

ผลของตัวแปรการเชื่อมแม่เหล็กที่มีผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม

EFFECT OF MAG WELDING PARAMETERS ON JOINT QUALITY

นายทศพล กุลกุล รหัส 49360624

นายวีระ คาทอง รหัส 49363380

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่รับ 13 ก.ค. 2552

เลขทะเบียน 15060138

เลขเรียกหนังสือ ๗5.

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ๗238 ๗ 2552

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปีการศึกษา 2552

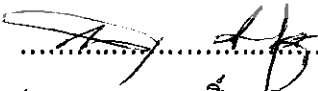



## ใบรับรองปริญญาโท

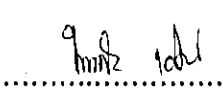
ชื่อหัวข้อโครงการ ผลของตัวแปรการเชื่อมแม่เหล็กที่มีผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม  
ผู้ดำเนินโครงการ นายทศพล กุลกุล รหัส 49360624  
นายวีระ ดาทอง รหัส 49363380  
ที่ปรึกษาโครงการ อ. ศรีสังจา บุญฤทธิ  
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ  
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ  
ปีการศึกษา 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

  
.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(อ. ศรีสังจา บุญฤทธิ)

  
.....กรรมการ  
(อ. ธนา บุญฤทธิ)

  
.....กรรมการ  
(อ. เสาวลักษณ์ ทองกลั่น)

  
.....กรรมการ  
(อ. วัฒนชัย เขาวรัตน์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	ผลของตัวแปรการเชื่อมแม่เหล็กที่มีผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายทศพล	กุลกุลศล	รหัส 49360624
	นายวีระ	คาทอง	รหัส 49363380
ที่ปรึกษาโครงการ	อ. ศรีสังจา บุญฤทธิ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2552		

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อม โดยการใช้กระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก ซึ่งใช้หุ่นยนต์ดำเนินการเชื่อมเหล็ก S37 ในการทดลองได้กำหนดตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม การศึกษาหาตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมได้ทำการทดสอบหาค่าความแข็ง ค่าแรงดึงของแนวเชื่อมและได้ประยุกต์การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) โดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อกรองปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อม จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  พบว่าค่าปัจจัยหลักได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อมและอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม ไม่มีผลต่อค่าความแข็งและค่าแรงดึงของแนวเชื่อม แต่มีอันตรกิริยาระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม และอันตรกิริยาระหว่างความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมและอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมมีผลต่อค่าแรงดึงของแนวเชื่อม

โดยกระแสไฟฟ้า 95 แอมป์ แรงดันไฟฟ้าที่ 26 โวลต์ ความเร็วในการเชื่อม 40 เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที จะทำให้ค่าความแข็งของแนวเชื่อมมีค่าน้อยที่สุด และกระแสไฟฟ้า 115 แอมป์ แรงดันไฟฟ้าที่ 26 โวลต์ ความเร็วในการเชื่อม 80 เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที จะทำให้ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมมากที่สุด

**Project title** Effects of MAG Welding Parameters on Joint Quality  
**Name** Mr. Tossapol Kulkusol ID. 49360624  
Mr. Weera Datong ID. 49363380  
**Project advisor** Mrs. Srisatja Boonrit  
**Major** Industrial Engineering  
**Department** Industrial Engineering  
**Academic year** 2009

.....

### Abstract

This research project aims to study a variable that affects the quality of welding by MAG welding. The robot uses welding in steel S37. The trial set variables that affect of joint quality including welding current, welding voltage, welding speed and flow rate of gas covered. Education is a variable that affects the quality of welding by testing for hardness and tensile strength of welding. Already have applications of experimental design (Design of Experiment) using statistical analysis to filter factors affecting the quality of welding

Results of the study and statistical analysis at the significant level of  $\alpha = 0.05$  indicate that the main factors include welding current , welding voltage, welding speed and flow rate of gas covered not affect to hardness and tensile strength of joint welding. But the interaction between welding current, welding voltage and welding speed, And interaction between welding speed and flow rate of gas covered have affect to hardness and tensile strength of joint welding.

By 95 Amp welding current, 26 Volt welding voltage, 40 cm per minute welding speed and 15 liters per minute flow rate of gas covered made to minimum hardness. And 115 Amp welding current, 26 Volt welding voltage, 80 cm per minute welding speed and 15 liters per minute flow rate of gas covered made to maximum tensile strength.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่องผลของตัวแปรการเชื่อมแม่เหล็กที่มีผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม ประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีต้องขอขอบคุณ ท่านอาจารย์ ศรีสังจา บุญฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำโครงการนี้เป็นอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณจักรพันธ์ จ้อยดวงจันทร์ คณาจารย์ ครูฝึกฝีมือแรงงานแผนกช่างเชื่อม สถาบันพัฒนาฝีมือแรงงานภาค 9 พิษณุโลก ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา รวมถึงทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนโครงการนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและคณะกรรมการทุกท่าน ซึ่งได้รับความกรุณาให้คำแนะนำเสนอแนะแนวทางการศึกษา ค้นคว้า ให้คำปรึกษา แก้ไขปรับปรุงข้อบกพร่องต่างๆ จนเป็นผลให้โครงการฉบับนี้สมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว ญาติพี่น้อง เพื่อนๆ ทุกคนที่คอยเป็นห่วงและให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา จนกระทั่งทำโครงการสำเร็จลุล่วงได้ ประโยชน์อันพึงมีจากการศึกษาโครงการวิจัยครั้งนี้ ขอมอบและอุทิศแด่บิดา มารดา บรรพบุรุษผู้ให้ชีวิตและทรัพย์สิน ครูอาจารย์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้ทำการศึกษาวิจัยตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายทศพล ฤกษ์กุล

นายวีระ คาทอง

กุมภาพันธ์ 2553

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์วัดผลงาน (Output).....	1
1.4 เกณฑ์วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินการวิจัย.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย.....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย.....	2
1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	4
2.1 กระบวนการเชื่อมเหล็ก.....	4
2.2 หลักการและเหตุผลของการนำหุ่นยนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมงานเชื่อม.....	19
2.3 เหล็กกล้า (Steels) .....	22
2.4 ลักษณะท่าเชื่อม.....	27
2.5 การตรวจสอบงานเชื่อม.....	28
2.6 หลักการพื้นฐานการออกแบบการทดลอง.....	31
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	35
3.1 การศึกษาขั้นตอนการเชื่อมแม่เหล็ก.....	36
3.2 การออกแบบการทดลอง.....	36
3.3 การเตรียมองค์ประกอบในการเชื่อม.....	37
3.4 การเชื่อมชิ้นงานทดสอบ.....	38
3.5 การทดสอบชิ้นงาน.....	40
3.6 การเก็บข้อมูลและบันทึกผลการทดลอง.....	44
3.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	44
3.8 การจัดทำเล่มรายงาน.....	49
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	50
4.1 การศึกษาวิจัยเบื้องต้นเพื่อควบคุมปัจจัยในกระบวนการเชื่อม.....	50
4.2 การตรวจสอบข้อมูลผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งและ ค่าแรงดึงของแนวเชื่อม.....	51
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	62
5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการดำเนินงาน.....	63
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก ก.....	65
ภาคผนวก ข.....	68

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	3
2.1 การเขียนสัญลักษณ์ของเหล็กกล้า ในระบบ AISI-SAE.....	26
3.1 แสดงปัจจัยระดับและขอบเขต สำหรับการเชื่อมแม่เหล็ก (Metal Active Gas Welding).....	36
3.2 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ 3 ปัจจัยแบบ Fixed Effects.....	46
3.3 แสดงตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ RCB Design.....	47
3.4 แสดงตารางที่ใช้บันทึกผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ RCB Design.....	47
ก.1 ปัจจัยสำหรับการเชื่อมแบบ MAG.....	66
ก.1 ปัจจัยสำหรับการเชื่อมแบบ MAG (ต่อ).....	67





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก.....4
2.2	อุปกรณ์สำหรับการเชื่อมแม่เหล็ก.....5
2.3	รอยเชื่อมที่ใช้แก๊สอาร์กอนสำหรับปกป้องกันรอยเชื่อม.....8
2.4	รอยเชื่อมที่ใช้แก๊สฮีเลียมปกป้องกันรอยเชื่อม.....9
2.5	การเปรียบเทียบการซึมลึกของรอยเชื่อมเมื่อใช้แก๊สชนิดต่างๆ.....12
2.6	รหัสที่ใช้จัดกลุ่มลวดเชื่อมแม่เหล็ก.....14
2.7	แสดงตัวอย่างหน่วยควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์.....20
2.8	แสดงอุปกรณ์จับยึดวางตำแหน่งงาน (Positioner).....21
2.9	แสดงการตรวจการทำงานระบบไม่สัมผัส.....22
2.10	แสดงส่วนประกอบของคาร์บอน.....24
2.11	แสดงหลักการของเครื่องวัดความแข็ง Rockwell.....29
2.12	แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็ก.....30
2.13	แสดงผังจำลองทั่วไปของกระบวนการออกแบบการทดลอง (DOE).....32
3.1	แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน.....35
3.2	แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ทำการเชื่อม.....37
3.3	ชิ้นงานทดลอง.....38
3.4	หุ่นยนต์เชื่อม.....39
3.5	ชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จ.....40
3.6	เครื่องทดสอบความแข็ง.....41
3.7	การทดสอบความแข็ง.....41
3.8	เครื่องทดสอบแรงดึง.....42
3.9	ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงดึง.....42
3.10	การทดสอบแรงดึง.....43
3.11	ชิ้นงานที่ทดสอบแรงดึงเสร็จ.....44
4.1	แสดงผลการทดสอบด้วยสายคาจากการทดสอบช่วงเชื่อมด้านการปฏิบัติงานเชื่อม.....51
4.2	แสดงค่า Normal Probability Plot for Hardness.....52
4.3	แสดงค่า Versus Order for Hardness.....53
4.4	แสดงค่า Versus Fist for Hardness.....54
4.5	แสดงค่า P-Value ที่ใช้ในการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งของแนวเชื่อม.....55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงค่า Main Effects Plot for Hardness.....	56
4.7 แสดงค่า Normal Probability Plot for Tensiles.....	57
4.8 แสดงค่า Versus Order for Tensiles.....	58
4.9 แสดงค่า Versus Fist for Tensiles.....	59
4.10 แสดงค่า P-Value ที่ใช้ในการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงของแนวเชื่อม.....	60
4.11 แสดงค่า Main Effects Plot for Tensiles.....	61
ข.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของแนวเชื่อม.....	68
ข.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงของแนวเชื่อม.....	69



## สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

$\alpha$	ระดับนัยสำคัญทางสถิติ
$\beta$	สัมประสิทธิ์การถดถอยหรือตั้งพารามิเตอร์
$\varepsilon$	ค่าความผิดพลาด
$\tau$	อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย
$\mu$	ค่าเฉลี่ยของประชากร
$\bar{y}$	ค่าเฉลี่ยของข้อมูล
$\hat{y}$	ค่าประมาณการของข้อมูล
$\chi^2$	ตัวสถิติไคร้สแควร์
$\sigma^2$	ค่าความแปรปรวนของประชากร
df	ขั้นของความอิสระ
MS	ค่ากำลังสองเฉลี่ย
$R^2$	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
SS	ผลรวมกำลังสอง
$S^2$	ค่าความแปรปรวนของตัวอย่าง
ANOVA (Analysis of Variance)	การวิเคราะห์ความแปรปรวน
Experiment of Factorial Design	การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล
Heat affect Zone (HAZ)	บริเวณความร้อนที่เกิดจากการเชื่อม
Model	แบบจำลอง
Model Adequacy Checking	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง
R - Square	สัมประสิทธิ์ภาพการตัดสินใจ
Statistical Design of Experiment	การออกแบบทดลองเชิงสถิติ
Variable	แบบผันแปร
DOE (Design of Experiment)	การออกแบบการทดลอง

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

เนื่องจากในปัจจุบันอุตสาหกรรมภายในประเทศได้มีการเจริญเติบโตและพัฒนาอย่างรวดเร็ว ซึ่งอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กก็เป็นส่วนหนึ่งในการสนับสนุนการเจริญเติบโตและพัฒนาของประเทศ เหล็กจึงเป็นวัตถุดิบชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการประกอบติดเข้าด้วยกันโดยอาศัยการเชื่อมประสาน การเชื่อมที่เป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ก็คือ การเชื่อมแม่เหล็ก (Metal Active Gas Welding) ซึ่งการเชื่อมแต่ละครั้งจะเกิดความแปรปรวนขึ้นอยู่ไม่น้อย จึงได้ศึกษาหาตัวแปรที่มีผลต่อการเชื่อมแม่เหล็ก ด้วยการตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อมซึ่งสามารถทำได้ด้วยกันหลายวิธี ทั้งการทดสอบแบบทำลายชิ้นงานและการทดสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงาน

ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นในรูปแบบของการทดลองและเก็บข้อมูลทางสถิติ โดยใช้หลักการทางสถิติมาวิเคราะห์ผลเพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของรอยเชื่อมและเลือกตัวแปรที่เหมาะสมต่อการเชื่อมแม่เหล็ก โดยอาศัยการทดสอบชิ้นงานแบบทำลายชิ้นงานคือการทดสอบการกดหาค่าความแข็ง ทดสอบแรงดึงของแนวเชื่อม

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพต่อค่าความแข็ง และค่าแรงดึงของแนวเชื่อม

1.2.2 เพื่อใช้ผลการศึกษาที่ได้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงด้านงานเชื่อมที่มีคุณภาพ

### 1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

1.3.1 แสดงให้เห็นถึงค่าตัวแปรได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อม และอัตราการไหล ที่มีผลต่อค่าความแข็งและค่าแรงดึงของแนวเชื่อม

#### 1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

1.4.1 ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีผลในการเชื่อมกับค่าความแข็งแรง และค่าแรงดึงของแนวเชื่อมได้

1.4.2. นำผลการศึกษาวิจัยที่ได้ใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาทางด้านงานเชื่อมให้มีคุณภาพ

#### 1.5 ขอบเขตในการดำเนินการวิจัย

1.5.1 การใช้กระบวนการเชื่อมแม่เหล็ก (Metal Active Gas Welding) โดยใช้หุ่นยนต์เชื่อม (Robot Welding) ยี่ห้อ Nachai ABC Master 350 Model 2

1.5.2 ตัวแปรการเชื่อมที่ศึกษาได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อมและอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม

1.5.3 วัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานในคือ เหล็กชนิด S37 ขนาด 100X150 มิลลิเมตรหนา 6 มิลลิเมตร และบากชิ้นงานหนึ่งด้านมุมเท่ากับ 30 องศา

1.5.4 ลวดเชื่อมที่ใช้ คือ ลวดเชื่อม ER 80 S-B 2 ขนาด 1 มิลลิเมตร

1.5.5 ก๊าซที่ใช้ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)

1.5.6 ลักษณะท่าที่ใช้ในการเชื่อม คือ การเชื่อมต่อชนท่าราบซึมลึก

#### 1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

1.6.1 สถาบันพัฒนาฝีมือแรงงาน ภาค 9 จังหวัดพิษณุโลก

1.6.2 อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระนคร

#### 1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

เดือน กรกฎาคม 2552 – มกราคม 2553

## 1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

ลำดับ	การดำเนินงาน	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.
1.	การศึกษาขั้นตอนและข้อมูลการเชื่อมโยง แม่ึก	■						
2.	การออกแบบการทดลอง		■					
3.	การเตรียมองค์ประกอบการเชื่อมโยง		■					
4.	การเชื่อมโยงชิ้นงาน			■				
5.	การทดสอบชิ้นงาน				■			
6.	การเก็บข้อมูลและบันทึกผลการ ทดสอบ					■		
7.	การวิเคราะห์ผลและสรุปผลการ ทดลอง						■	
8.	การจัดทำเล่มรายงาน							■

## บทที่ 2

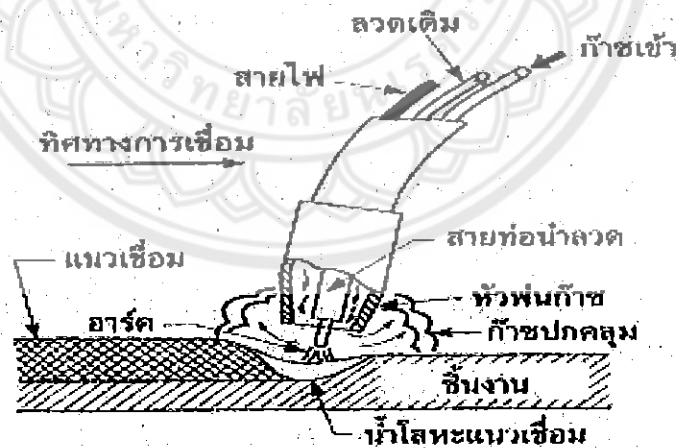
### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการเชื่อมแม่ิก

การเชื่อมโลหะภายใต้ก๊าซปกคลุม หรือการเชื่อมแม่ิก (MAG) มาจาก (Metal Active Gas Welding) เป็นกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ค ซึ่งการอาร์คเกิดขึ้นระหว่างลวดเชื่อมเปลือยที่ถูกป้อนมาอย่างต่อเนื่องกับโลหะชิ้นงาน ความร้อนแรงจากอาร์คจะทำให้ปลายลวดเชื่อมหลอมละลาย เติมลงไปรวมตัวกับน้ำโลหะชิ้นงานได้เป็นแนวเชื่อม ขณะเดียวกันบริเวณการอาร์คจะถูกปกคลุมด้วยแก๊สซึ่งจ่ายมาจากหัวเชื่อมเพื่อเป็นการป้องกันแก๊สออกซิเจนหรือแก๊สอื่นๆ จากบรรยากาศ กระบวนการเชื่อมแม่ิกสามารถแบ่งตามชนิดของแก๊สคลุมได้ 2 ชนิด คือ

1) การเชื่อมมิกส์ (MIG) หรือ Metal Inert Gas แก๊สที่ใช้ปกคลุมได้แก่ แก๊สเฉื่อยอาร์กอน หรือฮีเลียม หรือแก๊สผสมอาร์กอนกับออกซิเจนเป็นต้น ใช้เชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด เช่น อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าผสมต่ำ ทองแดงผสม เป็นต้น

2) การเชื่อมแม่ิก (MAG) หรือ Metal Active Gas แก๊สที่ใช้ปกคลุมคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สอาร์กอน ใช้เชื่อมเหล็กคาร์บอน (Carbon Steel) และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel)



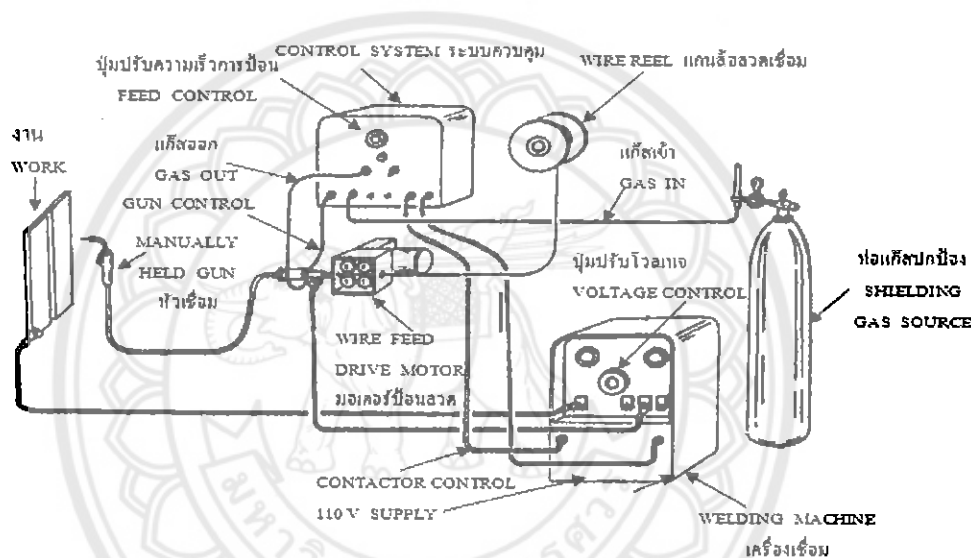
รูปที่ 2.1 กระบวนการเชื่อมแม่ิก

ที่มา : ประภาส (2542)

กระบวนการเชื่อมแม่ิก นิยมใช้แพร่หลายทั้งวิธีการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติ วิธีการอัตโนมัติช่างเชื่อม จะเป็นผู้ดำเนินการเองทั้งหมด ตั้งแต่การตั้งแรงดัน ปรับอัตราการไหลของแก๊ส และการเคลื่อนที่

ของหัวเชื่อม ส่วนการเชื่อมอัตโนมัติส่วนใหญ่จะใช้กับอุตสาหกรรมการผลิตที่ปริมาณงานเชื่อมมาก ๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ เป็นต้น ขนาดลวดเชื่อมที่นิยมใช้กันมีตั้งแต่ 0.8 – 3.2 มิลลิเมตร บรรจุในม้วน (Spool) การเลือกใช้จะพิจารณาตามความหนาและชนิดของชิ้นงานโลหะที่นิยมใช้กับกระบวนการเชื่อมแม่เหล็กได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอน อะลูมิเนียม สแตนเลส บรอนซ์ ทองแดง เป็นต้น ข้อดีของการเชื่อมแม่เหล็กมีหลายประการคือ เชื่อมได้ด้วยอัตราเร็วสูง ความร้อนไม่สะสมที่ชิ้นงานมาก ลวดเชื่อมป้อนอย่างต่อเนื่องไม่เสียเวลาเปลี่ยน , ให้การซึมลึกที่ดีกว่า , ไม่ต้องขจัดสแลก และสามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะและอโลหะ

### 2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเชื่อมโลหะด้วยวิธี MAG



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์สำหรับการเชื่อมแม่เหล็ก

ที่มา : อ.มานะศิษฐ์ (2543)

- 1) เครื่องเชื่อม (Welding Machine) หรือต้นกำลัง
- 2) ระบบการป้อนลวดและตัวควบคุม (Wire Feeder System and Control)
- 3) หัวเชื่อมและชุดสายประกอบการเชื่อม (Welding Gun and Cable Assembly)
- 4) แหล่งจ่ายแก๊สเพื่อใช้ปกป้องและอุปกรณ์ควบคุมแก๊ส (Shielding Gas Supply and Controls)
- 5) ลวดเชื่อม (Electrode Wire)



### 2.1.2 ความสามารถในการเชื่อม

กระบวนการเชื่อมเม็กนิยมนำมาใช้แพร่หลายทั้งวิธีการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ แต่ที่นิยมกันมากที่สุดได้แก่การเชื่อมกึ่งอัตโนมัติโดยคนเชื่อมจะเป็นผู้ดำเนินการเองทั้งหมดตั้งแต่การตั้งแรงดัน ปรับอัตราการใช้ของแก๊สคลุม และการเคลื่อนที่หัวเชื่อมด้วยมือ ส่วนการเชื่อมอัตโนมัติไม่ค่อยแพร่หลายนัก ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตที่มีปริมาณงานเชื่อมมากๆ เช่น โรงงานผลิตรถยนต์ เป็นต้น วิธีควบคุมควบคุมการเชื่อมอัตโนมัติทั้งหมดคนเชื่อมเพียงแต่คอยสังเกตความบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมเท่านั้น กระบวนการเชื่อมอัตโนมัติสามารถทำงานได้ทุกตำแหน่งแนวเชื่อม แต่ขึ้นอยู่กับขนาดลวดเชื่อมและลักษณะการถ่ายโอน โลหะด้วยกรณีใช้แก๊สอาร์บอนไดออกไซด์คลุมและลวดเชื่อมขนาดใหญ่จะเชื่อมได้ดีเฉพาะตำแหน่งแนวราบและแนวระดับ การถ่ายโอนโลหะแบบละอองเหมาะกับการเชื่อมแนวราบและแนวระดับ ถ้าต้องการแนวเชื่อมตั้งเหนือศีรษะต้องใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็กลง การเชื่อมอาร์คด้วยวิธีนี้จะมีปัญหาบ้างก็เฉพาะงานเชื่อมแนวตั้ง แต่แก้ไขได้โดยเปลี่ยนการถ่ายโอนโลหะไปเป็นแบบลัดวงจรหรือพัลส์แทน

### 2.1.3 วงจรการเชื่อมและกระแสเชื่อม

การเชื่อมเม็กมีลักษณะวงจรการเชื่อมประกอบด้วยระบบป้อนลวดเชื่อม (Wire Feeder System) จะเป็นตัวควบคุมการป้อนลวดเชื่อม เครื่องเชื่อมที่ใช้เป็นชนิดแรงดันคงที่ (CV) กระแสเชื่อม การไหลของแก๊สคลุมและน้ำหล่อเย็น ส่วนหัวเชื่อมจะทำหน้าที่ให้ลวดเชื่อมและแก๊สคลุมไหลผ่านออกมาสู่ที่อาร์ค กระบวนการเชื่อมนี้จะใช้ไฟกระแสตรงส่วนกระแสสลับใช้ไม่ได้ และกระแสตรงที่ให้ประสิทธิภาพในการเชื่อมสูงสุด คือ กระแสตรงกลับขั้ว (Direct Current Reverse Polarity, DCRP) โดยลวดเชื่อมจะเป็นขั้วบวก (DCEP) ความร้อนที่ได้รับจากการอาร์คจะหนาแน่นที่บ่อหลอมเหลว จึงเกิดการซึมลึกมากผิวงานสะอาดเหมาะสมกับงานเชื่อมที่มีออกไซด์บนผิวงานหนา (Heavy Surface Oxides) เช่น อะลูมิเนียมและแมกนีเซียม

การเชื่อมด้วยกระแสตรงไม่กลับขั้ว (Straight Polarity, DCSP) ลวดเชื่อมจะเป็นขั้วลบ (DCEN) ไม่นิยมใช้กับการเชื่อมเม็กเพราะระยะซึมลึกตื้น รอยเชื่อมกว้าง และมีประกายโลหะกระเด็นออกมามากเกินไป ผิวงานไม่สะอาด ต้องใช้ลวดเชื่อมชนิดพิเศษคือผิวลวดต้องเคลือบด้วยสารที่มีกำลังการเปล่ง (Emissive Power) เพื่อให้การปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ดี การเชื่อมโดยลวดเชื่อมเป็นขั้วลบจึงไม่ค่อยนิยมนักเพราะสารเคลือบลวดมีราคาแพงและรูปแบบการถ่ายโอนโลหะจากปลายลวดสู่บ่อหลอมเหลวไม่ค่อยได้ประสิทธิภาพ เป็นการถ่ายโอนโลหะแบบหยดขนาดใหญ่ และมีขนาดหยดไม่สม่ำเสมอกระแสกลับขั้วจะทำให้การถ่ายโอนโลหะแบบละอองขนาดเล็ก ส่วนกระแสสลับจะไม่นำมาใช้เพราะมีอัตราดินเปลื้อง (Burn-off Rate) ไม่เท่ากันในแต่ละครึ่ง วัฏจักร (Half-Cycle) การถ่ายโอนโลหะแบบพัลส์ต้องใช้เครื่องเชื่อมพิเศษเพื่อทำการพัลส์กระแสจากระดับ

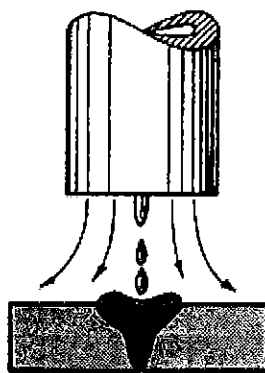
ต่ำไปสู่ระดับสูงที่ความถี่เท่ากับหรือเป็นสองเท่าของเส้นความถี่ (Line Frequency) ปกติจะเท่ากับ 50 หรือ 60 เฮิร์ต และ 100 หรือ 120 เฮิร์ต กระแสเชื่อมจะแปรผันจากค่าต่ำสุด 20 แอมแปร์ที่แรงดันอาร์ค 17 โวลต์ถึงสูงสุด 750 แอมแปร์ ที่แรงดันอาร์ค 50 โวลต์ ซึ่งพิสัยของกระแสและแรงดันขนาดนี้จะเกิดขึ้นทุกจังหวะที่มีการถ่ายโอนความร้อน

#### 2.1.4 การเลือกใช้แก๊สและผสมแก๊สในการเชื่อมโลหะด้วยวิธี MAG

การเลือกใช้แก๊สปกป้องรอยเชื่อมสำหรับการเชื่อมแบบแม่เหล็ก อาจจะมีปัญหาบ้างกับบรรยากาศรอบๆ เปลวไฟเชื่อม (Arc Stability) รูปร่างของรอยเชื่อม (Bead Shape) ความซึมลึกของรอยเชื่อม (Penetration) หมายถึงระยะของรอยเชื่อม ความซึมลึกของรอยเชื่อมหมายถึงระยะของบริเวณการละลายกินลึกลงไปภายใต้ผิวหน้าของชิ้นงาน การไม่มีรูพรุนในรอยเชื่อม (Freedom From Porosity) และอัตราเร็วในการเชื่อมที่ยอมรับได้ การที่จะเลือกแก๊สที่เหมาะสมจะต้องพิจารณาถึงสิ่งต่างๆ ที่กล่าวนี้ และพิจารณาราคาของแก๊สแต่ละชนิดด้วยแก๊สที่สำคัญสำหรับการเชื่อมแบบ GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) และแบบแม่เหล็ก มี 3 ชนิดด้วยกัน คือ อาร์กอน ฮีเลียม และคาร์บอนไดออกไซด์ การใช้แก๊สทั้ง 3 ชนิดนี้กับวิธีการเชื่อมทั้ง 2 วิธี ทำให้สามารถเชื่อมจรวด (Missiles and Rockets) เครื่องยนต์ Jets และเตาปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear Reactors) ซึ่งทำด้วยโลหะยุคอวกาศ (Space-Age Metals) ได้โดยไม่มีรูพรุน สำหรับการเชื่อมแบบแม่เหล็กจะใช้แก๊สชนิดเดียวหรือใช้แก๊สผสม เพื่อให้การปกป้องรอยเชื่อมเป็นไปได้ดีที่สุดก็ได้ ในกรณีเช่นนี้จะใช้อาร์กอนหรือฮีเลียมที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99.9 เปอร์เซ็นต์จะให้ผลดีที่สุด ส่วนแก๊สเฉื่อยชนิดอื่นๆ เช่น ซีนอน (Xenon) คริปทอน (Krypton) เรดอน (Radon) และนีออน (Neon) ต่างก็หายากและราคาแพงเกินไป

##### 2.1.4.1 แก๊สอาร์กอน

ในการใช้แก๊สอาร์กอนเพื่อป้องกันรอยเชื่อม เปลวไฟเชื่อมจะมีความสม่ำเสมอ (Stable) มากกว่าใช้แก๊สชนิดอื่น ด้วยคุณสมบัติข้อนี้จึงทำให้มักใช้อาร์กอนผสมกับแก๊สอื่นๆ อาร์กอนจะทำให้ไฟเชื่อมไม่มีเสียงดังและลดปริมาณเม็ดโลหะ (Spatter) ด้วย อาร์กอนมีค่านำความร้อนต่ำ (Thermal Conductivity) ล้าของเปลวไฟถูกจำกัดให้แคบดังนั้นจึงทำให้มีความหนาแน่นของเปลวไฟมีค่าสูง จากการที่ค่าความหนาแน่นของเปลวไฟมีค่าสูง ทำให้พลังงานจากเปลวไฟเชื่อมเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนถ่ายเทเข้าไปในชิ้นงานได้มาก ผลที่เกิดขึ้นตามมาก็คือ รอยเชื่อมมีลักษณะแคบและมีการซึมลึกของรอยเชื่อมได้มาก ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.3 รอยเชื่อมที่ใช้แก๊สอาร์กอนสำหรับปกป้องรอยเชื่อม

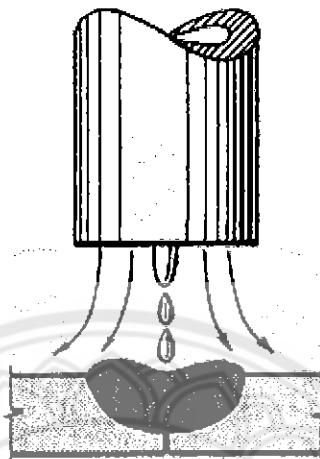
ที่มา : <http://www.meapim.pr.in.th/webpage/MigandTig/MigandTig.html>.

แต่ในงานเชื่อมบางอย่างอาร์กอนก็ไม่ก่อให้เกิดการซึมลึกตามที่ต้องการในการเชื่อมโลหะหนา อาร์กอนแตกตัวเป็นอะตอมได้ดีกว่าฮีเลียมทำให้อาร์กอนสามารถถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าได้บางส่วน ด้วยเหตุนี้อาร์กอนจึงใช้อาร์คโวลเทจ (Arc Voltage หมายถึง แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สามารถไหลผ่านการอาร์คขณะเชื่อม) ต่ำกว่าของฮีเลียม ผลที่เกิดตามมาคือความร้อนของเปลวไฟเชื่อมเมื่อใช้อาร์กอนจะร้อนน้อยกว่าเปลวไฟเชื่อมเมื่อใช้ฮีเลียม ดังนั้นจึงมักจะใช้แก๊สอาร์กอนในงานเชื่อมโลหะที่ใช้ทำเครื่องมือ (Light Gauge Metal) และวัสดุที่มีค่าความนำความร้อน (Thermal Conductivity) ต่ำการเชื่อมวัสดุพวกเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) โดยวิธี MAG มักจะไม่ใช้แก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์เพราะจะทำให้การซึมลึกของรอยเชื่อมไม่ดี (Poor Penetration) เกิดอันเดอร์คัท (Undercut หมายถึง รอยแหว่งที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานตรงขอบรอยเชื่อม) และทำให้แนวเชื่อมเลว (Poor Bead Contour) การใช้แก๊สอาร์กอนในสมัยแรกใช้ในการเชื่อมโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Nonferrous) เช่น ทองแดงและโลหะผสมของอะลูมิเนียมกับแมกนีเซียม ข้อดีของการใช้อาร์กอนในข้อที่ว่ามีการซึมลึกของรอยเชื่อมดีและมีเม็ดโลหะน้อย จึงทำให้การใช้อาร์กอนเป็นที่ต้องการใช้ ในการเชื่อมงานทำอื่นๆ ที่ไม่ใช่ทำเชื่อมในแนวราบ (Flat Position) การเชื่อมด้วยมือควรจะใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สปกป้องรอยเชื่อม เพราะการเปลี่ยนแปลงระยะอาร์คของการเชื่อมไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอาร์คโวลเทจ และความร้อนที่ถ่ายเทให้กับชิ้นงานมากเหมือนกับเมื่อใช้ฮีเลียม

#### 2.1.4.2 แก๊สฮีเลียม

แก๊สฮีเลียมผลิตมาจากแก๊สธรรมชาติ (Natural Gas) ฮีเลียมเป็นแก๊สเบาและมีแนวโน้มที่จะไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) กระจุกกระจายออกไปจากบริเวณที่ทำการเชื่อม ด้วยเหตุนี้เองจึงต้องใช้อัตราการไหลของแก๊สฮีเลียมมากกว่าอัตราการไหล เมื่อใช้อาร์กอนฮีเลียมให้

ความร้อนของเปลวไฟเชื่อมมากกว่าของอาร์กอน จึงเหมาะสำหรับเชื่อมโลหะหนักและวัสดุที่มีค่าความนำความร้อน (Thermal Conductivity) สูงรอยเชื่อมที่ได้จากการใช้ฮีเลียมจะกว้างกว่าของอาร์กอน แต่จะมีการซึมลึก (Penetration) น้อยกว่าเล็กน้อย ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.4 รอยเชื่อมที่ใช้แก๊สฮีเลียมปกป้องรอยเชื่อม

ที่มา : <http://www.meapim.pr.in.th/webpage/MigandTig/MigandTig.html>.

เมื่อใช้ฮีเลียมบริสุทธิ์ในการเชื่อม โดยกลับขั้วไฟฟ้า (Reverse Polarity) หมายถึงการจัดให้สายเชื่อมของเครื่องเชื่อมไฟฟ้าเป็นขั้วบวก และสายดินที่ขึ้นงานเป็นขั้วลบ) รอยเชื่อมจะไม่ค่อยสะอาดเท่าโค่นักโลหะเหลวที่ถ่ายเทจากลวดเชื่อมไปยังชิ้นงานจะเป็นหยดใหญ่ๆ และมีแนวโน้มที่จะเกิดเป็นเม็ดโลหะ (Spatter) มาก รอยเชื่อมจะกว้างและแบนราบการซึมลึกสม่ำเสมอตลอดรอยเชื่อม เนื่องจากรอยเชื่อมที่ใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สปกป้องรอยเชื่อมจะไม่มีการซึมลึกตรงกลางรอยเชื่อมเหมือนเมื่อใช้อาร์กอน ถ้าใช้ค่ากระแสและค่าระยะอาร์คค่าเดียวกันจะทำให้การเชื่อมที่ใช้ฮีเลียมจะมีค่าอาร์คโวลเทจสูงกว่าเมื่อใช้อาร์กอน การเชื่อมโดยใช้ฮีเลียมใช้มากในกระบวนการเชื่อมอัตโนมัติ (Automatic) และการเชื่อมด้วยเครื่องจักรกล (Mechanize) เพราะสามารถควบคุมระยะอาร์คได้โดยไม่มีปัญหาการเชื่อมโดยใช้ฮีเลียมมักใช้กับการเชื่อมโลหะพวกที่ไม่เป็นสนิม เช่น อะลูมิเนียม แมกนีเซียม ทองแดงและ โลหะของทองแดง

#### 2.1.4.3 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ไม่ใช่แก๊สเฉื่อยเหมือนอาร์กอนหรือฮีเลียม แต่มันเป็นสารประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 1 ส่วน (C) และออกซิเจน 2 ส่วน ( $\text{O}_2$ ) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผลิตได้จากแก๊สจากการเผาไหม้ของแก๊สธรรมชาติ น้ำมันเชื้อเพลิงและถ่านโค้ก การใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สปกป้องรอยเชื่อมกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ คาร์บอนไดออกไซด์

มีราคาถูกกว่าแก๊สเฉื่อย และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้เป็นแก๊สปกป้องรอยเชื่อมหลายอย่างด้วยกัน คือให้รอยเชื่อมกว้างและมีการซึมลึกสูงจึงไม่ต้องกลัวว่าจะมีโลหะหลอมเหลวน้อย แนวเชื่อมตึกมากและไม่ค่อยเกิดรอยกัดแหว่ง (Undercut) โกล้แนวเชื่อมข้อเดียวอย่างหนึ่งของคาร์บอนไดออกไซด์คือเปลวไฟเชื่อมไม่สม่ำเสมอ (Unstable) และจะเกิดเม็ดโลหะด้วย (Spatter) การเกิดเม็ดโลหะนี้จะลดลงได้โดยการ ใช้ระยะอาร์คน้อยๆอยู่ตลอดเวลาที่เชื่อมในชิ้นงานหนาๆ อาจจะทำให้เปลวไฟเชื่อมสัมผัสชิ้นงานอย่างเต็มที่ นอกจากวิธีนี้แล้วการใช้ลวดเชื่อมที่มีฟลักซ์อยู่ตรงกลาง (Flux-Cored Wire) ก็สามารถจะลดเม็ดโลหะลงได้เช่นกัน การเกิดการรวมตัวกันระหว่างโลหะของลวดเชื่อมกับออกซิเจนในอากาศเมื่อใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สปกป้องรอยเชื่อม จะมีปริมาณออกไซด์ที่เกิดขึ้นเทียบเท่ากับที่เกิดขึ้นเมื่อใช้แก๊สผสมระหว่างอาร์กอน 91 เปอร์เซ็นต์ กับออกซิเจน 9 เปอร์เซ็นต์ เป็นแก๊สปกป้องรอยเชื่อมในขณะที่เชื่อมโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สปกป้องรอยเชื่อม แมงกานีสประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ของทั้งหมดที่มีอยู่ในลวดเชื่อมกับซิลิกอนประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ของทั้งหมดที่มีอยู่ในลวดเชื่อม จะกลายเป็นออกไซด์ในขณะที่ถูกถ่ายเทไปยังชิ้นงานตอนที่เกิดเปลวไฟเชื่อม ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการเติมตัวกำจัดออกซิเจน (Deoxidizers) ลงในลวดเชื่อมและใช้ระยะอาร์คน้อยๆ ความร้อนของเปลวไฟเชื่อมจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์แตกตัวออกเป็น ส่วนประกอบย่อยที่ระยะอาร์คปกติ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรทั้งหมดจะเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide เท่ากับ สารประกอบซึ่งประกอบด้วย C1 อะตอม กับออกซิเจน 1 อะตอม) ถ้าระยะอาร์คมีมากเกินไปปริมาณแก๊สที่เปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าไปคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการเชื่อมมีทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลวสำหรับการเชื่อมที่ใช้หัวเชื่อมอันเดียวจะใช้แก๊สจำนวนน้อย ดังนั้นจึงเป็นการประหยัดถ้าใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวซึ่งบรรจุอยู่ในส่วนระบบการจ่ายแก๊สจากศูนย์กลางให้แก่การเชื่อมหลายๆหัวเชื่อมก็มีใช้อยู่ทั่วไป

#### 2.1.4.4 แก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับฮีเลียม

เพื่อให้ได้ประโยชน์ตามต้องการ สำหรับการเชื่อมแบบ MAG จึงมีการนำเอาอาร์กอนมาผสมกับฮีเลียมเพื่อนำไปใช้งาน แก๊สผสมที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการเชื่อมที่ต้องการคุณสมบัติในด้านการซึมลึกของรอยเชื่อม (Penetration) และความสม่ำเสมอของเปลวไฟเชื่อม (Stability) เมื่อผสมอาร์กอน 25 เปอร์เซ็นต์ เข้ากับฮีเลียม (รวมกันได้เป็น 100 เปอร์เซ็นต์) จะทำให้รอยเชื่อมมีการซึมลึกมากกว่าเมื่อใช้อาร์กอนอย่างเดียว และความสม่ำเสมอของเปลวไฟเชื่อมก็ใกล้เคียงกับของกระแสไฟเชื่อมเมื่อใช้อาร์กอนบริสุทธิ์ในการเชื่อมงานบางชนิด ถ้าใช้ฮีเลียมอย่างเดียวเปลวไฟเชื่อมจะร้อนเกินไปและถ้าใช้อาร์กอนอย่างเดียวเปลวไฟเชื่อมจะร้อนน้อยไป ในกรณีนี้จึงจำเป็นต้องเอาแก๊ส 2 ชนิดนี้มาผสมกันเพื่อให้ได้ความร้อนตามต้องการ ถ้าในแก๊สผสมนี้ใช้อาร์กอนมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป เปลวไฟเชื่อมจะมีความสม่ำเสมอมากขึ้นกว่าเดิมการผสมแก๊สผสมโดยให้มีฮีเลียม 75 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้การเกิดเม็ดโลหะ (Spatter) น้อยลง การซึมลึกของ

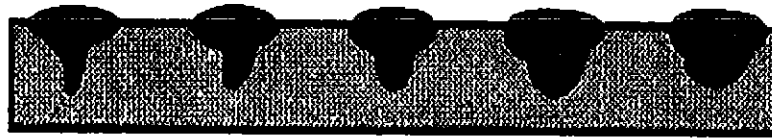
รอยเชื่อมจะมีลักษณะผสมกันระหว่างการซึมลึกเมื่อใช้อาร์กอนกับการซึมลึกเมื่อใช้ฮีเลียม แก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับฮีเลียมใช้สำหรับเชื่อมอะลูมิเนียมและโลหะผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิล แก๊สผสมนี้ทำให้เปลวไฟเชื่อมมีความร้อนสูงกว่าและมีรูปทรงในรอยเชื่อมน้อยกว่า แก๊สผสมนี้มีประโยชน์มากในการเชื่อมโลหะพวกที่ไม่ใช่เหล็ก (Nonferrous Metals) ชิ้นงานหนาๆ ถ้าชิ้นงานที่เชื่อมมีความหนามากจะต้องเพิ่มปริมาณของฮีเลียมในแก๊สผสมให้มากขึ้นด้วย

#### 2.1.4.5 แก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับคาร์บอนไดออกไซด์

แก๊สผสมที่ใช้สำหรับปกป้องรอยเชื่อมนั้นไม่จำเป็นว่าจะต้องได้มาจากการผสมกันของแก๊สเฉื่อยเท่านั้น แต่อาจจะใช้อาร์กอนหรือฮีเลียมผสมกับแก๊สอื่นเพื่อให้ได้แก๊สผสมที่มีคุณสมบัติตามต้องการได้ การผสมคาร์บอนไดออกไซด์เข้ากับอาร์กอนจะทำให้เปลวไฟเชื่อมที่ได้มีความสม่ำเสมอ (Stability) ถ่ายเทโลหะจากลวดเชื่อมไปยังชิ้นงานได้ดีและลดการเกิดเม็ดโลหะ (Spatter) เมื่อใช้แก๊สผสมในการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steels) การซึมลึกของรอยเชื่อมจะเปลี่ยนแปลงไปจากเมื่อใช้อาร์กอนอย่างเฉียว บ่อโลหะหลอมเหลวขณะเชื่อมจะเกิดเป็นโลหะเหลวอยู่ตามขอบของบ่อ จึงทำให้ไม่เกิดรอยกัดแห้ว (Undercut) ที่รอยเชื่อม ด้วยเหตุนี้จึงมักใช้แก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ในการเชื่อมเหล็กกล้าละมุน (Mild Steel) เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel) และเหล็กกล้าไร้สนิมบางชนิด (Stainless Steel) เมื่อใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ ผสมในแก๊สผสมจะทำให้การถ่ายเทโลหะจากลวดเชื่อมชนิดลวดเหล็กกล้าตัน (Solid Steel Wire) ไปยังชิ้นงานมีลักษณะเป็นละออง (Spray Metal Transfer เป็นลักษณะที่โลหะเชื่อมเม็ดเล็กๆถูกแรงให้ส่งผ่านอาร์คไปยังแนวเชื่อม) เหตุผลอย่างหนึ่งที่ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมากผสมในแก๊สผสมนี้ ก็เพื่อจะลดค่าใช้จ่ายของการเชื่อมลง คาร์บอนไดออกไซด์มีราคาถูกกว่าอาร์กอนถึง 85 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามแก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีบรรจุถึงขายอยู่ในท้องตลาดมีราคาเท่ากับราคาของอาร์กอนบริสุทธิ์ในทางปฏิบัติจึงควรซื้อแก๊สแต่ละชนิดแยกกันมา เวลาจะใช้งานแต่ละครั้งจึงค่อยนำมาผสมกันเพื่อนำไปใช้

#### 2.1.4.6 แก๊สผสมระหว่างอาร์กอน ฮีเลียม และคาร์บอนไดออกไซด์

แก๊สผสมที่ได้จากการผสมแก๊สเฉื่อยกับแก๊สที่เป็นสารประกอบนี้ ใช้มากที่สุดในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steels) ด้วยวิธีการถ่ายเทโลหะ (Metal Transfer) โดยการลัดวงจร (Short Circuit Method) รอยเชื่อมที่ได้จากการใช้แก๊สผสมนี้ ปกป้องรอยเชื่อมจะมีลักษณะแบนราบ ซึ่งลักษณะแบนราบของรอยเชื่อมนี้เป็นที่ต้องการมาก การที่รอยเชื่อมมีลักษณะแบนราบทำให้ไม่ต้องมีการเจียรระไน (Grinding) ชิ้นงานเพื่อตกแต่งลักษณะพิจารณาชิ้นงานภายหลังจากการเชื่อมหรือถ้าจะต้องเจียรระไนบ้างก็ไม่ต้องเจียรระไนมาก แก๊สชนิดนี้มีประโยชน์มากในการเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีการเชื่อมแบบ MAG



แก๊สอาร์กอน M1 M5 คาร์บอน ไดออกไซด์ อีเลียม

## รูปที่ 2.5 การเปรียบเทียบการซึมลึกของรอยเชื่อมเมื่อใช้แก๊สชนิดต่างๆ

ที่มา : <http://www.meapim.pr.in.th/webpage/MigandTig/MigandTig.html>.

### 2.1.5 การเลือกใช้ลวดเชื่อมในการเชื่อมด้วยวิธีแม็ก

ลวดเชื่อมชนิดเป็นสายยาวต่อเนื่องที่ใช้สำหรับการเชื่อมแบบแม็ก โดยทั่วไปจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าลวดเชื่อมชนิดที่เป็นแท่งยาว ขนาดของลวดเชื่อมมีตั้งแต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ถึง 3.2 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานบางปกติจะใช้ลวดเชื่อมขนาด 0.5 มิลลิเมตร , 0.8 มิลลิเมตร หรือ 0.9 มิลลิเมตร ชิ้นงานความหนาปานกลางจะใช้ขนาด 1 มิลลิเมตรและชิ้นงานหนาจะใช้ขนาด 2.4 มิลลิเมตร หรือ 3.2 มิลลิเมตร การเลือกใช้ขนาดของลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับงานนั้น สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ ตำแหน่งของการเชื่อม (Position of Welding) โดยทั่วไปในการเชื่อมตำแหน่งอื่นๆ ที่ไม่ใช่ตำแหน่งในแนวราบ เช่น การเชื่อมในแนวตั้งหรือในแนวเหนือศีรษะ (Overhead) จะใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็กๆ นอกจากนี้ก็ต้องคำนึงถึงอัตราการลวดเชื่อมด้วย ลวดเชื่อมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กจะมีราคาต่อน้ำหนักสูงกว่าของลวดเชื่อมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า อย่างไรก็ตามสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกอย่างก็คืออัตราการเติมเนื้อโลหะ (Metal Deposition Rates) บนชิ้นงานการเลือกลวดเชื่อมให้เหมาะกับงานแต่ละชนิด ด้วยเหตุผลต่อไปนี้

- เพื่อให้โลหะของลวดเชื่อมเหมาะสมกับโลหะชิ้นงาน
- เพื่อควบคุมคุณสมบัติในการเชื่อม
- เพื่อกำจัดออกซิเจนออกจากรอยเชื่อม
- เพื่อปรับปรุงความสม่ำเสมอของเปลวไฟเชื่อม และเพื่อให้ได้ลักษณะการถ่ายเทโลหะ

ตามที่ต้องการ (Metal Transfer Characteristics)

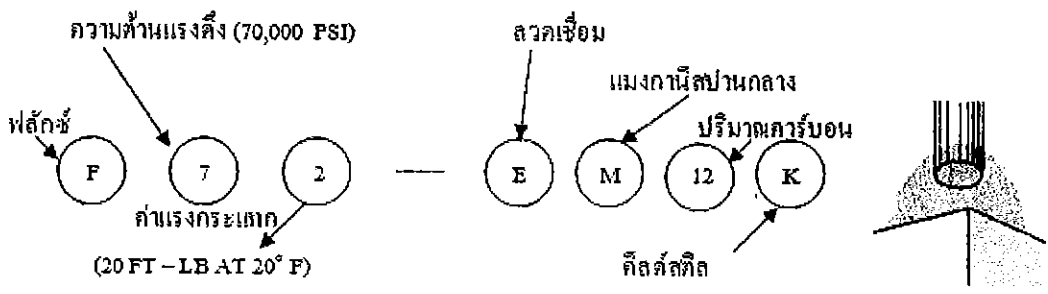
โดยปกติโลหะจากลวดเชื่อม จะเป็นชนิดเดียวกับโลหะชิ้นงานแต่ในหลายๆ กรณีก็จำเป็นต้องใช้ลวดเชื่อมที่มีโลหะจากลวดเชื่อมแตกต่างไปจากโลหะชิ้นงานโดยสิ้นเชิง เพราะโลหะผสมบางชนิดจะสูญเสียองค์ประกอบของมันไปในขณะเชื่อม ในกรณีนี้จึงต้องเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมและลวดเชื่อมนี้ต้องให้องค์ประกอบของโลหะงานที่ขาดหายไป โลหะชนิดที่ต้องใช้ลวดเชื่อมที่มีองค์ประกอบแตกต่างจากโลหะชิ้นงาน ได้แก่ โลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี (Copper and Zinc Alloys) อะลูมิเนียมที่มีกำลังต้านทานแรงดึงสูง (High-Strength

Aluminum) และโลหะผสมของเหล็กกล้าที่มีกำลังต้านทานแรงดึงสูง (High-Strength Steel Alloys) นอกจากนี้จะต้องเติมองค์ประกอบของโลหะผสม (Alloying Elements) ลงในลวดเชื่อมแล้วยังต้องเติมตัวกำจัดออกซิเจน (Deoxidizers) และตัวจับไล่อื่น ๆ (Scavenging Agents) ด้วยการเติมสารพวกนี้ลงไปก็เพื่อป้องกันการเกิดรูพรุนหรือความเสียหายที่จะเกิดต่อคุณสมบัติเชิงกลของโลหะชิ้นงาน ในการเชื่อมเหล็กกล้า โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สปกป้องกันรอยเชื่อม จะมีการสูญเสียองค์ประกอบของโลหะผสมไปด้วยวิธีการเกิดการรวมตัวกับออกซิเจนตัวกำจัดออกซิเจนที่ใช้มากในลวดเชื่อมเหล็กกล้า (Steel Filler Wires) ได้แก่แมงกานีส ซิลิกอน และอะลูมิเนียมในโลหะผสมของนิกเกิลจะใช้ไททาเนียมและซิลิกอนในโลหะผสมของทองแดงอาจจะใช้ไททาเนียม ซิลิกอนหรือฟอสฟอรัสในลวดเชื่อมที่ใช้สำหรับเชื่อมไททาเนียม (Titanium) เซอร์โคเนียม (Zirconium) อะลูมิเนียม และแมกนีเซียม จะไม่ใช่ตัวกำจัดออกซิเจนเพราะว่าโลหะเหล่านี้มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูงมาก (Highly Reactive) การเชื่อมโลหะเหล่านี้ต้องใช้แก๊สเฉื่อยที่ปราศจากออกซิเจน เป็นแก๊สปกป้องกันรอยเชื่อม และการปกป้องกันรอยเชื่อมจะต้องเป็นไปอย่างสมบูรณ์ หรืออาจจะเชื่อมภายในช่องเปิดที่บรรจุแก๊สเชื่อมก็ได้มีการซึมลึกมากกว่า และมีแนวเชื่อมน้อยกว่าเมื่อต้องเชื่อมงานขนาดใหญ่ ๆ เปลวไฟเชื่อมเกิดต่อเนื่องได้นานกว่า และไม่มี การสูญเสียลวดเชื่อมในลักษณะของเศษลวดเชื่อมสั้นๆ เหมือนที่เกิดเมื่อใช้ลวดเชื่อมชนิดแท่งยาวจะใช้ค่ามุมสำหรับการเชื่อมแบบร่องตัววี (V) เท่ากับ 30 องศา ก็เพียงพอแล้วไม่จำเป็นต้องใช้มุม 60 องศา จึงทำให้ประหยัดเวลาที่ใช้ในการเชื่อมและประหยัดค่าลวดเชื่อม

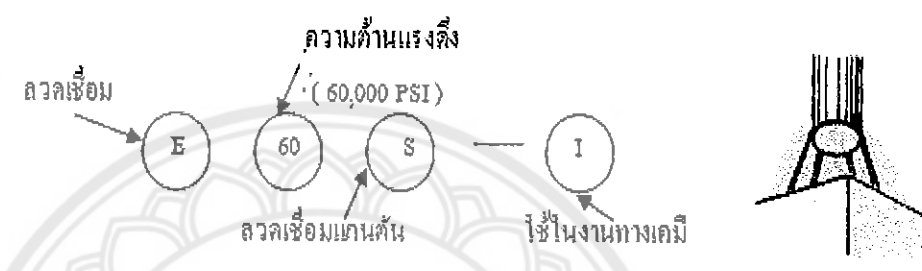
การจัดกลุ่มชนิดของลวดเชื่อมเมื่อกสมาคมการเชื่อมแห่งอเมริกา (The American Welding Society, AWS) ได้จัดกลุ่มชนิดของลวดเชื่อมแบบสายยาวต่อเนื่อง โดยจะใช้พื้นฐานเดียวกับที่ใช้จัดกลุ่มลวดเชื่อมแบบเป็นแท่งยาวสำหรับลวดสำหรับลวดเชื่อมชนิดแท่งยาว (Stick Electrodes) ผู้ใช้จะเลือกใช้ตามการจัดกลุ่มของ AWS ได้ เช่น ลวดเชื่อม E 7010 หรือ E 6024 และในปัจจุบันนี้สำหรับลวดเชื่อมผู้ใช้สามารถจะเลือกใช้ตามการจัดกลุ่มของ AWS ได้เช่นกัน เช่น E 70S-3 หรือ E 70S-4 ในการจัดกลุ่มลวดเชื่อมจะใช้อักษรตัว S เพื่อแสดงว่าเป็นลวดเชื่อมสายยาวภายในคัน เช่น E 70S-3 ใช้อักษรตัว T เพื่อแสดงว่าเป็นลวดเชื่อมชนิดสายยาวมีฟลักซ์เป็นไส้กลาง เช่น E 70T-1 มีลวดเชื่อมอยู่ชนิดเดียวเท่านั้นที่แตกต่างไปจากการจัดกลุ่ม เช่น E 70U-1 ลวดเชื่อมชนิดนี้เป็นลวดเชื่อมแบบเป็นสายยาวภายในคัน แต่มีการเคลือบผิว (Emissive Coated Solid Wire) สำหรับลวดเชื่อมภายในคัน ได้แก่ AWS A5.18-79 และสำหรับลวดเชื่อมที่มีฟลักซ์เป็นไส้กลาง ได้แก่ AWS A5.18-79 รหัสที่ใช้การจัดกลุ่ม แสดงเอาไว้ในรูป



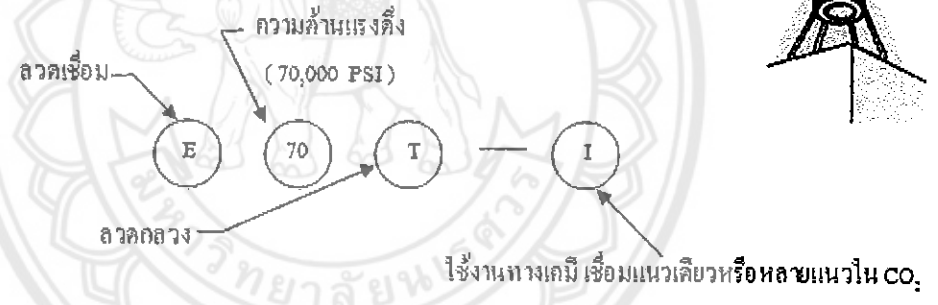
1. ลวดเชื่อมสำหรับเชื่อมได้ฟลักซ์



2. ลวดเชื่อมภายในคัน



3. ลวดเชื่อมที่มีฟลักซ์เป็นไส้กลาง



รูปที่ 2.6 รหัสที่ใช้จัดกลุ่มลวดเชื่อมแม็ก

ที่มา : <http://www.meapim.pr.in.th/webpage/MigandTig/MigandTig.html>.

จะเห็นได้ว่ามีส่วนคล้ายคลึงกับรหัสที่ใช้ในการจัดหมู่ลวดเชื่อมชนิดที่มีฟลักซ์หุ้ม (Shielded - Arc Electrodes) สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าละมุน (Mild Steel) สามารถใช้ลวดเชื่อมชนิดที่เป็นสายยาวต่อเนื่องแทนการใช้ลวดเชื่อมชนิดแท่งยาวได้ เช่น การเชื่อมในท่าควานันแฮนด์ (Down Hand Position) สามารถใช้ลวดเชื่อม E 70T-1 แทนการใช้ลวดเชื่อม E 7010 ใช้ลวดเชื่อม E 70T-4 แทน E 6024 ส่วนลวดเชื่อมพวก E 70S -1 ใช้ได้กับการเชื่อมแบบแม็ก ได้ทุกท่าการเชื่อมในบรรดาลวดเชื่อม 3 หมวด หมวด E 70S-1 หมวด E 70T-1 และหมวด E 70U-1 หมวด E 70S-1 มีปริมาณตัวกำจัดออกซิเจน (แมงกานีสและซิลิกอน) น้อยที่สุด

### 2.1.6 มุมหัวเชื่อม

มุมหัวเชื่อมเป็นมุมที่วัดอ้างอิงระหว่างหัวเชื่อมเทียบกับรอยต่อซึ่งประกอบไปด้วยมุมมุมคือ มุมทางขวาง (Transverse or Head) และมุมตามแนวยาว (Longitudinal or Nozzle Angle)

2.1.6.1 มุมทางขวาง หมายถึง มุมที่ลวดเชื่อมหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมทำมุมกับระนาบเอียงหรือผิวของชิ้นงานเชื่อมในระนาบที่ตั้งฉากกับแกนเชื่อมแสดงให้เห็นมุมทางขวางสำหรับรอยเชื่อมฉากและรอยเชื่อมร่อง สำหรับการเชื่อมต่อมุมทางขวางเป็นมุมที่ลวดเชื่อมหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมทำมุมกับแกนอ้างอิงหรือผิวของท่อในระนาบที่เลเยอออกไปจากศูนย์กลางของท่อเรื่อย ๆ ไปกับบ่อหลอมเหลว

2.1.6.2 มุมตามแนวยาว หมายถึง มุมที่ลวดเชื่อมหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมทำมุมกับเส้นอ้างอิงที่ตั้งฉากกับแกนของตะเข็บในระนาบของชิ้นงานเชื่อม สำหรับการเชื่อมต่อมุมตามแนวยาวเป็นมุมที่ ลวดเชื่อมหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมทำมุมกับเส้นอ้างอิงเลเยอออกไปจากศูนย์กลางของท่อตลอดการอาร์คในระนาบของแกนงานเชื่อม มุมตามแนวยาวจะมีทั้งแบบคิงหรือแบบลากลวดกับแบบดันหรือผลัก

- มุมเชื่อมคิงหรือลากลวดเชื่อม (Pulling Angle) หัวเชื่อมจะเอียงไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม เรียกการเชื่อมวิธีนี้ว่า Backhand Welding
- มุมเชื่อมแบบดันหรือผลักลวด (Pushing Angle) หัวเชื่อมจะเอียงกับทิศทางตรงข้ามของทิศทางการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม เรียกการเชื่อมวิธีนี้ว่า Forehand Welding
- มุมเอียงหัวเชื่อมที่ทำให้ระยะลิกมากที่สุด คือ 15-20 องศา เมื่อใช้การเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมแบบลากลวด ถ้ามุมเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมเปลี่ยนไปจากนั้นระยะลิกก็จะลดลง ถ้ามุมคิงลวดเชื่อม 15 องศา และมุมดันลวดเป็น 30 องศา ความสัมพันธ์ระหว่างระยะลิกกับมุมเคลื่อนที่หัวเชื่อมเกือบเป็นเส้นตรง ดังนั้นถ้าจะควบคุมระยะลิกให้ได้ต้องอยู่ในช่วงพิสัยนั้น ในการเชื่อมจะไม่เลือกมุมลากลวดเชื่อมเกิน 25 องศา มุมเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมที่เลือกจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสูงและความกว้างของตะเข็บและยังมีผลกระทบต่อลักษณะตะเข็บเมื่อเชื่อมด้วยมุมลากลวดเชื่อมลดลง ความสูงของตะเข็บเชื่อมจะลดลง ส่วนความกว้างจะเพิ่มขึ้น มุมเคลื่อนที่หัวเชื่อมแบบผลักดันจะใช้เมื่อมีอัตราเร็วเคลื่อนที่หัวเชื่อมสูงมุมเชื่อมเหล่านี้อาจเปลี่ยนแปลงไปบ้างเล็กน้อยหากใช้กับกระบวนการเชื่อมและวิธีปฏิบัติในการเชื่อมแบบอื่น

### 2.1.7 ความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณแนวเชื่อม

ความร้อนที่ซึ่งเกิดขึ้นจากการเชื่อมไม่เพียงพอบแต่จะทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะตรงรอยต่อของชิ้นงานเท่านั้น มันยังมีผลต่อ โครงสร้างของโลหะชิ้นงานที่อยู่ใกล้บริเวณบ่อหลอมละลายของรอยเชื่อมอีกด้วย บริเวณรอยเชื่อมแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก คือ รอยเชื่อม (Weld Metal) ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดจากการเย็นตัวของบ่อหลอมละลาย ส่วนที่สอง Heat Affect Zone ได้แก่

ส่วนของโลหะชิ้นงานที่อยู่ใกล้ชิดกับโลหะรอยเชื่อม ความร้อนจากบ่อหลอมละลายและการเย็นตัวของโลหะรอยเชื่อมมีผลต่อโครงสร้างของโลหะ ตลอดจนส่วนผสมทางเคมียังคงเดิมหรือกล่าวได้ว่าเนื้อโลหะชิ้นงานในส่วนนี้ไม่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนที่เกิดจากการเชื่อมแต่อย่างใด (Unaffected Based Metal) นอกจากนั้นยังมีส่วนหนึ่งซึ่งยังอยู่ใน Heat Affect Zone ส่วนที่เกิดจากโลหะรอยเชื่อมส่วนนี้เรียกว่า รอยประสาน (Weld Bond)

#### 2.1.7.1 การแข็งตัวและโครงสร้างของโลหะรอยเชื่อม

ในการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welding) อัตราการเย็นตัวของโลหะรอยเชื่อมและโครงสร้างที่เกิดจากการเย็นตัว มีผลต่อคุณสมบัติในรอยเชื่อม เช่น รอยร้าวอากาศ และรอยแตกการแข็งตัวของบ่อหลอมละลาย รอยเชื่อมเป็นปรากฏการณ์ซึ่งเหมือนการหล่อโลหะ (Casting) มีข้อแตกต่างดังนี้

- ก. บ่อหลอมละลายรอยเชื่อมมีอัตราการเย็นตัวสูง
- ข. แหล่งกำเนิดความร้อนเคลื่อนที่
- ค. การหลอมละลาย และการแข็งตัวเกิดขึ้นต่อเนื่องกัน
- ง. การแข็งตัวของบ่อหลอมละลายเริ่มจากผนังของบ่อหลอมซึ่งเป็นเนื้อโลหะชิ้นงาน และเทียบได้กับผนังของบ่อหลอม

#### 2.1.7.2 ปฏิกริยาโลหะวิทยาที่เกิดขึ้นในขณะโลหะรอยเชื่อมแข็งตัว

##### ก. เซกกริเกชัน (Segregation)

เซกกริเกชันในโลหะรอยเชื่อมมี 3 อย่าง คือ มาโครเซกกริเกชัน (Macro Segregation) เวลด์ริฟเฟิลเซกกริเกชัน (Weld Ripple Segregation) และไมโครเซกกริเกชัน (Micro segregation) มาโครเซกกริเกชัน หมายถึง ความไม่กลมกลืนของเนื้อรอยเชื่อมตั้งแต่บริเวณแนวการหลอมละลายจนถึงแกนกลางของแนวเชื่อม เวลด์ริฟเฟิลเซกกริเกชัน คือ ความไม่กลมกลืนของเนื้อโลหะรอยเชื่อมอันเนื่องมาจากการแข็งตัวไม่ต่อเนื่อง ในขณะที่เกิดเกล็ดรอยเชื่อม และไมโครเซกกริเกชัน คือ ความไม่กลมกลืนกันของเนื้อโลหะซึ่งเกิดขึ้นที่เกรนเสาเข็ม (Columnar Crystalrain) หรือที่เกรนย่อยซึ่งอาจจะเกิดขึ้นที่ขอบหรือภายในเกรน

##### ข. รูพรุน (Blow Holes)

การเกิดรูพรุนในโลหะรอยเชื่อมเกิดจากแก๊ส 3 ชนิด คือ

- แก๊สที่ระบายออกมามากน้ำโลหะเนื่องจากความสามารถในการร่วมตัวของแก๊สในโลหะเหลวและโลหะแข็งแตกต่างกัน เช่น  $H_2$  และ  $N_2$  ในเหล็กกล้า
- แก๊สที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีในโลหะหลอมละลาย เช่น แก๊สที่เกิดขึ้นในบ่อหลอมละลาย

- แก๊สอันเป็นสารแปลกปลอม (Inclusion) เกิดขึ้นจากบรรยากาศของการอาร์ค เช่น กระบวนการเชื่อมโลหะแก๊สเฉื่อย GMAW และสิ่งแปลกปลอมของบรรยากาศจากกันของรอยเชื่อม (Groove)

#### ค. การลดออกซิเจน

เป็นปฏิกิริยาเพิ่มออกซิเจน(Oxidation Phenomenon) ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่หลอมเหล็กกล้าทำให้ออกซิเจนเข้าไปรวมกับเหล็กในรูปของออกไซด์ ออกไซด์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ถาวร ทั้งนี้เพราะออกไซด์เหล่านี้มีกำลังแยกตัวต่ำมากจึงต้องใช้ปฏิกิริยาลดออกซิเจน ซึ่งได้ด้วยการใช้ธาตุบางธาตุทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็นออกไซด์ของธาตุนั้นและขจัดออกไปจากน้ำโลหะเหลวในภายหลัง ปริมาณออกซิเจนในเหล็กกล้าทั่วไปขึ้นอยู่กับส่วนผสม Si, Mn ฯลฯ เหล็กกล้าคิลด์ (Killed Steel) มีออกซิเจนประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์ เหล็กกล้าริมด์ (Rimmed Steel) มีอยู่ประมาณ 0.02 เปอร์เซ็นต์ สำหรับในกรณีของรอยเชื่อม ปริมาณออกซิเจนในรอยเชื่อมเปลี่ยนแปลงไปได้มากตั้งแต่ 0.08 เปอร์เซ็นต์ ถึง 0.12 เปอร์เซ็นต์ ด้วยการใช้อุณหภูมิสูง (High Iron Oxide Type) หรือชนิดอิมเมไนท์ (Imenite Type) สำหรับการเชื่อมด้วยวิธีซัพเมอร์อาร์ค (Submerged Arc Welding) และใช้ฟลักซ์เป็นด่างจะทำให้เกิดออกซิเจนในโลหะรอยเชื่อมประมาณ 0.02 เปอร์เซ็นต์ ถึง 0.04 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการเชื่อมด้วย TIG และ MIG จะทำให้มีออกซิเจนในโลหะรอยเชื่อมประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์ ถึง 0.02 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น จะเห็นได้ว่าปริมาณออกซิเจนในรอยเชื่อมนั้นมีอยู่มากเมื่อเทียบกับออกซิเจนที่อยู่ในเหล็กกล้า ความเหนียวของรอยเชื่อมจะลดลงตามปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ ดังนั้นออกซิเจนในเหล็กกล้าจะต้องถูกทำให้ลดลง ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการเติมธาตุลดออกซิเจน เช่น Si, Mn, Al, และ Ti เป็นต้น

#### 2.1.7.3 อิทธิพลของความร้อนจากการเชื่อมต่อรอยเชื่อม

โครงสร้างต่างๆที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมมีอิทธิพลโดยตรงต่อวัสดุ ด้านคุณสมบัติทางกลและทางฟิสิกส์ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องจำเป็นที่จะต้องทราบลักษณะและเปลี่ยนแปลงต่างๆในรอยเชื่อม เพื่อจะทำให้สามารถเข้าใจประโยชน์ของการเชื่อมได้อย่างเต็มที่ การเชื่อมเป็นการต่อกันของชิ้นงานอย่างถาวร ดังนั้นจึงควรทำให้รอยเชื่อมมีการประสานกันอย่างสมบูรณ์ เพื่อให้การส่งผ่านแรงเป็นไปได้อย่างสม่ำเสมอการเชื่อมแบบละลาย (Fusion Welding) สามารถเปรียบเทียบได้กับการหล่อโลหะ รอยต่อเปรียบเหมือนเป็นหล่อและน้ำเหล็กที่เทลงแบบได้จากลวดเชื่อม การแข็งตัวก็จะเริ่มจากขอบเข้าหาแกนกลางแกนของโลหะที่เกิดขึ้นใหม่ควรเป็นเกรนละเอียดปราศจากสิ่งบกพร่องใดๆ โครงสร้างที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย โดยการใช้แผนภาพเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ (Fe-Fe<sub>3</sub>C Diagram) ประกอบในการพิจารณา ทั้งนี้สามารถแบ่งส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

ก. บริเวณที่อุณหภูมิอยู่เหนือเส้นหลอมเหลว

บริเวณนี้เป็นบริเวณซึ่งเหล็กถูกหลอมละลายเป็นของเหลวหมด การเปลี่ยนแปลงต่างๆจะเป็นไปตามกฎทางฟิสิกส์ – เคมี่ ที่เกี่ยวกับการเย็นตัวของของเหลวในรอยเชื่อม เมื่อมีการเย็นตัวลงเหล็กจะเริ่มแข็งตัวเป็นผลึก (Crystal) โดยจะมีการเรียงตัวแตกต่างไปจากโลหะฐานลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะเป็นแบบเหล็กหล่อ คือ เป็นเส้นจากขอบเข้าสู่แกนกลาง

ข. บริเวณที่มีการละลายอย่างไม่สมบูรณ์

เป็นบริเวณซึ่งมีเพียงบางส่วนที่เริ่มละลาย โดยทั่วไปจุดที่ละลายจะมีส่วนผสมของสารเจือ สารมลทิน และอากาศมากกว่าผลึกซึ่งยังไม่ละลาย และเนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังจากการเชื่อมทำให้ธาตุต่าง ๆ ในบริเวณดังกล่าวซึ่งมีมากเป็นพิเศษไม่สามารถแพร่ (Diffuse) ไปบริเวณซึ่งมีส่วนผสมน้อยกว่าได้ ซึ่งเป็นผลให้เนื้อวัสดุมีส่วนผสมไม่สม่ำเสมอและทำให้บริเวณนี้เกิดผลึกที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ลักษณะของผลึกเป็นตาข่ายขนาดเล็กๆ หลักจากการแข็งตัวในช่วงอุณหภูมินี้สารมลทินที่ไม่ใช่โลหะจะเริ่มละลายตัว จึงทำให้ความแข็งแรงของการยึดติดแน่นกันของโลหะมีขนาดลดลง ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดการแตกร้อน (Hot Short) ได้

ค. บริเวณของอุณหภูมิเหนือเส้น  $Ac_3$

- บริเวณของอุณหภูมิเหนือเส้น  $Ac_3$  มากๆ ซึ่งทำให้เกิดเกรนหยาบ และส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างที่เรียกว่า โครงสร้างวิดแมนสเตทเตน (Widmannstaetten Structure) บริเวณนี้จึงสามารถเรียกว่า เป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนเกิน (Over Heat) และส่วนใหญ่จะมีความแข็งแรงสูงกว่าเนื้อเดิม แม้ว่าเหล็กชนิดนั้นจะไม่สามารถชุบแข็งได้ก็ตาม แต่เนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วนี้เป็นผลให้ความแข็งมีขนาดเพิ่มขึ้น สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะมีอันตรายต่อรอยเชื่อมเท่าใด เพราะความแข็งที่เพิ่มขึ้นมีขนาดไม่สูงมาก คือ ประมาณ 30 – 50 HV

- บริเวณที่มีอุณหภูมิเหนือเส้น  $Ac_3$  เพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดเกรนละเอียด ทั้งนี้เพราะช่วงอุณหภูมินี้เป็นอุณหภูมิเดียวกันกับการอบปกติ (Normalisation) ซึ่งส่วนใหญ่ทำให้มีคุณสมบัติดีกว่าโลหะฐานเดิมที่ไม่ได้รับอิทธิพลทางความร้อน

- ถ้าการเย็นตัวหลังการเชื่อมจากบริเวณเหนือเส้น  $Ac_3$  เป็นไปอย่างรวดเร็วก็จะเปรียบเสมือนเป็นการชุบแข็งซึ่งจะทำให้เกิดเกรนมาร์เทนไซต์ (Martensite) และ เบนไนต์ (Bainite) ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิของชิ้นงาน ขณะทำการเชื่อม เช่น เย็นตัวของชิ้นงานต่ำลง

ง. บริเวณอุณหภูมิระหว่างเส้น  $Ac_3$  และ  $Ac_1$

บริเวณช่วงอุณหภูมินี้เป็นบริเวณซึ่งมีการเปลี่ยนโครงสร้างอย่างไม่สมบูรณ์ เกรนเพอร์ไลต์ (Pearlite) จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเตไนต์ (Astenite) ซึ่งหลังจากการเย็นตัวก็จะเปลี่ยนโครงสร้างกลับมาเป็นเพอร์ไลต์อีก

ในกรณีที่ชิ้นงานผ่านการขึ้นรูปเย็นซึ่งองศาของการขึ้นรูปเย็น (Degree of Forming) อยู่ในช่วงวิกฤต ก็อาจจะทำให้เกิดเกรนหยาบขึ้นได้ช่วงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เหมือนเป็นการปลดความเค้น (Stress Relief) ซึ่งจะให้ความเค้นภายในลดลง แต่โครงสร้างไม่มีการเปลี่ยนแปลงช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส สำหรับเหล็กกล้าบางชนิดที่ผ่านการขึ้นรูปการเย็นอาจทำให้เกิดการเปราะเนื่องจากการ Aging ได้ โดยทั่วไปเกรนของโลหะหลังจากการเชื่อมแก๊สจะเป็นเกรนหยาบ แต่จะมีเกรนลักษณะเป็นเส้นน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะมีการเย็นตัวช้า โอกาสที่บางส่วนของเนื้อโลหะจะได้รับอุณหภูมิไม่ถึงจุดหลอมละลาย มีสูงกว่าการเชื่อมอาร์คไฟฟ้า ซึ่งอาจทำให้เกิดการประสานไม่สมบูรณ์ได้ นอกจากนี้ในการเชื่อมแก๊สโอกาสที่จะเกิดเกรนหยาบข้างแนวเชื่อมเนื่องจากความร้อนเกิน (Over Heat) จะมีมากกว่า ทั้งนี้เพราะเปลวไฟจะให้ความร้อนกับโลหะชิ้นงานเป็นบริเวณกว้าง ซึ่งทำให้มีความร้อนคงเหลือมากและทำให้การเย็นตัวของชิ้นงานช้า แต่อันตรายที่เกิดจากการเพิ่มความเค้นจากการเชื่อมแก๊สจะมีน้อยกว่า

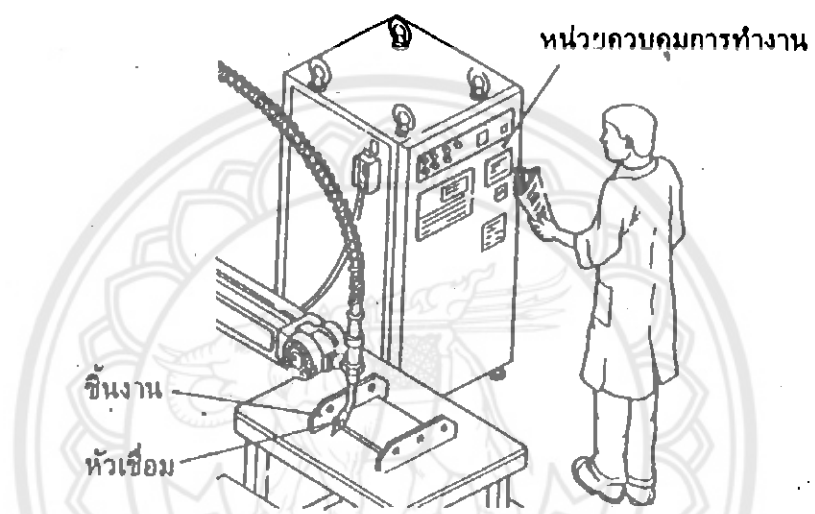
## 2.2 หลักการและเหตุผลของการนำหุ่นยนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมงานเชื่อม

หุ่นยนต์ (Robot) เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรมงานเชื่อม สำหรับสร้างหรือผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ , อุตสาหกรรมการผลิตแบบอัตโนมัติ เป็นต้นความต้องการที่จะนำหุ่นยนต์มาใช้สำหรับงานเชื่อมแทนการทำงานของคน (ช่างเชื่อมฝีมือ) มีความต้องการเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากข้อจำกัดในการใช้ช่างฝีมือนั้นมีมากและเกิดผลเสียหลายประการต่อผลผลิตกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ จะใช้กระบวนการเชื่อมที่สามารถเชื่อมได้อย่างต่อเนื่องและสามารถเชื่อมได้อย่างระบบอัตโนมัติได้

## 2.2.1 หุ่นยนต์ (Robot)

โครงสร้างของหุ่นยนต์ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

2.2.1.1 หน่วยควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ ซึ่งในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์สำหรับป้อนข้อมูล รวมไปถึง โปรแกรมสั่งงานที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ ยกตัวอย่าง เช่น เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์, เป็นพิมพ์สำหรับป้อนข้อมูลหรือคำสั่งเพื่อให้หุ่นยนต์ทำงานตามที่เรต้องการ เครื่องต้นกำลัง อุปกรณ์ป้อนลวดเชื่อม อุปกรณ์ยึดจับและการวางตำแหน่งของงาน เป็นต้น



รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างหน่วยควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์

ที่มา : จรุง (2544)

2.2.1.2 ส่วนที่ประกอบกันเป็นตัวหุ่นยนต์ ประกอบด้วยชิ้นส่วนต่าง ๆ คล้ายกับมนุษย์ เช่น ลำตัว (Body) ลำแขน (Arm) และมือหุ่นยนต์ (Wrist)

2.2.1.3 ส่วนที่เป็นเครื่องมือ ส่วนนี้จะเป็นอุปกรณ์ในการทำงานเชื่อมจริง ๆ ของหุ่นยนต์ ประกอบไปด้วยมือหุ่นยนต์ (Wrist) ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยการหมุน (Pitch) การบิดของข้อมือ (Roll) และการหักเหของข้อมือ (Yaw) มือของหุ่นยนต์สำหรับงานเชื่อมในนี้จะมีลักษณะเป็นเครื่องมือ (Tools and End Effectors) ที่ถูกออกแบบมาให้สามารถในการใช้งานได้หลายประเภท โดยที่เราสามารถถอดเปลี่ยนได้

### 2.2.2 อุปกรณ์จับยึดวางตำแหน่งงาน (Positioner)

อุปกรณ์จับยึดและวางตำแหน่งงาน มีหน้าที่สำหรับจับชิ้นงานตามรูปร่างของชิ้นงานที่จะเชื่อมและทำหน้าที่เคลื่อนที่หรือหมุนหาตำแหน่งงานให้กับหุ่นยนต์สามารถทำงาน ได้ง่าย สะดวก และรวดเร็วขึ้น ซึ่งอุปกรณ์จับยึดและวางตำแหน่งงานจะถูกควบคุมการสั่งงานด้วยโปรแกรม (Programs) เช่นเดียวกับตัวหุ่นยนต์



รูปที่ 2.8 แสดงอุปกรณ์จับยึดวางตำแหน่งงาน (Positioner)

ที่มา : จรุง (2544)

### 2.2.3 เครื่องเชื่อม (Power Supply)

เครื่องเชื่อมนี้ขึ้นอยู่กับชนิดกระบวนการเชื่อม เช่น GTAW, FCAW, GMAW, PAW หรือ Spot โดยจำเป็นจะต้องมี Duty Cycle 100 เปอร์เซ็นต์

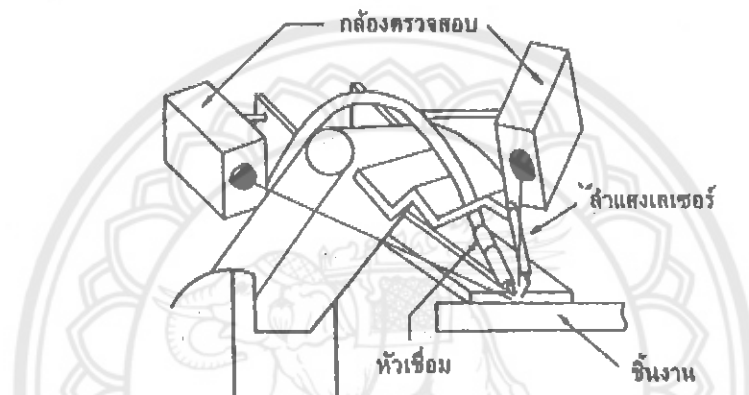
### 2.2.4 ระบบตรวจสอบการทำงาน (Robotic Sensors)

การเชื่อมด้วยคนมีข้อดีมากกว่าการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ ข้อดีประการหนึ่ง คือ ระบบตรวจสอบ หรือ การสัมผัส, การฟังเสียงขณะทำงาน ตัวอย่างเช่น ช่างเชื่อมสามารถเพิ่มหรือลดความเร็วเมื่อขนาดแนวเชื่อมเปลี่ยนไป สามารถปรับเปลี่ยนระยะอาร์ค หรือระยะยื่นปลายลวด (Stick Out) ได้ เมื่อต้องการเพิ่มหรือลดกระแสขณะเชื่อม ด้วยเหตุผลที่กล่าวมานี้ หุ่นยนต์จึงได้รับการออกแบบให้มีระบบตรวจสอบ (Sensors) ขึ้นมามีอยู่ 2 ระบบ คือ



2.2.4.1 ระบบสัมผัส (Contacting Sensors) ใช้หัวตรวจสอบ (Probe) ติดตั้งไว้กับปลายหัวเชื่อมเพื่อให้สัมผัสกับขอบรอยต่อเหนือบ่อหลอมละลาย ใช้ตรวจสอบระยะการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม ปัญหาของการตรวจสอบด้วยระบบสัมผัส คือ ความเที่ยงตรงและช่วงพักเวลาในการส่งข้อมูลเพราะเป็นระบบเครื่องกลอัตโนมัติ

2.2.4.2 ระบบไม่สัมผัส (Noncontacting Sensors) การตรวจสอบด้วยวิธีนี้ จะใช้ลำแสงเลเซอร์ (Laser Sensors) อิงไปที่บริเวณอาร์ก ระบบนี้สามารถวัดระยะสายของหัวเชื่อมทำการตรวจสอบค่าของตัวแปรเชื่อมได้ เช่น ค่าแรงเคลื่อน (Volts) กระแสไฟฟ้า (Amp) และความเร็วของการป้อนลวด (Wire Feed Speed) เป็นต้น



รูปที่ 2.9 แสดงการตรวจการทำงานระบบไม่สัมผัส  
ที่มา : จรุง (2544)

### 2.3 เหล็กกล้า (Steels)

เหล็กกล้า คือ เหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุเหล็ก ธาตุคาร์บอน และธาตุประสม โดยทั่วไปเหล็กบริสุทธิ์มีคุณสมบัติทางกลที่ไม่เหมาะสมสำหรับงานทางด้านวิศวกรรม เช่น มีความแข็งประมาณ 60 HB แต่เหล็กกล้า (C1010) มีความแข็งระหว่าง 131-170 HB จึงมีความแตกต่างจากเหล็กอ่อน เหล็กบริสุทธิ์ และเหล็กหล่อ ตรงที่สามารถทนต่อแรงดึง แรงบิด มีการขึ้นรูปหรือแปรรูปได้ง่าย ไม่เปราะหรือแตกหักง่าย และสามารถเชื่อมได้ เหล็กกล้ามีจุดหลอมเหลวสูงกว่าเหล็กคืบเพราะมีปริมาณคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้ามีส่วนผสมที่สำคัญดังนี้

- 1) ธาตุเหล็ก (FE) เป็นส่วนของเปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักที่มากที่สุด
- 2) ธาตุคาร์บอน มีคุณสมบัติทางกลที่เด่นอยู่ 2 ส่วน

- การเพิ่มคุณสมบัติด้านความแข็ง (Hardness) ความต้านแรงดึง (Tensile Strength) การทนต่อการเสียดสี (Abrasive Resistance) และความสามารถในการชุบแข็ง (Hardening)

- การลดคุณสมบัติด้านความเหนียว (Ductility) ความยืดตัว (Elongation) ความสามารถในการตัดเฉือน (Machine Ability) และความสามารถในการเชื่อม (Welding Ability)

3) ธาตุประสมหรือสารเจือ (Alloying Elements) ที่ติดมากับเหล็ก และที่มีอยู่แล้วเป็นที่ต้องการคือ แมงกานีส ซิลิกอน และอลูมิเนียม ส่วนสารที่ไม่ต้องการคือ ฟอสฟอรัส กำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน

4) สารเติม หรือ สารเติมแต่ง (Addition Agents) ที่ผสมไป เพื่อเพิ่มคุณสมบัติจำเพาะ เหล็กกล้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าประสม

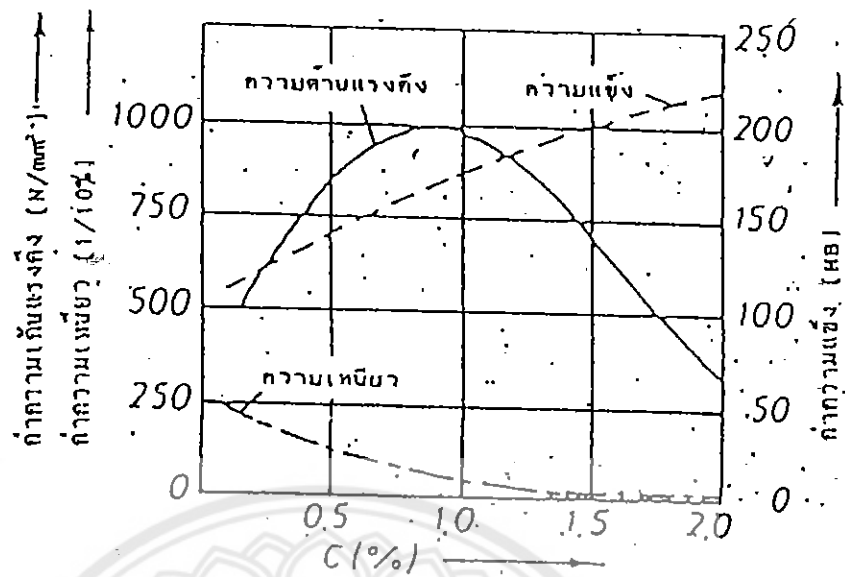
### 2.3.1 เหล็กกล้าคาร์บอน

เหล็กกล้า (Carbon Steels หรือ Plain Carbon Steels) หมายถึง เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอน เป็นธาตุหลักที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของเหล็ก และยังมีธาตุอื่นผสมอยู่อีก ซึ่งแบ่งเหล็กกล้าออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.3.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steels หรือ Mild Steels) บางครั้งเรียกว่า เหล็กเหนียว มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 0.25 เปอร์เซ็นต์ นอกจากคาร์บอนแล้ว ยังมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย เช่น แมงกานีส ซิลิกอน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน แต่มีปริมาณน้อย เนื่องจากหลงเหลือมาจากกระบวนการผลิต เหล็กประเภทนี้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรม และในชีวิตประจำวันไม่ต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่าย ทำการเชื่อมง่าย และราคาไม่แพง โดยเฉพาะเหล็กแผ่นมีการนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น ตัวรถถังรถยนต์ ชิ้นส่วนยานยนต์ต่าง ๆ กระป๋องบรรจุอาหาร ตั้งกะสีมุงหลังคา เครื่องใช้ในครัวเรือน และเครื่องใช้ในสำนักงาน

2.3.1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steels) มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.2-0.5 เปอร์เซ็นต์ มีความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่จะมีความเหนียวน้อยกว่า สามารถนำไปปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน หรือชุบแข็งได้ เหมาะกับงานทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รางรถไฟ เฟือง ก้านสูบ ท่อเหล็ก ไบควง

2.3.1.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steels) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.5-1.5 เปอร์เซ็นต์ มีความแข็งแรง และความเค้นแรงดึงสูง เมื่อชุบแข็งแล้วจะเหมาะสมสำหรับงานที่ทนต่อการสึกหรอ เหล็กกล้าประเภทนี้สามารถนำมาทำเป็นวัสดุคมตัด เครื่องมือ สปริงเหนียว และลูกปืน เป็นต้น



รูปที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบของคาร์บอน  
ที่มา : สมาคมการเชื่อม (2545)

### 2.3.2 เหล็กกล้าประสม (Alloy Steels)

เหล็กกล้าประสมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.3.2.1 เหล็กกล้าประสมต่ำ เป็นเหล็กกล้า ที่มีธาตุประสมรวมกันน้อยกว่า 8% ธาตุที่ประสมอยู่คือ โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม และแมงกานีส ปริมาณของธาตุที่ใช้ผสมแต่ละตัวจะไม่มากประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการผสมทำให้เหล็กสามารถชุบแข็งได้ มีความแข็งแรงสูงเหมาะสำหรับการทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น เฟือง เพลาข้อเหวี่ยง หรือมีชื่อเรียกว่าเหล็กกล้าเครื่องจักรกล (Machine Steels).เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะต้องใช้งานในสภาพชุบแข็ง และอบก่อนเสมอจึงจะมีค่าความแข็งแรงสูง

2.3.2.2 เหล็กกล้าประสมสูง (High Alloy Steels) เหล็กกล้าประเภทนี้จะถูกปรับปรุงคุณสมบัติ สำหรับการใช้งานเฉพาะอย่าง ซึ่งก็จะมีธาตุประสมรวมกันมากกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ เช่น เหล็กกล้าทนความร้อน เหล็กกล้าทนการเสียดสี และเหล็กกล้าทนการกัดกร่อน ในที่นี้จะศึกษาเหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าเครื่องมือ ดังนี้

- เหล็กกล้าสแตนเลส (Stainless Steels) หรือที่เรียกกันอีกอย่างว่า เหล็กกล้าไร้สนิม ส่วนมากผลิตมาจากเตาไฟฟ้า เหล็กกล้ากลุ่มนี้มีส่วนผสมทางเคมี และคุณสมบัติทางกลที่เด่นซึ่งทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมทนต่อการผุกร่อน หรือต้านทานการเป็นสนิมได้ดี ธาตุที่มีบทบาทมากได้แก่ โครเมียมที่ผสมเข้าไปในเนื้อเหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางๆขึ้นที่ผิวของเหล็กฟิล์มนี้จะ

มีความแข็งแรงสูง โปร่งใส ยึดติดกับผิวเหล็กได้ดี มีความหนาแน่นสูงและไม่มีรูพรุน นอกจากนี้ยังมีความสามารถซ่อมตัวเอง คือเกิดขึ้นใหม่ได้เอง เพื่อทดแทนส่วนของฟิล์มเก่าที่ถูกทำลายไปได้ อย่างรวดเร็วการที่จะเกิดฟิล์มในลักษณะดังกล่าวได้ จะต้องมีโครเมียมผสมอยู่ไม่น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วนใหญ่มีอยู่ประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ นอกจากโครเมียมแล้ว เหล็กกล้าไร้สนิมยังมีธาตุอื่นผสมอยู่อีก เช่น โมลิบดีนัม นิกเกิล และแมงกานีส ถ้าโครงสร้างเหล็กกล้าไร้สนิม เปลี่ยนไปอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ ของบรรยากาศการใช้งาน หรือลักษณะของแรงที่มากระทำ ฟิล์มจะไม่มีประสิทธิภาพในการป้องกันสนิม อันเกิดจากบรรยากาศภายนอกได้ เหล็กกล้าไร้สนิมก็จะเป็นสนิมได้ทันที

### 2.3.3 ธาตุผสมที่มีต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้า

2.3.3.1 คาร์บอน ทำให้เหล็กมีความสามารถในการชุบแข็งเพิ่มขึ้นมีค่าความแข็งและแข็งแรง

2.3.3.2 โครเมียม เพิ่มคุณสมบัติทางด้านความแข็ง ความแข็งแรง ความสามารถในการชุบแข็งต้านทานการกัดกร่อนและคงความแข็ง ณ อุณหภูมิสูง

2.3.3.3 นิกเกิล ทำให้เหล็กมีเกรนละเอียด เพิ่มความสามารถทางด้าน การรับแรงกระทำกะทันหัน (Shock Load) ความเหนียว ความสามารถในการชุบแข็ง และเพิ่มคุณสมบัติด้านการเชื่อม

2.3.3.4 ซิลิกอน เป็นธาตุที่สามารถลดการเกิดออกไซด์ในน้ำเหล็กได้ดี สามารถเพิ่มความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อน เพิ่มความต้านทานการเกิดสะเก็ดสนิมที่อุณหภูมิสูง รวมทั้งคาร์บอนในเนื้อเหล็ก เกิดเป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ ทำให้แข็งมากขึ้น แต่จะเปราะและแตกหักง่ายและถ้ามีมากจนเกินไปทำให้ชุบแข็งได้ไม่ดี

2.3.3.5 ฟอสฟอรัส ทำให้น้ำโลหะมีการไหลตัวในแบบหล่อได้ดี มีการยึดตัว หรือการขยายตัวต่ำ และการทนต่อแรงกระแทกไม่ดี

2.3.3.6 แมงกานีส รับแรงกระแทกได้ดีสามารถทำการชุบแข็งดี ทนต่อการสึกหรอและสามารถเพิ่มความแข็งแรง ความแข็ง แต่ความเหนียวจะลดน้อยลง

2.3.3.7 โมลิบดีนัม รักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงทนต่อการกัดกร่อน เพิ่มความแข็ง และมีคุณสมบัติในการตีขึ้นรูป และอัตราการขยายตัวได้ไม่ดี

2.3.3.8 วาเนเดียม สามารถทำการชุบแข็งได้ดี เพิ่มความแข็ง ความเหนียว รักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง และสามารถป้องกันการขยายตัวของออสเทนไนท์ได้ดี

2.3.3.9 ทังสแตน สามารถทำการชุบแข็งได้ดี เพิ่มความแข็งแรง ความแข็ง ทนต่อการกัดกร่อน รักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง รักษาความคมของคมตัดได้ดี

2.3.3.10 โคลบอลท์ เพิ่มความแข็ง รักษาความคมของคมตัดได้ดีและต้านทานต่อการสึกหรอ

15060138

ร.ร.

ท 238 ๗

2552

### 2.3.4 การจำแนกประเภทของเหล็กกล้า

2.3.4.1 ระบบ SAE (The Society of Automotive Engineers) และ AISI (The American Iron and Steel Institute)

ตารางที่ 2.1 การเขียนสัญลักษณ์ของเหล็กกล้า ในระบบ AISI-SAE

ชนิดของเหล็กกล้า	สัญลักษณ์ที่ใช้
เหล็กกล้า คาร์บอน	1XXX
- เหล็กกล้า Plain Carbon Steels (เหล็กกล้า ไม่เติมกำมะถัน)	10XX
- เหล็กกล้าชนิด ตัดเฉือนง่าย (เหล็กกล้า เติมกำมะถัน)	11XX
เหล็กกล้า นิกเกิล (แมงกานีส 1.75%)	13XX
เหล็กกล้า นิกเกิล	2XXX
- มีส่วนผสมของนิกเกิล ประมาณ 3.50%	23XX
- มีส่วนผสมของนิกเกิล ประมาณ 5.00%	25XX
เหล็กกล้า นิกเกิล-โครเมียม	3XXX
- มีส่วนผสมของนิกเกิล 1.25% โครเมียม 0.65%	31XX
- มีส่วนผสมของนิกเกิล 1.75% โครเมียม 1.00%	32XX
- มีส่วนผสมของนิกเกิล 3.50% โครเมียม 1.55%	33XX

ที่มา : [http://www.scribd.com/doc/12508833/06-Manufacturing-Hand-Out-20-Mar08,](http://www.scribd.com/doc/12508833/06-Manufacturing-Hand-Out-20-Mar08)

#### 2.3.4.2 ระบบ DIN (Deutsche Industrial Norm)

การเขียนสัญลักษณ์มาตรฐานของเยอรมัน (DIN) ของกลุ่มเหล็กเหนียว (Mid Steels/Low Carbon Steels) เหล็กหล่อ และเหล็กกล้าประสม มีการเขียนที่แตกต่างกันในที่นี้ขอ ยกตัวอย่างของการเขียนในกลุ่มของเหล็กเหนียว ที่ได้เขียนตัวอักษรเป็นตัวย่อแทนชนิดของเหล็ก ตามด้วยชุดของตัวเลข ชุดที่ 1 เป็นค่าความต้านแรงดึงสูงสุด และหมายเลขชุดที่ 2 เป็นการกำหนด ตามมาตรฐาน (DIN) ตามลักษณะการใช้งาน St 37.12 เป็นเหล็กกล้า ตามอักษร St ตัวเลขชุดแรกคือ 37 หมายถึง การแสดงค่าความต้านแรงดึง (Tensile Strength) ที่เหล็กสามารถรับได้ คิดเป็น 37 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร ( $370 \text{ MN/m}^2$ ) และตัวเลขชุดที่สองคือ 12 หมายถึง การบอกชนิดของ เหล็ก และการใช้งานในที่นี้ เป็นเหล็กโครงสร้างรูปพรรณต่าง ๆ สามารถทำการเชื่อมประสานได้ดี เพราะมีคาร์บอน 0.18 เปอร์เซ็นต์

### 2.4 ลักษณะท่าเชื่อม

#### 2.4.1 การเชื่อมต่อชนท่าราบ

การเชื่อมท่าราบเป็นการเชื่อมที่สามารถควบคุมการเชื่อมได้ง่าย โอกาสที่งานเชื่อมจะ สูญเสียนั้นมีมาก ดังนั้นถ้าสามารถนำชิ้นงานมาเชื่อมท่าราบได้ก็ควรปฏิบัติอย่างนี้ การเชื่อมท่าราบ นั้น ลวดเชื่อมทำมุมกับชิ้นงาน (มุมเดิน) ประมาณ 67– 75 องศา และทำมุมกับชิ้นงานด้านข้าง (มุม งาน) 90 องศา ทำการเชื่อมจากทางด้านซ้ายมือไปทางขวามือ

#### 2.4.2 ตำแหน่งทำขนานนอน

เป็นท่าเชื่อมที่แนวเชื่อมอยู่ด้านข้างของชิ้นงาน แนวเชื่อมขนานกับแนวระนาบไปกับ แนวระนาบของพื้น การเชื่อมทำขนานนอน แนวเชื่อมไหลย่อย ลงด้านล่างเสมอ ขณะเชื่อมต้อง เอียงลวดเชื่อมเพื่อให้แรงอาร์คช่วยพยุ่งน้ำ โลหะไม่ให้ไหลลงด้านข้าง

#### 2.4.3 ตำแหน่งทำตั้ง

เป็นท่าเชื่อมที่แนวเชื่อมอยู่ด้านข้างชิ้นงาน เช่น เดียวกับทำขนานนอน แต่แนวเชื่อม จะต้องตั้งฉากกับแนวระนาบของพื้นท่าเชื่อม การเชื่อมจากด้านล่างของรอยต่อขึ้นด้านบน เหมาะ กับงานที่มีความหนา การเชื่อมด้านล่างลงสู่ด้านล่าง เหมาะกับงานที่มีความหนาไม่มากเพราะน้ำ โลหะที่หลอมละลายจะไหลลงมาอย่างรวดเร็ว

#### 2.4.4 ตำแหน่งทำหนังสือรีไซเคิล

ทำเชื่อมที่แนวเชื่อมอยู่ด้านล่างของรอยต่อ หัวเชื่อมจะอยู่ด้านล่างชิ้นงานเป็นทำเชื่อมที่ปากที่สุดผู้เชื่อมต้องมีความชำนาญจึงสามารถเชื่อมได้ดีสำหรับทำเชื่อมของชิ้นงานต่อตัวที่ จะมีลักษณะที่แตกต่างจากแผ่นชิ้นงาน

### 2.5 การตรวจสอบงานเชื่อม

#### 2.5.1 การตรวจสอบชิ้นงานโดยไม่ทำลาย

การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย หมายถึง กรรมวิธีที่ใช้ค้นหาความบกพร่องหรือความผิดปกติใดๆ ที่มีอยู่ในชิ้นงาน (ทั้งที่เป็นอันตรายต่อการใช้งานและไม่เป็นอันตรายต่อการใช้งาน) โดยที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับชิ้นงานนั้น ซึ่งต่อไปนี้ความบกพร่องหรือความผิดปกติใดๆ ที่กล่าวถึงนี้จะเรียกโดยรวมว่า ความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity)

การตรวจสอบโดยไม่ทำลายมีหลายแบบตั้งแต่การตรวจสอบโดยใช้สายตา (Visual Inspection) ซึ่งเป็นการตรวจสอบโดยไม่ทำลายที่สะดวก รวดเร็วและประหยัดที่สุด จนถึงวิธีการที่ใช้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่ทันสมัยเข้ามาช่วยในการตรวจสอบ เช่น การตรวจสอบโดยใช้ภาพถ่ายรังสี (Radiographic Testing : RT) การตรวจสอบโดยใช้ของเหลวแทรกซึม (Liquid Penetrate Testing: PT) และการตรวจสอบโดยใช้คลื่นความถี่สูง (Ultrasonic Testing : UT) เป็นต้น

#### 2.5.2 การตรวจสอบชิ้นงานแบบทำลาย

เป็นวิธีการทดสอบรอยเชื่อมที่ทำให้รอยเชื่อมเปลี่ยนแปลงสภาพไปจากเดิมหลังการทดสอบ ซึ่งมีการทดสอบหลายวิธี

2.5.2.1. การทดสอบความแข็ง คือ การวัดความแข็งตามเนื้อของรอยเชื่อมตามระยะ Heat affect Zone (HAZ) และเปอร์เซ็นต์ของเนื้อรอยเชื่อมภายใต้จำนวนเปอร์เซ็นต์ของแนวเชื่อมที่แตกต่างกันออกไป โดยการเครื่องทดสอบแบบ Micro Hardness Test ยี่ห้อ MATSUZAWA โดยใช้หัววัดความแข็งแบบ Rockwell-C Hardness Testing ใช้ตัวกดทำด้วยเพชรทรงกรวย มีมุมปลาย 120 องศา ปลายแหลม 0.2 มิลลิเมตร ภายใต้แรงกดเท่ากับ 150 กิโลกรัม โดยการวัดที่ความลึก ของเนื้อรอยเชื่อมที่ความลึก 2 มิลลิเมตร ที่ได้ทำการบากเนื้อรอยเชื่อมลงไปแล้ว ทำการวัดตรงบริเวณด้านขอบ กึ่งกลางและด้านปลายของรอยเชื่อมจำนวน 3 รอย ตามแนวของเนื้อรอยเชื่อมและจับบันทึกผลการทดลองแล้วทำการหาเฉลี่ยค่าความแข็งของแนวเชื่อม

$$\text{ดังสมการ } HR = E - e \quad (2.1)$$

เมื่อ HR = Rockwell hardness number

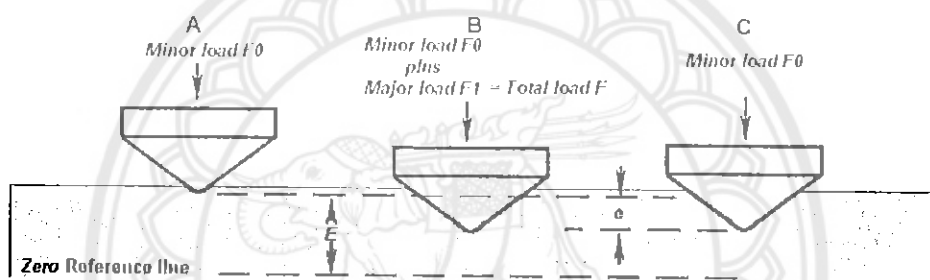
e = Permanent increase in depth of penetration due to major load F1 measured in unit of 0.002 mm

E = A constant depending on form of indenter : 100 unit for diamond indenter, 130 unit for steel ball indenter

F0 = Preliminary minor load in kgf

F1 = Additional major load in kgf

F = Total load in kgf



รูปที่ 2.11 แสดงหลักการของเครื่องวัดความแข็ง Rockwell  
ที่มา: แม้น อมรสิทธิ์ (2535)

#### 2.5.2.2 การตรวจสอบแรงดึง

การทดสอบก่อนอื่นต้องกำหนดความยาวจริง (Test length) และทำเครื่องหมายไว้วัดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างและความหนา เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดและหาอัตราการยืดตัวขึ้น ทดสอบแบบสำหรับชิ้นงานแผ่น ค่าการยืดตัวของวัสดุ (Elongation) หาได้โดยนำชิ้นส่วนที่หักมาต่อกันจนสนิทแล้ววัดความยาวระหว่าง Gauge ที่ขีดไว้ลบด้วย Gauge Length ก่อนทดสอบแรงดึงหารด้วย Gauge Length ก่อนทดสอบแรงดึงหารด้วย Gauge Length ก่อนทดสอบแรงดึงแล้วคูณด้วย 100 เป็นเปอร์เซ็นต์ของการยืดตัว การจับยึดชิ้นงานเชื่อมทดสอบจะต้องระวังให้แกนกลางของชิ้นงานทดสอบเป็นเส้นเดียวกับเส้นแรงดึงของเครื่อง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงคดงอ (Bending)



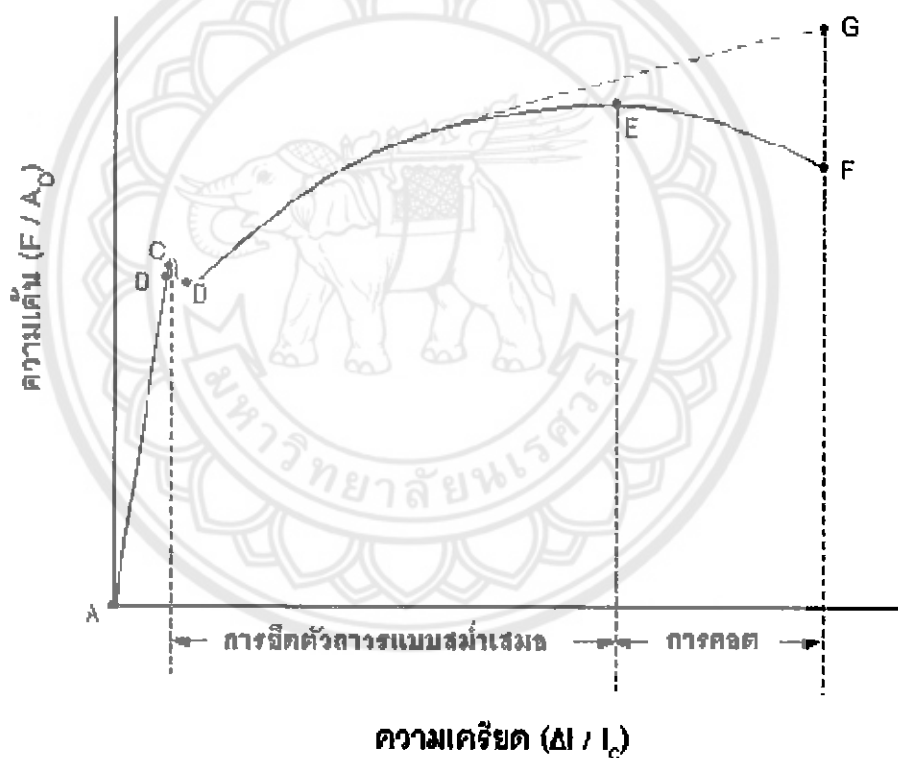
$$\text{ดั่งสมการ } (\% \text{ EL}) = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100\% \quad (2.2)$$

เมื่อ  $(\% \text{ EL})$  = เปอร์เซนต์ของการยืดตัว

$L_f$  = ความยาวของชิ้นงานทดสอบหลังจากถูกดึงจนขาด

$L_o$  = ความยาวเดิมของชิ้นงานทดสอบ (ก่อนถูกดึง)

ความเร็วในการดึง เนื่องจากความเค้นคราก  $R_o$  (Yield stress) และค่าความต้านแรงดึง  $R_m$  (tensile strength) ขึ้นอยู่กับความเร็วในการดึงด้วย ดังนั้นความเร็วในการดึงจึงต้องกำหนดไว้เป็นมาตรฐาน DIN 50145 เช่น ความเร็วในการดึงเพื่อหาค่า  $R_o$  จะใช้ความเร็ว 30 N/mm<sup>2</sup>



รูปที่ 2.12 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็ก

จากภาพที่ 2.12 แสดงค่าความเค้น (Stress) เทียบกับความเครียด (Strain) จากการทดสอบแรงดึงเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยค่าต่าง ๆ ในกราฟคำนวณจาก

$$\text{ความเค้น (Stress)} = \frac{\text{แรงที่กระทำ}}{\text{พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงนั้น}} \quad (2.3)$$

ช่วงต่างๆ ของกราฟความเค้น-ความเครียดที่น่าสนใจ ได้แก่ ช่วง AB เป็นช่วงที่วัสดุเริ่มยืดตัว โดยที่ระยะยืดตัวจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่มาดึงเป็นแนวเส้นตรง เราเรียกช่วงนี้ของกราฟว่า Proportional limit หรือ Limit of Proportionality โดยความชันของเส้นตรงดังกล่าวจะเรียกว่า Young's Modulus of Elasticity

เมื่อวัสดุยืดตัวอีกเล็กน้อยจะถึงจุด C ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มที่จะมีการแปรรูป แบบถาวร (Plastic deformation) โดยวัสดุที่ได้รับแรงดึงในช่วง AC เมื่อทำการหยุดดึงชิ้นงานจะหดกลับไปยังความยาวเริ่มแรกของวัสดุนั้น เราเรียกการแปรรูปในช่วง AC ว่า Elastic deformation ในทางปฏิบัติ จุด B และ C จะอยู่ใกล้กันมากจนสามารถถือได้ว่าเป็นจุดเดียวกัน

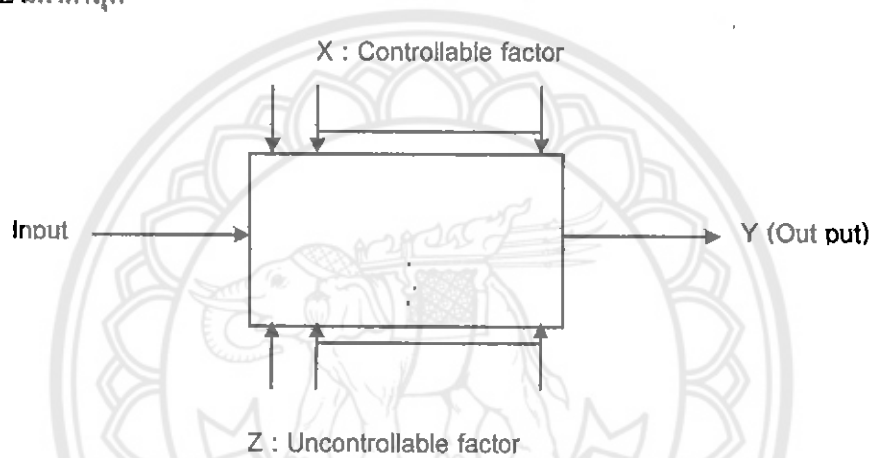
สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเมื่อทำการแปรรูปต่อจากจุด C ความเค้นจะลดลงและคงที่ โดยวัสดุสามารถยืดตัวออกไปได้เองโดยไม่ต้องเพิ่มความเค้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เราเรียกค่าความเค้นที่จุด D ว่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคลาก (Yield strength) เมื่อดึงวัสดุต่อจากจุด D ไปเรื่อย ค่าความเค้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อระยะยืดเพิ่มขึ้นจนถึงจุด E ซึ่งเป็นจุดที่ความเค้นสูงสุดของกราฟที่เป็นเส้นเต็ม เราเรียกค่าความเค้นสูงสุดนี้ว่า ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งถ้าวัสดุถูกดึงออกจากจุด D พื้นที่หน้าตัดบางส่วนของชิ้นงานจะเริ่มเกิดการคอด (Non-Uniform Deformation) และทำให้รับแรงได้น้อยลงอย่างมากเมื่อดึงวัสดุต่อจนถึงจุด F วัสดุจะขาดในที่สุด ซึ่งเราสามารถหาค่าความยาว ที่วัสดุยืดตัวออก โดยการนำเอาชิ้นงานที่ขาดมาต่อกัน แล้วหาความยาวของวัสดุหลังการดึง (Initial Gauge Length) ลบด้วยความยาวของวัสดุก่อนดึง (Initial Gauge Length) และทำการคำนวณหาค่าความยืดตัวร้อยละ (Percentage Elongation) ได้

## 2.6 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง การออกแบบทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อที่จะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ โดยวิธีการทางสถิติซึ่งจะทำให้ผู้ศึกษาสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งจำเป็น ถ้าผู้ศึกษาต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่และถ้ายังปัญหาที่ผู้ศึกษาสนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความคิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองคือ การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมากทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นอยู่กับวิธีการทดลองที่จะนำมาใช้ การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) คือ การทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่มีวัตถุประสงค์ที่จะเปลี่ยนแปลง (Factor) นำเข้าของกระบวนการและสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของปัจจัยนำออกซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกว่าผลตอบ (Response) ตามรูป โดยการกำหนดให้

ปัจจัย  $X_1, X_2, \dots, X_p$  เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Variably) ขณะที่  $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$  เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) และบางครั้งเรียกว่า ปัจจัยรบกวน (Noise) ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการทดลองคือ

- 1) การหาปัจจัยที่มีผลมากที่สุดต่อผล Output (Y)
- 2) การหาวิธีการตั้งค่าปัจจัยที่ควบคุมได้ (X) ที่มีผลต่อค่า Out put (Y) เพื่อให้ Out put (Y) ได้ค่าที่ต้องการ
- 3) การหาวิธีการตั้งค่าปัจจัยที่ควบคุมได้ (X) ที่มีผลต่อค่า Out put (Y) เพื่อให้ Out put (Y) มีค่าน้อย
- 4) การหาวิธีการตั้ง (X) ที่มีผลต่อค่า Out put (Y) เพื่อให้ผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ Z มีค่าต่ำสุด



รูปที่ 2.13 แสดงผังจำลองทั่วไปของกระบวนการออกแบบการทดลอง (DOE)

ที่มา : ประเมศ ชูติมาศ (2545)

หลักการพื้นฐานที่นำไปสู่ความสำเร็จในการออกแบบการทดลอง ประกอบด้วย 7 ปัจจัยดังนี้

- 1) กำหนดวัตถุประสงค์หรือเป้าหมายที่ต้องการศึกษาก่อนที่จะออกแบบการทดลองจะทำให้ทราบว่าปัจจัยใดที่ไม่มีผลต่อสิ่งที่กำลังศึกษาซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบการทดลองที่ดี
- 2) Out put ต้องสามารถวัดได้ในเชิงปริมาณ ในการออกแบบการทดลองในหลายกรณีไม่ประสบความสำเร็จเพราะเหตุว่า Out put ที่ได้นั้นไม่สามารถวัดได้ในเชิงปริมาณ
- 3) จำนวนซ้ำของการทดลองมีความสำคัญที่ทำให้พบผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (Signal) ในขอบเขตของความแปรปรวนในกระบวนการทางธรรมชาติ (Noise) เพื่อให้ทราบตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้
- 4) อันดับการทดลองควรทำแบบสุ่มเพื่อที่หลีกเลี่ยงอิทธิพลของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น การสึกหรอของเครื่องมือ หรือการเปลี่ยนวัตถุดิบ เป็นต้น

5) การจัดทำเป็นบล็อกจะทำให้ทราบแหล่งของความแปรปรวนโดยการแบ่งอันดับการทดลองให้อยู่ในบล็อกเดียวกันที่มีความคล้ายกัน และใช้หลักการทางพีชคณิตแยกความแตกต่างออกมาจะทำให้เพิ่มความไวต่อการออกแบบการทดลอง

6) ทราบผลที่จะเป็นคู่แฝดแฝง คู่แฝดแฝงจะแสดงให้เห็นได้เมื่อมีการเปลี่ยนสิ่งของตั้งแต่ 2 สิ่งขึ้นไปในเวลาเดียวกันและในทิศทางเดียวกัน เช่น ถ้าพยายามศึกษา 3 ปัจจัย โดยกำหนดให้มีเพียง 4 อันดับการทดลอง โดยการใช้การทดลองแบบครึ่งจำนวน (Half Fraction) และจำทำให้ผลหลักกลายเป็นคู่แฝดของ 2 ปัจจัยที่สัมพันธ์กัน นั่นคือจะทำให้เกิดความสับสนต่อปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กัน (เช่น AB) กับปัจจัยเดียว (เช่น C)

7) ลำดับขั้นตอนของการทดลองประกอบด้วย การกรองปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง เช่น ออกแบบส่วนแฟกทอเรียล (Fractional Factorial) เพื่อที่จะหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญจากนั้นจะออกแบบการทดลองแบบเต็มจำนวน (Full Factorial) หรือพื้นผิวผลตอบ (Response Surface) หรือสร้างแบบทดลองของผลตอบและตรวจสอบซ้ำเพื่อยืนยันผล ดังนั้นถ้าเกิดการผิดพลาดของการเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมีขนาดใหญ่มาก นั้นหมายความว่าค่าใช้จ่ายในการทดลองจะสูงขึ้น

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบการทดลองได้ถูกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมต่างๆมากมาย ดังเช่น อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปและการผลิต เทคนิคการออกแบบการทดลองได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินผลของการวิจัยที่สนใจศึกษา เช่น ทวีป จีระประดิษฐ์ (2538) ได้ทำการวิจัยเรื่องการศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขการแปรรูปโลหะในกรรมวิธี EDM โดยได้ศึกษาเงื่อนไขการแปรรูปของโลหะของ 3 แปร ได้แก่ กระแสช่วงพัลส์และเซอร์โว ซึ่งมีผลกระทบต่ออัตราการกัดเนื้อโลหะ อัตราการสึกหรอ ความหยาบและ โอเวอร์คัต โดยอาศัยวิธีแฟกทอเรียลตามหลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นพื้นฐานของการวิจัยและสร้างสมการอโคโนมอลโพลีโนเมียลของอัตราการกัดเนื้อโลหะ การสึกหรอ ความหยาบ และ โอเวอร์คัต ในรูปแบบ 3 ตัวแปร โดยใช้โปรแกรม Statistical Graphics มาช่วยในการวิเคราะห์ผลเบื้องต้น

ในส่วนเรื่องของการเชื่อมโลหะได้มีการใช้หลักการออกแบบการทดลอง ในการศึกษาเกี่ยวกับงานเชื่อม ดังเช่น Aloraier, A et al. 2006 ได้ทำการวิจัยด้านการหลีกเลี่ยงการให้ความร้อนภายหลังการกระบวนการเชื่อม FACW ซึ่งได้ศึกษาความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมซึ่งมีผลทำให้รูปทรงเกิดการบิดเบี้ยวเปลี่ยนรูปทรง อีกทั้งแรงที่มากกระทำให้เกิดความไม่สมดุลเกิดขึ้นและมีผลทำให้เสียคุณค่าทางคุณสมบัติทางกลสูญหายไป

ยุค จตุตถุช (2535) ได้ศึกษาทดสอบหาคุณภาพและประสิทธิภาพของงานเชื่อม เพื่อรวบรวมข้อมูลนำมาสร้างเป็นมาตรฐานการเชื่อมของเมืองไทย ทำการทดสอบหาคุณภาพของเนื้อรอยเชื่อมทดลองที่ค่าความชื้นต่างกันเพื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบหา ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนของรอย

เชื่อม และหาคุณสมบัติทางกล และทางโลหะวิทยา เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมให้มีคุณภาพเทียบเท่ากับต่างประเทศ จากผลการทดลองในสถานที่ที่ความชื้นแตกต่างกัน ซึ่งปริมาณการรวมตัวของแก๊สไฮโดรเจนมีความแตกต่างกัน คือปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนมีปริมาณการคายตัวสูงมากจึงเป็นอันตรายต่อการเชื่อมจึงมีมาตรการป้องกัน

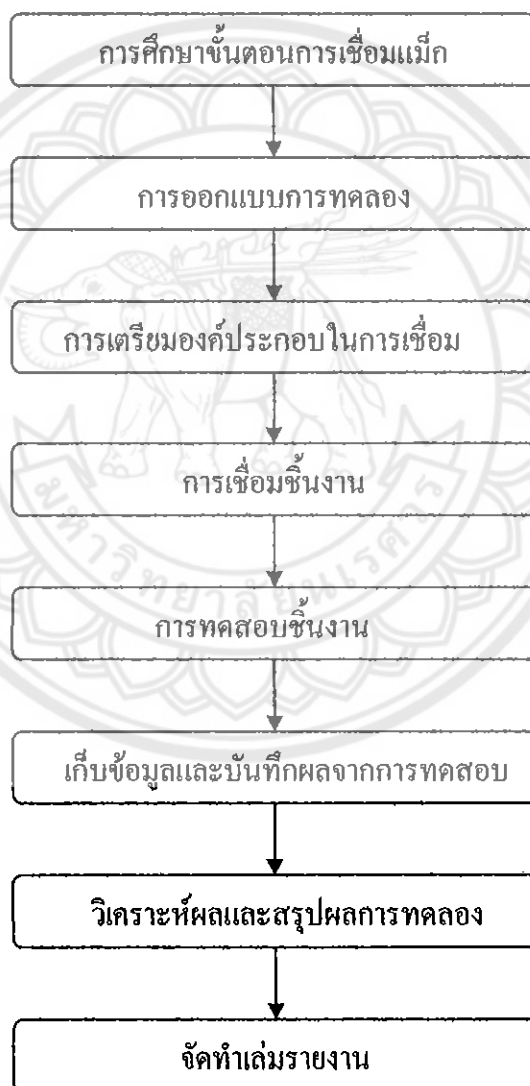
จากการวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเห็นได้ว่าการนำเทคนิคการออกแบบและการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีทางสถิติได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายๆแขนง ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถขึ้นชิ้นผลที่ได้จากการออกแบบของสิ่งที่ต้องการทำการทดลองในเชิงสถิติ เพื่อให้เกิดความเชื่อมั่น มีความเที่ยงตรงและแม่นยำ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น การทำการวิจัยนี้ออกแบบการทดลองมาใช้ในการศึกษาหาผลของตัวแปรการเชื่อมเมื่อที่มีผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม จากการศึกษาตำราทั้งในและต่างประเทศ ทั้งผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตลอดจนการสอบถามผู้ที่ชำนาญที่มีประสบการณ์ในด้านการเชื่อม เพื่อศึกษาหาค่าตัวแปร ได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อม และมุมของหัวเชื่อม ที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมและความแข็งแรงของรอยเชื่อมเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาทางด้านการเชื่อมให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น



### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงาน

บทนี้กล่าวถึงวิธีการดำเนินงาน ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบชิ้นงาน ซึ่งในการศึกษาผลของตัวแปรการเชื่อมแม่เหล็กที่มีผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม โดยจะทำการทดสอบค่าความแข็งและความบกพร่องของรอยเชื่อม โดยอาศัยการออกแบบการทดลอง ซึ่งมีวิธีการดำเนินงานดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.1 การศึกษาขั้นตอนการเชื่อมแม่เหล็ก

ศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมแม่เหล็ก (Metal Active Gas Welding) ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมประสานชิ้นงานให้ยึดติดกัน โดยศึกษาในเรื่องของกระบวนการและขั้นตอนการปฏิบัติงาน รวมไปถึงองค์ประกอบต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมแม่เหล็ก เพื่อที่จะทำให้เข้าใจถึงขั้นตอนในการเชื่อมและตัวแปรในการเชื่อมแม่เหล็ก ซึ่งจะสามารถนำไปตั้งเป็นสมมติฐานในการออกแบบการทดลองได้

### 3.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อรองรับปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็ง และค่าแรงดึงของเนื้อแนวเชื่อม โดยเบื้องต้นวิจัยมีตัวแปรที่อยู่ในความสนใจอยู่หลายปัจจัยด้วยกัน ดังนั้นจึงต้องการทราบว่า มีปัจจัยใดบ้างที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบเหล่านั้น

#### 3.2.1 เลือกปัจจัยระดับและขอบเขต

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและจากคู่มือประกอบการเชื่อมรวมถึงการปฏิบัติงานเชื่อม โดยการเชื่อมแม่เหล็กจะทำให้คุณภาพของ การเชื่อมที่ดีนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหรือองค์ประกอบอยู่หลายปัจจัยด้วยกันได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม ระยะ โผล่ของลวดเชื่อม มุมของหัวเชื่อมระยะอาร์ระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อม ขนาดของลวดเชื่อม บริเวณที่เกิดความร้อนจากการเชื่อม (HAZ) ชนิดของลวดเชื่อมชนิดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม วัสดุที่ใช้ในการเชื่อม ความชื้นของบรรยากาศระหว่างการเชื่อม ชนิดของแก๊ส ตลอดจนปริมาณของแก๊สที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อมในขณะที่ปฏิบัติงานเชื่อม ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของงานเชื่อม นั้น มีทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซ โดยปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยนี้ แต่ละปัจจัยจะประกอบไปด้วย 2 ระดับ คือ ระดับต่ำและระดับสูง โดยได้กำหนดปัจจัยระดับและขอบเขตดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงปัจจัยระดับและขอบเขต สำหรับการเชื่อมแม่เหล็ก (Metal Active Gas Welding)

ปัจจัย/หน่วย	ระดับ	
	ระดับต่ำ (-1)	ระดับสูง (+1)
1. กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม (แอมป์)	95	115
2. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม (โวลต์)	22	26
3. ความเร็วในการเชื่อม (เซนติเมตรต่อนาที)	40	80
4. อัตราการไหลของก๊าซปกคลุม (ลิตรต่อนาที)	15	20

### 3.3 การเตรียมองค์ประกอบในการเชื่อม

เป็นการเตรียมองค์ประกอบต่างๆที่ใช้ในการเชื่อมเม็ก โดยในข้อที่ 3.3.4 - 3.3.7 นั้นจะกำหนดจากตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นช่วงของค่าที่เหมาะสมจากงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเชื่อมเม็กและเหล็ก ST37

3.3.1 การเตรียมวัสดุของชิ้นงาน ซึ่งวัสดุที่ใช้จะเป็นเหล็กแผ่นชนิด ST37 โดยกำหนดให้ชิ้นงานมีขนาด 100X150 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร จำนวน 64 ชิ้น



รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ทำการเชื่อม

3.3.2 ลวดเชื่อม ใช้ลวดเชื่อม ER 80 S-B2 ขนาด 1 มิลลิเมตร

3.3.3 ก๊าซที่ใช้ในการเชื่อม คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3.3.4 การตั้งกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม โดยการเลือกค่าไว้ทั้งหมด 2 ค่า คือ 95 และ 115 แอมป์

3.3.5 การตั้งแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม โดยการเลือกค่าไว้ทั้งหมด 2 ค่า คือ 22 และ 26 โวลต์

3.3.6 การตั้งความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม โดยการเลือกค่าไว้ทั้งหมด 2 ค่า คือ 40 และ 80 เซนติเมตรต่อนาที

3.3.7 กำหนดอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม โดยเลือกค่าไว้ทั้งหมด 2 ค่า คือ 15 และ 20 ลิตรต่อนาที

3.3.8 หุ่นยนต์เชื่อม ยี่ห้อ Nachai ABC Master 350 Model 2 โดยตั้งกระแสเชื่อมโดยเลือกแบบประเภทกลับหัว (DCEP) โดยที่อิเล็กโตรดจับที่ขั้วบวกและชิ้นงานถูกจับที่ขั้วลบ

3.3.9 เครื่องอุปกรณ์วัดระยะความยาวของแนวเชื่อม ในการวิจัยนี้ใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ชนิดอ่านค่าได้ละเอียด 0.1 มิลลิเมตรและไม้บรรทัดวัดความยาว 12 นิ้ว

3.3.10 การกำหนดค่าที่ใช้ในการเชื่อมและการต่อชิ้นงาน โดยค่าที่ใช้ในการเชื่อมใช้ทำرابและการต่อชิ้นงานใช้การต่อในลักษณะการต่อชน

3.3.11 เตรียมเครื่องทดสอบความแข็ง โดยการเครื่องทดสอบแบบ Micro Hardness Test ยี่ห้อ MATSUZAWA โดยใช้หัววัดความแข็งแบบ Rockwell - C Hardness Testing ใช้ตัวกดทำด้วยเพชรทรงกรวยมีมุมปลาย 120 องศา ปลายแหลม 0.2 มิลลิเมตร

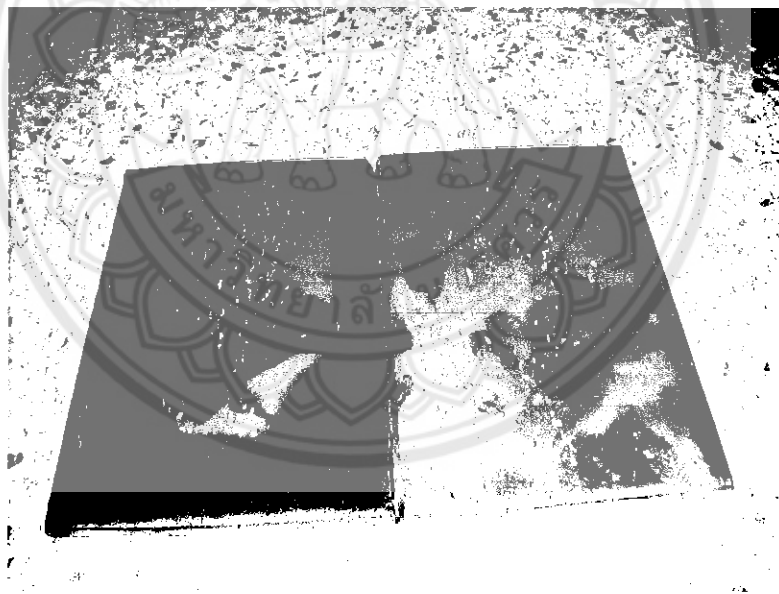


3.3.12 การเตรียมเครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น WE-100 ซึ่งถูกสร้างได้มาตรฐาน เช่น ตาม DIN 5122I เครื่องจะประกอบด้วยส่วนฐาน ลำตัว ชุดตั้งกำลัง อุปกรณ์วัดแรงและอุปกรณ์เขียนไดอะแกรมแรง - ความยาว ในการทดสอบค่าแรงดึงชิ้นงานทดสอบจะถูกยึดที่หัวจับทั้งสอง น้ำมันไฮดรอลิกจากปั๊มที่ไหลตามท่อล่างจะดันลูกสูบไปดันแท่นบนสุดให้ดึง แท่นข้างล่างให้ดึง ชิ้นทดสอบจนขาดออกจากกัน ในขณะที่ดึงความดันของเหลวในท่อบนจะมาดันให้ระบบกลไกใช้เกจวัดซึ่งบอกค่าความเค้นได้ ขนาดเครื่องทดสอบแรงดึงที่ใช้สามารถดึงชิ้นงานได้สูง 10,000 kgf. อ่านค่าได้ละเอียดถึง 10 kgf.

3.3.13 การกำหนดสถานที่ในการเชื่อม ซึ่งใช้สถานที่สถานบันพัฒนาฝีมือแรงงาน ภาค 9 จังหวัดพิษณุโลก และอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

### 3.4 การเชื่อมชิ้นงานทดสอบ

3.4.1 การนำชิ้นงานทดสอบ ขนาด 100 x 150 x 6 มิลลิเมตร มาเชื่อมติดกัน



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานทดลอง

3.4.2 ตั้งกระแสนเชื่อมโดยเลือกแบบประเภทถับขั้ว (DCEP) โดยที่อิเล็กโตรดจับที่ขั้วบวกและชิ้นงานถูกจับที่ขั้วลบ ตั้งระยะห่างระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน 5 มิลลิเมตร ทำการเชื่อมชิ้นงานในตำแหน่งท่าราบ (Flat Position) มุมของลวดเชื่อมตั้งฉาก 90 องศา กับชิ้นงานเชื่อม โดยใช้

กระบวนการเชื่อมอาร์กด้วยเส้นลวดภายใต้แก๊สปกคลุม MAG ซึ่งใช้หุ่นยนต์เชื่อม (Robot Welding)

3.4.3 การตั้งค่าตัวแปร ในการปฏิบัติงานเชื่อม ได้แก่ กระแสไฟฟ้าที่ 95 และ 115 แอมป์ แรงดันไฟฟ้าที่ 22 และ 26 โวลต์ และความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมที่ 40 และ 80 เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการไหลก๊าซปกคลุมที่ 15 และ 20 ลิตรต่อนาที ของแนวเชื่อมตามการออกแบบการทดลองที่ได้กำหนดไว้

3.4.4 ทำการเชื่อมแนวเชื่อมบนชิ้นงานทดลอง ขนาดของแนวเชื่อม 10 มิลลิเมตร ความยาวของการเชื่อมเท่ากับ 150 มิลลิเมตร

3.4.5 ทำการดำเนินการเชื่อมชิ้นงานทดลองตามตัวแปรของการออกแบบการทดลองจนครบชิ้นงานทดลองจำนวน 32 ชิ้น



รูปที่ 3.4 หุ่นยนต์เชื่อม



รูปที่ 3.5 ชีงงานที่เชื่อมเสร็จ

### 3.5 การทดสอบชีงงาน

เป็นการทดสอบคุณภาพของรอยเชื่อม เพื่อแสดงคุณภาพและข้อบกพร่องของชีงงาน

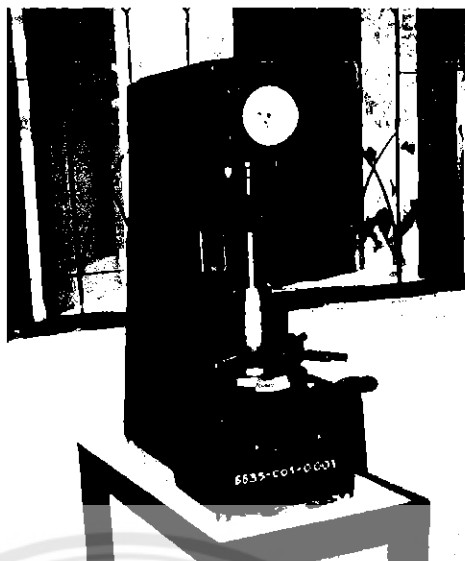
#### 3.5.1 การทดสอบแบบไม่ทำลายชีงงาน

เป็นการทดสอบชีงงาน โดยไม่ทำให้ชีงงานนั้นเกิดความเสียหาย ในที่นี้ใช้การทดสอบด้วยสายตาซึ่งเป็นการตรวจสอบเบื้องต้น เพื่อตรวจดูความบกพร่องของรอยเชื่อมที่ผิวของรอยเชื่อม เช่น รอยร้าว การซึมลึกที่ไม่สมบูรณ์

#### 3.5.2 การทดสอบแบบทำลายชีงงาน

##### ก. ทดสอบความความแข็ง

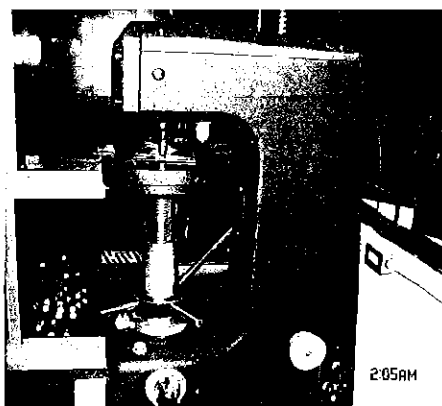
การวัดความแข็งตามเนื้อของรอยเชื่อมตามระยะ Heat Affect Zone (HAZ) และเปอร์เซ็นต์ของเนื้อรอยเชื่อมภายใต้จำนวนเปอร์เซ็นต์ของแนวเชื่อมที่แตกต่างกันออกไป โดยการทดสอบแบบ Micro Hardness Test โดยใช้หัววัดความแข็งแบบ Rockwell-C Hardness Testing ใช้ตัวกดทำด้วยเพชรทรงกรวยมีมุมปลาย 120 องศา ปลายแหลม 0.2 มิลลิเมตร ภายใต้แรงกดเท่ากับ 150 กิโลกรัม โดยการวัดที่ความลึกของเนื้อรอยเชื่อมที่ความลึก 2 มิลลิเมตร ที่ได้ทำการบากเนื้อรอยเชื่อมลงไปแล้วทำการวัดตรงบริเวณด้านขอบกึ่งกลางและด้านปลายของรอยเชื่อมจำนวน 3 รอย ตามแนวของเนื้อรอยเชื่อมและจดบันทึกผลการทดลองแล้วทำการหาเฉลี่ยค่าความแข็งของแนวเชื่อม



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความแข็ง

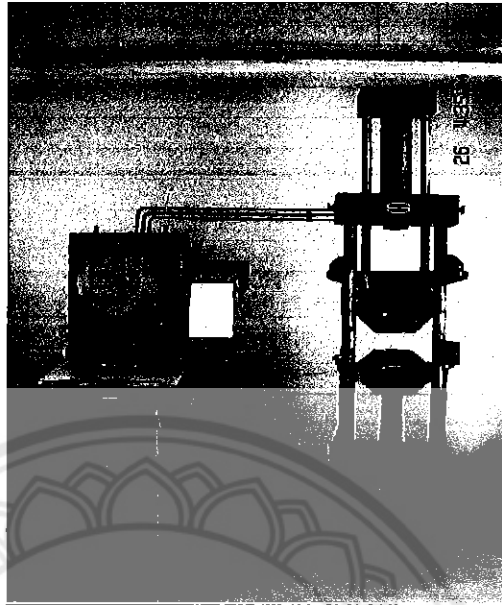
ขั้นตอนการทดสอบค่าความแข็งของแนวเชื่อม ดังนี้

- วางชิ้นงานเชื่อมแล้วหมุนเกลียวที่ฐานเครื่องเพื่อยกชิ้นงานเชื่อมขึ้น จนผิวหน้าของชิ้นงานสัมผัส
- ใส่ Minor Load ใช้น้ำหนักกดเท่ากับ 10 กิโลกรัม
- ปรับเข็มที่หน้าปัดชี้ที่เลข 0
- ใส่ Minor Load ใช้น้ำหนักเท่ากับ 10 กิโลกรัม
- จับเวลาการกดแช่ทิ้งไว้ 10 – 15 วินาที
- ปลด Minor Load ออก
- อ่านค่าความแข็ง



รูปที่ 3.7 การทดสอบความแข็ง

## ข. การตรวจสอบแรงดึง



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.9 ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงดึง

ขั้นตอนการทดสอบค่าแรงดึงของแนวเชื่อม ดังนี้

- การเตรียมชิ้นงานภายหลังที่ทำการเชื่อมเสร็จสิ้นแล้ว โดยทำการตัดชิ้นงาน กำหนดขนาดชิ้นงานในแนวขวางกับแนวเชื่อม ขนาดชิ้นงานทดสอบ 40 X 100 X 6 มิลลิเมตร
- นำชิ้นงานทดสอบที่ได้มาขึ้นทำการปรับผิวหน้ารอยเชื่อมโดยการใช้เครื่องกัด (Milling) เพื่อทำการปรับแต่งผิวชิ้นงานให้เรียบสม่ำเสมอทั้ง 2 ด้าน ของรอยเชื่อม
- ทำการกัดเว้าบริเวณด้านข้างทั้ง 2 ข้าง ของรอยเชื่อม เพื่อกำหนดจุดที่จะทำการดึง

- ทำความสะอาดชิ้นงานทดสอบ โดยการเช็ดสารหล่อลื่นที่ติดมากับชิ้นงานทดสอบที่กัดสีเสร็จแล้ว ซึ่งอาจใช้กระดาษทรายลูบชิ้นงานทดสอบ ถ้าผิวเหล็กมีสนิม เพื่อป้องกันการเลื่อน (Slip) ของชิ้นงานจากหัวจับขณะทำการดึง

- ตรวจสอบความเรียบของชิ้นงานทดสอบ โดยจะต้องไม่บิดเบี้ยวหรือเสียรูปทรง เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องจากการทดสอบ

- ทำการวัดและบันทึกค่าขนาดของชิ้นทดสอบที่ได้จากการเตรียมและตรวจเช็คค่าให้แน่ใจว่าขนาด (Dimension) ของชิ้นทดสอบอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน

- ทำการดึงด้วยเครื่องดึง (Tensile Machine) เครื่องมือที่ใช้ทดสอบแรงดึงเรียกว่า เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine) เครื่องมือดังกล่าวนี้ จะมีปากสำหรับจับชิ้นทดสอบอยู่ 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ยึดติดกับแท่นเครื่อง ส่วนที่ 2 ยึดติดกับตัววัดแรง (Load Cell) และสามารถเคลื่อนที่ได้ ในการทดสอบนั้นจะต้องนำชิ้นทดสอบที่เตรียมใส่ระหว่างปากจับ ทั้งสองข้าง โดยจับที่ส่วนปลายของชิ้นทดสอบแล้วล็อคให้แน่นหลังจากนั้นจึงดึงให้ปากจับส่วนที่ 2 เคลื่อนที่ห่างออกไป โดยปลายอีกข้างหนึ่งของชิ้นทดสอบยังอยู่กับที่ชิ้นทดลองที่กำลังยืดออกจะมีแรงต้านซึ่งแรงต้านของชิ้นทดสอบนี้ มีผลทำให้ตัววัดแรงสามารถวัดแรงออกมาได้แรงที่วัดออกมา มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) หรือนิวตัน (N) การทดสอบซึ่งเมื่อดึงเสร็จสิ้น (ชิ้นงานขาดจากกันเป็นสองส่วน) โปรแกรมของเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซลจะทำการวาดกราฟและคำนวณค่าแรงดึงออกมา



รูปที่ 3.10 การทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.11 ชิ้นงานที่ทดสอบแรงดึงเสร็จ

### 3.6 การเก็บข้อมูลและบันทึกผลการทดลอง

กำหนดการจดบันทึกผลที่ได้จากการทดสอบคุณภาพของรอยเชื่อม โดยใช้การบันทึกแบบข้อมูลเชิงสถิติ

### 3.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ภายหลังจากการเชื่อมเสร็จสิ้นแล้วนำค่าความแข็งและค่าแรงดึงของแนวเชื่อม มาดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูล โดยการป้อนข้อมูลแล้ว Runs ลงในโปรแกรม ANOVA จะมีวิธีขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

#### 3.7.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

$$\text{จากสมการ } y_{ij} = \mu + \tau + \varepsilon \quad (3.1)$$

โดยที่  $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ย  
 $\tau$  คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย  
 $\varepsilon$  คือ ความคลาดเคลื่อน

ในการออกแบบการทดลองส่วนใหญ่ มักจะตั้งสมมุติฐานในการวิเคราะห์จาก การที่  $y$  (ตัวแปร) มีการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น  $y$  จะมีการกระจายแบบนี้ได้ ต้องให้  $\varepsilon$  มีการกระจายแบบปกติด้วย และต้องเป็นการกระจายที่เป็นอิสระ ( $\varepsilon_j \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ )

#### 3.7.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square)

เป็นการวิเคราะห์ว่าการออกแบบที่ได้ออกแบบขึ้นมาใช้ในการทดลองนั้น มีความเหมาะสมเพียงใดซึ่งในการทดลองทุกครั้งจะต้องมีความผันแปรที่อธิบายไม่ได้ (Unexplained Variable) หรือความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ การออกแบบการทดลองที่ดีจะต้องทำให้เกิด ความผันแปรที่อธิบายไม่ได้ให้น้อยที่สุด

$$R^2 - \text{Square} = \frac{SS_{\text{Model}}}{SS_{\text{Total}}} \times 100 \quad (3.2)$$

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่ำ สามารถแก้ไขได้โดย

- 1) เพิ่มจำนวนซ้ำในการทดลอง
- 2) ตรวจสอบหาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง แล้วออกแบบการทดลองใหม่
- 3) ถ้าทำการเพิ่มปัจจัยอื่นแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจยังต่ำอยู่ แสดงว่าผลจากปัจจัยรบกวน (Noise Factor) มีมากต้องทำการบล็อก (Blocking) เพื่อลดปัจจัยรบกวน

### 3.7.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการตรวจสอบความถูกต้อง ของแบบจำลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ตามหลักการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.2 และเมื่อมีการบล็อกในการทดลองจะใช้หลักการวิเคราะห์ตามตารางที่ 3.3 ประกอบการวิเคราะห์ผล ซึ่งโปรแกรมจะให้ตาราง ANOVA ตามตัวอย่างตาราง 3.4

ในการออกแบบการทดลองชนิด Factorial Design จะต้อง Sum of Squares เนื่องจากค่าผิดพลาด (Error) ถ้าอันตรกิริยาทั้งหมดรวมอยู่ในแบบจำลองถ้าปัจจัยทั้งหมดเป็นแบบค่าตายตัว อาจจะสามารถทดสอบเกี่ยวกับผลหลักและอันตรกิริยาได้ง่าย พิจารณาแบบจำลองของการวิเคราะห์ ANOVA กรณี 3 ปัจจัย คือ

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad (3.3)$$

ดังนั้นตามตาราง 2 จึงนำตัวสถิติ F Tests มาทดสอบผลหลักและอันตรกิริยาได้โดยตรง จากค่ากำลังสองเฉลี่ยค่าหมายที่ได้ โดย  $F_0$  คือ การแจกแจง F ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีของตัวตั้ง เป็น  $n_1 - 1$  และมีระดับขั้นความเสรีของตัวหารเป็น  $n_2 - 1$  สมมุติฐานหลักจะถูกปฏิเสธ

ถ้าหาก  $F_0 > F_{\alpha/2, n_1 - 1, n_2 - 1}$  หรือ ถ้า  $F_0 > F_{1 - \alpha/2, n_1 - 1, n_2 - 1}$  โดยที่  $F_{\alpha/2, n_1 - 1, n_2 - 1}$  และ  $F_{1 - \alpha/2, n_1 - 1, n_2 - 1}$  คือ ค่าบนที่  $\alpha/2$  และค่าล่างที่  $1 - \alpha/2$  ของการแจกแจง F ที่ระดับขั้นความเสรี  $n_1 - 1$  และ  $n_2 - 1$  แต่โปรแกรมจะคำนวณค่า P-Value มาให้สำหรับเปรียบเทียบกับค่า  $\alpha$  ที่กำหนด



ดังนั้นจึงสามารถอ่านค่า P-Value ได้โดยตรง โดยที่ไม่จำเป็นต้องคำนวณค่า  $F_0$  ซึ่งในการทดลองนี้ผู้วิจัยกำหนดค่า  $\alpha = 0.05$  หมายความว่า ถ้าค่า P-Value มีค่ามากกว่าค่า  $\alpha$  สรุปได้ว่าความแตกต่างของความแปรปรวนนั้นสำคัญทางสถิติ แต่ถ้าค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าค่า  $\alpha$  สรุปได้ว่าความแตกต่างของแปรปรวนนั้นมิมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 3.2 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ 3 ปัจจัยแบบ Fixed Effects

Source of Variation	SS	df	MS	Expected Mean Square	$F_0$
A	$SS_A$	$a - 1$	$MS_A$	$\sigma^2 + \frac{bcn \sum \tau_i^2}{a - 1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
B	$SS_B$	$b - 1$	$MS_B$	$\sigma^2 + \frac{bcn \sum \tau_i^2}{b - 1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
C	$SS_C$	$c - 1$	$MS_C$	$\sigma^2 + \frac{abn \sum \gamma_k^2}{c - 1}$	$\frac{MS_C}{MS_E}$
AB	$SS_{AB}$	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB}$	$\sigma^2 + \frac{cn \sum \sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	$SS_{AC}$	$(a - 1)(c - 1)$	$MS_{AC}$	$\sigma^2 + \frac{bn \sum \sum (\tau\gamma)_{ij}^2}{(a - 1)(c - 1)}$	$\frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	$SS_{BC}$	$(b - 1)(c - 1)$	$MS_{BC}$	$\sigma^2 + \frac{an \sum \sum (\beta\gamma)_{jk}^2}{(b - 1)(c - 1)}$	$\frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	$SS_{ABC}$	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	$MS_{ABC}$	$\sigma^2 + \frac{n \sum \sum \sum (\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a - 1)(b - 1)(c - 1)}$	$\frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	$SS_E$	$abc(n - 1)$	$MS_E$	$\sigma^2$	
total	$SS_T$	$abcn - 1$			

ที่มา : Montgomery (2001)

ตารางที่ 3.3 แสดงตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ RCB Design

Source of Variation	Sum of Square	df	Mean Square	F <sub>0</sub>
Treatments	SS Treatments	a - 1	$\frac{SS_{Treatments}}{a - 1}$	$\frac{MS_{Treatments}}{MS_E}$
Blocks	SS Blocks	b - 1		
Error	SS E	(a - 1)(b - 1)		
Total	SST	N - 1		

ที่มา : Montgomery (2001)

ตารางที่ 3.4 แสดงตารางที่ใช้บันทึกผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ RCB Design

แหล่งความ ผันแปร (Source)	ชั้นของความ อิสระ(DF)	ผลรวมกำลัง สอง(SS)	ค่าเฉลี่ยกำลัง สอง(MS)	ตัวทดสอบ (F)	ตัวทดสอบ (P)
Regression					
Linear					
Square					
Interaction					
Residual					
Error					
Lack-of-Fit					
Pure Error					
Total					

ที่มา : Montgomery (2001)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่า SS ในตาราง 3 คือ

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (3.4)$$

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i\dots}^2 + \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (3.5)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{j\dots}^2 + \frac{y_{\dots}^2}{abcn} \quad (3.6)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{i=1}^c y_{k\dots}^2 + \frac{y^2}{abcn} \quad (3.7)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij\dots}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_B \quad (3.8)$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{ik\dots}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_C \quad (3.9)$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{cn} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{jk\dots}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_B - SS_C \quad (3.10)$$

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D \quad (3.11)$$

$$- SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{AD} - SS_{BC}$$

$$SS_{AB} = SS_{subtotals(ABC)} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (3.12)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotals(ABC)} \quad (3.13)$$

สูตรที่มีในการคำนวณค่า SS ตาราง 3 คือ

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y^2}{N} \quad (3.14)$$

$$SS_{Treatments} = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^a y_{i\dots}^2 - \frac{y^2}{N} \quad (3.15)$$

$$SS_{Blocks} = \frac{1}{a} \sum_{j=1}^b y_{j\dots}^2 - \frac{y^2}{N} \quad (3.16)$$

การทดสอบ Lack of Fit ใช้ประกอบการทดสอบในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยดูที่ค่า P-Value โดยเฉพาะการตรวจสอบฟังก์ชันการถดถอยว่าเป็นเส้นตรงหรือไม่เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์แบบจำลองระดับสูงต่อไป เช่น แบบจำลองของ Quadratic Model โดยพิจารณาจากการออกแบส่วนประสมกลาง ที่มีการเติมจุดศูนย์กลางเพื่อให้สามารถหาตัวประมาณของความผิดพลาดในการทดลองโดยตรง (Experimental Error) และยังทำให้แบ่งผลรวมกำลังสองตกค้าง  $SS_E$  ได้เป็น 2 ส่วน คือ

$$SS_E = SS_{PE} + SS_{LOF} \quad (3.17)$$

โดยที่  $SS_{PE}$  คือผลรวมกำลังสองที่เกิดขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดโดยตรง และ  $SS_{LOF}$  คือผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจาก Lack of Fit

$$\text{โดยที่ } SS_{PE} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (3.18)$$

ถ้าสมมุติให้การทดลองอยู่ที่  $n_i$  ภายได้ผลตอบที่ระดับ  $i$  ของตัวทดลอง  $X_i$ ,  $i = 1, 2, m$  กำหนดให้  $y_{ij}$  แทนข้อมูลครั้งที่  $j$  บนผลตอบที่  $X_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  และ  $j = 1, 2, \dots, n_i$

$$SS_{LOF} = \sum_{i=1}^m n_i (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.19)$$

และสถิติที่ใช้ทดสอบ Lack of Fit คือ

$$F_0 = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}} \quad (3.20)$$

### 3.8 การจัดทำเล่มรายงาน

รวบรวมข้อมูลจากการปฏิบัติจริง และทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องมาประกอบ เพื่อจัดทำเล่มรายงานการวิจัยโครงการตามรูปแบบรายงานที่ถูกต้อง

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์การทดลอง

#### 4.1 การศึกษาวิจัยเบื้องต้นเพื่อควบคุมปัจจัยในกระบวนการเชื่อม

จากการศึกษาเบื้องต้นในกระบวนการเชื่อมจะเห็นได้ว่าผู้ปฏิบัติงานเชื่อมเป็นปัจจัยสำคัญ ที่มีผลต่อคุณภาพของงานเชื่อมในการควบคุมปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของงานเชื่อม จากการทดสอบระหว่างผู้ปฏิบัติงานเชื่อมกับการวิจัยในครั้งนี้จึงต้องใช้หุ่นยนต์เชื่อมทำการเชื่อมชิ้นงาน โดยทำการเชื่อมในตำแหน่งท่าราบ ใช้กระบวนการเชื่อมแม็ก ตามมาตรฐาน ISO 5817 ซึ่งประกอบด้วยการตรวจสอบตามแบบฟอร์ม ดังนี้ A = การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Test) B = การตรวจสอบด้วยวิธีคดงอ (Bend Test) C = การประกอบชิ้นงานตามแบบและข้อกำหนด (Assembly According to Prints & Specification) และ D = ความปลอดภัยและความสามารถในการปฏิบัติ (Safety and Competency Interpretation) ตามรูปที่ 4.1 ในหน้าถัดไป แสดงผลการทดสอบด้วยสายตาของผู้ปฏิบัติงานเชื่อม




จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าจากการพิจารณาการตรวจสอบชิ้นงานเชื่อมแล้วคุณภาพของผู้ปฏิบัติงานเชื่อมแต่ละบุคคลมีความแตกต่างกันออกไป เนื่องจากประสบการณ์ทางด้านงานเชื่อมและความเชี่ยวชาญทางด้านงานปฏิบัติงานเชื่อมที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลกระทบต่อคุณภาพของงานเชื่อมในการปฏิบัติงานอีกทั้งยังมีปัจจัยที่มีผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพของงานเชื่อม ไม่ว่าจะเป็นความคงที่ของระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อม มุมองศาระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อม ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม เป็นต้น ซึ่งสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ไม่สามารถที่จะควบคุมให้คงที่ได้อย่างสม่ำเสมอ

จากผลการศึกษาวิจัยเบื้องต้นจากการปฏิบัติงานเชื่อม โดยใช้คนที่กล่าวมา ดังนั้นจึงเลือกใช้หุ่นยนต์ในการเชื่อมชิ้นงานทดลอง เนื่องจากสามารถทำการควบคุมและความคงที่ในการปฏิบัติงานเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ว่าจะเป็นในด้านการทำงาน (Operation) การจัดเครื่องมือ (Tool Setup) และการควบคุมคุณภาพ (Quality Control) ในกระบวนการเชื่อม

ตาราง 6 แสดงการทดสอบช่างเชื่อมด้านการปฏิบัติงานเชื่อม ทำตาม สาขาช่างเชื่อม MAG ระหว่างวันที่ 7 สิงหาคม 2550 ณ โรงฝึกงานช่างเชื่อมโลหะ สถาบันพัฒนาฝีมือแรงงานภาค 9 พิษณุโลก

เลขที่	อาชีพ	JOB	การทดสอบสายตา (Visual Inspection Test)																		แบบฝึกหัด				คะแนนรวม
																					A	B	C	D	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	รวม	35	50	5	
1	ช่างเชื่อม โลหะสี (S)	PA	1	1	13	12	12	10	10	10	13	10	10	10	12	10	12	10	13	162	3150	30	3	10	74.50
2	ช่างเชื่อม โลหะสี (S)	PA	1	1	1	10	9	7	10	1	1	7	10	1	10	7	10	7	98	1906	6	3	10	38.06	
3	ช่างเชื่อม โลหะสี (S)	PA	4	10	13	10	13	10	4	10	7	7	10	10	10	13	10	13	147	2858	15	3	10	56.58	
4	ช่างเชื่อม โลหะสี (S)	PA	1	1	1	7	10	1	13	4	10	1	10	7	7	10	10	13	96	1867	0	5	10	33.67	
5	ช่างเชื่อม โลหะสี (S)	PA	1	1	7	10	1	1	10	1	7	1	4	1	4	4	10	13	84	1633	2	3	10	31.33	
6	ช่างเชื่อม โลหะสี (S)	PA	1	1	4	7	7	1	1	1	4	4	4	4	1	4	7	1	48	933	0	3	10	22.33	
7	ช่างเชื่อม โลหะสี (S)	PA	1	1	13	7	13	13	10	10	7	10	7	10	7	10	10	7	147	2858	26	3	10	67.58	
8	ช่างเชื่อม โลหะสี (S)	PA	7	10	13	10	10	1	4	13	13	1	13	4	10	1	10	13	7	126	24.50	50	5	10	89.50
9	ช่างเชื่อม โลหะสี (S)	PA	1	1	10	1	1	13	1	1	1	4	1	1	1	10	1	1	57	1108	2	5	10	28.08	

หลักสูตรช่างเชื่อมโลหะสี

ผู้สอน:  นายวิชาญ เต็มแก้ว  
 น.ส.วิชาญ เต็มแก้ว  
 TWSAAI 01 03 0021 นายวิชาญ เต็มแก้ว  
 TWSAAI 01 03 0022 นายวิชาญ เต็มแก้ว  
 ผู้คุมเวลา:  นายวิชาญ เต็มแก้ว  
 น.ส.วิชาญ เต็มแก้ว  
 TWSAAI 01 03 0022 นายวิชาญ เต็มแก้ว  
 TWSAAI 01 03 0025 นายวิชาญ เต็มแก้ว  
 ผู้ประเมิน:  นายวิชาญ เต็มแก้ว  
 นายวิชาญ เต็มแก้ว

รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบด้วยสายตาจากการทดสอบช่างเชื่อมด้านการปฏิบัติงานเชื่อม ที่มา : จักรพันธ์ จี๊ดดวงจันทร์ (2551)

4.2 การตรวจสอบข้อมูลผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งและค่าแรงดึงของแนวเชื่อม

ผลการวิจัยข้อมูลต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ผลการศึกษาหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของแนวเชื่อม โดยใช้กระบวนการเชื่อม MAG พิจารณาตัวแปรปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อม โดยการทดสอบค่าความแข็งและค่าแรงดึงของแนวเชื่อม เมื่อได้ปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยอาศัยการทดลองในการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งอาศัยการออกแบบการทดลองแบบ One Factor โดยใช้เครื่องมือทางสถิติ ซึ่งใช้การ Screening Factor ในการออกแบบการทดลอง โดยใช้ General Factorial Design ในการทดลองซ้ำ (Replicates) 2 ครั้ง ซึ่งเมื่อเชื่อมขึ้นทดสอบตามการออกแบบการทดลองครบทั้ง 32 การทดลอง นำชิ้นงานทดสอบไปทดสอบค่าความแข็ง และค่าแรงดึงของแนวเชื่อม

เมื่อได้ค่าความแข็งและค่าแรงดึงของแนวเชื่อมผู้วิจัยเลือกใช้เครื่องมือทางสถิติ วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อกรองปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งและค่าแรงดึงของแนวเชื่อมที่ระดับ

นัยสำคัญ ที่เราต้องการนำมาเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อกรองปัจจัยให้เหลือปัจจัยเฉพาะที่มีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$

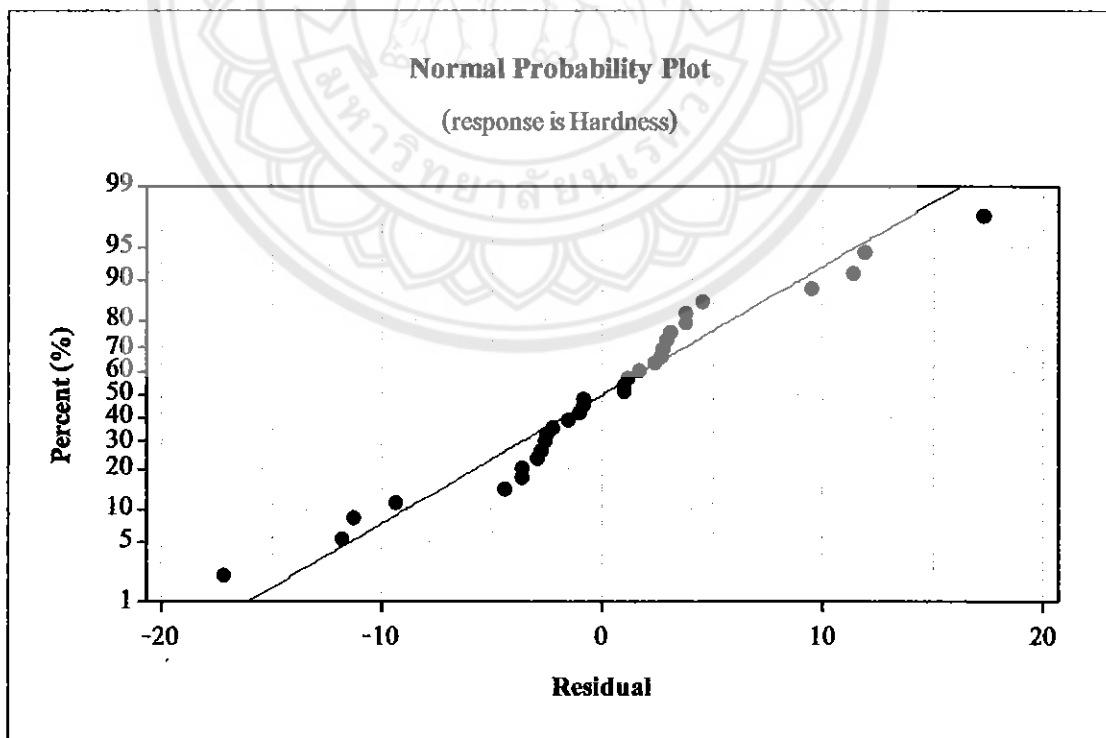
#### 4.2.1 การตรวจสอบข้อมูลผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็ง

เมื่อได้ค่าความแข็งของแนวเชื่อม นำข้อมูลที่ได้มาทำการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ด้วยการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง โดยมีการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลดังนี้

##### 4.2.1.1 การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ

การทดสอบสมมติฐาน (Montgomery ,2001) จากการตรวจสอบค่าเฉลี่ยของ Residuals (ส่วนตกค้าง) โดยการพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายของค่าส่วนตกค้างเทียบกับระดับค่าความแข็งของแนวเชื่อม จะพบว่ากราฟมีการกระจายอย่างอิสระไม่มีลักษณะเป็นลู่ออกหรือลู่ออก ซึ่ง Residuals ในแต่ละระดับของผลตอบที่กระจายนั้นมีทั้งในด้านบวกและด้านลบ และมีความสมคลงซึ่งกันและกัน จึงทำให้ประมาณค่าเฉลี่ยของ Residuals ได้ว่ามีค่าใกล้เคียงหรือเทียบเท่า 0 แสดงว่าปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย ที่ใช้ในการเชื่อมที่ทำให้งานวิจัยนี้มีความถูกต้องเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากทั้ง 4 ปัจจัย มีผลที่เกี่ยวเนื่องซึ่งกันและกัน (Interaction) นั่นคือ ข้อมูลหรือผลตอบที่ได้มีความเชื่อถือได้ ดังรูปที่

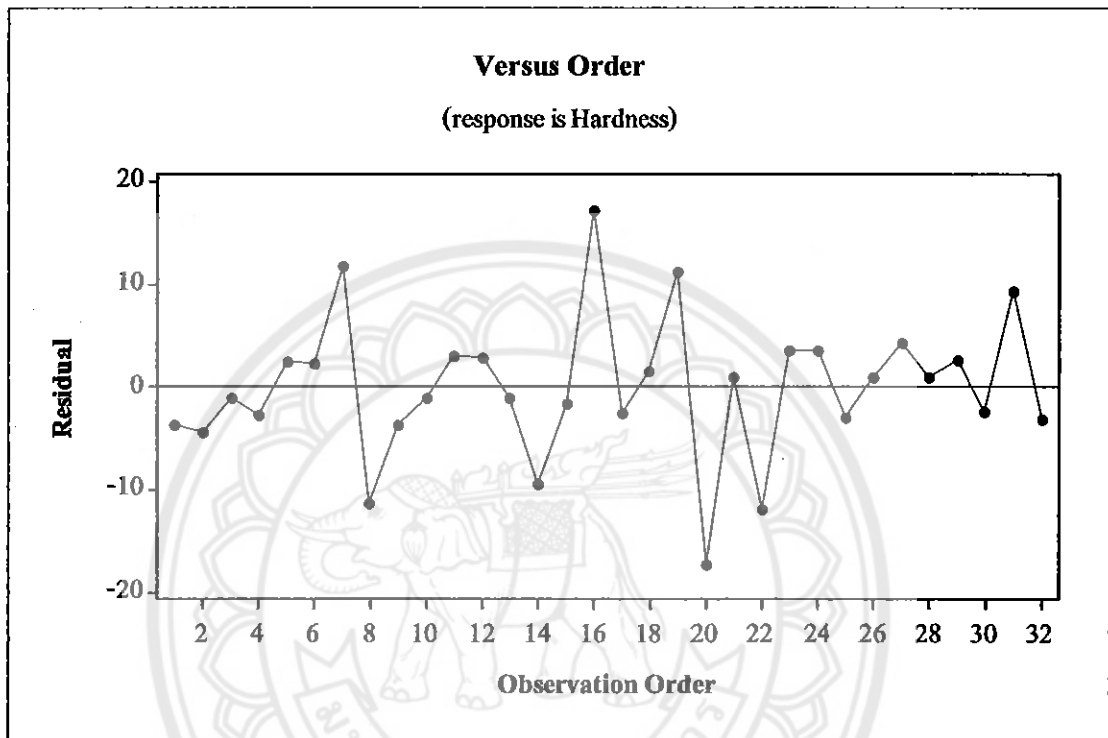
4.2



รูปที่ 4.2 แสดงค่า Normal Probability Plot for Hardness

#### 4.2.1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

โดยใช้แผนภูมิการกระจาย เพื่อสังเกตลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิ ว่าเป็นรูปแบบอิสระหรือไม่ จากรูปที่ 4.3 ส่วนตกค้างของผลการทดลอง มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอแสดงว่าข้อมูลมีความอิสระ

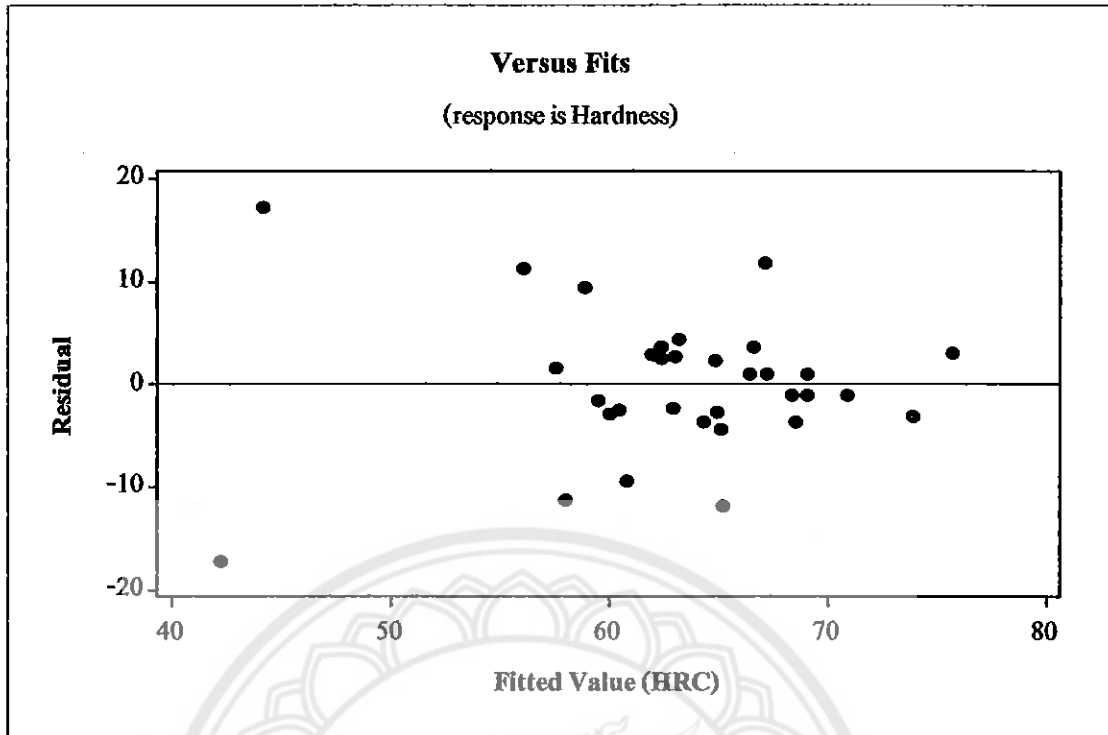


รูปที่ 4.3 แสดงค่า Versus Order for Hardness

#### 4.2.1.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

โดยใช้แผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละระดับปัจจัย พบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลองมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน จากรูปที่ 4.4





รูปที่ 4.4 แสดงค่า Versus Fists for Hardness

#### 4.2.1.4 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของแนวเชื่อม

จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้เครื่องมือทางสถิติ วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของแนวเชื่อม สามารถแสดงผลได้ในรูปที่ 4.5 ดังนี้

**General Linear Model: Hardness versus Blocks, Welding Current ,Welding Current, Welding Voltage, Gas Rate .**

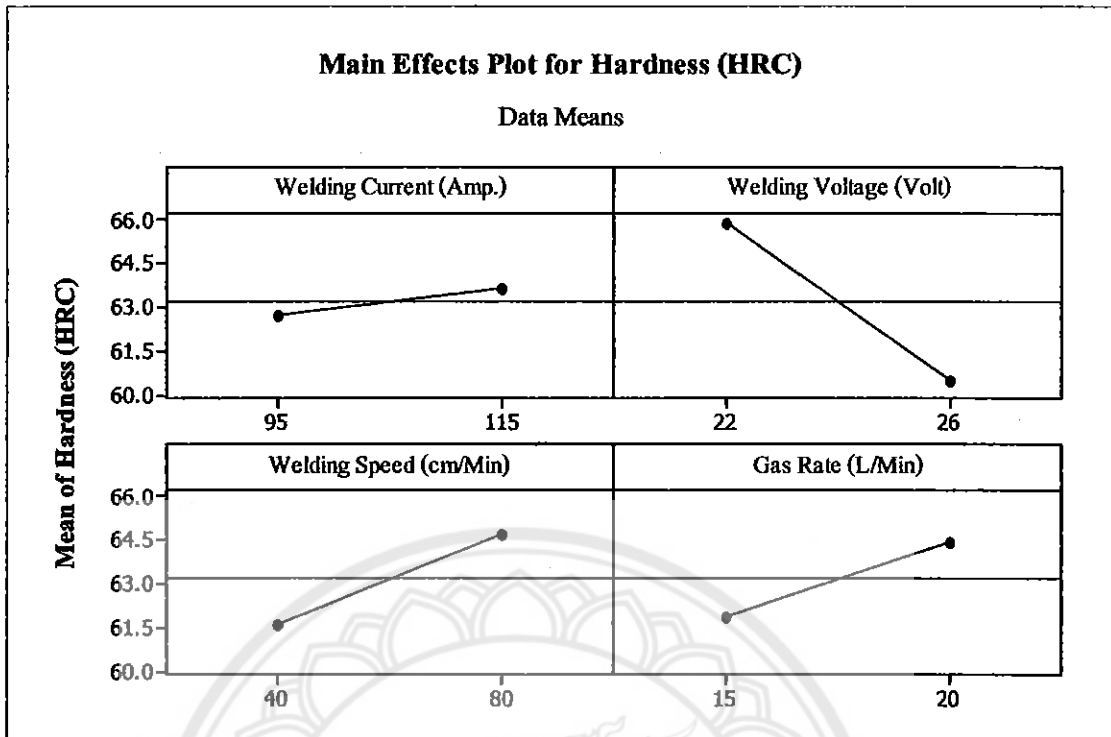
Factor	Type	Levels	Values
Blocks	fixed	2	1, 2
Welding Current	fixed	2	95, 115
Welding Voltage	fixed	2	22, 26
Welding Speed	fixed	2	40, 80
Gas Rate	fixed	2	15, 20

**Analysis of Variance for Hardness, using Adjusted SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	29.36	29.36	29.36	0.30	0.595
Welding Current	1	7.50	7.50	7.50	0.08	0.787
Welding Voltage	1	229.78	229.78	229.78	2.31	0.149
Welding Speed	1	79.73	79.73	79.73	0.80	0.385
Gas Rate	1	55.20	55.20	55.20	0.56	0.468
Welding Current*Welding Voltage	1	34.80	34.80	34.80	0.35	0.563
Welding Current*Welding Speed	1	21.76	21.76	21.76	0.22	0.647
Welding Current*Gas Rate	1	98.46	98.46	98.46	0.99	0.335
Welding Voltage*Welding Speed	1	156.16	156.16	156.16	1.57	0.229
Welding Voltage*Gas Rate	1	244.59	244.59	244.59	2.46	0.138
Welding Speed*Gas Rate	1	6.53	6.53	6.53	0.07	0.801
Welding Current*Welding Voltage* Welding Speed	1	106.84	106.84	106.84	1.08	0.316
Welding Current*Welding Voltage* Gas Rate	1	286.14	286.14	286.14	2.88	0.110
Welding Current*Welding Speed* Gas Rate	1	26.34	26.34	26.34	0.27	0.614
Welding Voltage*Welding Speed* Gas Rate	1	100.43	100.43	100.43	1.01	0.331
Welding Current*Welding Voltage* Welding Speed*Gas Rate	1	8.81	8.81	8.81	0.09	0.770
Error	15	1490.61	1490.61	99.37		
Total	31	2983.02				

**รูปที่ 4.5 แสดงค่า P-Value ที่ใช้ในการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งของแนวเชื่อม**

จากตารางที่ 4.1 ค่า P-Value ของปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งของแนวเชื่อม ที่ค่าความเชื่อมั่นที่ 95% สามารถทำการวิเคราะห์ข้อมูล แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อมและอัตราไหลของก๊าซปกคลุม ที่ใช้ในการเชื่อม กับค่าความแข็งของแนวเชื่อม ได้ดังนี้ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อม และอัตรา การไหลของก๊าซปกคลุมไม่มีผลต่อค่าความแข็งของแนวเชื่อม



รูปที่ 4.6 แสดงค่า Main Effects Plot for Hardness

จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยที่มีผลกระทบร่วมกันปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งของแนวเชื่อม (Main Effect Plot for Hardness) ดังรูปที่ 4.5 สามารถแสดงค่า Main Effects Plot for Hardness เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความแข็งและค่าความเหนียวของปริมาณเปอร์เซ็นต์คาร์บอนจากบทที่ 2 รูปที่ 2.10 เพื่อเลือกค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่เหมาะสมที่สุด โดยเลือกปัจจัยที่มีค่าความแข็งของแนวเชื่อมที่ต่ำที่สุด ได้ดังนี้ กระแสไฟฟ้า 95 แอมป์ (Mean = 62.69 HRC) แรงดันไฟฟ้า 26 โวลต์ (Mean = 69.50 HRC) ความเร็วในการเชื่อม 40 เซนติเมตรต่อนาที (Mean = 61.60 HRC) และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที (Mean = 61.86 HRC)

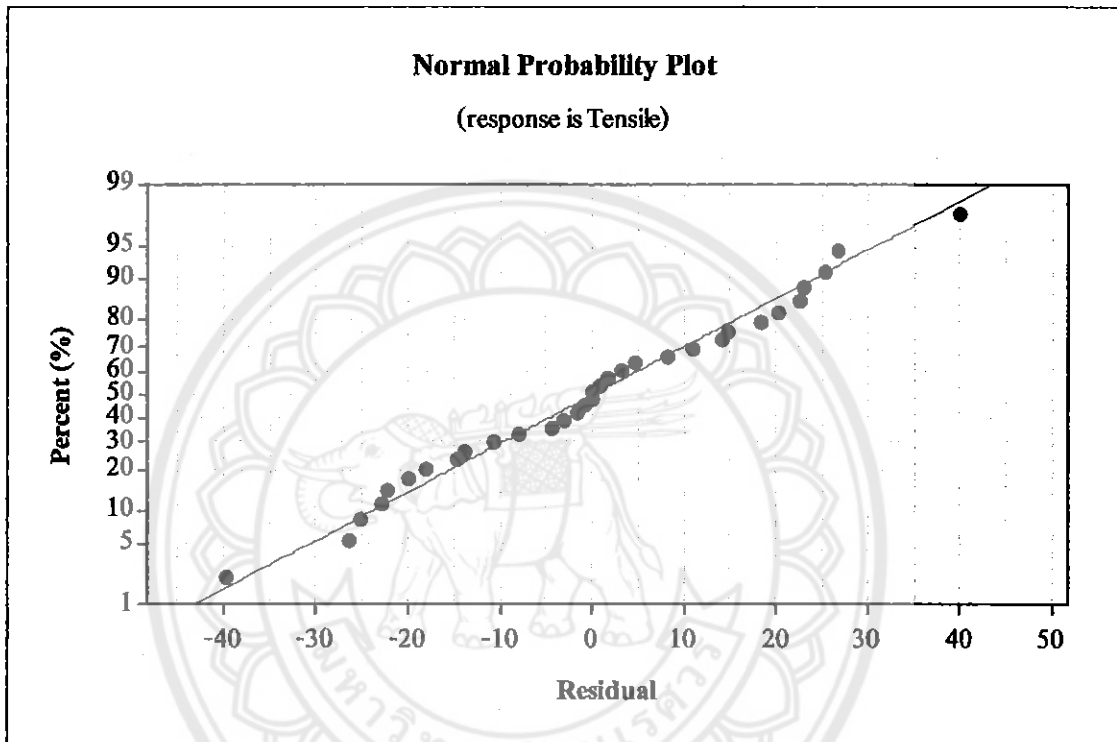
#### 4.2.2 การตรวจสอบข้อมูลผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึง

เมื่อได้ค่าแรงดึงของแนวเชื่อม นำข้อมูลที่ได้มาทำการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล ว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ด้วยการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง โดยมีการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลดังนี้

##### 4.2.2.1 การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ

การทดสอบสมมติฐาน (Montgomery, 2001) จากการตรวจสอบค่าเฉลี่ยของ Residuals (ส่วนตกค้าง) โดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายของค่าส่วนตกค้างเทียบกับระดับค่าแรงดึงแนวเชื่อมจะพบว่ากราฟมีการกระจายอย่างอิสระ ไม่มีลักษณะเป็นตู้เข้าหรือตู้ออก ซึ่ง

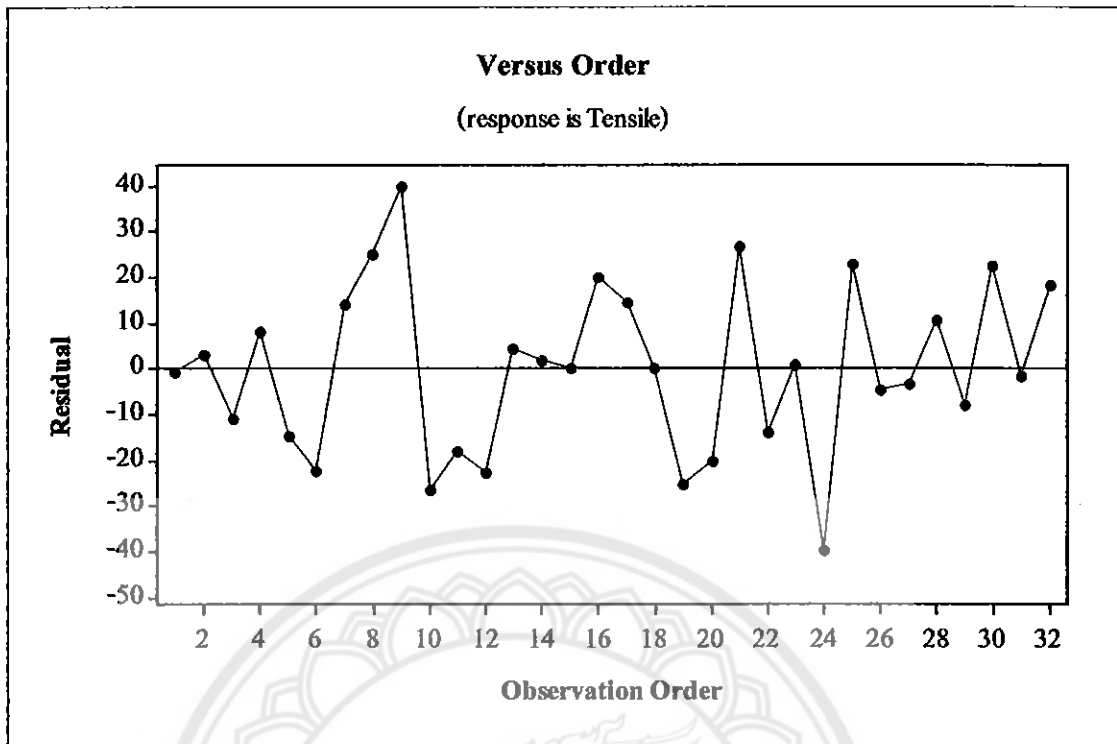
Residuals ในแต่ละระดับของผลตอบที่กระจายนั้นมีทั้งในด้านบวกและด้านลบและมีความสมดุลซึ่งกันและกัน จึงทำให้ประมาณค่าเฉลี่ยของ Residuals ได้ว่ามีค่าใกล้เคียงหรือเทียบเท่า 0 แสดงว่าปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย ที่ใช้ในการเชื่อมที่ทำให้งานวิจัยนี้มีความถูกต้องเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากทั้ง 4 ปัจจัย มีผลที่เกี่ยวเนื่องซึ่งกันและกัน (Interaction) นั่นคือ ข้อมูลหรือผลตอบที่ได้มีความเชื่อถือได้ ดังรูปที่ 4.6 แสดงค่า Normal Probability Plot for Tensile



รูปที่ 4.7 แสดงค่า Normal Probability Plot for Tensile

#### 4.2.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

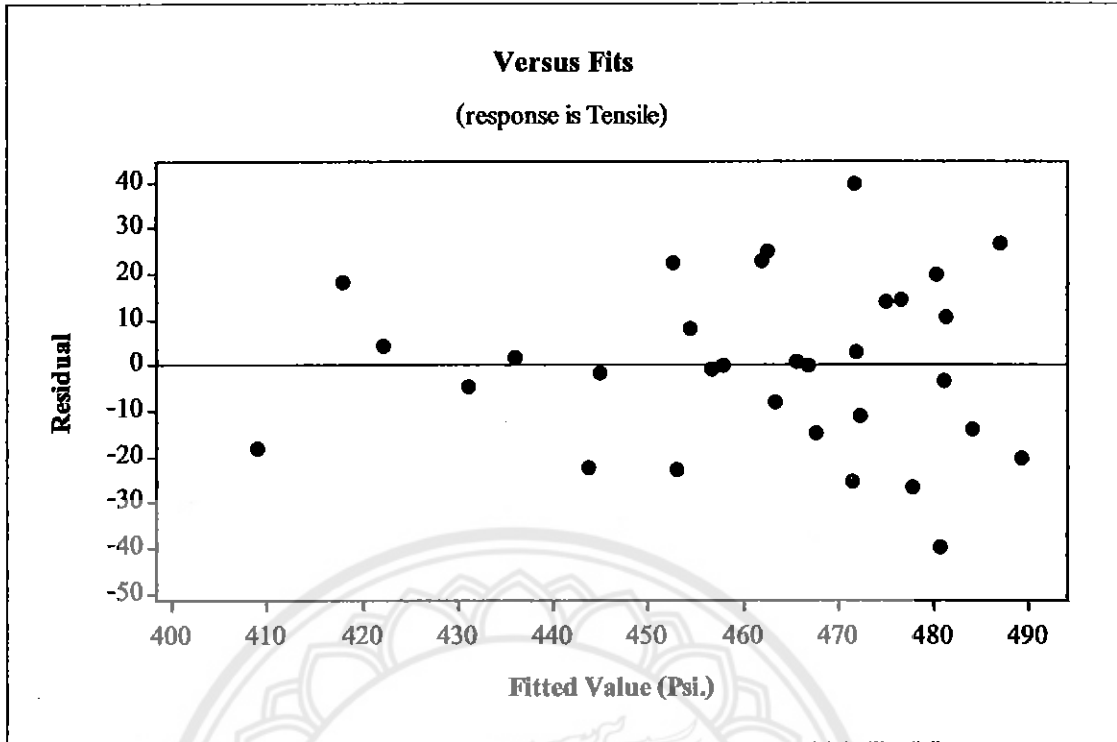
โดยใช้แผนภูมิการกระจาย เพื่อสังเกตลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิ ว่าเป็นรูปแบบอิสระหรือไม่ จากรูปที่ 4.7 ส่วนตกค้างของผลการทดลอง มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอแสดงว่าข้อมูลมีความอิสระ



รูปที่ 4.8 แสดงค่า Versus Order for Tensile

#### 4.2.2.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

โดยใช้แผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละระดับปัจจัย พบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลองมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน จากรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.9 แสดงค่า Versus Fists for Tensile

#### 4.2.2.4 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงของแนวเชื่อม

จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้เครื่องมือทางสถิติ วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงของแนวเชื่อม สามารถแสดงผลได้ในรูปที่ 4.10

### รูปที่ 4.2 แสดงค่า P-Value ที่ใช้ในการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงของแนวเชื่อม

**General Linear Model: Tensile versus Blocks, Welding Current ,Welding Current ,Welding Voltage ,Gas Rate.**

Factor	Type	Levels	Values
Blocks	fixed	2	1, 2
Welding Current	fixed	2	95, 115
Welding Voltage	fixed	2	22, 26
Welding Speed	fixed	2	40, 80
Gas Rate	fixed	2	15, 20

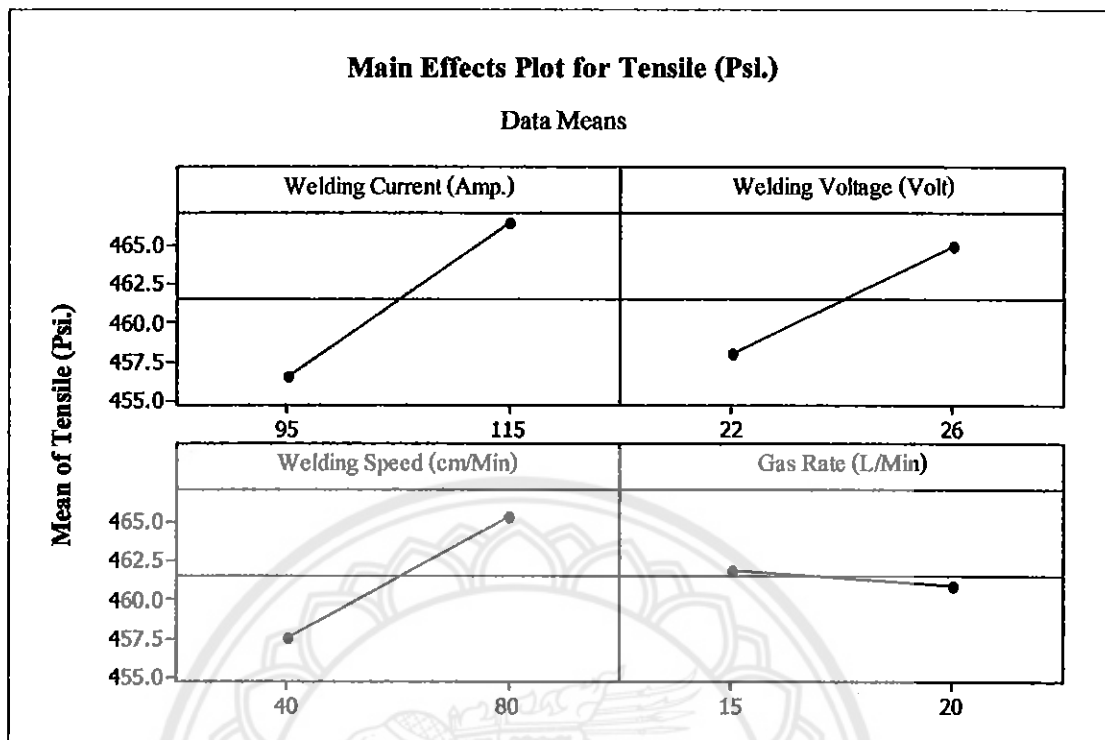
Analysis of Variance for Tensile, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	650.4	650.4	650.4	0.92	0.354
Welding Current	1	797.7	797.7	797.7	1.12	0.306
Welding Voltage	1	392.8	392.8	392.8	0.55	0.469
Welding Speed	1	475.9	475.9	475.9	0.67	0.426
Gas Rate	1	7.7	7.7	7.7	0.01	0.918
Welding Current*Welding Voltage	1	862.9	862.9	862.9	1.21	0.288
Welding Current*Welding Speed	1	0.2	0.2	0.2	0.00	0.988
Welding Current*Gas Rate	1	354.6	354.6	354.6	0.50	0.491
Welding Voltage*Welding Speed	1	539.8	539.8	539.8	0.76	0.397
Welding Voltage*Gas Rate	1	203.3	203.3	203.3	0.29	0.601
Welding Speed*Gas Rate	1	3230.7	3230.7	3230.7	4.55	0.050
Welding Current*Welding Voltage* Welding Speed	1	3418.2	3418.2	3418.2	4.81	0.044
Welding Current*Welding Voltage* Gas Rate	1	600.9	600.9	600.9	0.85	0.372
Welding Current*Welding Speed* Gas Rate	1	845.7	845.7	845.7	1.19	0.292
Welding Voltage*Welding Speed* Gas Rate	1	9.4	9.4	9.4	0.01	0.910
Welding Current*Welding Voltage* Welding Speed*Gas Rate	1	844.1	844.1	844.1	1.19	0.293
Error	15	10657.2	10657.2	710.5		
Total	31	23891.5				

### รูปที่ 4.10 แสดงค่า P-Value ที่ใช้ในการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงของแนวเชื่อม

จากตารางที่ 4.2 ค่า P - Value ของปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าแรงดึงของแนวเชื่อม ที่ค่าความเชื่อมั่นที่ 95 % สามารถทำการวิเคราะห์ข้อมูล แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อมและอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม ที่ใช้ในการเชื่อมกับค่าแรงดึงของแนวเชื่อม ได้ดังนี้ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมไม่มีผลต่อค่าแรงดึงของแนวเชื่อมได้

แต่มีค่า P - Value ของ Interaction ของปัจจัยที่กำหนด 3 ปัจจัย ระหว่างกันได้แก่อันตรกิริยาระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม = 0.044 และอันตรกิริยาระหว่างความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมและอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม = 0.050 ที่มีผลต่อค่าแรงดึงของแนวเชื่อม



รูปที่ 4.11 แสดงค่า Main Effects Plot for Tensile

จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยที่มีผลกระทบร่วมกันปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงของแนวเชื่อม (Main Effect Plot for Tensile) ดังรูปที่ 4.9 แสดงค่า Main Effects Plot for Tensile โดยการพิจารณาปัจจัยที่มีค่าแรงดึงของแนวเชื่อมสูงที่สุด ได้ดังนี้ กระแสไฟฟ้า 115 แอมป์ (Mean = 466.46 Psi) แรงดันไฟฟ้าที่ 26 โวลต์ (Mean = 464.97 Psi) ความเร็วในการเชื่อม 80 เซนติเมตรต่อนาที (Mean = 465.33 Psi) และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที (Mean = 461.96 Psi) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย เรื่องพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการเชื่อมแบบแม่เหล็ก สำหรับเหล็ก St37 (Optimization of MAG Welding Parameters Process for Steel St 37) ของ อนุสิทธิ์ อ่ำไพบูลย์



## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการประยุกต์การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาหาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของแนวเชื่อม โดยใช้กระบวนการเชื่อม MAG โดยพิจารณาตัวแปรปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งและค่าแรงดึงของแนวเชื่อม ได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมและอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ  $\alpha = 0.05$

5.1.1 ค่าจากทดสอบความแปรปรวนของความแข็งพบว่าไม่มีค่าของปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งของแนวเชื่อม ที่ค่าความเชื่อมั่นที่ 95% สามารถทำการวิเคราะห์ข้อมูล แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อมและอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม ที่ใช้ในการเชื่อมกับค่าความแข็งของแนวเชื่อม ได้ดังนี้ กระแสไฟฟ้าที่ แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมไม่มีผลต่อค่าความแข็งของแนวเชื่อม

โดยกระแสไฟฟ้า 95 แอมป์ แรงดันไฟฟ้าที่ 26 โวลต์ ความเร็วในการเชื่อม 40 เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที จะทำให้ค่าความแข็งของแนวเชื่อมมีน้อยที่สุด

5.1.2 ค่าจากการทดสอบความแปรปรวนแรงดึงพบว่าไม่มีค่าของปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าแรงดึงของแนวเชื่อม ที่ค่าความเชื่อมั่นที่ 95 % และสามารถทำการวิเคราะห์ข้อมูล แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อมและอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม ที่ใช้ในการเชื่อมกับค่าแรงดึงของแนวเชื่อม ได้ดังนี้ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อม และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมไม่มีผลต่อค่าแรงดึงของแนวเชื่อม ได้

แต่มีค่า P - Value ของปัจจัยที่กำหนด 3 ปัจจัย ระหว่างกัน ได้แก่อันตรกิริยาระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า และความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม = 0.044 และอันตรกิริยาระหว่างความเร็วที่ใช้ในการเชื่อมและอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม = 0.050 ที่มีผลต่อค่าแรงดึงของแนวเชื่อม

โดยกระแสไฟฟ้า 115 แอมป์ แรงดันไฟฟ้าที่ 26 โวลต์ ความเร็วในการเชื่อม 80 เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที จะทำให้ค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมมากที่สุด

## 5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการดำเนินงาน

### 5.2.1 ปัญหาด้านวัสดุอุปกรณ์

5.2.1.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีราคาสูง

5.2.1.2 ชิ้นส่วนของหุ่นยนต์ในการเชื่อมเกิดการชำรุดเพราะมีการใช้มาเป็นเวลานาน ทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหาย จึงต้องมีการซ่อมปรับปรุง

### 5.2.2 ปัญหาด้านการปฏิบัติงาน

5.2.2.1 ในการใช้หุ่นยนต์เชื่อมชิ้นงานจำเป็นต้องให้ผู้เชี่ยวชาญเป็นผู้ปฏิบัติงาน เพื่อให้เกิดความถูกต้องแม่นยำในการเชื่อมชิ้นงาน

5.2.2.2 การติดต่อสื่อสารของผู้ปฏิบัติงานค่อนข้างยาก

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ก่อนทำการเชื่อมควรมีการตรวจเช็คอุปกรณ์ของเครื่องเชื่อมทุกครั้งเพื่อป้องกันการเชื่อมที่ไม่ได้คุณภาพ

5.3.2 ระหว่างการเชื่อมต้องมีการสังเกตอยู่เสมอว่าการเชื่อมมีความผิดปกติหรือไม่

5.3.3 ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งต่อไป ควรทำการศึกษาค้นคว้าตัวแปรอื่นๆ ที่ส่งผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม เช่น มุมที่ใช้ในการเชื่อม , ระยะ โผล่ของลวดเชื่อม , ขนาดของลวดเชื่อม และชนิดของก๊าซปกคลุม เพื่อใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงการเชื่อมให้มีคุณภาพต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

มานะศิษฐ์ พิมพ์สาร, (2542), คู่มือการเชื่อม มิกส์-แม็ก (GMAW-Welding, กรุงเทพมหานคร: บริษัท เอ็มแอนดีอี จำกัด.

จรูญ พรหมสุทธิ และอำนาจ ทองเสน. (2540). กระบวนการเชื่อม. หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง. กรมอาชีวศึกษากระทรวงศึกษาธิการ.

ขันติพล วัชชานาด และคณะ, (2535), การตรวจสอบงานเชื่อม: บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด.

ผ.ศ วชิระ มีทอง และคณะ, (2542), ปฏิบัติการทดสอบวิศวกรรมงานเชื่อมโลหะ, สาขาช่างเชื่อมและโลหะแผ่น คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศูนย์เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ปารเมศ ชูติมาศ. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จักรพันธ์ จีอดดวงจันทร์ และอรุณพล แจ่มใส. (2551). การศึกษาหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของแนวเชื่อมโดยใช้กระบวนการเชื่อม MAG. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยธนเรศวร, พิษณุโลก

อนุสิทธิ์ อ่ำไพลบุญย์. (2551). พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการเชื่อมแบบแม็ก สำหรับเหล็ก เอสที 37. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น, ขอนแก่น

<http://www.meapim.pr.in.th/webpage/MigandTig/MigandTig.html>, สืบค้นวันที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2552.

<http://www.scribd.com/doc/12508833/06-Manufacturing-Hand-Out-20-Mar08>, สืบค้นวันที่ 29 กรกฎาคม 2552.



## ปัจจัยสำหรับการเชื่อมแบบ MAG

### ตารางที่ ก.1 ปัจจัยสำหรับการเชื่อมแบบ MAG

ชิ้นงาน ที่ใช้ใน การ ทดสอบ	Welding Current (แอมป์)	Welding Voltage (โวลต์)	Welding Speed (ซ.ม. / นาที)	Gas Rate (ลิตร/นาที)	ผลการทดสอบ คุณภาพของแนวเชื่อม	
					Hardness (RCH)	Tensile (Psi.)
1	95	22	80	20	64.83	455.79
2	115	26	80	20	60.67	475.15
3	115	22	80	15	70	461.54
4	115	22	40	20	62.33	462.38
5	115	26	40	15	65	452.83
6	115	26	80	15	67.17	421.21
7	115	22	80	20	79	489.02
8	95	26	40	15	46.67	487.73
9	95	22	40	15	60.67	511.47
10	95	26	80	20	68	451.25
11	95	22	80	15	78.83	390.62
12	115	22	40	15	64.8	429.98
13	95	26	40	20	67.42	426.62
14	95	22	40	20	51.42	437.65
15	115	26	40	20	57.92	457.88
16	95	26	80	15	61.42	500.27
17	115	26	40	15	57.92	491.3
18	115	26	40	20	59.17	466.85
19	95	26	40	15	67.5	446.25
20	95	26	80	15	25	469.14
21	95	26	80	20	68.33	513.51

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ปัจจัยสำหรับการเชื่อมแบบ MAG

ชิ้นงาน ที่ใช้ใน การ ทดสอบ	Welding Current (แอมป์)	Welding Voltage (โวลต์)	Welding Speed (ซ.ม. / นาที)	Gas Rate (ลิตร/นาที)	ผลการทดสอบ คุณภาพของแนวเชื่อม	
					Hardness (RCH)	Tensile (Psi.)
22	115	22	80	20	53.33	469.99
23	95	22	80	20	70.33	466.54
24	95	22	40	15	66.08	440.79
25	115	22	40	15	57.25	484.87
26	95	26	40	20	67.42	426.62
27	115	26	80	20	67.67	477.82
28	115	22	80	15	70	492.12
29	115	22	40	20	65.67	455.32
30	115	26	80	15	60.67	475.15
31	95	22	40	20	68.33	443.28
32	95	22	80	15	70.83	436.11



## การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งและค่าแรงดึงของแนวเชื่อม

### General Linear Model: Hardness versus Blocks, Welding Current, Welding Voltage, Welding Speed and Gas Rate

Factor	Type	Levels	Values
Blocks	fixed	2	1, 2
Welding Current	fixed	2	95, 115
Welding Voltage	fixed	2	22, 26
Welding Speed	fixed	2	40, 80
Gas Rate	fixed	2	15, 20

#### Analysis of Variance for Hardness, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	29.36	29.36	29.36	0.30	0.595
Welding Current	1	7.50	7.50	7.50	0.08	0.787
Welding Voltage	1	229.78	229.78	229.78	2.31	0.149
Welding Speed	1	79.73	79.73	79.73	0.80	0.385
Gas Rate	1	55.20	55.20	55.20	0.56	0.468
Welding Current*Welding Voltage	1	34.80	34.80	34.80	0.35	0.563
Welding Current*Welding Speed	1	21.76	21.76	21.76	0.22	0.647
Welding Current*Gas Rate	1	98.46	98.46	98.46	0.99	0.335
Welding Voltage*Welding Speed	1	156.16	156.16	156.16	1.57	0.229
Welding Voltage*Gas Rate	1	244.59	244.59	244.59	2.46	0.138
Welding Speed*Gas Rate	1	6.53	6.53	6.53	0.07	0.801
Welding Current*Welding Voltage* Welding Speed	1	106.84	106.84	106.84	1.08	0.316
Welding Current*Welding Voltage* Gas Rate	1	286.14	286.14	286.14	2.88	0.110
Welding Current*Welding Speed* Gas Rate	1	26.34	26.34	26.34	0.27	0.614
Welding Voltage*Welding Speed* Gas Rate	1	100.43	100.43	100.43	1.01	0.331
Welding Current*Welding Voltage* Welding Speed*Gas Rate	1	8.81	8.81	8.81	0.09	0.770
Error	15	1490.61	1490.61	99.37		
Total	31	2983.02				

S = 9.96864 R-Sq = 50.03% R-Sq(adj) = 0.00%

#### Unusual Observations for Hardness

Obs	Hardness	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
16	61.4200	44.1678	7.2658	17.2522	2.53 R
20	25.0000	42.2522	7.2658	-17.2522	-2.53 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

### รูปที่ ข.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของแนวเชื่อม



**General Linear Model: Tensile versus Blocks, Welding Current, Welding Voltage, Welding Speed and Gas Rate**

Factor	Type	Levels	Values
Blocks	fixed	2	1, 2
Welding Current	fixed	2	95, 115
Welding Voltage	fixed	2	22, 26
Welding Speed	fixed	2	40, 80
Gas Rate	fixed	2	15, 20

Analysis of Variance for Tensile, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Blocks	1	650.4	650.4	650.4	0.92	0.354
Welding Current	1	797.7	797.7	797.7	1.12	0.306
Welding Voltage	1	392.8	392.8	392.8	0.55	0.469
Welding Speed	1	475.9	475.9	475.9	0.67	0.426
Gas Rate	1	7.7	7.7	7.7	0.01	0.918
Welding Current*Welding Voltage	1	862.9	862.9	862.9	1.21	0.288
Welding Current*Welding Speed	1	0.2	0.2	0.2	0.00	0.988
Welding Current*Gas Rate	1	354.6	354.6	354.6	0.50	0.491
Welding Voltage*Welding Speed	1	539.8	539.8	539.8	0.76	0.397
Welding Voltage*Gas Rate	1	203.3	203.3	203.3	0.29	0.601
Welding Speed*Gas Rate	1	3230.7	3230.7	3230.7	4.55	0.050
Welding Current*Welding Voltage* Welding Speed	1	3418.2	3418.2	3418.2	4.81	0.044
Welding Current*Welding Voltage* Gas Rate	1	600.9	600.9	600.9	0.85	0.372
Welding Current*Welding Speed* Gas Rate	1	845.7	845.7	845.7	1.19	0.292
Welding Voltage*Welding Speed* Gas Rate	1	9.4	9.4	9.4	0.01	0.910
Welding Current*Welding Voltage* Welding Speed*Gas Rate	1	844.1	844.1	844.1	1.19	0.293
Error	15	10657.2	10657.2	710.5		
Total	31	23891.5				

S = 26.6549 R-Sq = 55.39% R-Sq(adj) = 7.81%

Unusual Observations for Tensile

Obs	Tensile	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	511.470	471.622	19.428	39.848	2.18 R
24	440.790	480.638	19.428	-39.848	-2.18 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

**รูปที่ ข.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงของแนวเชื่อม**

## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายทศพล กุลกุศล  
ภูมิลำเนา 75 หมู่ 2 ต. ท่าวังทอง อ. เมือง จ. พะเยา  
ประวัติการศึกษา  
- จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนเฉลิมพระ  
เกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ พะเยา  
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
E-mail: kulkusol\_t@hotmail.com



ชื่อ นายวีระ คาทอง  
ภูมิลำเนา 169 หมู่ 2 ต. บ้านกลาง อ. หล่มสัก  
จ. เพชรบูรณ์  
ประวัติการศึกษา  
- จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนเมืองกลาง  
วิทยาคม  
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
E-mail: Sirome\_naja@hotmail.com