได้จากการเล่นประสานที่กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4.26 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อที่ได้จากการเล่นประสานที่กำลังขยาย 200 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

## สรุปผลการดำเนินงาน

### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษากการเชื่อมประสานอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กกล้าโดยใช้วิธีการเชื่อมประสานแบบมิก (MIG brazing) ซึ่งเป็นวิธีการเชื่อมประสานที่ผสมกันระหว่างการเชื่อมประสาน (Brazing) และการเชื่อมแบบมิก (Metal inert gas welding) ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการเชื่อมประสานแบบมิกที่มีผลต่อความสมบูรณ์และรูปร่างของรอยเชื่อม คุณสมบัติทางกล (ความแข็งแรงของรอยเชื่อม) และการเกิดโครงสร้างจุลภาคภายในรอยเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดสารประกอบเชิงโลหะชนิดต่างๆ โดยตัวแปรที่จะทำการศึกษา ได้แก่ ความเร็วในการเชื่อมประสาน (Travel speed) ระยะจากหัวเชื่อมถึงชิ้นงาน (Nozzle to work distance) และมุมงาน (Work angle) โดยให้แรงดันไฟฟ้า (Voltage) กระแสไฟฟ้า (Current) อัตราการป้อนลวด (Wire feed rate) และอัตราการไหลของแก๊สคลุม (Gas flow rate) มีค่าคงที่ และจะทำการศึกษากการเชื่อมประสานแบบมิกระหว่างแผ่นอลูมิเนียม (Al 5052) กับแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนเคลือบสังกะสี (Galvanized steel) ภายใต้บรรยากาศแก๊สอาร์กอน (Ar) โดยใช้รอยต่อแบบต่อเกย (Lap joint) และใช้โลหะเติม Al-Si แบบลวดในการเชื่อมประสาน

จากกการทดลองและการวิเคราะห์ผลพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกล (ความต้านทานแรงดึงของรอยต่อ) คือ ความเร็วในการเชื่อมประสาน และมุมงาน ส่วนปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานแรงดึงของรอยต่อ คือ ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วในการเชื่อมประสานและมุมงาน และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการพยากรณ์ค่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อ คือ  $Y = 2164.16 - 0.66 * \text{Speed} - 61.35 * \text{Angle} + 0.12 * \text{Speed} * \text{Angle}$  โดยข้อจำกัดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ คือ ขอบเขตของปัจจัยความเร็วในการเชื่อมประสาน จะอยู่ในช่วง 400 ถึง 650 มิลลิเมตร/นาที และขอบเขตของมุมงาน จะอยู่ในช่วง -15 ถึง 15 องศา โดยที่ความเร็วในการเชื่อมประสานและมุมงานที่ใช้ในช่วงที่ได้กล่าวมานี้ เป็นช่วงที่ให้รูปร่างของรอยเชื่อมที่สมบูรณ์ตามมาตรฐานการตรวจสอบรอยเชื่อม ANSI/AWS.B.11:2000 สำหรับสารประกอบเชิงโลหะที่พบในรอยต่อจากการเชื่อมประสานในการศึกษานี้ ได้แก่  $\text{Fe}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{FeAl}_2$  และ  $\text{FeAl}_3$  ในงานวิจัยนี้พบว่าเกิดการเกิดสารประกอบเชิงโลหะที่รอยต่อขึ้นอยู่กับตัวแปรในการเชื่อมประสาน คือ ความเร็วในการเชื่อมประสาน และไม่พบว่าการเกิดขึ้นของสารประกอบเชิงโลหะขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นๆที่ทำการศึกษา โดยที่  $\text{Fe}_2\text{Al}_3$  เกิดขึ้นที่การเชื่อมประสานที่ใช้ความเร็วในการเชื่อมประสานสูง ในขณะที่  $\text{FeAl}_2$  และ  $\text{FeAl}_3$  เกิดขึ้นเมื่อใช้ความเร็วในการเชื่อมประสานต่ำ เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าความร้อนที่เกิดขึ้นกับรอยต่อในระหว่างการเชื่อมประสานจะแปรผกผันกับความเร็วในการเชื่อมประสาน ซึ่งหมายความว่า  $\text{Fe}_2\text{Al}_3$  ที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นที่ระดับความร้อนต่ำ ส่วน  $\text{FeAl}_2$  และ  $\text{FeAl}_3$  เกิดขึ้นเมื่อมีระดับความร้อนในการเชื่อมประสานที่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ 77 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

- [1] [www.thaipr.net](http://www.thaipr.net)
- [2] Schubert, E., Klassen, M., Zerner, I., Walz, C., Sepold, G. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001; 115: 2-8.
- [3] Mathieu, A., Pontevecchi, S., Viala, J., Cicala, E., Mattei, S., Grevey, D. Laser brazing of a steel/aluminium assembly with hot filler wire (88% Al, 12% Si). *Materials Science & Engineering A*. 2006; 435-436: 19-28.
- [4] Mathieu, A., Shabadi, R., Deschamps, A., Suery, M., Mattei, S., Grevey, D., Cicala, E., Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire). *Optics & Laser Technology*. 2007; 39: 652-661.
- [5] Murakami, T., Nakata, K., Tong, H., Ushio, M., Dissimilar metal joining of aluminum to steel by MIG arc brazing using flux cored wire. *ISIJ International*. 2003; 43: 1596-1602.
- [6] Zhang, H.T., Feng, J.C., He P., Hackl, H., Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminum-zinc-coated steel joints made by a modified metal inert gas welding-brazing process. *Materials Characterization*. 2007; 58: 588-592.
- [7] Oikawa, H., Saito, T., Yoshimura, T., Nagase, T., Kiriya, T., Spot welding of aluminum clad steel to steel or aluminum--Dissimilar metal joining of steel to aluminum with intermediate layer. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*. 1996; 14: 69-80.
- [8] Kikuchi, M., Takeda, H., Morozumi, S., Bonding interfaces in friction and explosive welded aluminum and steel joints. *Journal of Japan Institute of Light Metals*. 1984; 34: 165-173.
- [9] Iordachescu, D., Quintino, L., Miranda, R., Pimenta, G., Influence of shielding gases and parameters on metal transfer and bead shape in MIG brazed joints of the thin zinc coated steel plates. *Materials & Design*. 2006; 27: 381-390.
- [10] Yu, Z., Li, R., Qi, K., Growth behavior of interfacial compounds in galvanized steel joints with  $\text{CuSi}_3$  filler under arc brazing. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2006; 16: 1391-1396.
- [11] Chew, K.H., Pang, J.H.L. Impact of drop-in lead free solders on microelectronics packaging. *Electronics Packaging Technology Conference*. 2005; 451-454.
- [12] Amagai, M., Toyoda, Y., Ohnishi, T., Akita, S. High drop test reliability: Lead-free solders. *Electronic Components and Technology Conference*. 2004: 1304-1309.
- [13] Yu, D.Q., Wu, C.M.L., Law, C.M.T., Wang, L., Lai, J.K.L. Intermetallic compounds growth between  $\text{Sn-3.5Ag}$  lead-free solder and Cu substrate by dipping method. *Journal of Alloys and Compounds*. 2005; 392: 192-199.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 78 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[14] Ma, X., Qian, Y., Yoshida, F. Effect of La on the Cu-Sn intermetallic compound (IMC) growth and solder joint reliability. *Journal of Alloys and Compounds*. 2002; 334: 224-227.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้