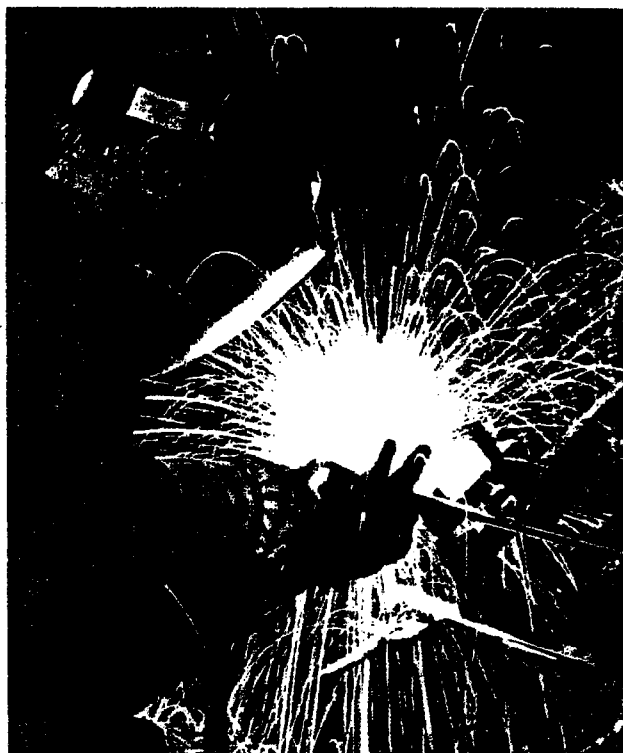


**เอกสารประกอบการสอน**  
**วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ 2**  
**“ การเชื่อมและการทดสอบรอยเชื่อม ”**



**นายวิเชียร ศรีไพร**  
**ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ**  
**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**มหาวิทยาลัยขอนแก่น**

## คำนำ

เอกสารประกอบการสอนปฏิบัติการวิชา ปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ 2 เนื้อหา  
ในคู่มือประกอบด้วยเรื่อง การเชื่อมพลาสติก ( Plastic Welding ) การเชื่อม TIG ( Tungsten  
Inert Gas Arc Welding ) การเชื่อมแบบความชนิตจุด ( Spot Welding ) ตลอดจนการ  
ตรวจสอบและทดสอบรอยเชื่อมแบบไม่ทำลาย ( Non - destructive Testing ) เป็นคู่มือที่ใช้  
ประกอบการสอนวิชา 17439 Industrial Engineering Lab 2

เนื้อหาส่วนใหญ่ได้เรียบเรียงจากตำราของท่านผู้รู้หลายท่านและจากประสบการณ์ของผู้  
เรียบเรียงเอง

เอกสารเล่มนี้ได้แบ่งออกเป็น 4 เรื่อง แต่ละเรื่องจะมีบทต่างๆซึ่งในบางเรื่องจะมี  
ภาพประกอบเพื่อความเข้าใจง่ายขึ้น ส่วนภาษาที่ใช้ก็เป็นแบบง่ายๆ เช่นกัน

ผู้เรียบเรียงหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเอกสารเล่มนี้คงจะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ศึกษาในวิชานี้  
เป็นอย่างดีและยังเหมาะสำหรับท่านผู้ที่สนใจทั่วไป เอกสารเล่มนี้ได้รวบรวมและจัดพิมพ์เป็นครั้งแรก  
หากมีข้อผิดพลาดประการใดผู้เรียบเรียงขออภัยและขอแก้ไขและปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้น แต่  
หากมีข้อติดอยู่บ้างก็ขอมอบให้บิดา - มารดา ครู อาจารย์ ผู้เป็นเจ้าของเอกสารอ้างอิง ผู้มีพระคุณ  
ทั้งหลายทั้งปวงด้วยความเคารพและศรัทธา

เอกสารเล่มนี้สำเร็จออกมาได้เป็นรูปเล่มก็เพราะได้รับความอนุเคราะห์จาก คุณสมชาย  
แก้วบุญเรือง ในการให้คำแนะนำและตรวจทาน คุณอรจิรา หัตถพนม ที่พิมพ์ต้นฉบับ ตลอดจน  
เจ้าหน้าที่ห้องผลิตเอกสารทุกๆท่านในสำนักงานคณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย -  
ขอนแก่น ที่ได้จัดพิมพ์รูปเล่มอย่างสมบูรณ์และสวยงาม

วิเชียร ศรีไพร

หลักสูตรการสอน

ก

กำหนดการสอน

ข

บทที่ 1 การเชื่อมพลาสติก (Plastic Welding)

1.1 บทนำ	1
1.2 วิธีการเชื่อมพลาสติก	1
1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมด้วยลมร้อน	3
1.4 เครื่องเชื่อมพลาสติก	7
1.5 ลวดเชื่อมพลาสติก	8
1.6 การออกแบบรอยต่อสำหรับการเชื่อมพลาสติก (Welding Joint)	10
1.7 ขั้นตอนการเชื่อมพลาสติก	13
1.8 ข้อแนะนำในการเชื่อมพลาสติก	14
1.9 ข้อบกพร่องและวิธีการแก้ไขในงานเชื่อมพลาสติกด้วยลมร้อน	16
1.10 การตรวจสอบและทดสอบรอยเชื่อมพลาสติก (Inspection and Testing of Weld)	18
1.11 ข้อควรระวังในการเชื่อมพลาสติก	19

บทที่ 2 การเชื่อม TIG (Tungsten Inert Gas Arc Welding)

2.1 บทนำ	20
2.2 เครื่องเชื่อม TIG	21
2.3 อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องเชื่อม TIG	23
2.4 หัวเชื่อม (Torch) และอุปกรณ์ประกอบ	24
2.5 หน้ากากเชื่อม (Helmets)	26
2.6 Gas Nozzle	27
2.7 แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม (Shielding Gas)	28
2.8 การแบ่งประเภทของ Electrode	32
2.9 ลวดเชื่อมเติม (Filler Metal)	38
2.10 กระแสเชื่อม (Welding Current)	39
2.11 การอาร์ค (Arc)	42
2.12 ความสมดุลย์และไม่สมดุลย์ของคลื่น (Balance and Unbalanced Wave)	45
2.13 การเชื่อมจุดโดยเครื่องเชื่อมแบบ TIG	46
2.14 รอยต่อของการเชื่อม TIG	48

2.15 การเชื่อม TIG แบบอัตโนมัติ	54
2.16 ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการเชื่อม TIG	55
2.17 การเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ	56
2.18 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม	57
2.19 การเชื่อมทองแดงและทองแดงผสม	59
2.20 การเชื่อมอลูมิเนียม	60
ภาคผนวก	61
<b>บทที่ 3 การเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด (Spot Welding)</b>	
3.1 บทนำ	62
3.2 อุปกรณ์สำหรับการเชื่อมไฟฟ้าแบบจุด (Spot Welding)	63
3.3 เวลาที่ใช้ในการเชื่อม	66
3.4 พื้นที่สัมผัสของผิวหน้าแท่ง Electrode	67
3.5 ความสมดุลความร้อน	68
<b>บทที่ 4 การตรวจสอบและทดสอบรอยเชื่อม (Destructive Testing)</b>	
4.1 จุดประสงค์	69
4.2 มาตรฐานในการเชื่อม	69
4.3 การตรวจสอบรอยเชื่อม	70
<b>บรรณานุกรม</b>	76

## หลักสูตรการสอน

( SYLLABUS )

174390	ปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหกรรม 2
หน่วยกิต	1(0-3-3)
เงื่อนไขรายวิชา	174340 วิศวกรรมการผลิตและเทคโนโลยี
ผู้สอน	อ.ดร สมศักดิ์ หอมดี อ. พิระพงศ์ ท้าวเพชร นายวิเชียร ศรีไพร นายสมชาย แก้วบุญเรือง นายมณฑป ปลั่งสูงเนิน นายกสิน หัตถพนม นายกองพันธ์ กุ่มไข่น้ำ นายอภัย ศรีบุญเรือง
การประเมินผล	ภาคทฤษฎี 40 % ภาคปฏิบัติ 60 %
จุดประสงค์การเรียนรู้	เพื่อให้นักศึกษาได้มีความรู้และทักษะการปฏิบัติ ในด้านกรรมวิธีการ- อบชุบโลหะ กรรมวิธีการเชื่อมประสานโลหะ กรรมวิธีการหล่อโลหะ กรรมวิธีการตัดเฉือนโลหะ กรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะ
เนื้อหา	1. ด้านการอบชุบโลหะ บทนำการอบชุบโลหะ วัตถุประสงค์ การชุบแข็ง การอบคลาย การอบคืนตัว การอบอ่อนสมบูรณ์ การอบปกติ 2. ด้านกรรมวิธีการเชื่อมประสาน บทนำการเชื่อมประสานโลหะ วัตถุประสงค์ กกการเชื่อมพลาสติก การเชื่อม TIG การเชื่อมแบบจุด วิธีการเชื่อม การแก้ไขงานเชื่อม ที่มีข้อบกพร่อง การเลือกใช้ลวดเชื่อม การทดสอบรอยเชื่อม 3. ด้านกรรมวิธีการหล่อโลหะ บทนำเกี่ยวกับการหล่อโลหะ วัตถุประสงค์ ทรายหล่อ กระสวน การทดสอบทราย เตาหลอมโลหะ

#### 4. ด้านกรรมวิธีการเครื่องมือกลและการตัดเฉือนโลหะ

บทนำเครื่องมือกล วัสดุประสงค์ ประเภทเครื่องมือกล เครื่องมือ  
กลที่ใช้มีดตัดคมเดียว เครื่องมือกลที่ใช้มีดตัดหลายคม

#### 5. การขึ้นรูปโลหะ

บทนำการขึ้นรูปโลหะ วัสดุประสงค์ การแปรรูปแบบร้อน การ -  
แปรรูปแบบเย็น การขึ้นรูปแบบตี การขึ้นรูปแบบรีด การขึ้น-  
รูปแบบอัด การขึ้นรูปแบบดึง

## กำหนดการสอน

สัปดาห์ที่	หัวข้อปฏิบัติการ	จำนวนชั่วโมง
1	การเชื่อมพลาสติก	3
2	การเชื่อมพลาสติก	3
3	การเชื่อมพลาสติก	3
4	การเชื่อม TIG	3
5	การเชื่อม TIG	3
6	การเชื่อม TIG	3
7	การเชื่อมชนิดความดันทานแบบจุด	3
8	การเชื่อมชนิดความดันทานแบบจุด	3
9	การเชื่อมชนิดความดันทานแบบจุด	3
10	การทดสอบรอยเชื่อม	3
11	การทดสอบรอยเชื่อม	3
12	การทดสอบรอยเชื่อม	3

# บทที่ 1

## การเชื่อมพลาสติก

### (PLASTIC WELDING)

#### 1.1 บทนำ

การเชื่อมพลาสติก หมายถึง การต่อพลาสติกให้ติดกันโดยอาศัยความร้อนและแรงดันกด ทำให้เนื้อพลาสติกเชื่อมยึดติดกัน โดยบริเวณรอยต่อจะต้องมีลักษณะและความแข็งแรงเช่นเดียวกับวัสดุหลัก ซึ่งวิธีการให้ความร้อนจะแตกต่างกันตามความเหมาะสมของสภาพการใช้งาน

ชนิดของพลาสติกโดยทั่ว ๆ ไปจะมีอยู่ 2 ชนิด คือ พลาสติกแข็ง (Thermosetting Plastic) และพลาสติกอ่อน (Thermo Plastic)

1.1.1 พลาสติกแข็ง เมื่อประกอบเป็นผลิตภัณฑ์แล้วนำกลับไปหลอมละลายใหม่อีกไม่ได้ ทนกรด ด่าง และทนต่อสารเคมีได้ดี วัสดุจะมีลักษณะเป็นเม็ดและของเหลว แต่ส่วนมากจะอยู่ในรูปของเม็ดหรือผง เมื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใช้วิธีการหล่อเหลวในแบบโดยใช้กรรมวิธีเปลี่ยนแปลงทางเคมีตัวอย่างเช่น ปลั๊ก สวิตช์ หูหม้อ หูกะทะ ด้ามทัพพี ด้ามมีด ฯลฯ

1.1.2 พลาสติกอ่อน เมื่อประกอบเป็นผลิตภัณฑ์แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการนำมาบดเป็นผงแล้วนำมาหลอมเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้ ทนต่อความร้อนได้ต่ำ ทนความดันได้น้อย วิธีการนำมาผลิตใหม่ก็ทำโดยหลอมเหลวแล้วฉีด อัดหรือเป่าเข้าไปในแม่แบบแล้วถอดแบบออกก็จะได้ผลิตภัณฑ์ตามแบบที่ต้องการพลาสติกชนิดนี้เช่น PVC (Polyvinyl Chloride), PE (Polyethylene), PP (Polypropylene), ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), Acrylics พลาสติกที่เชื่อมได้จะเป็นชนิดอ่อน (Thermoplastic) เท่านั้น

#### 1.2 วิธีการเชื่อมพลาสติก มีดังต่อไปนี้ คือ

##### 1.2.1 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Friction Welding)

เป็นการเชื่อมโดยให้ชิ้นงาน 2 ชิ้นหมุนเสียดสีกันจนเกิดภาวะพลาสติกแล้วใช้แรงดันบีบอัดให้ผิวหน้างานติดกันเมื่อชิ้นงานเย็นตัวจึงหยุดกด ดังรูปที่ 1

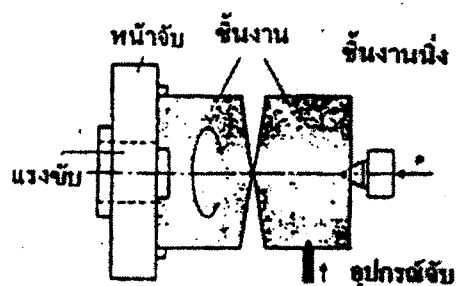
ข้อดีของการเชื่อมแบบหมุนชิ้นงาน คือ

1. ใช้เวลาเชื่อมน้อย  $\approx 30-45$  วินาที
2. ประหยัดค่าใช้จ่ายอาจใช้เครื่องมือในโรงงานธรรมดา เช่น เครื่องเจาะ เครื่องกลึง
3. ได้ผลดีสำหรับการเชื่อมต่อพลาสติกอ่อน
4. ได้ชิ้นงานมีคุณสมบัติเหมือนเดิมเพราะไม่ต้องใช้ตัวประสาน สารละลาย ลวดเชื่อม



### ข้อเสียคือ

เชื่อมได้เฉพาะชิ้นงานทรงกลมแต่ถ้าเป็นชิ้นงานไม่กลมจะเชื่อมลำบาก



รูปที่ 1.1 การเชื่อมแบบหมุนชิ้นงาน

### การนำไปใช้งาน

เหมาะกับพลาสติกอ่อน เช่น ท่อ งานทรงกลม ภาชนะบรรจุของเหลวที่ไม่ให้มีการรั่วซึม การต่อพลาสติกแผ่นให้เป็นชั้น (Laminate) สามารถเชื่อมพลาสติกอ่อนกับไม้ได้ โดยเมื่อพลาสติกอ่อนหลอมตัวจะไหลซึมเข้าไปในรูพรุนของไม้ที่นำมาต่อเข้าด้วยกัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าที่ใช้ในการเชื่อมพลาสติกแบบหมุน

วัสดุ	ความเร็วที่จุดเฉลี่ย (เมตร/วินาที)	แรงกดเริ่มต้น (กก.แรง/ซม <sup>2</sup> )
ไนลอน (Nylon)	1.5 - 15	25.5 - 153
อซิตอล (Acetal)	1.5 - 10.5	25.5 - 153
อคริลิกเรซิน (Acrylic resin)	3 - 10.5	15.3 - 127.5
โพลีเอทิลีน (Polyethylene)	1.5 - 18	10.2 - 100.2

### 1.2.2 การเชื่อมพลาสติกด้วยแผ่นความร้อน (Heat Tool Welding)

เป็นการเชื่อมแบบการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นความร้อน(หัวแรง) โดยนำเอาหน้าสัมผัสของชิ้นงานเข้าใกล้แผ่นความร้อนประมาณ 0.3 ซม. เมื่อหน้าสัมผัสหลอมเหลวก็จะนำออกมาจากอุปกรณ์แล้วใช้แรงกดหน้าสัมผัสทั้งสองให้ติดกันจนกว่าจะเย็นตัวใช้เวลาประมาณ 5-15 วินาทีและใช้แรง 25.5 - 153 กก.แรง/ตารางเซนติเมตร

## การนำไปใช้งาน

ใช้เชื่อมได้เฉพาะพลาสติกแผ่นบาง โดยการตอ้งานแบบเกยซ้อนทับกันใช้เวลาสั้น ต้นทุนต่ำ ใช้ในงานสนามได้

แผ่นความร้อนจะใช้แผ่นอลูมิเนียม เหล็กนิเกิล หรือวัสดุอื่นที่ไม่ติดพลาสติก

### 1.2.3 การเชื่อมด้วยลมร้อน (Hot Gas Welding)

เป็นการเชื่อมที่ได้รับความนิยมมากอาศัยลมร้อนหรือแก๊สร้อนเพื่อทำให้ชิ้นงานเชื่อม หลอมเหลวพร้อมกับลวดเชื่อมและใช้แรงกดให้ลวดเชื่อมประสานชิ้นงานให้ติดกันมีทั้งแบบเชื่อม ด้วยมือและเชื่อมแบบอัตโนมัติ ลวดเชื่อมที่ใช้จะเป็นชนิดเดียวกันกับวัสดุชิ้นงานที่นำมาเชื่อม

การเชื่อม Polyethylene (PE) จะต้องใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สร้อนไม่ควรใช้ลมร้อน เพราะชิ้นงานจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้เร็วแต่การเชื่อม Polyvinyl Chloride (P.V.C.) สามารถเชื่อมด้วยลมร้อนหรือแก๊สร้อนอื่น ๆ ได้

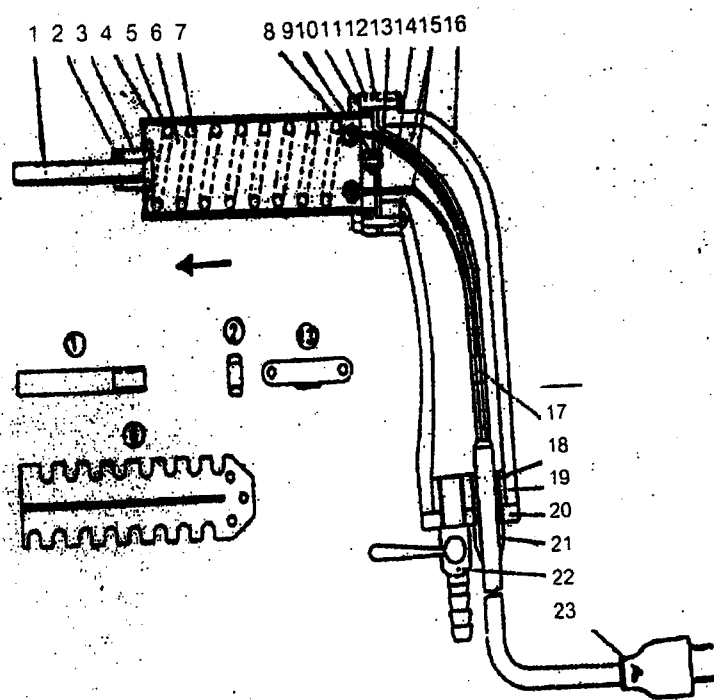
### 1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมด้วยลมร้อน

#### หัวเชื่อม (Welding Guns)

หัวเชื่อมแบบลมร้อนที่มีใช้อยู่จะมีโครงสร้างภายในที่คล้ายคลึงกันปัจจุบันมี 2 แบบ จะแตกต่างกันตรงที่แหล่งให้ความร้อน ซึ่งอาจจะเป็นไฟฟ้าหรือแก๊สก็ได้ โดยทั่วไปแล้วชนิดแก๊ส จะใช้กับงานสนามที่ไม่สามารถหากระแสไฟฟ้าได้

BLAND NEW

## "WINNING" (K-1) GUN



## HOW TO REPLACE BOBBIN

Please refer to the symbols (parts No.) shown in the attached sketch (page 2)

1. Remove the main screw (No. 10)
2. Pull out the main pipe (No. 4) to the marked ( ← ) direction
3. Remove Mounting terminal screw (No.8) and Bobbin screw (No.9)
4. Replace the Bobbin

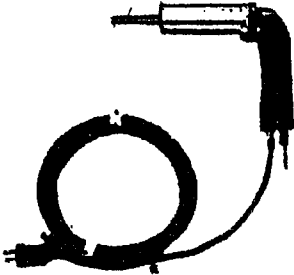
## CAUTION

Insulation mica is inserted of the pipe  
When replacing Bobbin, also check the Insulation mica (No.5). If there is something wrong with it, replace the Insulation mica.

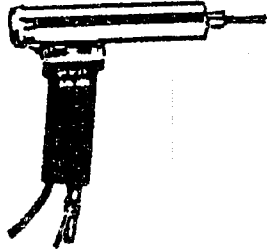
No.	Name	No.	Name
1	Nozzle (dia. 7.0 mm)	13	Bearing
2	Lock nut	14	Earth lead wire
3	Nozzle screw cover	15	Heater lead wire
4	Main pipe	16	Handle
5	Insulation mica	17	Load wire joint
6	Bobbin	19	O ring bearing washer
7	Coil	19	O ring
8	Mounting terminal screw	20	Cock cord clamping base
9	Bobbin screw	21	O ring clamping washer
10	Main screw	22	Air cock
11	Main flange	23	Source core
12	Packing (filling)		

รูปที่ 1.2 ส่วนต่าง ๆ ของหัวเชื่อมพลาสติกแบบ K-1 GUN

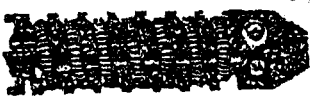
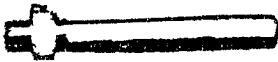
หัวเชื่อมด้วยลมร้อน (Welding Guns) ซึ่งใช้ลมร้อนในการเชื่อมดังรูปที่ 1.3, 1.4 และ 1.7 ส่วนไส้ขดลวดและปลายหัวเชื่อม (Bobbin, Nozzle) จะเป็นรูปที่ 1.5, 1.9 กล้องบรรจุเครื่องเชื่อมแบบ K-1, K-2 จะเป็นรูปที่ 1.6 และหัวเชื่อมและเครื่องเชื่อมแบบ K-3 จะเป็นรูปที่ 1.8

Type K- 1 Gun

100V/700W-350 °C
Common usable for Types 52, 51, 47, 15M, 15N

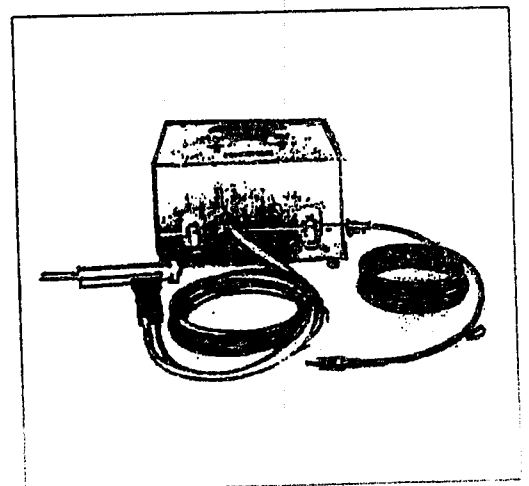
รูปที่ 1.3 หัวเชื่อมแบบ K-1

Type K- 2 Gun

100V/1000W-350 °C
Usable for Type 15M only

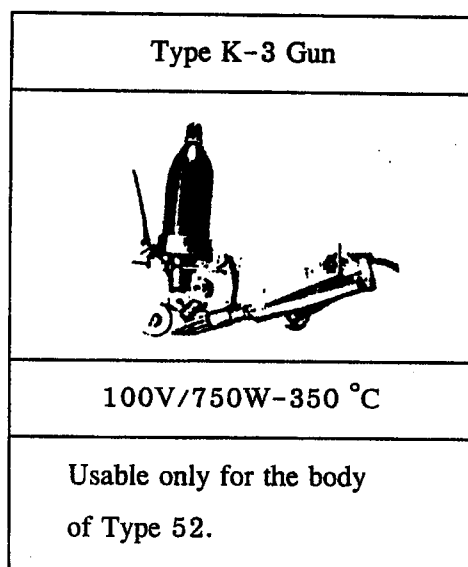
รูปที่ 1.4 หัวเชื่อมแบบ K-2

 942 x 26 Ø
K-1. K-2
 7 x 50

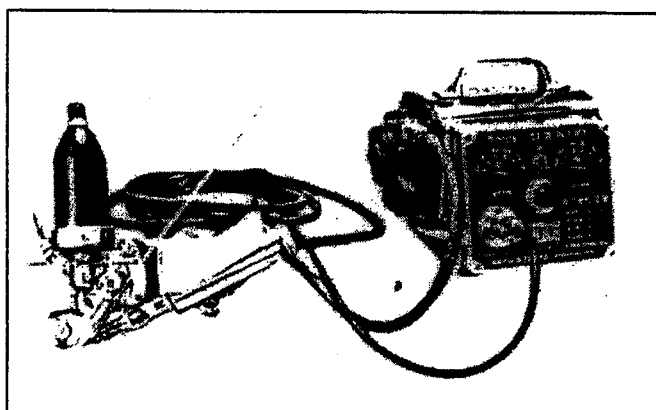
รูปที่ 1.5 ไส้ขดลวดและหัวทิวแบบ  
K-1, K-2 (Bobin, Nozzle)



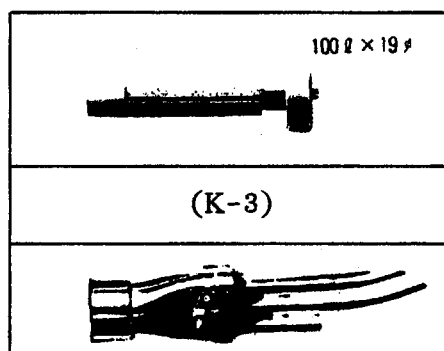
รูปที่ 1.6 หัวเชื่อมพร้อมกล่องบรรจุ  
เครื่องเชื่อมแบบ K-1, K-2



รูปที่ 1.7 หัวเชื่อมแบบ K-3



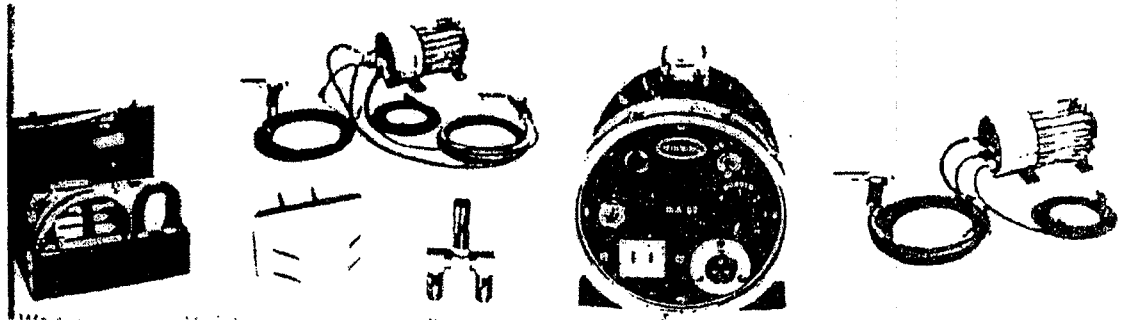
รูปที่ 1.8 หัวเชื่อมและเครื่องเชื่อมแบบ K-3



รูปที่ 1.9 ไส้ขดลวดและหัวทิวแบบ K-3 (Bobbin, Nozzle)

#### 1.4 เครื่องเชื่อมพลาสติก

เป็นเครื่องเชื่อมที่ปรับกระแสแรงเคลื่อนและแรงดันลม โดยลมจะถูกส่งผ่านชุดลวดที่ร้อนในหัวเชื่อมกลายเป็นลมร้อนที่นำไปใช้ในการเชื่อมต่อไป



รูปที่ 1.10 เครื่องเชื่อมพลาสติกแบบ WA-51 HOT-JET

#### ข้อมูลจำเพาะ

กำลังแรงเคลื่อน (Power Source-Voltage)	100V/200V/220V
คลื่นความถี่ (Frequency)	50/60 Hz
กำลังสูงสุด (Max. Power)	1,300 W (2 หัวเชื่อม)
กระแสเป่า (Blower Current)	3A/1.6A/1.4A
แรงเคลื่อนออก (Output Voltage)	100V/700V
อุณหภูมิควบคุม (Range for Temperature Control)	0 ~ 350 °C
แรงดันลม (Wind Volume)	70 - 80 L/min
แรงอัดลม (Wind Pressure)	0.3 ~ 0.35 Kg/cm <sup>2</sup>
น้ำหนัก (Weight)	16 Kg
ขนาดกล่องบรรจุเครื่อง (Size of the Case)	240 x 350 x 210 mm.

การปรับอุณหภูมิใช้งานของเครื่อง

อุณหภูมิปกติ 20 °C

ขนาดรูหัวเชื่อมทิว 7 mm.

อุณหภูมิที่หน้าปัทม์ 3 = 90 °C , 5 = 160 °C, 7 = 250 °C

เครื่องเชื่อม 9 = 310 °C , 11 = 350 °C

หมายเหตุ หมายเลข 3 คือ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 90 °C

หมายเลข 5 คือ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 160 °C

หมายเลข 7 คือ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 250 °C

หมายเลข 9 คือ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 310 °C

หมายเลข 11 คือ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 350 °C

### 1.5 ลวดเชื่อมพลาสติก (Welding Rod)

ลวดเชื่อมพลาสติกมีรูปร่างลักษณะต่าง ๆ เช่น แบบกลม แบบสามเหลี่ยม แบบแบน แบบ  
บางรี ซึ่งมีความยาวมาตรฐานคือหนึ่งเมตรมีสีฟ้า สีเทา ส่วนการเลือกใช้ก็อาจจะใช้สีที่เป็นสีเดียว  
กับชิ้นงานที่เชื่อมก็ได้และลวดเชื่อมเป็นชนิดเทอร์โมพลาสติกเช่นเดียวกับวัสดุงาน

#### ขนาดของลวดเชื่อมและแรงกดในการเชื่อม

ขนาดลวด	แรงกด
Ø 2 มม.	0.6 ~ 0.9 กก.
Ø 3 มม.	1.0 ~ 1.5 กก.
Ø 4 มม.	1.6 ~ 2.3 กก.
Ø 5 มม.	2.3 ~ 2.5 กก.
Ø 6 มม.	2.5 ~ 3.2 กก.

การใช้ลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับรอยบากแบบต่าง ๆ

เพื่อความเหมาะสมและรวดเร็วในการเชื่อมการเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับรอยบากหรือ  
รอยต่อของชิ้นงานก็นับว่ามีความสำคัญเพราะนอกจากจะสวยงามแล้วยังแข็งแรงอีกด้วย

แนวเชื่อมมุมใน



แท่งกลม

แท่งสามเหลี่ยม

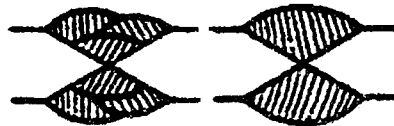
แนวเชื่อมมุมและมุมฉาก



แท่งกลม

แท่งสามเหลี่ยม

แนวเชื่อมต่อชนบากร่อง V 2 ร่อง



แท่งกลม

แท่งสามเหลี่ยม

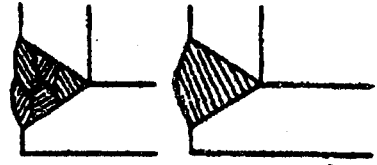
แนวเชื่อมขอบ



แท่งกลม

แท่งสามเหลี่ยม

แนวเชื่อมมุมนอก



แท่งกลม

แท่งสามเหลี่ยม

แนวเชื่อมต่อชนบากร่อง V เดี่ยว



แท่งกลม

แท่งสามเหลี่ยม

แนวเชื่อมมุมฉากต่อเกย



แท่งกลม

แนวเชื่อมมุมฉากต่อเกย



แท่งสามเหลี่ยม

รูปที่ 1.10 รอยต่อแบบพื้นฐานที่ใช้ลวดเชื่อมกลมหรือสามเหลี่ยม



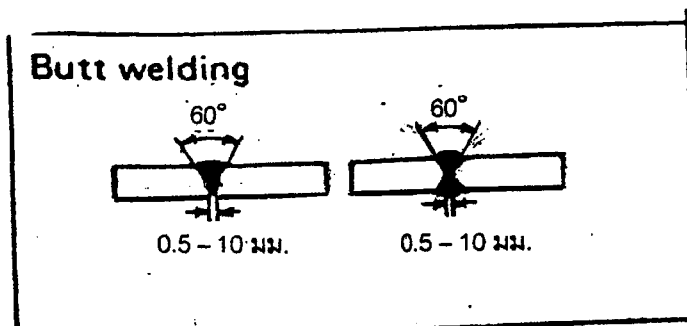
## 1.6 การออกแบบรอยต่อสำหรับการเชื่อมพลาสติก (Welding Joint)

การออกแบบรอยต่อการเชื่อมพลาสติกโดยทั่วไปก็เหมือนกับการเชื่อมโลหะ คือ

- 1.6.1 รอยต่อแบบสี่เหลี่ยม (Square Butt Joint)
- 1.6.2 รอยต่อแบบร่องตัววีเดี่ยว (Single-V Butt Joint)
- 1.6.3 รอยต่อแบบร่องตัววีคู่ (Double-V Butt Joint)
- 1.6.4 รอยต่อแบบต่อขอบ (Edge Joint)
- 1.6.5 รอยต่อแบบต่อมุม (Corner Joint)
- 1.6.6 รอยต่อแบบเกย (Lap Joint)

### 1.6.1 รอยต่อแบบสี่เหลี่ยม (Square Butt Joint)

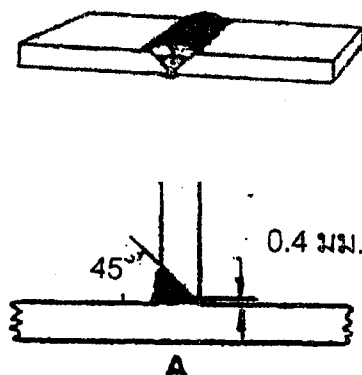
รอยต่อแบบนี้นิยมใช้กับแผ่นพลาสติกบางขนาดไม่เกิน 6 มม. ไม่ต้องการเตรียมรอยต่อมากโดยเว้นระยะรอยต่อประมาณ 0.4 มม. เพื่อให้เกิดการซึมลึกที่สมบูรณ์ทั้งสองด้าน การเชื่อมควรกระทำทั้งสองด้านหากเป็นไปได้ ดังรูปที่ 1.11 ใช้เทคนิคการเชื่อมแบบเดียวกับการเชื่อมที่กล่าวมาแล้วและการทดสอบแนวเชื่อมใช้การทดสอบแบบต่อชน Butt Joint



รูปที่ 1.11 รอยต่อชนแบบสี่เหลี่ยมและเชื่อมสองด้าน

### 1.6.2 รอยต่อแบบร่องตัววีเดี่ยว (Single-V Joint)

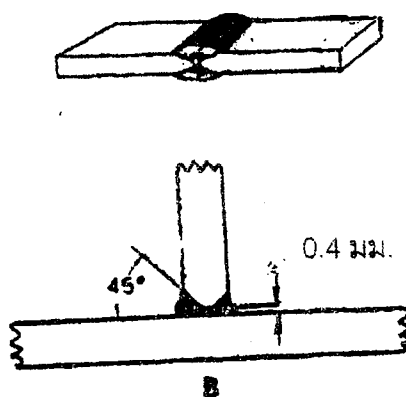
โดยทั่วไปรอยต่อแบบนี้จะใช้สำหรับแผ่นที่มีการต่อต้านเดียว แต่หากจะเพิ่มแนวเชื่อมด้านหลังก็จะเพิ่มความแข็งแรงมากขึ้น ให้มีความหนาด้านล่าง 0.8 มม. และเว้นระยะห่างของแผ่นงาน 0.4 มม. ดังรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 รอยต่อแบบตัววีเชื่อมด้านเดียว

### 1.6.3 รอยต่อแบบร่องตัววีคู่ (Double-V Joint)

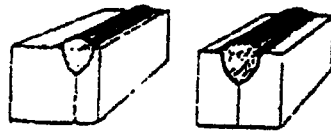
โดยทั่วไปการต่อแบบนี้จะใช้กับการต่อสำหรับแผ่นที่มีการต่อ 2 ด้านให้ระยะห่างของแผ่นชิ้นงาน 0.4 มม. และมีความหนาแผ่นงาน 0.8 มม. ดังรูปที่ 1.13



รูปที่ 1.13 รอยต่อแบบตัววีสองด้าน

#### 1.6.4 รอยต่อขอบ (Edge Joint)

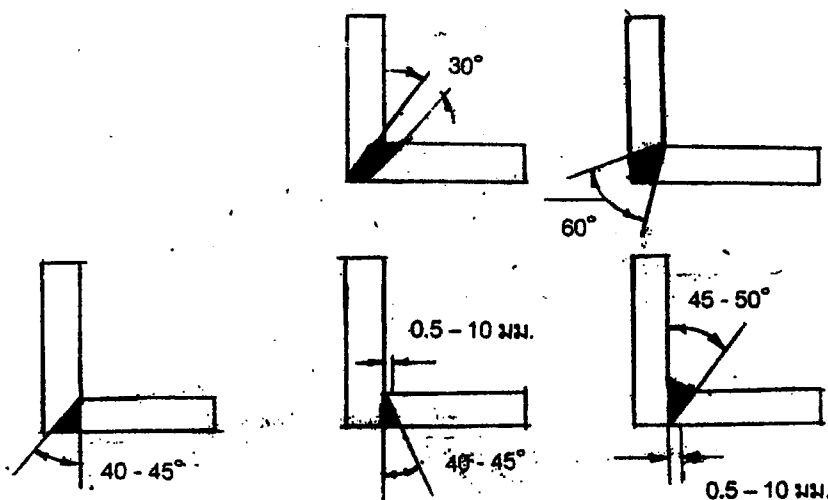
แนวเชื่อมขอบใช้ในถังหรือกล่อง หรือต่อมุม โดยการต่อผิวเรียบ 2 ผิวแนบกับด้านต่อต้าน และจะเชื่อมขอบมุมเข้าด้วยกัน หากเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักจะต้องบากร่องรูปที่ 1.14 เพื่อการยึดแน่นหนา แล้วใช้เทคนิคการเชื่อมแบบร่องวี



รูปที่ 1.14 รอยต่อแบบต่อขอบ

#### 1.6.5 รอยต่อแบบมุม (Corner Joint)

การเชื่อมมุมฉากและการต่อมุนนี้ใช้ในการต่อชิ้นงานแบบตัว T หรือต่อมุม 90 องศา จะต้องบากมุมชิ้นงานจนเกือบถึงด้านหนึ่ง ดังรูปที่ 1.15 หากการเชื่อมทั้งสองด้าน



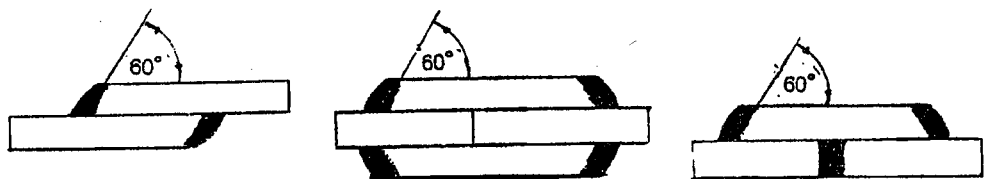
รูปที่ 1.15 รอยต่อแบบต่อมุม

### 1.6.6 รอยต่อแบบเกย (Lab Joint)

แนวเชื่อมแบบนี้พบบ่อยและใช้ในการต่อแบบต่อเกย ดังรูปที่ 1.16 แนวเชื่อมแบบนี้ อาจจะใช้ปลายหัวเชื่อมแบนหรือใช้ปลายหัวเชื่อมแบบกลมร่วมกับลวดเชื่อมได้



Lap welding



รูปที่ 1.16 รอยต่อแบบต่อเกย

### 1.7 ขั้นตอนการเชื่อมพลาสติก

1.7.1 เตรียมชิ้นงานหรือแผ่นงาน 2 ชิ้นขนาด 15 ซม. x 8 ซม. x 5 ซม.

1.7.2 ทำความสะอาดชิ้นงานโดยให้ชิ้นงานปราศจากความสกปรก เช่น ฝุ่นละออง คราบน้ำมัน

1.7.3 บากมุมที่ชิ้นงานเป็นมุม 30 องศาทั้ง 2 แผ่น และให้มีเนื้อที่ด้านล่าง 0-3 มม. และจัดให้ชิ้นงานห่างกัน 0-4 มม.

1.7.4 ตัดปลายลวดเชื่อมให้เป็นมุม 30 องศา

1.7.5 ตั้งมุมของลวดเชื่อมเป็นมุม  $70^{\circ}$  -  $90^{\circ}$  กับแผ่นงาน

1.7.6 ตั้งกระแสไฟตามความหนาของชิ้นงานตามหน้าปัทม์เครื่องเช่น  $3-90^{\circ}\text{C}$ ,  $5-160^{\circ}\text{C}$

1.7.7 ให้ความร้อนที่แผ่นงานจนเป็นสีเทาเข้มแล้วเริ่มให้ความร้อนที่ปลายลวดเชื่อมไปพร้อม ๆ กัน โดยให้ความร้อนที่แผ่นงานมากกว่าลวดเชื่อม คือแผ่นงาน 60% ลวดเชื่อม 40%

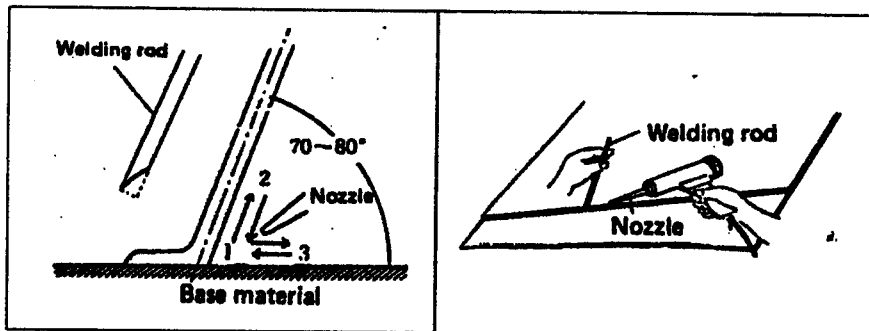
1.7.8 ใช้แรงกดลวดเชื่อมให้ติดกับแผ่นงานโดยออกแรงตามขนาด  $\varnothing$  ลวดเชื่อม เช่น  $\varnothing$  2 มม. ใช้แรงกด 0.6 ~ 0.9 กก. เป็นต้น

1.7.9 ก่อนเชื่อมทุกครั้งอาจจำเป็นต้องมีการเชื่อมยึดแบบจุดก่อน (Tack) เพื่อป้องกันมิให้ชิ้นงานแยกหรือถ่างออก-เข้าในขณะที่ทำการเชื่อม

1.7.10 สังเกตดูครีบทที่ลวดเชื่อมต้องขยายออกด้านข้าง ๗ ละ  $\approx 1$  มม.ถึงจะเป็นรอยเชื่อมที่ดี

1.7.11 เมื่อจะหยุดเชื่อมให้ใช้ปลายหัวเชื่อมเป่าที่ลวดเชื่อมให้ละลายและดึงให้ขาดออกจาก รอยเชื่อมและเชื่อมแนวต่อไป

1.7.12 เมื่อจะหยุดเชื่อมให้ปิดตัวปรับระดับความร้อนก่อนแล้วรอจนหัวเชื่อม (Torch) เย็น ก่อนจึงปิดสวิทช์เครื่องเชื่อม



รูปที่ 1.17 แสดงการทำมุมของลวดเชื่อมกับชิ้นงาน

## 1.8 ข้อแนะนำในการเชื่อมพลาสติก

- รอยเชื่อมควรจะมีขนาดเล็กและก่อตัวขึ้นที่แต่ละด้านของแนวเชื่อม
- ลวดเชื่อมควรมีลักษณะแบบเติมตลอด
- ลวดเชื่อมหรือชิ้นงานควรจะไม่เปลี่ยนสี
- ลวดเชื่อมจะต้องไม่ยื่นยาวเกินหรือสั้นเกินกว่าแนวเชื่อมที่เดินอยู่
- ห้ามใช้แก๊สออกซิเจน หรือแก๊สที่ติดไฟเป็นอันตราย

ลักษณะที่ดีของงานเชื่อมพลาสติกเป็นดังนี้

- การซึมลึกถึงด้านล่าง ตลอดแนว
- มีความสมดุลของความร้อนที่ใช้กับการป้อนลวด
- การจับถือหัวเชื่อมมีลักษณะถูกต้อง
- การเตรียมชิ้นงานและรอยต่อดี



รอยเชื่อมเกินขนาดมุม



เกิดการไหม้รอยเชื่อมแบบพื้นฐาน



การซึมลึกดี



ไม่ไหล-เย็นไป



การซึมไม่ดีทำได้ไม่เต็มรอยบาก



ไหลดี-แนวดี






การซึมไม่ดีและเย็นไป



ไม่ก่อตัว-ความร้อนมาก



รูปที่ 1.18 ลักษณะดี-ไม่ดีของรอยเชื่อม

### 1.9 ข้อบกพร่องและวิธีการแก้ไขในงานเชื่อมพลาสติกด้วยลมร้อน

จุดบกพร่อง	สาเหตุ	การแก้ไข
เกิดรูพรุนในแนวเชื่อม 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ลวดเชื่อมเป็นรูปรุณ</li> <li>2. ลวดเชื่อมได้รับความร้อนมาก</li> <li>3. เชื่อมเร็วเกินไป</li> <li>4. ลวดเชื่อมใหญ่เกินไป</li> <li>5. การเริ่มต้นและการหยุดเชื่อมไม่ถูกต้อง</li> <li>6. เติมลวดเชื่อมลงในร่องรอยต่อไม่เหมาะสม</li> <li>7. เกิดแรงตึงในลวดเชื่อม</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ตรวจสอบลวดเชื่อมก่อน</li> <li>2. ให้ความร้อนแก่ลวดเชื่อมและชิ้นงานให้ถูกต้อง</li> <li>3. ตรวจสอบอุณหภูมิในการเชื่อม</li> <li>4. จัดลำดับการเติมลวดเชื่อมให้เหมาะสม</li> <li>5. จุดเริ่มเชื่อมจะต้องตัดลวดเชื่อมเป็นมุม</li> <li>6. จุดต่อลวดจะต้องตัดลวดที่จะต่อให้เป็นมุมและเกยทับกันประมาณ 1.25 ซม.</li> </ol>
การซึมลึกไม่ดี 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เตรียมงานเชื่อมไม่ดี</li> <li>2. ลวดเชื่อมใหญ่เกินไป</li> <li>3. เชื่อมเร็วเกินไป</li> <li>4. ระยะร่องกันรอยต่อน้อยไป</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. บากชิ้นงานเป็นมุมเอียง 60 องศา</li> <li>2. ใช้ลวดเล็กเชื่อมแนวยึดไส้</li> <li>3. ตรวจสอบคลิบขอบแนวเชื่อมในขณะที่เชื่อม</li> <li>4. เชื่อมยึดชิ้นงานให้มีระยะห่างกันร่องรอยต่อ 0-4 มม.</li> </ol>
รอยไหม้ 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. อุณหภูมิเชื่อมสูงเกินไป</li> <li>2. เชื่อมช้าเกินไป</li> <li>3. ให้ความร้อนไม่สม่ำเสมอ</li> <li>4. วัสดุงานอุณหภูมิต่ำเกินไป</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เพิ่มอัตราการไหลของลม</li> <li>2. เชื่อมด้วยความเร็วคงที่</li> <li>3. ล่ายหัวเชื่อมให้ถูกต้อง</li> <li>4. อุ่นงานก่อนเชื่อม</li> </ol>

จุดบกพร่อง	สาเหตุ	การแก้ไข
<p>การบิดงอ</p> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. รอยต่อร้อนเกินไป</li> <li>2. เชื่อมช้าเกินไป</li> <li>3. ลวดเชื่อมเล็กเกินไป</li> <li>4. ลำดับการเชื่อมไม่เหมาะสม</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ปลดปล่อยให้แนวเชื่อมแต่ละแนวเย็นก่อน</li> <li>2. เชื่อมด้วยความเร็วคงที่ ใช้หัวเชื่อมแบบ speed tip</li> <li>3. ใช้ลวดเชื่อมขนาดใหญ่ หรือลวดเชื่อมแบบสามเหลี่ยม</li> <li>4. ประกอบงานเพื่อการบิดงอไว้ก่อนเชื่อม</li> <li>5. ใช้รอยต่อ Double-Vee หรือเชื่อมรองหลัง</li> <li>6. รองหลังแนวเชื่อมด้วยโลหะ</li> </ol>
<p>การโค้งงอ</p> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. วัสดุงานหดตัว</li> <li>2. ให้ความร้อนสูงเกินไป</li> <li>3. เตรียมงานไม่ถูกต้อง-ระยะกันร่องรอยต่อมากเกินไป</li> <li>4. จับยึดงานไม่ดี</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. อุ่นงานเพื่อลดความเค้น</li> <li>2. เชื่อมด้วยความเร็วสูง-ใช้เชื่อมรองหลัง</li> <li>3. สำหรับการเชื่อมซ้อนหลายแนว ควรให้แต่ละแนวเย็นก่อน</li> <li>4. จับยึดงานให้เหมาะสม</li> </ol>
<p>แนวเชื่อมไม่สวยงาม</p> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ใช้แรงกดลวดเชื่อมไม่สม่ำเสมอ</li> <li>2. เกิดแรงตึงในลวดเชื่อมมากเกินไป</li> <li>3. ให้ความร้อนไม่สม่ำเสมอ</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ฝึกหัดเริ่มต้น, หยุดและใช้นิ้วมือเคลื่อนลวดเชื่อม</li> <li>2. จับลวดเชื่อมให้มีมุมถูกต้อง</li> <li>3. ส่ายหัวเชื่อมให้สม่ำเสมอ และให้ความร้อนลวดเชื่อมกับชิ้นงานให้เหมาะสม</li> </ol>



จุดบกพร่อง	สาเหตุ	การแก้ไข
การแตกเนื่องจาก ความเค้น  	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. อุณหภูมิเชื่อมไม่เหมาะสม</li> <li>2. เกิดความเค้นในแนวเชื่อมมากเกินไป</li> <li>3. สารเคมีกัดกร่อน</li> <li>4. ส่วนผสมของลวดเชื่อมกับชิ้นงานต่างกัน</li> <li>5. แนวเชื่อมออกซิเดชันหรือคุณภาพลดลง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ใช้อุณหภูมิเชื่อมให้เหมาะสมตามตารางที่เสนอแนะ</li> <li>2. ให้งานเชื่อมขยายตัวและหดตัวได้ตามธรรมชาติ</li> <li>3. ใช้กับสารเคมีที่งานทนได้หรือใช้ในช่วงอุณหภูมิที่ไม่เป็นอันตรายต่องาน</li> <li>4. ใช้ลวดเชื่อมและชิ้นงานที่มีส่วนผสมเหมือนกัน และใช้แก๊สเฉื่อยเป็นแก๊สเชื่อม</li> </ol>
การหลอมละลายไม่ดี  	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เตรียมงานไม่ดี</li> <li>2. กลวิธีการเชื่อมไม่เหมาะสม</li> <li>3. ความเร็วในการเชื่อมไม่ถูกต้อง</li> <li>4. เลือกใช้ลวดเชื่อมไม่ถูกต้อง</li> <li>5. อุณหภูมิเชื่อมไม่ถูกต้อง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ทำความสะอาดชิ้นงานก่อนเชื่อม</li> <li>2. รักษาความดันและการส่ายหัวเชื่อมให้คงที่</li> <li>3. เวลาเชื่อมช้าเมื่อใช้อุณหภูมิเชื่อมต่ำ</li> <li>4. ใช้ลวดเชื่อมเล็กสำหรับเชื่อมยึดไส้และใช้ลวดเชื่อมใหญ่เมื่อเชื่อมแนวลาดหน้าโดยใช้ขั้นตอนการเชื่อมที่เหมาะสม</li> <li>5. อุ่นงานก่อนเชื่อมเมื่อจำเป็น</li> <li>6. จับยึดงานเชื่อมให้มั่นคง</li> </ol>

#### 1.10 การตรวจสอบและทดสอบรอยเชื่อมพลาสติก (Inspection and Testing of Weld)

การทดสอบรอยเชื่อมของพลาสติกก็คล้ายกับในรอยเชื่อมโลหะโดยจะพิจารณาถึงการหลอมตัว การซึมลึก ฟองอากาศ และความเรียบร้อยสวยงาม งานเชื่อมพลาสติกแตกต่างจากงานเชื่อมโลหะคือ ความแข็งแรงของชิ้นงานบริเวณแนวเชื่อมจะลดลงไป 25% โดยทั่วไปหากความแข็งแรงในชิ้นงานพลาสติกนั้นเหลืออยู่น้อยกว่า 75% ถือว่าใช้ไม่ได้

ในงานเชื่อมพลาสติกมีวิธีการทดสอบแนวเชื่อมอยู่ 3 วิธี คือ การทดสอบแบบทำลายแบบไม่ทำลาย

### 1.10.1 การทดสอบแบบทำลาย (Destructive Testing) มีดังนี้ คือ

1. ทดสอบการดึง เหมือนกับการทดสอบแรงดึงในงานโลหะ ส่วนมากใช้ทดสอบรอยต่อชนในแผ่นพลาสติกแข็ง
2. ทดสอบการตัด เหมือนกับการตัดชิ้นงานอิสระในงานเชื่อมโลหะ
3. ทดสอบการปริแตก ใช้ทดสอบรอยต่อของท่อหรือข้อต่อและหน้าแปลนของท่อ
4. ทดสอบการกระแทก ทดสอบแรงกระแทกโดยใช้ค้อนทุบ

### 1.10.2 การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing) มีดังนี้ คือ

1. การตรวจสอบด้วยสายตาประกอบกับวิธีต่าง ๆ เป็นวิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย
2. ทดสอบโดยการสปาร์ค โดยใช้ spark - coil tester แนวด้านล่างของแนวเชื่อมต่อไว้ด้วยแผ่นโลหะ เมื่อใช้ปลายแหลมของอุปกรณ์ทดสอบเดินตามแนวเชื่อม หากปรากฏว่ามีรุปรุนจะทำให้ประกาย (Spark) ผ่านลงกราวด์ที่แผ่นโลหะได้
3. เรดิโอกราฟฟี เพื่อตรวจสอบภาพของโครงสร้างภายในลักษณะของแนวเชื่อมและรอยต่อ
4. ทดสอบทางเคมี (Chemical Testing) การทดสอบทางเคมี ตัวอย่างงานคือ การแช่ท่อ PVC ไว้ในอะซีโตนเป็นเวลา 2-4 ชั่วโมง จะทำให้เห็นรอยแยกหรือข้อบกพร่องของชิ้นงาน

### 1.11 ข้อควรระวังในการเชื่อมพลาสติก

- 1.11.1 ตรวจเช็คสายไฟของเครื่องว่าชำรุดหรือไม่ถ้าชำรุดควรเปลี่ยนใหม่
- 1.11.2 ระวังหัวเชื่อมที่ร้อนมิให้วางทับสายลมหรือสายไฟ
- 1.11.3 ควรมีที่สำหรับวางหัวเชื่อมโดยเฉพาะในขณะที่เชื่อมชิ้นงาน
- 1.11.4 ควรให้หัวเชื่อมเย็นก่อนเก็บเข้ากล่องบรรจุเครื่องเชื่อม
- 1.11.5 อย่าให้รอยเชื่อมไหม้เพราะความแข็งแรงจะน้อยลง

## บทที่ 2

### การเชื่อม TIG

(Tungsten Inert Gas Arc Welding)

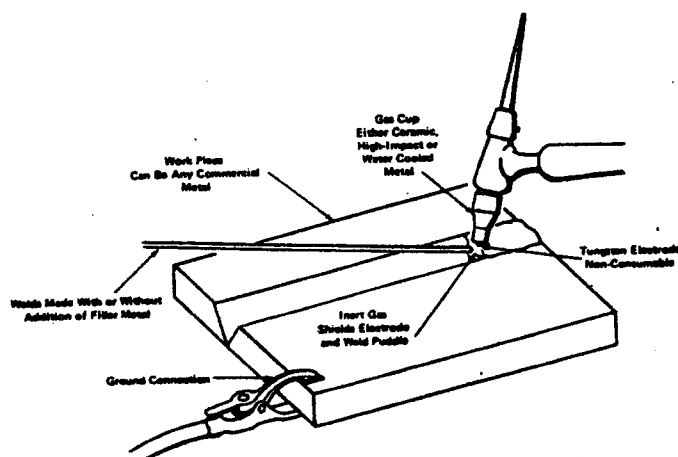
#### 2.1 บทนำ

การเชื่อม TIG คือการเชื่อมที่นำแท่งทังสเตนมาเป็น Electrode อาร์คกับชิ้นงาน โดยที่แท่ง Electrode ไม่หลอมละลาย และใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุมบริเวณรอยเชื่อมเพื่อป้องกันปฏิกิริยา Oxidation ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่โลหะเกิดการหลอมเหลว

TIG ย่อมาจาก Tungsten Inert Gas หรือบางที่เรียก GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ซึ่งหมายถึงการเชื่อมที่ใช้แท่งทังสเตนเป็นตัว Electrode และมีแก๊สเฉื่อยปกคลุมรอยเชื่อม เช่น อาร์กอน หรือ ฮีเลียม เป็นต้น วิธีการเชื่อมด้วยแก๊สเฉื่อยเริ่มมีมาตั้งแต่ปี ค.ศ.1890 ต่อมาในปี ค.ศ.1920 ได้มีการพัฒนาขึ้นเรื่อย ๆ จนปี ค.ศ.1930 MR.HENRY M. HOBART และ MR.PHILLIP K. BEVERS เป็นผู้จดทะเบียนการเชื่อม TIG ไว้

2.1.1 กรรมวิธีการเชื่อม TIG สามารถเชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิดซึ่งรวมถึงโลหะผสม เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสม เหล็กกล้าไร้สนิม โลหะทนความร้อน อลูมิเนียมผสม ทองแดงและทองแดงผสม ส่วนตะกั่วและสังกะสีไม่ควรเชื่อมด้วย TIG เนื่องจากมีอุณหภูมิต่ำ การเชื่อม TIG มีอุณหภูมิที่ได้จากการอาร์คสูงประมาณ  $1942^{\circ}\text{C}$  ( $35,000^{\circ}\text{F}$ )

การเชื่อม TIG มีการพัฒนาวิธีการเชื่อมแบบต่อเนื่อง (Continuous Weld) การเชื่อมเป็นช่วง (Intermittent) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Skip Weld และการเชื่อมจุด (Spot Weld) ความหนาของชิ้นงานมีตั้งแต่ 0.12 มม. ถึง 3.18 มม. แต่ถ้าขนาดหนา 6.35 มม.ขึ้นไป ควรใช้การเชื่อมด้วยวิธีอื่นจะประหยัดกว่าส่วนการเชื่อม TIG จะเชื่อมโลหะที่เน้นคุณภาพมากกว่า เช่น งานอากาศยาน ถึงสแตนเลส เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของการเชื่อม TIG

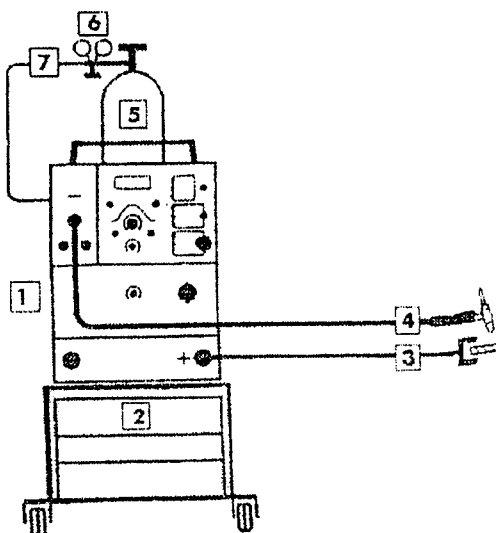
### 2.1.2 ข้อดีของการเชื่อม TIG

- 2.1.2.1 ใ้รอยเชื่อมที่สะอาดปราศจาก Slag ผิเงน
- 2.1.2.2 รอยเชื่อมมีส่วนผสมเหมือนกับเนื้อโลหะเดิม
- 2.1.2.3 เชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม
- 2.1.2.4 มองเห็นบ่อหลอมละลายได้ชัดเจน เนื่องจากไม่มีควันและ Slag ปกคลุม
- 2.1.2.5 งานเชื่อมบิดงอน้อยเนื่องจาก Heat Affected Zone แคบ
- 2.1.2.6 ไม่มีเม็ดโลหะกระเด็น (Spatter)
- 2.1.2.7 เชื่อมโลหะที่มีความหนาแตกต่างกันได้ เช่น เหล็กเหนียว
- 2.1.2.8 ควบคุมแนวเชื่อมได้ง่าย

### 2.2 เครื่องเชื่อม TIG

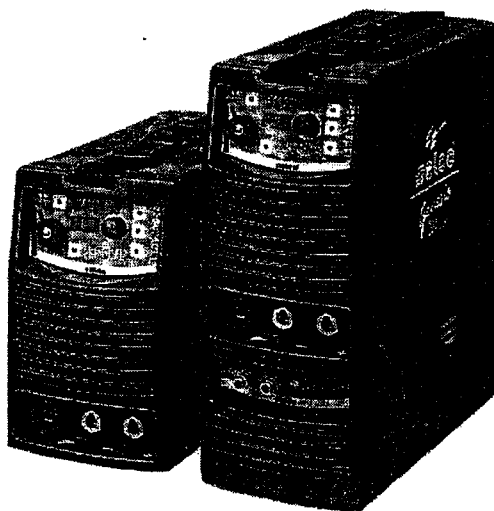
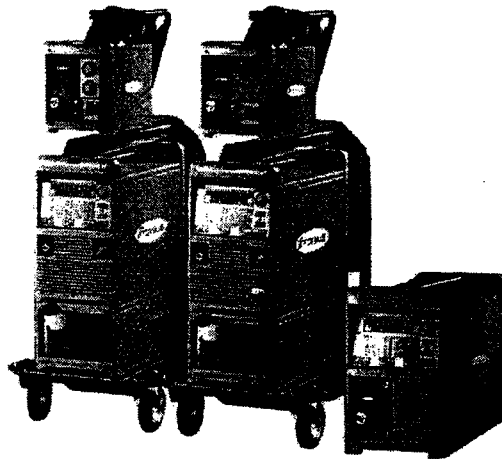
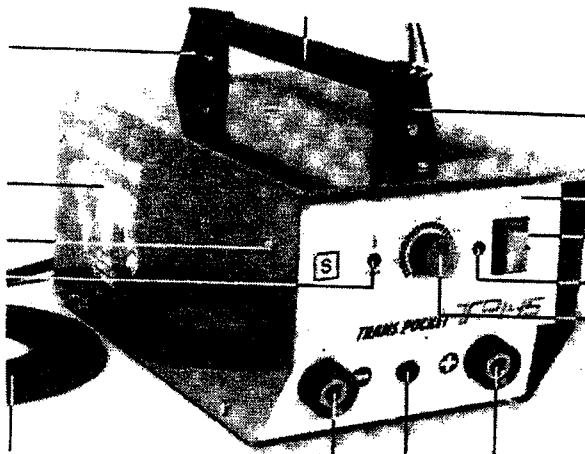
เครื่องเชื่อมแบบ TIG มีหลายแบบ เช่น แบบที่จ่ายกระแสตรง (Transformer – rectifiers) แบบจ่ายกระแสสลับ (Transformer) แบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า (Power-driven Generators) ซึ่งจะจ่ายกระแสไฟฟ้าตรง ถ้าใช้เครื่องยนต์ขับเคลื่อนจะจ่ายได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ ซึ่งข้อดีของเครื่องแบบนี้สามารถเชื่อมในสถานที่ไม่มีไฟฟ้าได้

เครื่องเชื่อม TIG มีขนาดผลิตไฟเชื่อมได้ตั้งแต่ 2 ถึง 3 แอมแปร์ จนถึงหลายร้อยแอมแปร์ ซึ่งมีทั้งที่เชื่อมด้วยกระแสไฟ AC, AC/DC (สามารถเชื่อมลวดเชื่อมที่หุ้มฟลักซ์ได้)



รูปที่ 2.2 เครื่องเชื่อม TIG และส่วนประกอบต่าง ๆ

- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| 1. เครื่องเชื่อม (Power Source) | 2. ชุดน้ำหล่อเย็น (Cooling Unit)           |
| 3. สายดิน (Ground Cable)        | 4. หัวเชื่อม (Torch)                       |
| 5. ถังบรรจุแก๊ส (Gas Cylinder)  | 6. วาล์วปรับแก๊ส (Regulator And Flowmeter) |
| 7. สายแก๊ส (Gas Supply Line)    |  |



รูปที่ 2.3 เครื่องเชื่อม TIG แบบต่าง ๆ

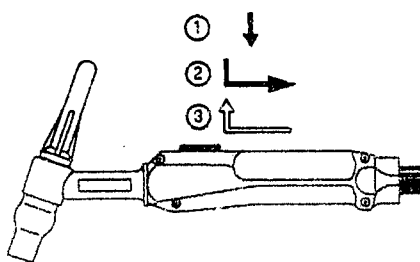
## 2.3 อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องเชื่อม TIG

ในการควบคุมการทำงานของเครื่องเชื่อม TIG จะมีอุปกรณ์หลักดังนี้

2.3.1 รีโมทคอนโทรล ควบคุมกระแสเชื่อม การไหลของแก๊สปกคลุมและน้ำหล่อเย็นมี 2 แบบ คือแบบที่ใช้เท้าเหยียบและแบบที่ใช้มือกด ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5



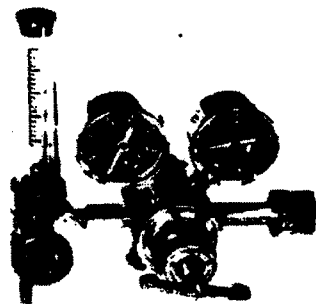
รูปที่ 2.4 รีโมทคอนโทรลแบบเท้าเหยียบ



รูปที่ 2.5 รีโมทคอนโทรลแบบมือกด

### 2.3.2 อุปกรณ์ปรับความดันและวัดปริมาณการไหลของแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม

ในการควบคุมการไหลของแก๊สเนื่องจากจำเป็นต้องใช้ Regulator ซึ่งเป็นตัววัดความดันภายในถังแก๊สและต่อตัว Flowmeter เพื่อวัดหรือปรับปริมาณการไหลของแก๊สเป็นฟุตต่อชั่วโมง โดยให้หลอดแก้วซึ่งบรรจุลูกเหล็กกลมตั้งอยู่ในแนวตั้งที่ถูกต้อง



รูปที่ 2.6 Regulator And Flowmeter

### 2.4 หัวเชื่อม (Torch) และอุปกรณ์ประกอบ

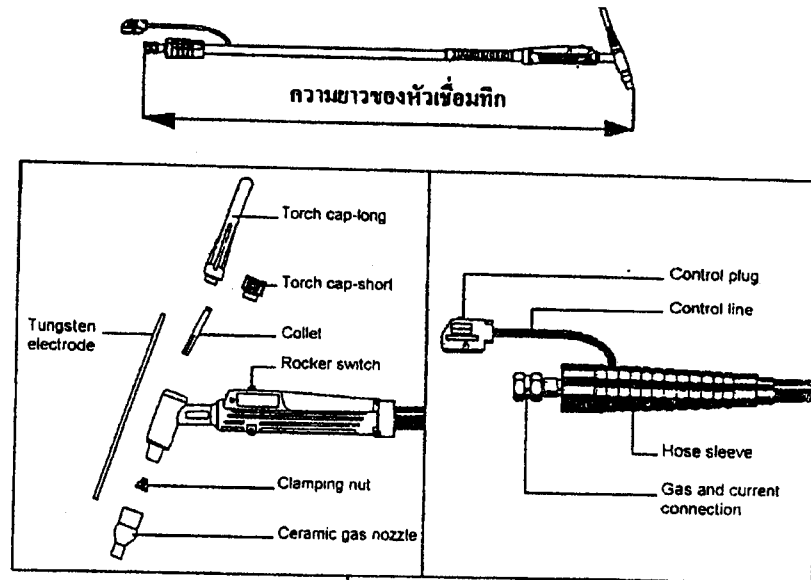
หัวเชื่อม TIG จะเป็นตัวจับ Electrode (แท่งทังสเตน) ประกอบด้วย Nozzle ที่เป็นเซรามิกหรือแก้วที่ใช้ควบคุมการไหลของแก๊สมิให้แก๊สฟุ้งกระจายในขณะที่เชื่อม สายเชื่อม สายยางและข้อต่อ หัวเชื่อมที่เชื่อมด้วยมือจะมี 2 ชนิด คือ

2.4.1 ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air-cooled)

2.4.2 ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water-cooled)

#### 2.4.1 ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศหรือแก๊สปกคลุม (Air-cooled)

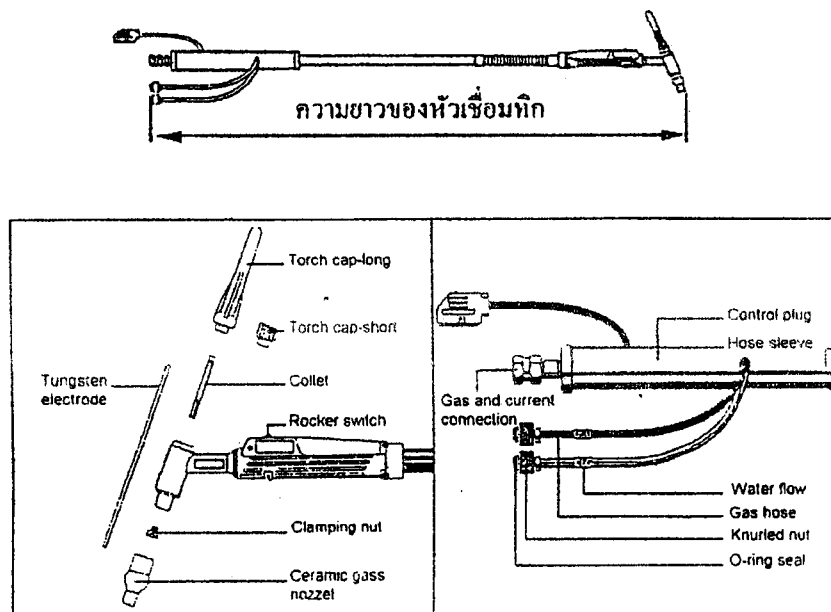
เป็นหัวเชื่อมที่ใช้กับกระแสไม่เกิน 150 แอมป์ ใช้เชื่อมโลหะบางและ Duty Cycle ต่ำ ใช้งานน้อย หัวเชื่อมมีน้ำหนักเบา กะทัดรัด และราคาถูกกว่าแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 หัวเชื่อมที่หล่อเย็นด้วยอากาศ

#### 2.4.2 ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water-cooled)

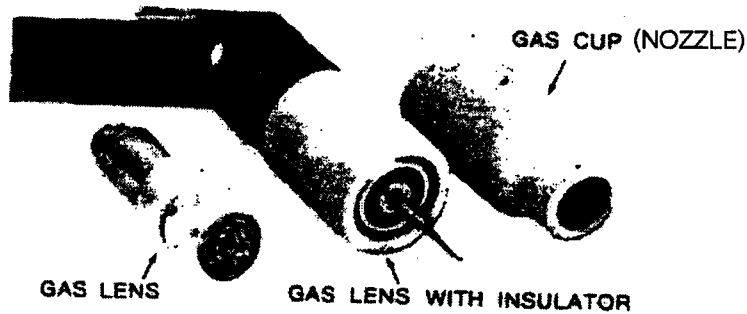
เป็นหัวเชื่อมที่ใช้กับการเชื่อมแบบต่อเนื่องและเชื่อมงานที่มีความหนามากขึ้นใช้ กระแสเชื่อมตั้งแต่ 200-500 แอมป์ มีสายต่อเข้า 3 เส้นคือ สายแก๊ส สายไฟเชื่อม และสายน้ำหล่อเย็น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 หัวเชื่อมที่หล่อเย็นด้วยน้ำ



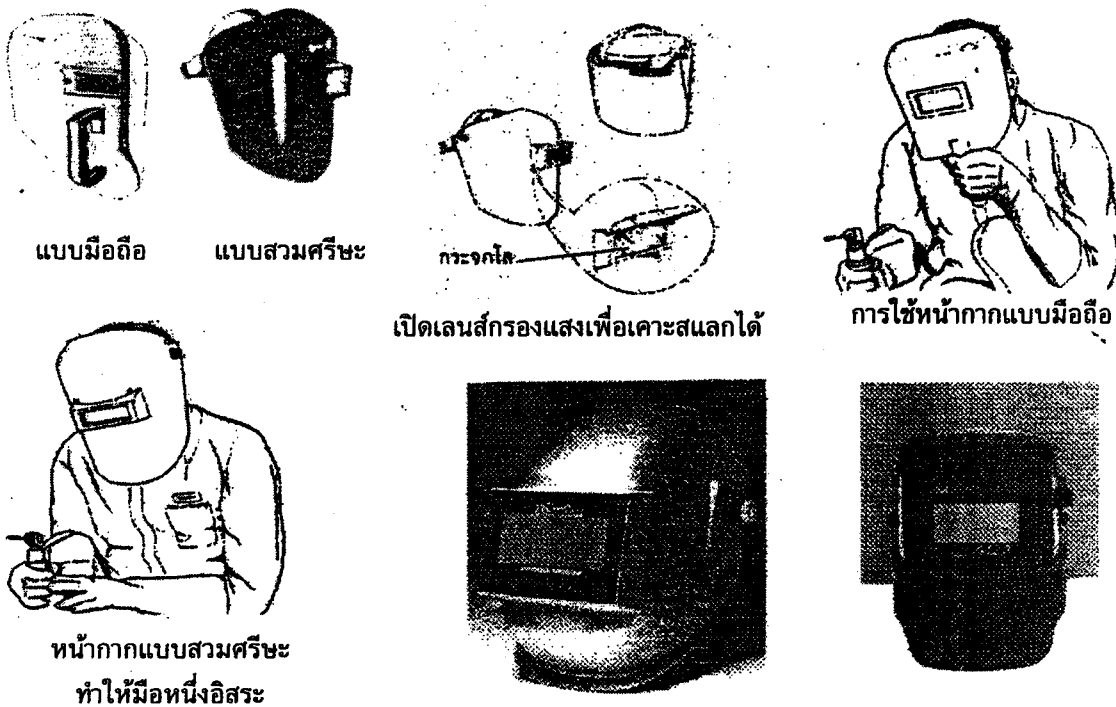
2.4.3 Gas Lens แก๊สเลนส์จะเป็นอุปกรณ์เสริมเพื่อช่วยให้ปลายของ Electrode ยื่นออกมาได้ยาวขึ้นมากกว่าปกติคือประมาณ 2.5 เซนติเมตร (1 นิ้ว) จากส่วนปลายของกระเปาะเชื่อมสามารถเชื่อมมุมที่อับได้ง่ายขึ้น แก๊สเลนส์จะเป็นตะแกรงแสตนเลสใช้สวมเข้าไปในส่วนปลายของหัวเชื่อม (Torch) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 Gas Lens พร้อมอุปกรณ์ประกอบ

## 2.5 หน้ากากเชื่อม (Helmets)

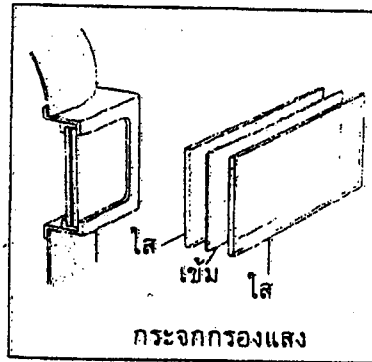
มีทั้งแบบที่ใช้มือถือและแบบสวมศีรษะ ถ้าเป็นแบบมือถือจะใช้ในการเชื่อมที่ไม่ได้มีการเดินลวดเชื่อมในแนวเชื่อมก็ได้ ส่วนแบบสวมศีรษะเหมาะสำหรับการเชื่อมที่ในขณะที่เชื่อมมือข้างหนึ่งจับหัวเชื่อม (Torch) ส่วนมืออีกข้างหนึ่งจะจับลวดเชื่อมป้อนในแนวเชื่อม ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 หน้ากากเชื่อมแบบมือถือและแบบสวมศีรษะ

### 2.5.1 เลนส์ (Lens)

กระจกที่ใสในหน้ากากเชื่อมจะมีกระจกใสอยู่ด้านนอกและด้านในส่วนตรงกลางก็จะ เป็นเลนส์ทึบเพื่อกรองแสงในขณะเชื่อมเพื่อป้องกันอันตรายให้กับดวงตา ดังรูปที่ 2.11



#### WELDING LENS SHADE RECOMMENDATIONS

Welding Appli	Lens shades No
Light Welding or load Welding	4
Spot Welding min	5
Flame cutting min	5
Gas welding      Gas cutting	6
Arc welding to      Amp	6
Heavy gas welding	8
Arc welding & cutting to 75 Amp	8
Arc welding & cutting 75 to 200 Amp	10
Arc welding & cutting 200 to 400 Amp	12
Arc welding & cutting over 400 Amp	14

รูปที่ 2.11 เลนส์

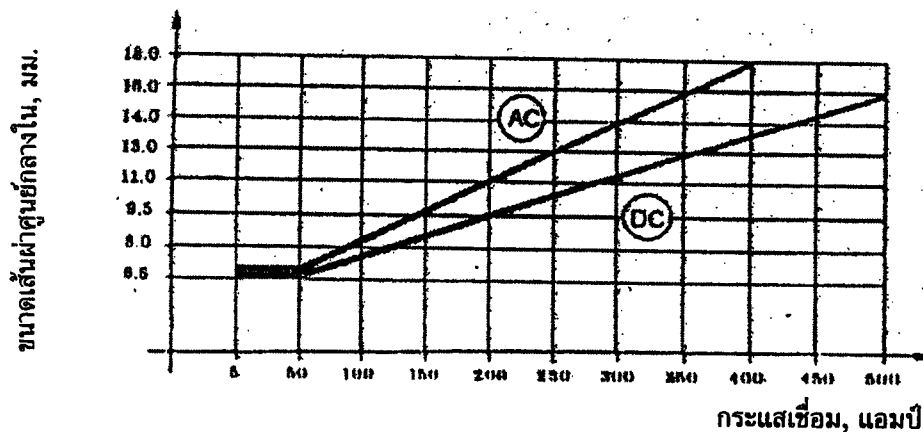
### 2.6 Gas Nozzle

Nozzle ที่ใช้คลุมแก๊สเฉื่อยจะมีทั้งแบบที่เป็นเซรามิกและแก้วใสมีรูปร่างต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 Nozzle (Gas Cup)

### การเลือกขนาดของ Gas Nozzle เพื่อใช้งาน



ขนาดระบุ		เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน
1/4"	=	6.5 มม.
5/16"	=	8.0 มม.
3/8"	=	9.5 มม.
7/16"	=	11.0 มม.
1/2"	=	13.0 มม.
9/16"	=	14.0 มม.
5/8"	=	16.0 มม.
11/16"	=	18.0 มม.

การเลือกใช้ขนาดของ Gas Nozzle โดยทั่วไปจะยึดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็นหลักและกำหนดเป็นเบอร์ เช่น เบอร์ 4, 5, 6, 7 แต่ถ้าหารด้วย 16 จะได้ขนาดเป็นนิ้ว เช่น ขนาด  $\frac{6}{16} = \frac{3}{8}$  โดยปกติจะเลือกใช้ Gas Nozzle ขนาด 4-6 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของ Electrode ถ้า Gas Nozzle เล็กเกินไปอายุการใช้งานจะสั้น แต่ถ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโตเกินไปก็เปลืองแก๊ส

### 2.7 แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม (Shielding Gas)

ส่วนมากจะเป็นแก๊สอาร์กอนและแก๊สฮีเลียม หน้าที่ของแก๊สปกคลุมก็คือป้องกันมิให้อากาศภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อม ซึ่งจะเป็นผลเสียกับแนวเชื่อมได้

2.7.1 แก๊สอาร์กอน (Argon) ต้องบริสุทธิ์ถึง 99.99% และไม่มีความชื้นปนปกติจะมีอยู่ประมาณ 0.9% ในอากาศ

ข้อดีของแก๊สอาร์กอน

1. เป็นตัวนำความร้อนที่เลวทำให้การอาร์คเกิดความร้อนเข้มข้นสูงและเป็นบริเวณแคบ
2. ทำให้เปลวอาร์คเรียบสม่ำเสมอเหมาะกับการเชื่อมโลหะบาง
3. เหมาะกับงานที่มีออกไซด์เคลือบที่ผิวเช่น อลูมิเนียมและแมกนีเซียม
4. น้อยกว่าอากาศประมาณ 1.4 เท่า น้อยกว่าแก๊สฮีเลียม 10 เท่า ซึ่งเป็นผลดีต่อบริเวณเชื่อมที่ต้องปกคลุมเป็นบริเวณแคบ
5. ควบคุมบ่อหลอมละลายได้ง่ายเหมาะกับการเชื่อมทำถังและทำหม้อไอน้ำ

#### 2.7.2 แก๊สฮีเลียม (Helium)

แก๊สฮีเลียมเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเวลาเชื่อมความร้อนจะแผ่ขยายกว้างและแนวเชื่อมซึมลึกมากกว่าใช้แก๊สอาร์กอน ความร้อนจะสูงเนื่องจากแก๊สฮีเลียมต้องใช้แรงเคลื่อนสูงจึงมีพลังงานมากใช้มากกว่าแก๊สอาร์กอน 2-3 เท่า เหมาะกับการเชื่อมแบบอัตโนมัติไม่เกิดรูพรุนแนวเชื่อมมี Heat Affected Zone แคบ

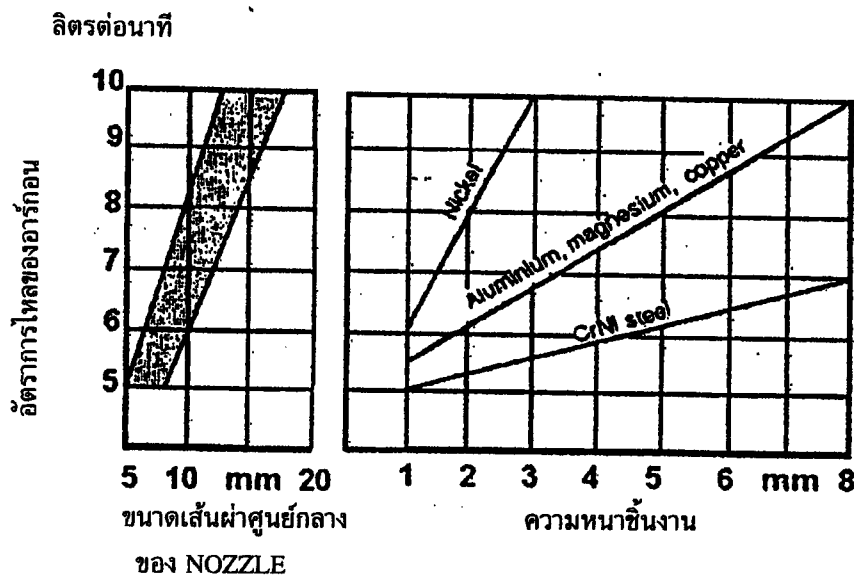
ในการเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาหรืองานที่ต้องการความเร็วสูงควรใช้แก๊สผสมระหว่างฮีเลียมกับแก๊สอาร์กอนในอัตราส่วนผสม 2:1 เพื่อแก้ปัญหาของการเปลี่ยนแปลงระยะอาร์คและลดรูพรุนในแนวเชื่อมด้วย

ตารางที่ 2.1 การพิจารณาเลือกใช้แก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อม TIG ให้เหมาะสมกับโลหะชนิดต่าง ๆ

โลหะเชื่อม	แก๊สปกคลุม	ผลที่ได้
อลูมิเนียมผสม	1. อาร์กอน (ใช้ไฟ AC) 2. อาร์กอนผสมกับฮีเลียม (ใช้ไฟ AC) 3. ฮีเลียม (ใช้ไฟ AC)	- การอาร์คสม่ำเสมอ ปฏิบัติการทำความสะอาดดี - การอาร์คสม่ำเสมอน้อยกว่าการใช้อาร์กอนแต่ปฏิบัติการทำงานสะอาดดี สามารถเชื่อมได้ด้วยความเร็วสูง ชิมลึกมาก - การอาร์คสม่ำเสมอและสามารถเชื่อมได้ดีด้วยความเร็วสูงบนวัสดุงานที่ทำความสะอาดผิวด้วยเคมีมาแล้ว
อลูมิเนียม บรอนซ์ ทองเหลือง Cobalt-Base Alloys Cupro-Nickel	อาร์กอน อาร์กอน อาร์กอน อาร์กอน	- การชิมลึกน้อย (อลูมิเนียมบรอนซ์ต้องการชิมลึกน้อย) - การอาร์คสม่ำเสมอและมีควันน้อย - การอาร์คสม่ำเสมอและควบคุมบ่อหลอมละลายได้ง่าย - การอาร์คสม่ำเสมอและควบคุมบ่อหลอมละลายได้ง่าย
Deoxidized copper	1. ฮีเลียม 2. แก๊สผสมระหว่างฮีเลียม 75% กับอาร์กอน 25%	- ให้ความร้อนสูง จึงเป็นการชดเชยวัสดุงานเป็นตัวนำความร้อนที่ดี - การอาร์คสม่ำเสมอแต่ให้ความร้อนน้อยกว่าการใช้ฮีเลียมอย่างเดียวและยังสามารถเชื่อมโลหะงานที่บางกว่า 1.58 มม.
Inconel	1. อาร์กอน	- การอาร์คสม่ำเสมอและควบคุมบ่อหลอมละลายได้ง่าย
	2. ฮีเลียม	- ใช้ในการเชื่อมอัตโนมัติที่มีความเร็วเชื่อมสูง

โลหะเชื่อม	แก๊สปกคลุม	ผลที่ได้
เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	1. อาร์กอน 2. ฮีเลียม	- เหมาะสำหรับการเชื่อมที่ควบคุมด้วยมือ - ใช้ในการเชื่อมอัตโนมัติที่มีความเร็วเชื่อมสูงและซึมลึกกว่าการใช้แก๊สอาร์กอน
แมกนีเซียมผสม	อาร์กอน (ใช้ไฟ AC)	- การอาร์คสม่ำเสมอและมีปฏิกิริยาทำความสะอาดดี
Maraging Steel	อาร์กอน	- การอาร์คสม่ำเสมอและควบคุมบ่อหลอมละลายได้ง่าย
นิกเกิลผสม	1. อาร์กอน 2. ฮีเลียม	- การอาร์คสม่ำเสมอและควบคุมบ่อหลอมละลายได้ง่าย - ใช้ในการเชื่อมอัตโนมัติที่มีความเร็วสูง
*PH Stainless Steel	ฮีเลียม	- ให้การซึมลึกในการเชื่อมยึดได้สม่ำเสมอกว่าแก๊สอาร์กอน
ซิลิคอนบรอนซ์	อาร์กอน	- ในการเชื่อมซิลิคอนบรอนซ์นั้นจะต้องให้ความร้อนแก่ชิ้นงานและแนวเชื่อมต่ำและรวดเร็ว
เหล็กซิลิคอน	อาร์กอน	- การอาร์คสม่ำเสมอและควบคุมบ่อหลอมละลายได้ง่าย
Stainless Steel	ฮีเลียม	- ซึมลึกดีกว่าการใช้แก๊สอาร์กอน ให้การอาร์คที่ชัดเจนและสม่ำเสมอ
ไทเทเนียม	1. อาร์กอน 2. ฮีเลียม	- การอาร์คสม่ำเสมอและควบคุมบ่อหลอมละลายได้ง่าย - ใช้ในการเชื่อมแบบอัตโนมัติที่มีความเร็วในการเชื่อมสูง
* ในการใช้แก๊สอาร์กอนและอาร์กอนผสมกับฮีเลียมนั้นสามารถใช้ได้ผลเหมือนกัน		

## อัตราการไหลของแก๊สคลุม



## 2.8 การแบ่งประเภทของ Electrode

Electrode ที่ใช้ในการเชื่อม TIG แบ่งตามส่วนผสมดังนี้

2.8.1 ทังสเตนบริสุทธิ์ (Pure Tungsten) ใช้กับกระแสสลับ (AC) ใช้เชื่อมอลูมิเนียมและแมกนีเซียมละลาย Electrode ต้องมนกลม การอาร์คนุ่มสม่ำเสมอ ถ้าใช้กับกระแสตรงจะนำกระแสได้ต่ำกว่าทังสเตนผสมมีโอกาสละลายเข้ากับแนวเชื่อมเริ่มต้นอาร์คไม่ดีแต่ไม่ค่อยสกปรกขณะใช้งานคาดโค๊ดสีเขียว

2.8.2 ทอริเอตเตททังสเตน (Thoriated Tungsten) ถ้าผสมทอริียม (Thorium) 2.2% จะทำให้อิเลคตรอนแตกตัวดีเริ่มอาร์คดี นำไฟฟ้าได้สูงเมื่อเพิ่มทอริียม 1-2% ค่าการเป็นตัวนำสูงถึง 50% ควรใช้กับกระแสตรงปลายแท่ง Electrode ต้องแหลมเรียวใช้นานไปปลายจะมนกลม Electrode ทังสเตนทอริเอตเตทชนิด 2% มีโค๊ดคาดสีแดง ถ้า 1% มีโค๊ดคาดสีเหลือง

2.8.3 ทังสเตนผสม (EWTH-3) เป็น Electrode ผสมระหว่างทังสเตนบริสุทธิ์กับทอริเอตเตทเข้าด้วยกัน โดยทังสเตนทอริเอตเตทจะรวมเข้าเป็น  $\frac{1}{4}$  ของพื้นที่หน้าตัด Electrode ตลอดแนวยาวของแท่ง ซึ่งในขณะที่เชื่อมจะรักษารูปร่างปลายให้มนกลมได้สม่ำเสมอเริ่มต้นอาร์คดี สามารถเชื่อมอลูมิเนียมและแมกนีเซียมด้วยกระแสสลับ(AC) ได้ดีและยังเชื่อมด้วยกระแสตรง(DC) ได้ด้วยโค๊ดคาดสีน้ำเงิน

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของแท่งทั้งสแตน  
(AWS A5. 12-69)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาตรฐาน(มม.)	ขนาดความเผื่อของเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ขนาดความยาวของลวดตามมาตรฐาน (มม.)	ขนาดความเผื่อของความยาว (มม.)
0.254	$\pm 0.025$	76.2, 152.4, 177.8	$\pm 4.23$
0.508	$\pm 0.050$	304.8, 457.2, 609.6	$\pm 2.38$
1.016, 4.23, 2.38	$\pm 0.076$		
3.17, 4.76, 6.35			

#### หมายเหตุ

สำหรับแท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.254 มม. มีจำหน่ายเป็นม้วน

2.8.4 เซอร์โคเนียมทั้งสแตน (Zirconium Tungsten) เป็น Electrode ทั้งสแตนที่มีส่วนผสมของเซอร์โคเนียม 0.15 - 0.40% ซึ่งเหมาะแก่การเชื่อมด้วยกระแสไฟสลับ เพราะว่า Electrode ทั้งสแตนชนิดนี้มีความต้านทานต่อการเกิดสิ่งสกปรก (contamination) สูง ทั้งยังให้การเริ่มต้นอาร์คที่ดีอีกด้วย ส่วนการแต่งปลายของ Electrode เชื่อมเป็นลักษณะปลายมนเหมือนกับ Electrode ทั้งสแตนบริสุทธิ์ และเหมาะกับงานที่ต้องการคุณภาพสูง ซึ่งจะทำให้การอาร์คที่สม่ำเสมอในการเป็นตัวนำกระแสจะเท่ากับหรือมากกว่า Electrode ทั้งสแตนเทอริเอทที่ผสมเล็กน้อย โค้ดสีของ Electrode ทั้งสแตนชนิดเซอร์โคเนียมเป็นสีน้ำตาล

#### ชนิดของอิเล็กโทรด

โลหะใช้ทำอิเล็กโทรด.....ทั้งสแตน (Tungsten, W = Wulfram)

- จุดหลอมเหลวสูงกว่าโลหะอื่น (3140 °C)
- จุดเดือดสูงมาก (5000 °C)
- แผ่ประจุอิเล็กตรอนได้ง่าย (Good Electron Emission)



ตารางที่ 2.3 ชนิดของอีเล็กโทรด

ส่วนผสมของแท่งทั้งสแตน	มาตรฐาน	สัญลักษณ์สี	การใช้งาน
ทั้งสแตนบริสุทธิ์	EWP	เขียว	ความสามารถในการนำกระแสต่ำกว่า อิเล็กโทรดอื่น ๆ ใช้เชื่อม Al, Mg เป็นหลัก เนื่องจากปลายจะมนเรียบ ให้อาร์คเสถียร อาจเชื่อม DC ได้แต่ การจุดอาร์คไม่ดี และอาร์คไม่เสถียร อย่าง EWTh, EWL <sub>a</sub> , EWCe
เจือทอเรียมออกไซด์ 0.9 - 1.2 ThO <sub>2</sub> 1.8 - 2.2 ThO <sub>2</sub>  2.8 - 3.2 ThO <sub>2</sub> 3.8 - 4.2 ThO <sub>2</sub>	EWTh 1 EWTh 2  EWTh 3 EWTh 4	เหลือง แดง  ม่วงแดง ส้ม	ทอเรียมออกไซด์ทำให้การแผ่ความร้อนและประจุติจิงจุดอาร์คได้ง่าย สามารถนำกระแสสูงกว่า EWP ถึง 20% อายุการใช้งานดี เจือปนในบ่อ หลอมละลายได้ยากกว่า จุดอาร์คได้ดีกว่า EWP และ EWZr เหมาะกับการเชื่อมเหล็กกล้าด้วย DCEN ไม่เหมาะกับการเชื่อม AC เพราะไม่คงความมน
เจือเซอร์โคเนียออกไซด์ 0.3 - 0.5 ZrO <sub>2</sub> 0.7 - 0.9 ZrO <sub>2</sub>	EWZr - 1 EWZr - 2	น้ำตาล ขาว	คุณสมบัติใช้งานอยู่ระหว่าง EWP จึง EWTh เหมาะกับการเชื่อม AC อาร์คเรียบและปลายมนดีเจือปนในบ่อ หลอมละลายยากกว่า EWP
เจือแลนแทนออกไซด์ 0.9 - 1.2 LaO <sub>2</sub>	EWL <sub>a</sub> - 1	ดำ	อายุการใช้งานยาวกว่า EWTh เหมาะกับการเชื่อมและตัดด้วยพลาสมา ไม่แผ่รังสี
เจือซีเรียมออกไซด์ 1.0 - CeO <sub>2</sub>  2.0 - CeO <sub>2</sub>	EWCe - 1  EWCe - 2	ชมพู  เทา	ใช้งานได้ใกล้เคียงกับ EWTh ได้ทั้ง AC, DC แต่ไม่แผ่รังสี อายุใช้งานดีกว่า EWP
เจือโลหะอื่น ๆ	EWG	-	ระบุโดยผู้ผลิต เพื่อประโยชน์ต่อการใช้งาน

ตารางที่ 2.4 ขนาดของอิเล็กโทรดและความสามารถในการทำกระแสเชื่อม

ขนาดของอิเล็กโทรด (มม.)	DC (แอมป์)	AC / คลื่น sine	
		อิเล็กโทรดทั้งสแตน บริสุทธิ (แอมป์)	อิเล็กโทรดทั้งสแตนเจอ 2% ทอเรียบ
1.0	15 – 80	10 – 60	15 – 90
1.6	70 – 150	50 – 100	70 – 150
2.4	150 – 250	100 – 160	90 – 220
3.2	250 – 400	150 – 210	140 – 300
4.0	400 – 500	200 – 275	200 – 400
4.8	500 – 800	250 – 350	250 – 500
6.4	800 – 1100	300 – 450	400 – 630

#### ระยะยื่นของปลายอิเล็กโทรดทั้งสแตน (Electrode Extension)

เป็นระยะที่ Electrode ทั้งสแตนยื่นออกจาก nozzle โดยทั่วไปเท่ากับ 1-2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสแตน ถ้า electrode extension ยาวเกินไป จะทำให้ปลายของ Electrode สัมผัสกับบ่อหลอมละลายหรือลวดเชื่อมเติมได้ง่าย ๆ และต้องใช้แก๊สปกคลุมมากกว่าปกติ ถ้าระยะ electrode extension สั้น จะไม่ทำให้ปลาย Electrode ไม่จุ่มในบ่อหลอมละลายแต่จะมีผลเสียต่อ nozzle และการเชื่อมต้องใช้ช่วงเชื่อมที่มีความชำนาญ เพราะมองเห็นบ่อหลอมละลายได้ยาก

การลับและสภาพของปลายแท่งทั้งสแตนหลังจากการใช้งาน

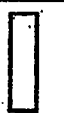
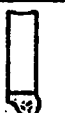

- เมื่อใช้งานด้วยกระแสเชื่อม DC

กระแสเชื่อม	ต่ำไป	สูงไป	พอดี
DC = (-)			

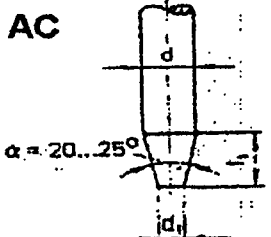
แบบนี้คือแค่เชื่อมด้วย  
กระแสสูง เชื่อมราคา  
หน้า และเชื่อมจุด

DC $\alpha = 20 \dots 25$	d	l
	1	2.6
	1.6	4.0
	2.4	6.0
	3.2	8.0
	4	10.0

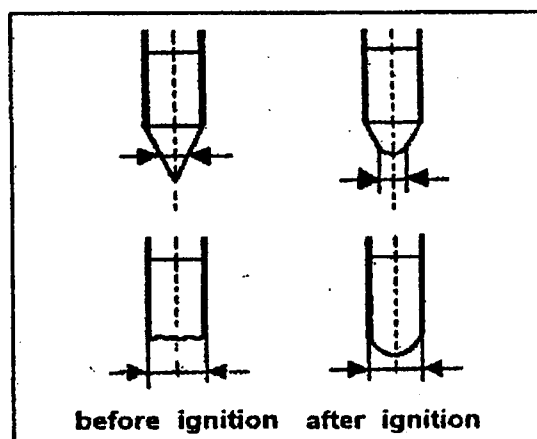
- เมื่อใช้งานด้วยกระแสเชื่อม AC

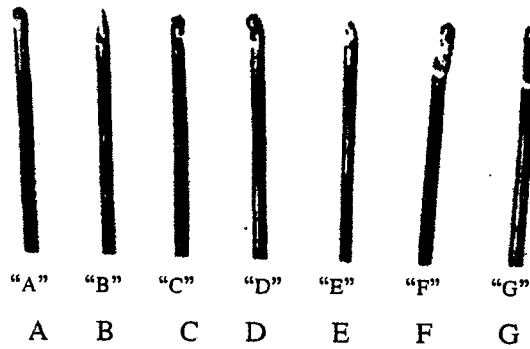
กระแส เชื่อม	ต่ำไป	สูงไป	พอดี
AC ~			

ดี สำหรับเชื่อม  
ยึดได้ และเชื่อม  
แผ่นบาง

<b>AC</b> 	<b>d</b>	<b>d</b>	<b>l<sub>1</sub></b>
	1	0.5	1.2
	1.6	0.8	2.0
	2.4	1.2	3.0
	3.2	1.6	4.0
	4	2	5

- การกลับปลายแท่งทังสเทนเพื่อการเชื่อมด้วย AC โดยเครื่องเชื่อม (Ball Forming by Machine)





รูปที่ 2.12 ลักษณะต่าง ๆ ของลวดทั้งสแตน

ในรูปแสดงลักษณะต่าง ๆ ของแท่งทั้งสแตนขนาด 3.17 มม. พร้อมทั้งอธิบายสาเหตุ  
แท่งทั้งสแตน A เป็นทั้งสแตนบริสุทธิ์ใช้กับกระแสไฟสลับในการเชื่อมอลูมิเนียมมีลักษณะ  
ปลายมนเป็นมุมที่เหมาะสม

แท่งทั้งสแตน B เป็นทอริเอตเตททั้งสแตน 2% ลับปลายเรียว ใช้กับกระแสไฟตรงขั้วลบ

แท่งทั้งสแตน C คือลักษณะของแท่งทอริเอตเตททั้งสแตน 2% ที่ใช้กับกระแสไฟสลับใน  
การเชื่อมอลูมิเนียม จะปรากฏเห็นเม็ดกลมเล็ก ๆ จำนวนมากที่ปลาย แทนที่จะมีปลายมนเป็นมัน  
เหมือนกับใช้ทั้งสแตนบริสุทธิ์

แท่งทั้งสแตน D เป็นแท่งทั้งสแตนบริสุทธิ์ที่ใช้กับกระแสไฟสลับซึ่งมีขนาดกระแสไฟสูง  
เกินกว่าความสามารถที่จะรับได้ทำให้ปลายละลายขณะเชื่อมและพร้อมจะหยดสู่บ่อหลอมละลาย

แท่งทั้งสแตน E คือแท่งทั้งสแตนบริสุทธิ์ที่ลัปลายเรียวแหลมและใช้กับกระแสไฟตรงขั้ว  
ลบจะสังเกตเห็นปลายแหลมละลายกลายเป็นปลายมน ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของทั้งสแตนชนิด  
นี้ ดังนั้นทั้งสแตนบริสุทธิ์จึงไม่นิยมลัปลายให้แหลมในการใช้งาน

แท่งทั้งสแตน F แสดงลักษณะการเกิด Contamination โดยแท่งทั้งสแตนไปสัมผัสกับลวด  
เชื่อม และเมื่อเป็นเช่นนี้จำเป็นจะต้องหักส่วนที่เกิดสกปรกนี้ทิ้งไป แล้วลัปลายใหม่ตามต้องการ

แท่งทั้งสแตน G เป็นลักษณะที่ได้รับการปกคลุมจากแก๊สเฉื่อยหลังการอาร์คไม่เพียงพอ  
จะสังเกตเห็นผิวสีดำอันเนื่องมาจากการเกิดออกไซด์ เนื่องจากบรรยากาศภายนอกเข้ามาทำ  
ปฏิกิริยาก่อนเย็นตัว หากยังใช้เชื่อมต่อไปอีกจะเป็นเหตุให้ผิวออกไซด์แตกตัวหลุดไปยังบ่อหลอม  
ละลาย

## 2.9 ลวดเชื่อมเติม (Filler Metal)

การเลือกลวดเชื่อมเติมสำหรับการเชื่อม TIG ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงาน คุณสมบัติเชิงกล กายภาพ การออกแบบรอยต่อและคุณภาพผิวสำเร็จ การเลือกลวดเชื่อมเติมควรให้มีส่วนผสมเหมือนหรือเหมาะสมกับวัสดุที่เป็นชิ้นงาน ถ้าส่วนผสมของลวดเชื่อมเติมไม่เหมือนกับงานเชื่อมจะทำให้แนวเชื่อมไม่แข็งแรงหรืออาจแตกร้าวได้ง่ายและสามารถนำเอาเศษที่ตัดออกจากวัสดุชิ้นงานมาใช้แทนลวดเชื่อมเติมก็ได้ ลวดเชื่อมเติมที่ใช้กับกระบวนการเชื่อมด้วยมือหรืออัตโนมัติ จะมีทั้งที่เป็นเส้นตรงและขดเป็นม้วน.

การเติมลวดเชื่อมนั้นจะขึ้นกับการเชื่อมงานที่หนากว่า 1.3 มม. หรืองานที่ต้องการแนวเชื่อมหนุนและยังเป็นการป้องกันการแตกร้าวของแนวเชื่อมอีกด้วย

### เหล็กกล้าเหนียว

DIN 8559	SG1.....	AWS A 5.18 ER 70 S-3
DIN 8559	SG2.....	AWS A 5.18 ER 70 S-6

### เหล็กกล้าสเตนเลส

DIN 8556	SG x 2 CrNi 19 9.....	AWS A 5.9 ER 308 L
DIN 8556	SG x 2 CrNi 24 12.....	AWS A 5.9 ER 309 L
DIN 8556	SG x 2 CrNiMo 19 12.....	AWS A 5.9 ER 316 L
DIN 8556	SG x 10 CrNi 30 9.....	AWS A 5.9 ER 312

### อลูมิเนียม

DIN 1732	S-Al 99 5.....	AWS A 5.10 ER 1100
DIN 1732	S-Al Si 12.....	AWS A 5.10 ER 4047

### นิกเกิล

DIN 1736	SG NiTi 4.....	AWS A 5.14 ER Ni-1
----------	----------------	--------------------

### ทองแดง

DIN 1733	S-CuSn 6.....	AWS A 5.7 ER CuSn-A
----------	---------------	---------------------

## 2.10 กระแสเชื่อม (Welding Current)

กระแสเชื่อมเป็นตัวควบคุมการซึมลึก ความเร็วของการเชื่อม อัตราการเติมสวดเชื่อมและคุณภาพของแนวเชื่อม

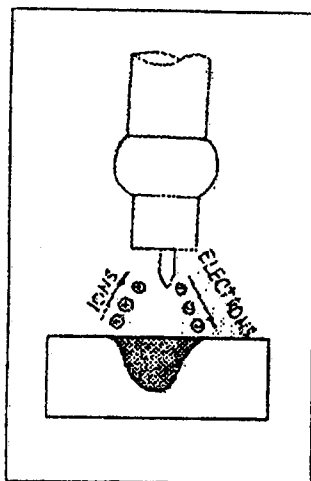
กระแสเชื่อม TIG แบบพื้นฐานมีอยู่ 3 ชนิดคือ

2.10.1 กระแสตรงต่อขั้วตรง (Direct current straight polarity) หรือเรียกย่อว่า “DCSP”

2.10.2 กระแสตรงต่อกลับขั้ว (Direct current reverse polarity) หรือเรียกย่อว่า “DCRP”

2.10.3 กระแสไฟสลับ (Alternating current) หรือเรียกย่อว่า “AC”

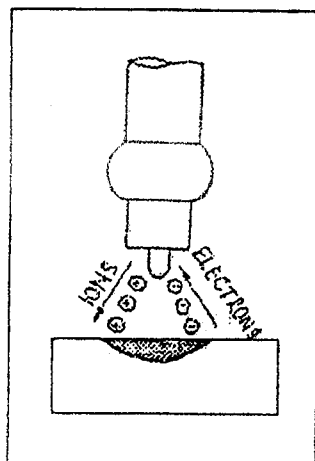
ชนิดของกระแสเชื่อมกับการใช้งาน



### DCSP

การไล่ผิวออกไซด์.....ไม่มี  
ความร้อนจากอาร์ค.....70% ที่ขึ้นงาน 30% ที่อิเล็กโทรด  
แนวเชื่อม.....แคบ ซึมลึกมาก  
ขีดจำกัดของกระแสเชื่อม.....อิเล็กโทรด 3.2 มม. 400 A  
ชนิดเนื้อโลหะขึ้นงาน.....ทุกชนิด ยกเว้น Al.Mg

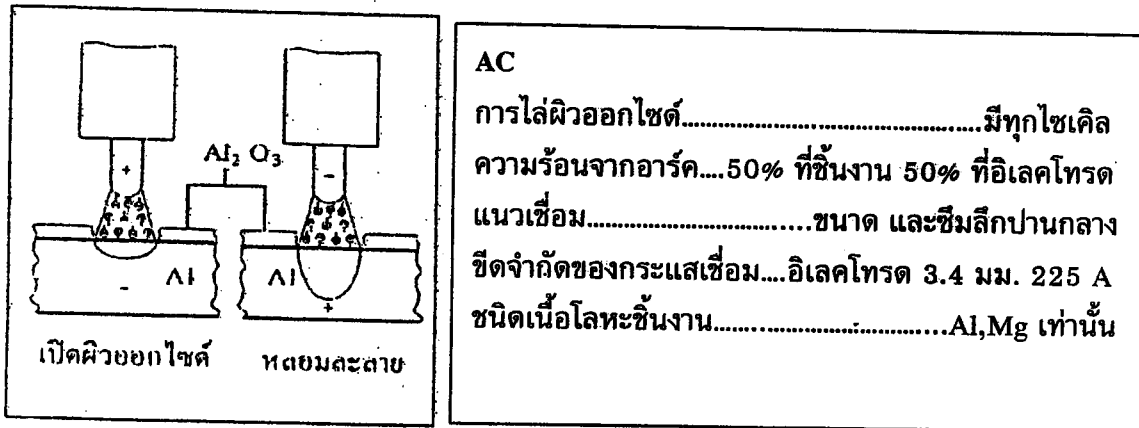
รูปที่ 2.13 การเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าตรงขั้วตรงเชื่อมโลหะ



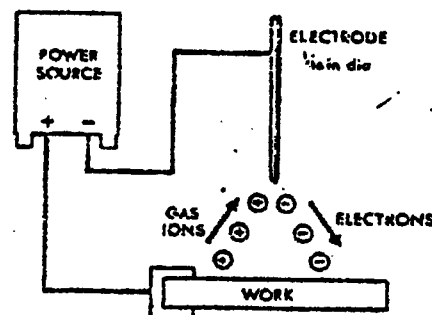
### DCRP

การไล่ผิวออกไซด์.....มี  
ความร้อนจากอาร์ค.....30% ที่ขึ้นงาน 70% ที่อิเล็กโทรด  
แนวเชื่อม.....กว้าง ซึมลึกลด  
ขีดจำกัดของกระแสเชื่อม.....อิเล็กโทรด 6.4 มม. 120 A  
ชนิดเนื้อโลหะขึ้นงาน.....ไม่เหมาะกับการใช้งาน

รูปที่ 2.14 การใช้กระแสไฟตรงกลับขั้วเชื่อมโลหะ



รูปที่ 2.15 การใช้กระแสไฟสลับเชื่อมโลหะ



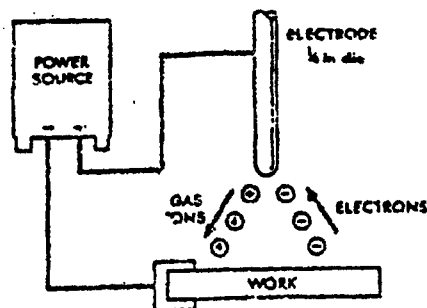
รูปที่ 2.16 แสดงวงจรไฟฟ้ากระแสไฟตรงขั้วตรง

### กระแสไฟตรงต่อขั้วตรง (DCSP)

กระแสไฟเชื่อมชนิด DCSP เป็นที่นิยมใช้ในการเชื่อม TIG มาก ซึ่งให้ผลดีแก่การเชื่อมโลหะทั่วไปและโลหะผสม ยกเว้นอลูมิเนียมและแมกนีเซียม

การเชื่อมแบบ DCSP นั้นลวดเชื่อมจะต่อเข้ากับขั้วลบ ส่วนชิ้นงานเชื่อมจะต่อเข้ากับขั้วบวก ดังนั้นอิเล็กตรอนจะไหลจากลวดเชื่อมสู่ชิ้นงาน ความร้อนเกิดขึ้นบนขั้วบวก (ชิ้นงาน) ประมาณ 70% ของความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมด และความร้อนที่เกิดขึ้นกับอิเล็กโทรดจึงมีน้อย ทำให้ลวดเชื่อมสามารถใช้กับกระแสเชื่อมได้สูง และลดการกัดกร่อนของเปลวอาร์คและความร้อน ซึ่งเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของอิเล็กโทรด

การเชื่อมด้วยไฟ DCSP จะให้แนวเชื่อมที่แคบและซึมลึกสูง ไม่เหมาะสมกับการเชื่อมโลหะบางและไม่เกิดปฏิกิริยาทำความสะอาด (กำจัดออกไซด์) ถ้าจะเชื่อมอลูมิเนียมด้วยไฟ DCSP จะต้องใช้กลวิธีเชื่อมพิเศษโดยจะต้องทำความสะอาดผิวงานด้วยวิธีกลหรือเคมีอย่างดีก่อนเชื่อม



รูปที่ 2.17 แสดงวงจรไฟฟ้ากระแสไฟตรงกลับขั้ว

การเชื่อมด้วยกระแสไฟ DCRP ความร้อนส่วนมากจะอยู่ที่อิเล็กโทรดส่วนความร้อนน้อยจะอยู่ที่ชิ้นงาน บางทีอาจใช้กับแผ่นอลูมิเนียมหนาได้ไม่เกิน 0.64 มิลลิเมตร

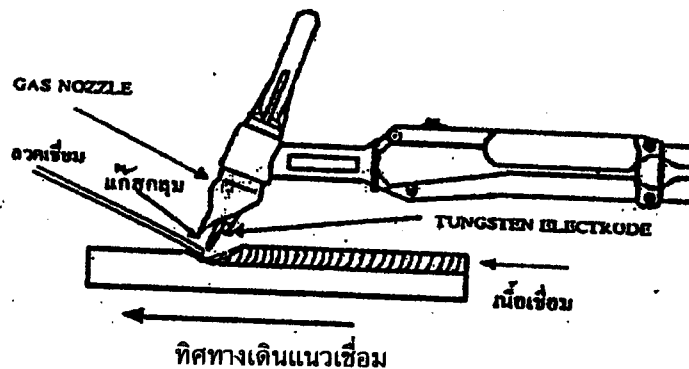


รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะคลื่นกระแสไฟฟ้า

กระแสเชื่อมสลับเป็นการรวมเอากระแสไฟ DCSP กับกระแสไฟ DCRP โดยไนโซเคิลจะเป็น DCSP ครึ่งหนึ่งและ DCRP ครึ่งหนึ่ง ดังนั้นการกระทำของอิเล็กตรอนและไอออนบวกของแก๊สจะกระทำกับชิ้นงานและลวดเชื่อมในลักษณะที่สลับกันอย่างต่อเนื่อง



### 2.11 การอาร์ค (Arc)



รูปที่ 2.19 แสดงการอาร์คขึ้นงาน

อาร์ค เกิดตรงบริเวณระหว่างปลายแท่งทังสเตนกับชิ้นงาน ภายใต้การคลุมของแก๊สเฉื่อย แก๊สเฉื่อย ทำหน้าที่ดังนี้

- ป้องกันการเกิดออกซิเดชัน และไนไตรต์ที่แท่งทังสเตนและชิ้นงาน
- ทำให้อาร์คเสถียร
- ช่วยไม่ให้เกิดจุดบกพร่องในแนวเชื่อม
- มีผลต่ออัตราการหลอมละลาย และการซึมลึก
- ระบายความร้อนให้กับหัวเชื่อม

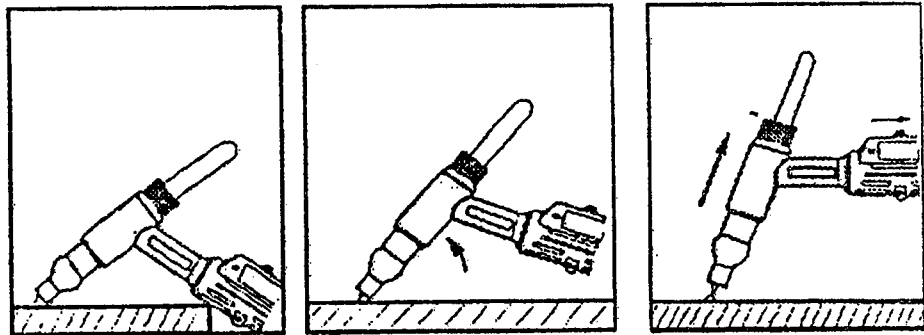
แท่งทังสเตนเป็นอิเล็กโทรดที่ไม่หลอมละลาย (Non Consumable Electrode) แต่ทำหน้าที่อาร์คเพื่อหลอมละลายชิ้นงานและลวดเชื่อม (โลหะเติม)

การเชื่อมชิ้นงาน 2 ชิ้น ให้ติดกันทำได้โดยใช้หรือไม่ใช้โลหะเติม (Filler Metal) ก็ได้

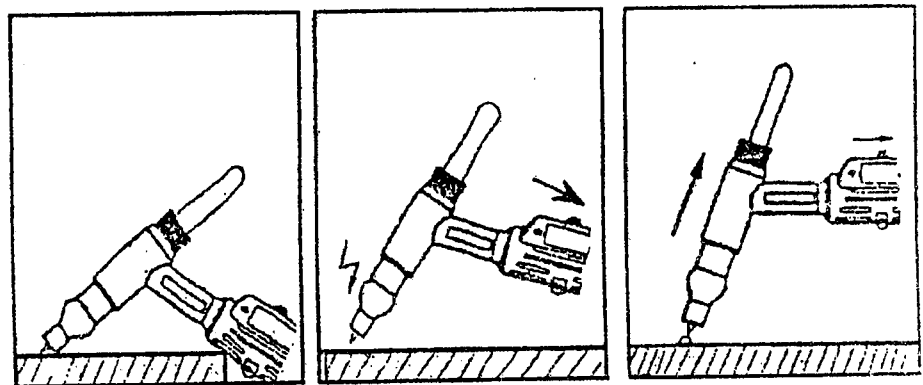
โลหะเติมหรือลวดเชื่อมทิก มี 2 แบบ คือ :-

- แบบแท่ง (Rod) สำหรับการเชื่อมด้วยมือ
- แบบม้วน (Wire) สำหรับการเชื่อมอัตโนมัติ

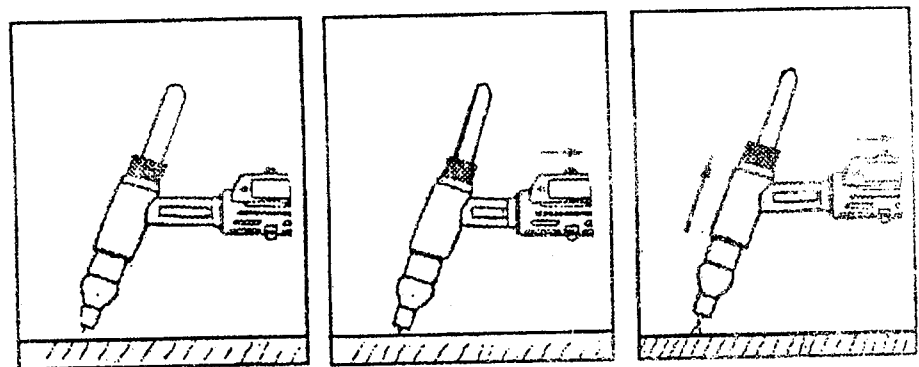
2.11.1 การจุดอาร์ค (Arc Ignition) ด้วยวิธีต่าง ๆ ตามรูปที่ 2.20, 2.21 และ 2.22



รูปที่ 2.20 การอาร์คด้วยวิธีขีด, ขีดตวัด, เชื้อ (Scratching)



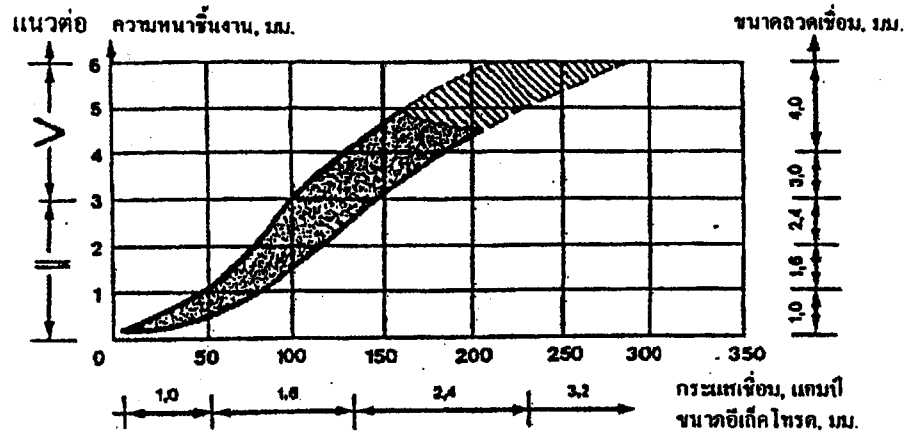
รูปที่ 2.21 การอาร์คโดยใช้ความถี่สูง (High Frequency, HF)



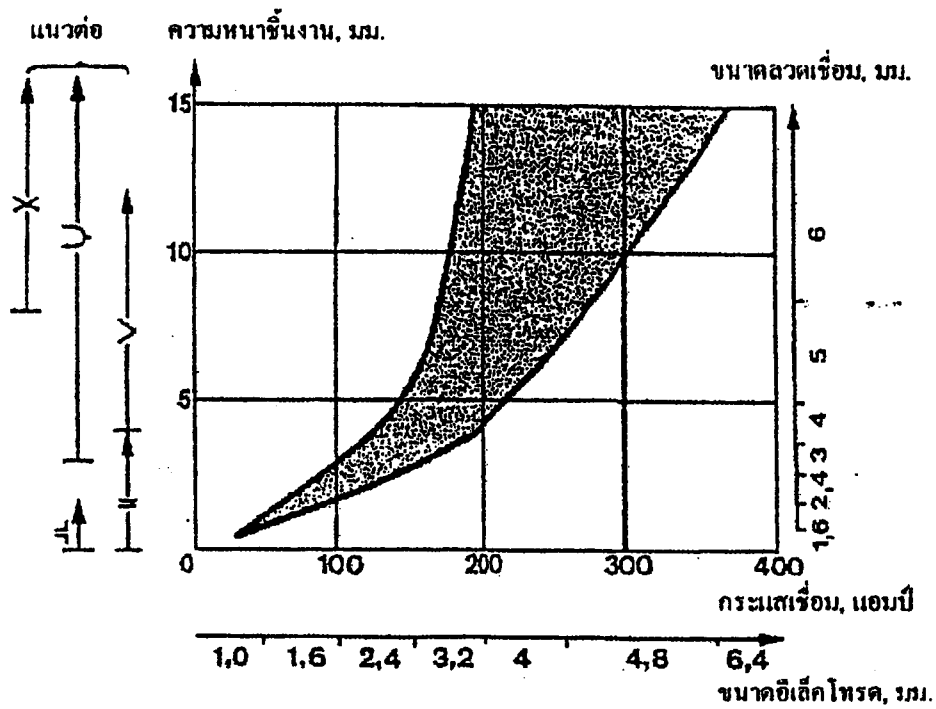
รูปที่ 2.22 การอาร์คโดยวิธีแตะยก (Life Arc)

### 2.11.2 ข้อแนะนำบางประการเกี่ยวกับการเชื่อมทิก

- การเชื่อมเหล็กกล้าสเตนเลส (Cr/Ni) ทำชานนอน



- การเชื่อมอลูมิเนียม (ด้านเดียว)



## 2.12 ความสมดุลและไม่สมดุลของคลื่น (Balance and Unbalanced Wave)

การเชื่อมด้วยกระแสสลับอาจใช้ได้กับเครื่องที่มีคลื่นที่สมดุลและไม่สมดุลโดยมีข้อแตกต่างกันดังต่อไปนี้ คือ

### ข้อดีของการเชื่อมที่มีคลื่นสมดุล (Balance Wave)

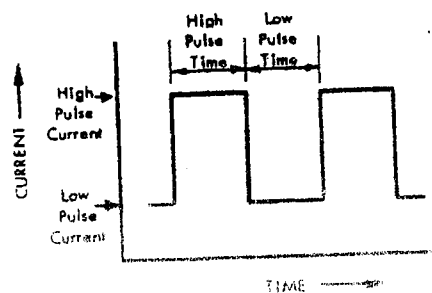
1. ช่วงไซเคิลบวกมีแรงดันไฟฟ้าสูง ปฏิกริยาทำความสะอาดดีมาก
2. เชื่อมได้นิ่มนวล การอาร์คสม่ำเสมอเนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้าขณะวงจรเปิดสูงกว่า
3. เหมาะกับการเชื่อมแบบอัตโนมัติ ที่ต้องการผลผลิตสูง

### ข้อดีของการเชื่อมที่มีคลื่นไม่สมดุล (Unbalance Wave)

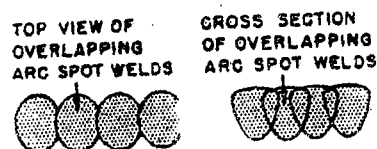
1. ใช้กระแสสูงได้เพราะช่วงไซเคิลบวกซึ่งมีอิทธิพลทำให้แท่งทั้งสแตนร้อนมีความสูงของคลื่นต่ำและมีช่วงเวลายาว
2. ชีมลึกมากกว่า เนื่องจากการละลายเกิดขึ้นในช่วงไซเคิลลบ
3. เครื่องเชื่อมราคาถูกกว่า

### 2.12.1 การเชื่อมด้วยกระแสเป็นช่วง (Pulsed Current Welding)

การเชื่อม TIG ที่มีการให้กระแสเชื่อมแบบ Pulsed จะมีการเปลี่ยนแปลงกระแสอยู่ 2 ระดับ คือ ระดับสูง (High Pulsed Current) และระดับต่ำ (Low Pulsed Current) แนวเชื่อมจะมีลักษณะเป็นจุดวางซ้อนทับกัน ซึ่งใช้สวิตซ์การเชื่อมแบบอัตโนมัติของ Pulse ควบคุมเวลาและกระแสแต่ละช่วงได้จุดเชื่อมแต่ละจุดเกิดจากช่วงที่กระแสที่สูงขึ้นซึ่งจุดเชื่อมนี้จะเกิดความร้อนและการซึมลึกและเมื่อกระแสลดสู่ระดับต่ำแนวเชื่อมจะเย็นและแข็งตัว การเชื่อมจะเกิดขึ้นสลับกันไปตามแนวยาวของแนวเชื่อม ดังรูปที่ 2.23, 2.24



รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะแนวเชื่อมกับเวลาของระบบ Pulse



รูปที่ 2.24 แสดงลักษณะแนวเชื่อมแบบ Pulse

การเชื่อมด้วยระบบ Pulse จะต้องเข้าใจองค์ประกอบ 4 ประการดังนี้

1. “High Pulse Current” หรือ “Pulse Current” คือช่วงของกระแสที่สูงที่สุดซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้ความร้อนจากการอาร์คสูงสุด
2. “Low Pulse Current” หรือ “Background Current” คือช่วงของกระแสที่ต่ำสุดและเป็นช่วงที่ให้ความร้อนต่ำสุด
3. “High Pulse Time” เป็นระยะเวลาที่เครื่องเชื่อมจ่ายกระแสช่วงสูงสุด (High Current Pulse)
4. “Low Pulse Time” เป็นระยะเวลาที่เครื่องเชื่อมจ่ายกระแสช่วงต่ำสุด (Low Current Pulse)

#### 2.12.2 การปรับกระแสและเวลาสำหรับการเชื่อมแบบ Pulse

การปรับ High Pulse Current จะใช้สูงกว่ากระแสปกติเพียงเล็กน้อย ส่วน Low Pulse Current ปรับต่ำกว่า High Pulse Current 25% การปรับช่วงเวลาดังกล่าวที่ High Pulse Time โดยคำนึงถึงความหนาของชิ้นงานบ่อหลอมละลายและการซึมลึก ส่วน Low Pulse Time จะตั้งต่ำกว่า High เสมอ

ข้อดีของการเชื่อมแบบ Pulse

1. งานเสียรูปและการบิดงอมีน้อย
2. ควบคุมบ่อหลอมละลายและการหลอมละลายของแนวเชื่อมได้
3. ควบคุมการซึมลึกได้
4. เชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม
5. แนวเชื่อมมีคุณภาพสูง
6. เชื่อมท่อและแนวเชื่อมซิกแซกได้ดี
7. มี Heat-affected zone แคบ

#### 2.13 การเชื่อมจุดโดยเครื่องเชื่อมแบบ TIG

เป็นการเชื่อมด้วยเครื่อง TIG โดยเชื่อมแผ่นโลหะเพียงด้านเดียวก็สามารถทำให้แผ่นชิ้นงานติดกันได้ เชื่อมงานที่มีลักษณะเป็นลอนเหมือนสังกะสีได้ เช่น โครงสร้างของอากาศยาน ตัวถังรถยนต์ และโครงสร้างที่มีผนังเป็นแบบสองชั้น ซึ่งระบบการเชื่อมมีทั้งแบบเชื่อมด้วยมือและแบบอัตโนมัติ

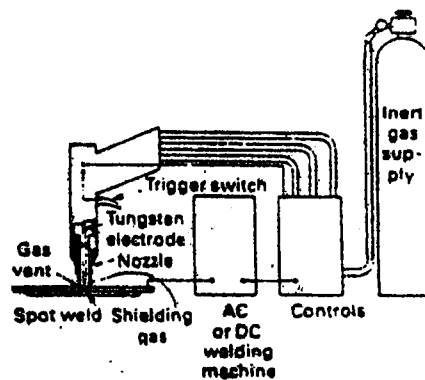
##### 2.13.1 อุปกรณ์การเชื่อมจุด

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมยึดแบบจุดของการเชื่อม TIG มีดังต่อไปนี้คือ

1. ตัวตั้งเวลา (Timer) มีทั้งในและนอกเครื่องเชื่อมก็ได้
2. หัวเชื่อมแบบจุดโดยเฉพาะ (Torch) มีทั้ง Air cooled และ Water cooled

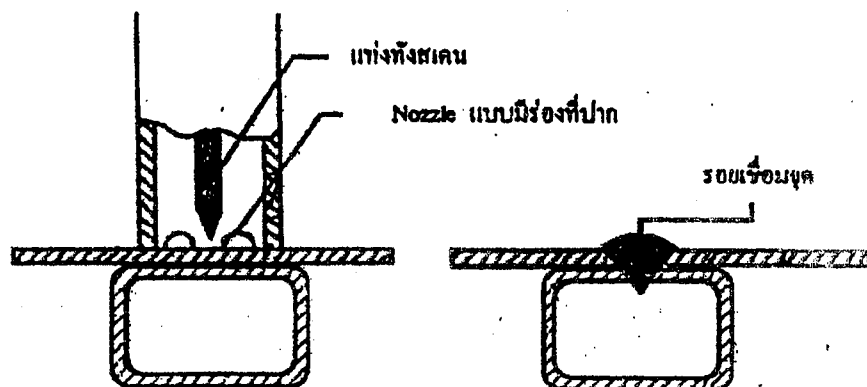
3. อุปกรณ์ผลิตความถี่สูงใช้ขณะเริ่มการอาร์ค
4. อุปกรณ์ควบคุมการไหลของแก๊ส

การเชื่อมต้องใช้ความหนาแน่นของกระแสสูง ถ้าระยะอาร์คยาวจะเกิด Undercut บนรอยเชื่อม แต่ถ้าระยะอาร์คสั้นจะทำให้ปลายแท่ง Electrode ติดกับแผ่นงานและปลายสกปรกได้ง่าย สามารถควบคุมการเชื่อมได้ด้วยการปรับกระแสและเวลาเชื่อมถ้าจำนวนกระแสเวลาน้อย รอยเชื่อมจะซึมลึกน้อยและขนาดเล็ก ถ้าเพิ่มกระแสเวลาน้อยจะซึมลึกมากและขนาดโตขึ้น ดังรูปอุปกรณ์เชื่อมจุด รูปที่ 2.25, 2.26



รูปที่ 2.25 อุปกรณ์เชื่อมจุด

nozzle แบบมีร่องที่ปาก



รูปที่ 2.26 แสดงการเชื่อมยึดจุด

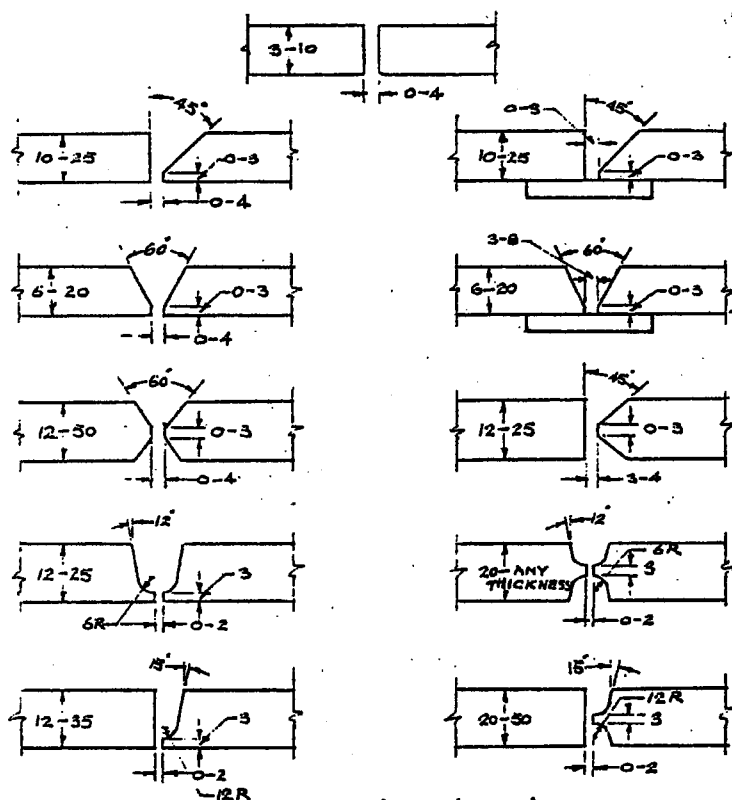
## 2.14 รอยต่อของการเชื่อม TIG

การออกแบบรอยต่อของการเชื่อมแบบ TIG ก็เหมือนกับการออกแบบรอยต่อทั่ว ๆ ไปของการเชื่อม ซึ่งจะต้องคำนึงถึงความหนาของชิ้นงานและระยะห่างระหว่างชิ้นงานสำคัญ ดังรูปที่ 2.27

การพิจารณาเลือกรอยต่อชิ้นงานเชื่อมชนิดใดก็ตาม หรือเว้นห่างควรพิจารณาถึงองค์ประกอบต่อไปนี้

1. ความหนาของชิ้นงานโลหะที่จะเชื่อม
2. ชนิดของรอยต่อ
3. ความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม
4. ตำแหน่งของการเชื่อม
5. ชนิดและขนาดของลวดเชื่อม
6. ความสำคัญของรอยต่อ
7. คุณสมบัติพิเศษทางกล

สัดส่วนของร่องรอยต่อชิ้นงานเชื่อม

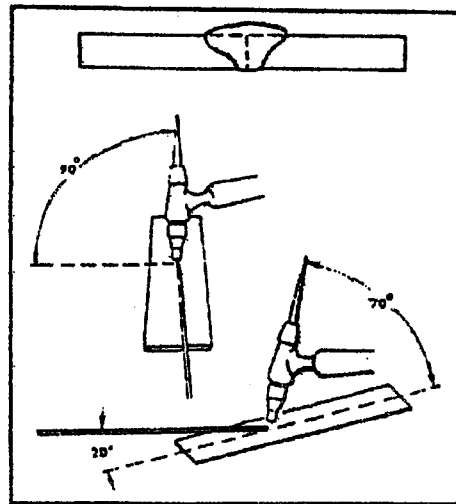


รูปที่ 2.27 สัดส่วนของร่องรอยต่อ (มิลลิเมตร)

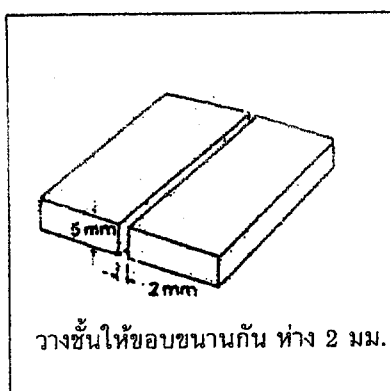
โดยทั่ว ๆ ไปรอยต่อของการเชื่อม มีดังนี้คือ

1. การเชื่อมต่อชน (Butt Joint)
2. การเชื่อมต่อเกย (Lap Joint)
3. การเชื่อมต่อมุม (Corner Joint)
4. การเชื่อมต่อฉาก (T Joint)
5. การเชื่อมแบบตัววี (V Joint)

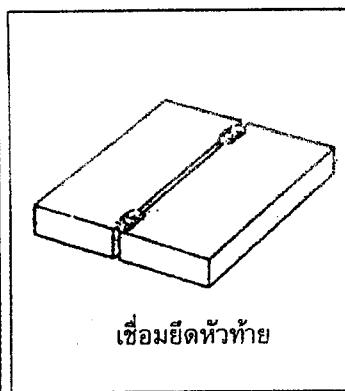
### 1. การเชื่อมต่อชน (Butt Joint)



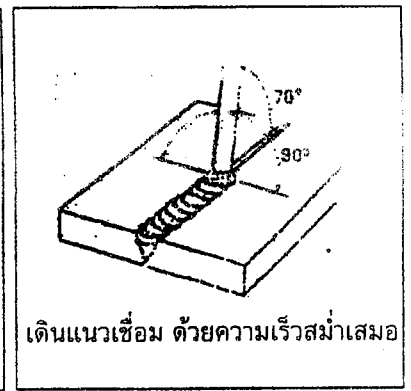
Square Edge Butt Joint



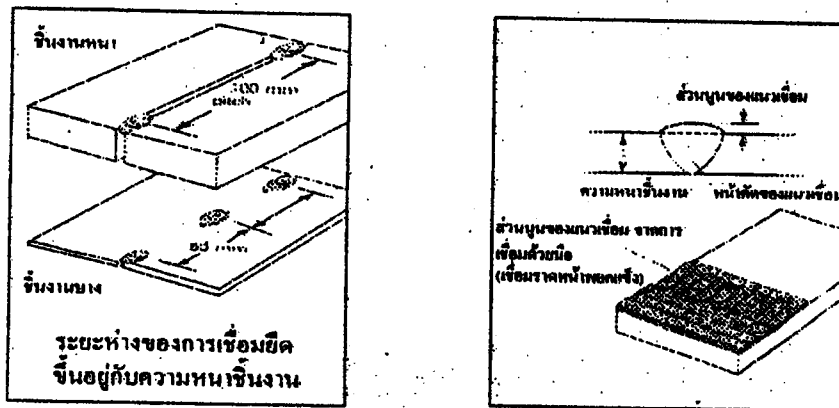
การเชื่อมยึด



ส่วนนูนของแนวเชื่อม (Reinforcement)

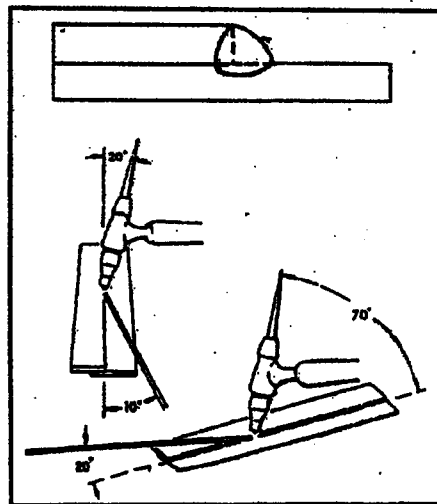




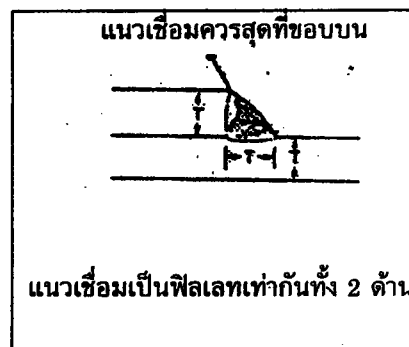


รูปที่ 2.28 แสดงการเชื่อมต่อชน

## 2. การเชื่อมต่อเกย (Lap Joint)

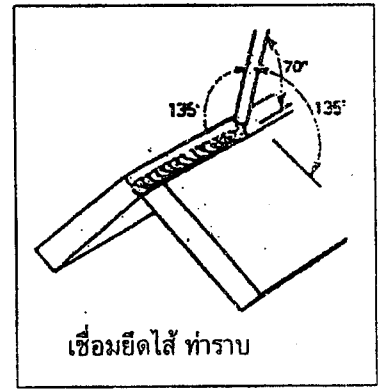
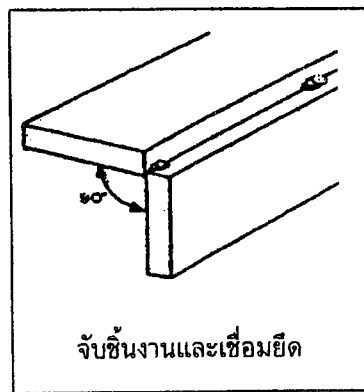
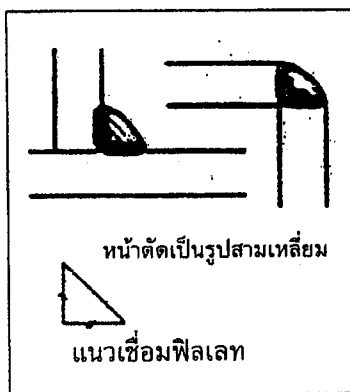
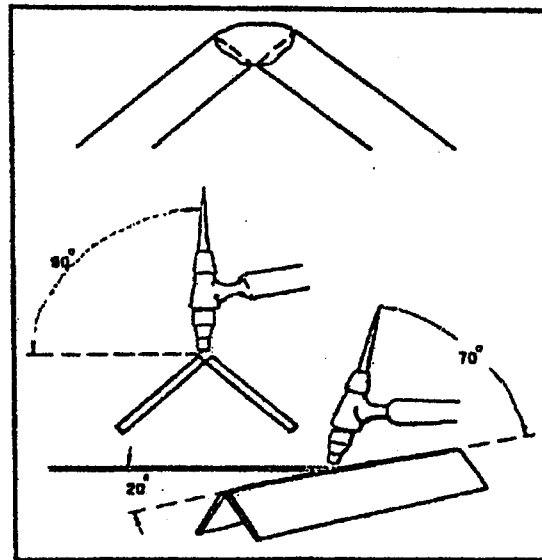


แนวเชื่อมเกย



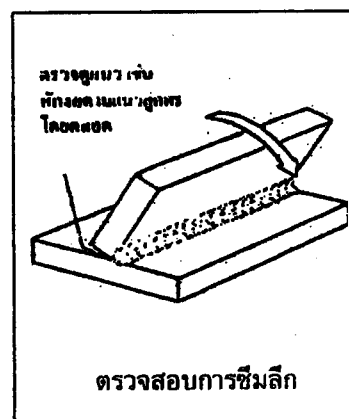
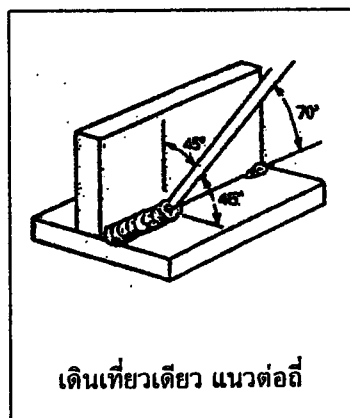
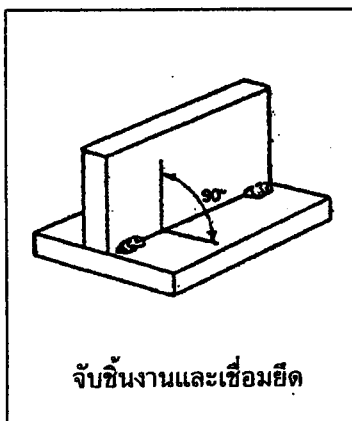
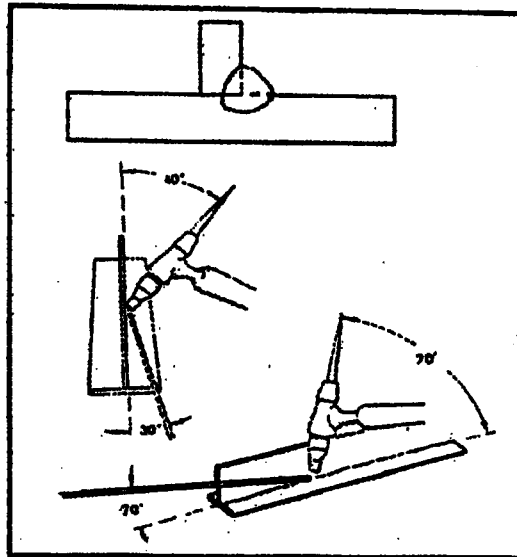
รูปที่ 2.29 แสดงการเชื่อมต่อเกย

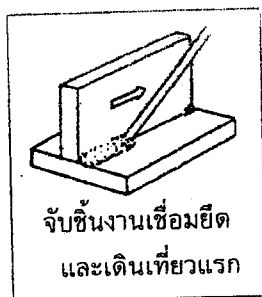
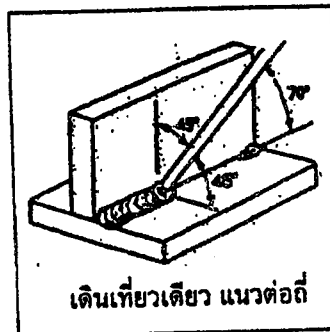
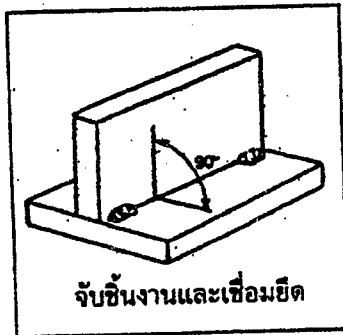
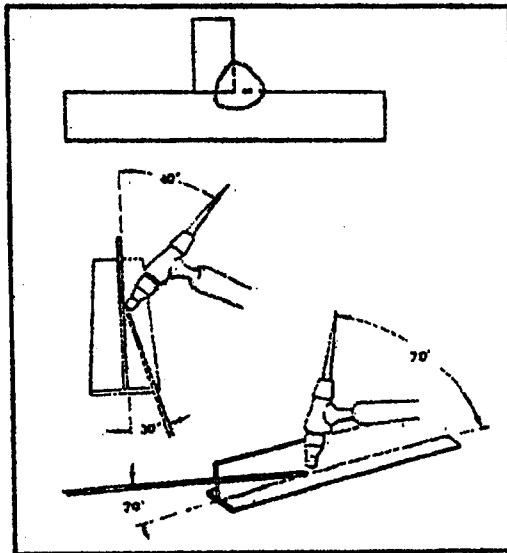
### 3. การเชื่อมต่อมุม (Corner Joint)



รูปที่ 2.30 แสดงการเชื่อมต่อมุม

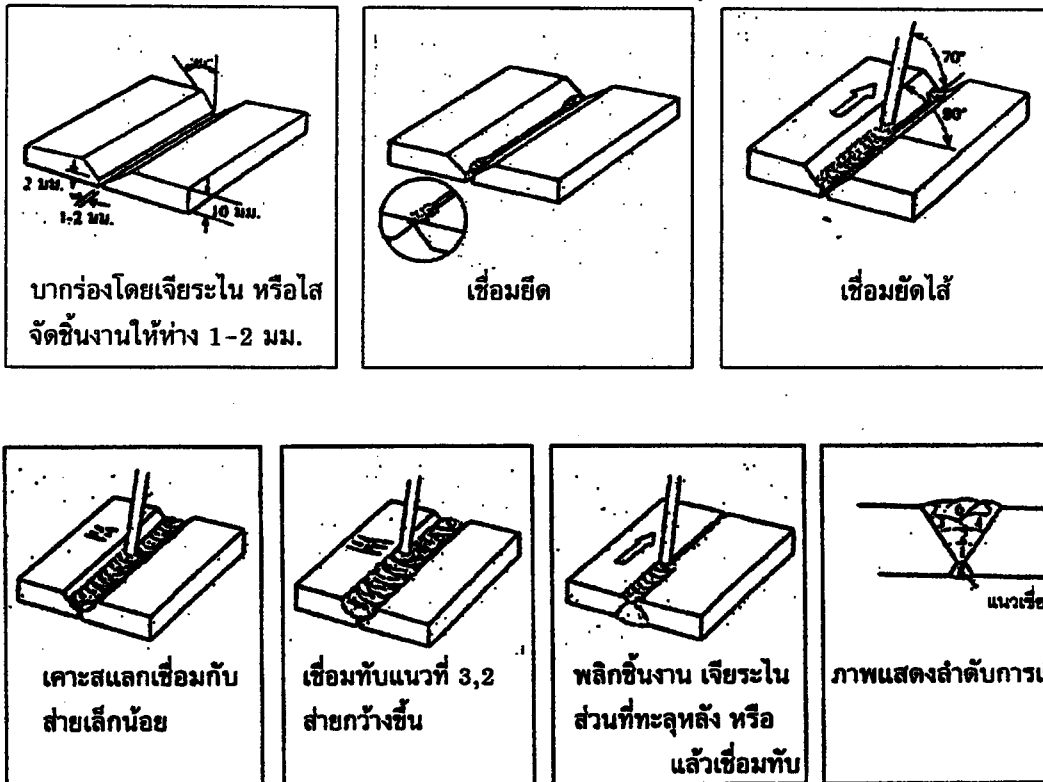
#### 4. การเชื่อมต่อฉาก (T Joint)





รูปที่ 2.31 แสดงการเชื่อมต่อจาก

## 5. การเชื่อมตัววี (V-Joint)



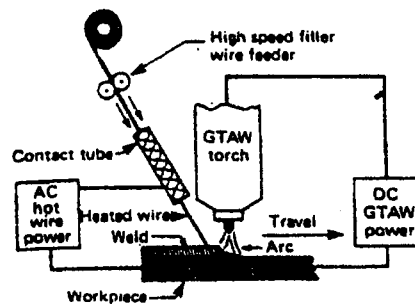
รูปที่ 2.32 แสดงการเชื่อมแบบตัววี

### 2.15 การเชื่อม TIG แบบอัตโนมัติ

การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ซึ่งเชื่อมด้วย TIG แบบอัตโนมัติ แรงเคลื่อนของการอาร์คจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะอาร์ค โดยใช้สัญญาณจากแรงเคลื่อนอาร์คไปควบคุมอุปกรณ์จะใช้ลวดเชื่อมหรือไม่ใช้ก็ได้ถ้าเป็นการเชื่อมให้ชิ้นงานละลายติดกันเอง

การเชื่อมแบบอัตโนมัติลวดเชื่อมที่ใช้มีทั้งแบบ “Cold wire” และ “Hot wire” แบบ Cold wire สามารถเติมในบ่อหลอมละลายได้เลย ส่วน Hot wire จะใช้เมื่อต้องการเพิ่มความรวดเร็วในการเชื่อมให้สูงขึ้น

สำหรับแหล่งที่ให้ความร้อนของ Hot wire มี 2 แห่งคือที่ปลายแท่ง Electrode และต่อกระแสน้ำเข้าที่เส้นลวดที่ใช้เติมในบ่อหลอมละลายโดยต่อเข้าที่ Contact tube ลวดเชื่อมจะยื่นออกมาจากตัว Contact tube ยาวมากและลวดจะเกิดความร้อนสูงเนื่องจากความต้านทานกระแสจนเกือบหลอมละลายและจะเติมลงในบ่อหลอมละลาย โดยปลายของลวดเติมจะไม่สัมผัสกับบ่อหลอมละลายซึ่งโดยปกติจะใช้ลวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.14 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 ระบบป้อนลวดแบบ Hot wire

## 2.16 ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการเชื่อม TIG

สำหรับปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการเชื่อมแบบ TIG ก็มีอยู่หลายประเด็นด้วยกัน เช่น

### 2.16.1 ปัญหา Electrode ทั้งสแตนเลสเปลี่ยนเร็ว

สาเหตุ

1. ใช้แก๊สไม่เหมาะสม
2. เชื่อมด้วยกระแสไฟตรงกลับขั้ว (DCRP)
3. ใช้กระแสสูงเกินกว่า Electrode จะรับได้
4. Torch มีความร้อนสูงเกินไป
5. แทะ Electrode สกปรก
6. แทะ Electrode ทั้งสแตนเกิด Oxidation ในขณะที่เย็นตัว

การแก้ไข

1. ทำความสะอาด Nozzle ให้ระยะห่าง Nozzle กับชิ้นงานสั้นลง เพิ่มอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม
2. ใช้แท่ง Electrode ทั้งสแตนโดขึ้นหรือเปลี่ยนเป็นไฟกระแสตรงขั้วตรง (DCSP) เชื่อมงาน
3. ใช้ Electrode ทั้งสแตนโดขึ้น
4. ใช้ Electrode ทั้งสแตนผิวเจียรไน เปลี่ยน Collet ใหม่และตรวจเช็คหน้าสัมผัสของ Electrode กับ Collet ให้เหมาะสม
5. กำจัดสิ่งสกปรกของแท่ง Electrode ออกให้หมด
6. เพิ่มเวลาในการไหลของแก๊สปกคลุม

### 2.16.2 ปัญหา การอาร์คไม่คงที่

#### สาเหตุ

1. งานเชื่อมสกปรก เปื้อนจาระบีหรือน้ำมัน
2. รอยต่อแคบเกินไป
3. แท่ง Electrode ทั้งสแตนสกรปรก
4. แท่ง Electrode ทั้งสแตนโดเกินไป
5. ระยะอาร์คห่างเกินไป

#### การแก้ไข

1. เริ่มต้นการอาร์คด้วยความถี่สูงหรือเริ่มต้นอาร์คบนแผ่นทองแดง
2. ใช้กระแสเชื่อมต่ำหรือเพิ่มขนาด Electrode โตขึ้น

### 2.17 การเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ

ใช้เป็นจำนวนไม่มากในการเชื่อม TIG ถ้ามีการผลิตจำนวนมาก ๆ แต่ถ้าเชื่อมเหล็ก Killed steel ซึ่งเป็นเหล็กที่ผ่านการกำจัดออกซิเจนแล้วจะไม่มีปัญหาเรื่องรูพรุน แต่ถ้าเป็นเหล็ก Rimmed steel และ Semikilled steel จะมีปัญหาเพราะกำจัดออกซิเจนไม่หมด ขณะเชื่อมจะมีฟองอากาศควรใช้ลวดเติมที่ผสมธาตุ Deoxidizers เชื่อมซึ่งลวดชนิดนี้จะเป็นธาตุที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำโลหะส่วนผสมคล้ายกับกลุ่ม E 70 5-2: มาตรฐาน AWS.A5.18-69 หรืออาจใช้ฟลักเติมเพื่อลดรูพรุน

เหล็กกล้าผสมต่ำได้แก่ Chromium-molybdenum alloy (ASTM A 387 และ A 335) ซึ่งได้กำจัดออกซิเจนออกหมดแล้วจึงสามารถใช้ลวดเติมที่มีส่วนผสมคล้ายกับชิ้นงาน ส่วนผสมที่เสียไปในขณะเชื่อมมีน้อยมาก

การเชื่อมยึดไลน์ขมการเชื่อมแบบ TIG ซึ่งจะเชื่อมได้ดีไม่ต้องใช้แผ่นรองหลังและก่อนเชื่อมต้องทำความสะอาดชิ้นงานก่อนเพื่อขจัดสนิม ี น้ำมัน และสารมลทินต่าง ๆ ออกให้หมด ถ้าผิวงานขรุขระควรแต่งให้เรียบ ถ้าเชื่อมท่อที่มีสีดำต้องขจัดสีดำออกให้หมดก่อน รายละเอียดการเลือกแท่ง Electrode กระแสไฟเชื่อม แก๊สปกคลุม ดังตารางที่ 2.5

## ตารางที่ 2.5 การเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำด้วย TIG

ความหนาของ วัสดุ มม.	ชนิดของรอย เชื่อม (2)	ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง แก๊ส (3) มม.	ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง แก๊ส (4) มม.	ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง ของ nozzle มม.	อัตราการ ไหลของ แก๊ส (5) C.F.M.	กระแส เชื่อม (Amps) DCSP	จำนวน แนวเชื่อม	ความเร็ว ในการ เชื่อม (ชม./ นาที)
0.8	Sq.groove & Fillet	1.6	1.6	6.5	10	75-100	1	33.02
1.0	Sq.groove & Fillet	1.6	1.6	6.5	10	90-120	1	38.10
1.6	Sq.groove & Fillet	1.6	1.6	6.5	10	95-135	1	38.10
2.4	Sq.groove & Fillet	2.4	2.4	8	10	135-175	1	35.56
3.18	Sq.groove & Fillet	2.4	3.18	8	12	145-205	1	28

1. เพิ่มกระแสเชื่อมเมื่อใช้แผ่นรองหลัง
2. ค่าที่ให้มาใช้สำหรับทุกท่าเชื่อม
3. ให้เลือกแก๊สทั้งสแตนชนิด 2% thoriated EWTH 2 เป็นอันดับแรกและ 1% thoriated EWTH 1 เป็นอันดับสอง
4. เลือกใช้โลหะเติมให้มีคุณสมบัติและส่วนผสมเข้ากับชิ้นงานเชื่อม
5. ใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สชิล สำหรับแก๊สผสมระหว่างฮีเลียม 75% อาร์กอน 25% บางครั้งใช้สำหรับการเชื่อมงานหนา

### 2.18 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม

ใช้แท่ง Electrode ชนิดทอริทอเทททั้งสแตนจะเชื่อมได้ดีที่สุด จะให้การอาร์คสม่ำเสมอแก๊สปกคลุมใช้อาร์กอน ถ้าใช้เชื่อมงานหนาจะใช้อาร์กอนผสมกับฮีเลียมถ้างานบางใช้แก๊สอาร์กอนจะดีกว่า

การเลือกใช้สวดเติมมีความสำคัญมากให้เลือกตามตารางที่ 2.6

การเชื่อมต่อเหล็กไร้สนิม 2 ชนิดที่แตกต่างกันให้เลือกใช้ตารางที่ 2.7 แต่ควรระวังการสูญเสียจากการกัดกร่อน เมื่อใช้ไฟกระแสตรงควรเลือกความถี่สูงตอนเริ่มต้นอาร์คจะช่วยให้ปลาย Electrode ไม่ให้สัมผัสกับผิวงานและไม่สกปรกขี้ไฟควรใช้ DCSP ซึ่งให้การซึมลึกดีเริ่มต้นการอาร์คควรใช้วิธีการขีดแทนการใช้ความถี่สูงก่อนเชื่อมควรทำความสะอาดบริเวณผิวงานเสียก่อนด้วยแปรงสวดเหล็กกล้าไร้สนิม



ความถี่สูงได้ไม่ควรเริ่มต้นอาร์คบนแท่งคาร์บอนเพราะอาจทำให้แท่ง Electrode สกปรกจากคาร์บอนได้ ก่อนเชื่อมควรทำความสะอาดผิวงานเสียก่อนด้วยแปรงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม

## ตารางที่ 2.6 การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมด้วย TIG

ความหนา ของวัสดุ งาน มม.	ชนิดของรอย เชื่อม	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของ แท่งทั้งสแตน (3) มม.	ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลางของ สวดเชื่อม (4) มม.	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางภายในของ Nozzle มม.	อัตราการใช้ โหลของ แก๊สซีล (CGH)	กระแสเชื่อม DCSP	จำนวน แนว เชื่อม	ความเร็ว ในการ เชื่อม (ชม./ นาที)
0.6	Square groove	1.0	1.6	6.5	10	20-50	1	66.04
1.0	Square groove	1.6	1.6	6.5	10	50-80	1	55.88
1.6	Square groove	1.6	1.6	6.5	12	65-105	1	30.48
1.6	Fillet	1.6	1.6	6.5	12	75-125	1	25.40
2.4	Square groove	1.6	2.4	6.5	12	85-125	1	30.3
2.4	Fillet	1.6	2.4	6.5	12	95-135	1	25.40
3.18	Square groove	1.6	2.4	8	12	100-135	1	30.48
3.18	Fillet	1.6	2.4	8	12	115-145	1	25.40
4.8	Square groove	2.4	3.18	8	15	150-225	1	25.40
4.8	Fillet	3.18	3.18	8	15	175-250	1	20.32
6.35	Vee groove	3.18	4.8	9.5	18	225-300	2	25.40
6.35	Fillet	3.18	4.8	9.5	18	225-300	2	25.40
9.52	Vee groove	4.8	4.8	13	25	220-350	2-3	25.40
9.52	Fillet	4.8	4.8	13	25	250-350	3	25.40
12.7	Vee groove	4.8	6.35	13	25	250-350	3	25.40
12.7	Fillet	4.8	6.35	13	25	250-350	3	25.40

1. เพิ่มกระแสเชื่อมเมื่อใช้แผ่นรองหลัง
2. ค่าที่ให้มาสำหรับการเชื่อมทำราบ และลดกระแสลง 10-20% เมื่อเชื่อมทำขนานนอน ทำตั้ง หรือทำเหนือศีรษะ
3. ให้เลือกใช้แท่งทั้งสแตนชนิด 2% thoriated EWTH 2 เป็นอันดับแรกและ 1% thorited EWTH 1 เป็นอันดับรอง
4. เลือกใช้โลหะเติมให้เหมาะสมกับชิ้นงาน
5. ใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สซีล สำหรับแก๊สผสมระหว่างฮีเลียม 75% อาร์กอน 25% สำหรับการเชื่อมงานหนา

### 2.19 การเชื่อมทองแดงและทองแดงผสม

การเชื่อมทองแดงด้วย TIG ควรใช้กระแสไฟ DCSP ยกเว้นอลูมิเนียมบรอนซ์จะต้องเชื่อมด้วยไฟกระแสสลับ (AC) การเชื่อมที่ให้คุณภาพสูงได้แก่ทองแดงชนิด Deoxidized copper, Silicon bronze coproninkel และ Aluminium bronze ส่วนการเชื่อมงานที่ได้คุณภาพพอใช้ได้แก่ทองแดงชนิด Electrolytic, Red brass, Muntz metal และ Phosphor bronze ด้วยการใช้แก๊สอาร์กอน ฮีเลียมหรือแก๊สผสมปกคลุม ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาเชื่อมควรเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับงานเชื่อมนั้นๆ (ดังตารางที่ 2.6) ส่วนค่าต่างๆ ในการเชื่อมให้เลือกพิจารณาจาก ตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 การเชื่อมทองแดงและทองแดงผสมด้วย TIG

ความหนาของวัสดุงานเชื่อม มม.	ชนิดของรอยเชื่อม	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งทั้งสแตน มม.	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อม มม.	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของ Nozzle มม.	อัตราการใช้โลหะของแก๊สซีล (CFH)	กระแสเชื่อม (ACHF)	จำนวนแนวเชื่อม	ความเร็วในการเชื่อม (ซม./นาที)
1.6	Sq. groove	1.6	6.5	1/4	18	100-150	1	30.48
1.6	Fillet	1.6	6.5	1/4	18	125-155	1	25.4
3.18	Sq. groove	2.4	8	5/16	18	170-230	1	25.4
3.18	Fillet	2.4	8	5/16	18	195-245	1	20.32
4.8	Sq. groove	3.18	9.5	3/8	36	185-230	1	25.4
4.8	Fillet	3.18	9.5	3/8	36	230-255	1	20.32
6.35	Vee groove	3.18	9.5	3/8	36	220-275	2	17.8
6.35	Fillet	3.18	9.5	3/8	36	245-285	1	17.8
9.52	Vee groove	4.8	13	1/2	45	275-325	2	17.8
9.52	Fillet	4.8	13	1/2	36	290-350	2	20.32
12.7	Vee groove	6.35	16	5/8	45	370-500	2	15.24

1. เพิ่มกระแสเชื่อมเมื่อใช้แผ่นรองหลัง
2. ค่าที่ใช้มาสำหรับการเชื่อมทำราบ และต้องลดกระแส 10-20% เมื่อเชื่อมทำขนานนอน ทำตั้ง หรือทำเหนือศีรษะ
3. ให้เลือกใช้แท่งทั้งสแตนชนิด 1% thoriated EWTH 1 เป็นอันดับแรก 2% thoriated EWTH 2 เป็นอันดับสอง
4. เลือกใช้ขนาดโลหะเติมให้เหมาะสมกับชิ้นงานเชื่อม
5. การเชื่อมทองแดงใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สซีล สำหรับแก๊สผสมฮีเลียม 75% อาร์กอน 25% นิยมใช้กับทองแดงและทองแดงผสมบางชนิดแก๊สอาร์กอนใช้ในการเชื่อมบรอนซ์
6. ทองแดงหนา 4.8 มม. อุณหภูมิ 200° ฟ, 6.3 มม. - 300° ฟ, 9.5- 500° ฟ
7. Deoxidized copper และ copper alloys ใช้ไฟ DCSP และใช้ ACHF สำหรับเชื่อมอลูมิเนียมบรอนซ์และใช้อาร์กอนคลุมรอยเชื่อม

## 2.20 การเชื่อมอลูมิเนียม

กระแสไฟใช้ได้ทั้ง DCSP, DCRP และ AC แต่กระแสไฟ DCRP ใช้กับการเชื่อมงานแผ่นบาง กระแสไฟ DCSP ใช้เชื่อมงานหนาด้วยระบบอัตโนมัติกระแสไฟ AC ใช้กับงานแผ่นบาง การเชื่อม TIG ช้ากว่าการเชื่อม MIG โดยทั่วไปใช้อาร์กอนเมื่อใช้กระแส AC และ DCRP ส่วน DCSP ใช้แก๊สฮีเลียม ถ้างานเป็นแผ่นอลูมิเนียมบางจะเชื่อมด้วยระบบมือควบคุมโดยเป็นงานเชื่อมขอบซึ่งไม่ต้องเติมลวดเชื่อมแต่ถ้าแผ่นงานหนาควรเชื่อมแบบ MIG

การเชื่อมอลูมิเนียมต้องใช้ความระมัดระวังเรื่องความสะอาดของชิ้นงานมากต้องขัดด้วยแปรงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม(ขจัด Oxide ที่ผิวทั้งสองด้าน) ต้องปราศจากน้ำมัน สนิม ถูมือเชื่อมที่จับลวดเชื่อมต้องสะอาด

## ตารางที่ 2.8 การเชื่อมอลูมิเนียมด้วย TIG

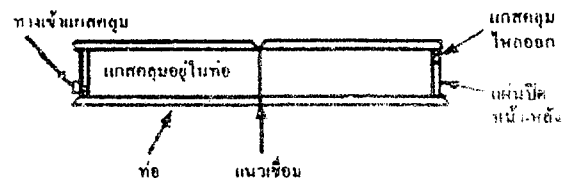
ความหนาของวัสดุงานเชื่อม	ชนิดของรอยเชื่อม	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งทั้งสแตนนิ้ว	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมนิ้ว	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของ Nozzle นิ้ว	อัตราการไหลของแก๊สซีล (CFH)	กระแสเชื่อม (ACHF)	จำนวนแนวเชื่อม	ความเร็วในการเชื่อม (นิ้ว/นาที)
1.2	Sq. groove	1.6	1.6	6.5	19	40-60	1	40.64
1.6	Sq. groove	2.4	2.4	8	19	70-90	1	28
1.6	Fillet	2.4	2.4	8	15	70-90	1	22.86
2.4	Sq. groove	2.4	2.4	8	19	90-110	1	28
2.4	Fillet	2.4	2.4	8	16	95-115	1	22.86
3.18	Sq. groove	3.18	3.18	9.5	20	115-135	1	28
3.18	Fillet	3.18	3.18	9.5	19	120-140	1	25.4
4.8	Fillet	4.0	4.0	11	25	180-200	1	25.4
4.8	Vee groove	4.0	4.0	11	25	160-180	2	28
6.35	Fillet	4.8	4.8	13	30	230-250	1	25.4
6.35	Vee groove	4.0	4.0	11	30	200-220	2	22.86
9.52	Fillet	4.8	4.8	13	35	250-310	2-3	

1. เพิ่มกระแสเชื่อมเมื่อใช้แผ่นรองหลัง
2. ค่าที่ให้มาสำหรับการเชื่อมทุกท่าเชื่อม
3. ให้เลือกใช้แท่งทั้งสแตนชนิด ทั้งสแตนบริสุทธิ์ EWP เป็นอันดับแรกและเซอร์โคเนท EWZR เป็นอันดับรอง
4. ให้เลือกใช้โลหะเติมให้เหมาะสมกับชิ้นงาน
5. โดยปกติจะใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สซีล สำหรับแก๊สผสมที่มีฮีเลียม 10% หรือมากกว่าใช้ในการเชื่อมอลูมิเนียมที่มีความหนามากกว่า 6.35 มม. นั้นจะทำให้การซึมลึกดี อัตราการไหลของแก๊สซีลจะต้องเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของแก๊สฮีเลียมในแก๊สผสมแต่ถ้าใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สซีล 100% ต้องใช้อัตราการไหลของแก๊สซีลเป็น 2 เท่าของการใช้อาร์กอนเป็นแก๊สซีล

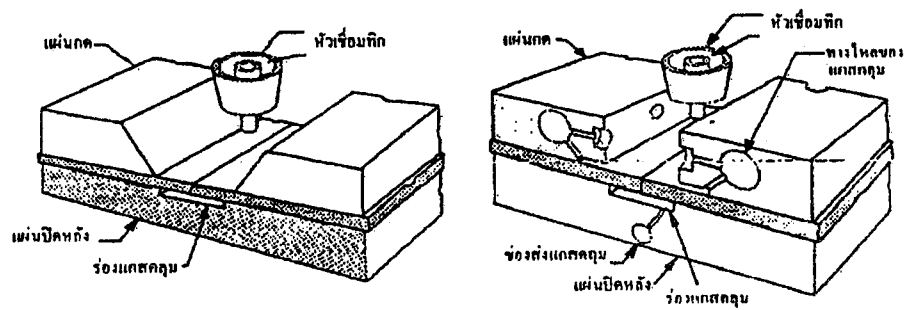
ภาคผนวก

แก๊สกลุ่มหลังแนวเชื่อม

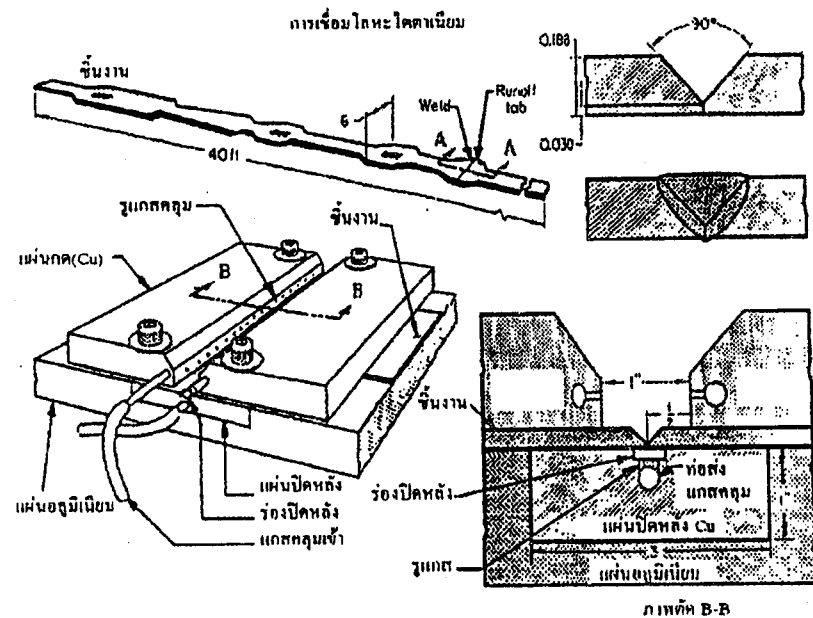
- การเชื่อม



- การเชื่อมแนวท่อชน



- ภาพแสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อจ่ายแก๊สคลุมหลังแนวเชื่อม



### บทที่ 3

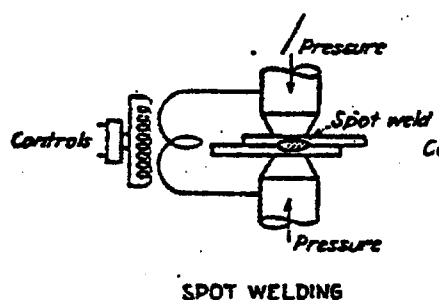
#### การเชื่อมแบบความต้านทานไฟฟ้าชนิดจุด (Spot Welding)

##### 3.1 บทนำ

การเชื่อมแบบความต้านทาน หมายถึง การเชื่อมที่ใช้ความร้อนจากความต้านทานกระแสไฟฟ้าของวัสดุที่เป็นชิ้นงาน เมื่อกระแสไหลครบวงจรและมีกระแสที่สูงมากพอที่จะทำให้บริเวณที่เชื่อมต่อเกิดความร้อนจนอยู่ในสภาวะพลาสติก (Plastic) แล้วใช้แรงดันบีบอัดบริเวณเชื่อมให้ประสานติดกัน

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าวิ่งผ่าน Electrode และผ่านทะลุชิ้นงานสองชิ้นที่วางซ้อนทับกันตำแหน่งที่มีความต้านทานมากจะเกิดความร้อนสูง และถ้ามากพอจะทำให้อุณหภูมิโลหะอยู่ในช่วงภาวะพลาสติก จากนั้นจะใช้แรงดันบีบอัดเข้าก็จะเกิดการเชื่อมยึดติดกัน หลังจากไม่มีกระแสไหลผ่านแล้ววัสดุชิ้นงานจะเย็นตัวและได้รอยเชื่อมที่ต้องการ

ประโยชน์ของการเชื่อมแบบนี้คือ เชื่อมได้รวดเร็ว การบิดงอมีน้อย สามารถควบคุมการเชื่อมได้อย่างเที่ยงตรง ส่วนมากเป็นรอยต่อซ้อนและต่อชน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หลักการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด

จากกฎของ Joule สามารถหาค่าพลังงานความร้อนจากการเชื่อมแบบความต้านทานได้  
ดังนี้

$$H = I^2 R t$$

เมื่อ  $H$  = พลังงานความร้อนเป็น Watt/sec หรือ Joule/sec

$I$  = กระแส (แอมแปร์)

$R$  = ความต้านทานกระแสไฟฟ้า (โอห์ม)

$T$  = เวลา (Sec)

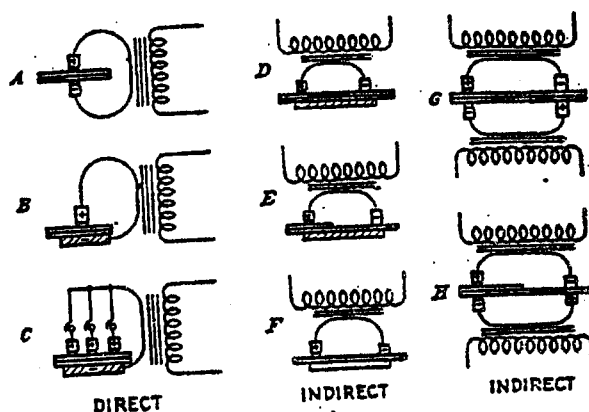
ในปี ค.ศ. 1886 Elihu H. Thomson ค้นพบการเชื่อมแบบความต้านทาน ซึ่งในปัจจุบันเรียกว่า Butt welding โดยให้โลหะวางในที่ยึดให้ขอบโลหะชนกันใช้กระแสไฟฟ้าที่สูงผ่านทะลุชิ้นงานเชื่อมก็จะเกิดความต้านทานกระแสตรงบริเวณที่เชื่อมเกิดความร้อนสูงและใช้แรงบีบอัดชิ้นงานทั้งสองให้ติดกัน

### 3.2 อุปกรณ์สำหรับการเชื่อมไฟฟ้าชนิดจุด (Spot Welding)

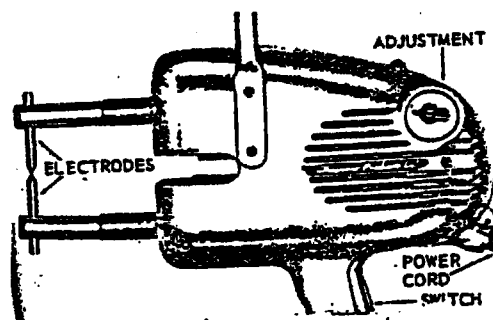
#### 3.2.1 เครื่องเชื่อม

ใช้หลักการทรานส์ฟอร์มเมอร์ซึ่งให้กระแสไฟฟ้าสูงและสัมพันธ์กับแรงเคลื่อนต่ำ โดยให้ลวดปฐมภูมิมีจำนวนรอบมาก ส่วนขดลวดทุติยภูมิมีเพียง 2-3 รอบ โดยทั่วไปเครื่องแบบนี้จะให้กระแสสูงตั้งแต่ 3,000-100,000 แอมแปร์ แต่มีแรงเคลื่อนต่ำประมาณ 0.5-10 โวลท์เท่านั้น

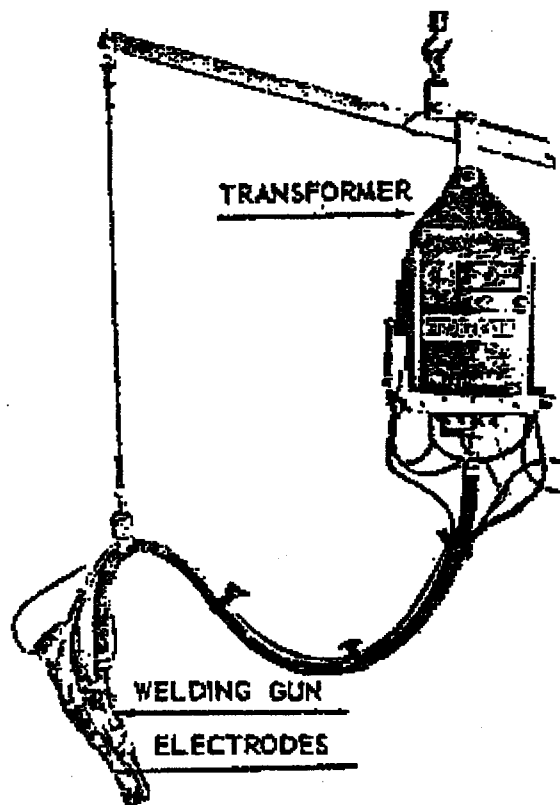
โดยทั่วไปเครื่องเชื่อมแบบความต้านทานจะมีอุปกรณ์ควบคุมแรงดันบีบอัดชิ้นงานเชื่อมให้สัมผัสกันแน่นและอุปกรณ์ควบคุมเวลาที่ใช้ในการเชื่อม ดังรูปที่ 3.2, 3.3, 3.4, 3.5



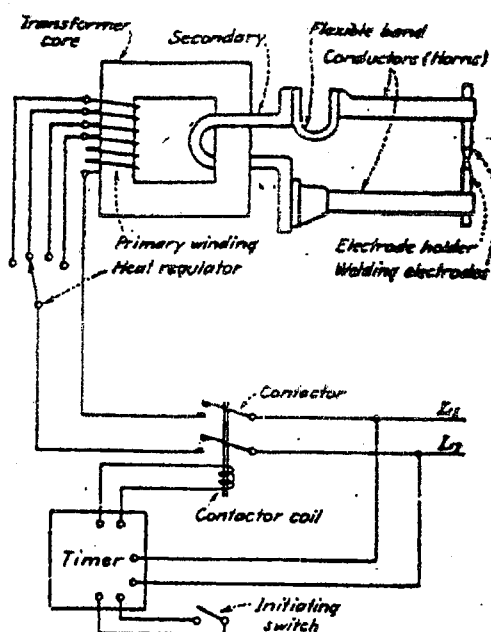
รูปที่ 3.2 แบบการเชื่อมชนิดจุด



รูปที่ 3.3 เครื่องเชื่อมจุดขนาดเล็ก



รูปที่ 3.4 เครื่องเชื่อมจุดซึ่งใช้ลมเป็นแรงดันบีบอัด



รูปที่ 3.5 หลักการของเครื่องเชื่อมแบบความต้านทาน

### 3.2.2 อิเลคโทรด (Electrode)

อิเลคโทรดสำหรับเชื่อมแบบความต้านทาน มีรูปร่างลักษณะต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับการใช้งานและชนิดของการเชื่อมแบบความต้านทาน อิเลคโทรดเป็นตัวผ่านกระแสไฟฟ้า และส่งแรงบีบอัดชิ้นงาน ปกติจะเป็นทองแดงหรือทองแดงผสม มีคุณสมบัติดังนี้

1. เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าที่ดี
2. เป็นตัวนำความร้อนที่ดี
3. มีความแข็งแรง และมีความแข็งแรงพอเพียง
4. ทนต่อการสึกกร่อนได้ดี
5. มีแนวโน้มเอียงที่จะรวมตัวกับโลหะงานต่าง ๆ ได้น้อยที่สุด

3.2.3 การควบคุมการเชื่อม ในระหว่างการเชื่อมจะมีการควบคุมสิ่งต่าง ๆ ให้ถูกต้องในระหว่างการเชื่อม คือ

3.2.3.1. กระแสไฟฟ้า ต้องให้สูงเพียงพอต่อการเกิดสภาวะพลาสติก

3.2.3.2. แรงบีบอัด ปรับได้ที่เครื่องเชื่อม แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1) แรงอัดเชื่อม (Weld pressure) เป็นแรงจาก Electrode ที่ใช้ดันชิ้นงานจนเกิดสภาวะพลาสติก

2) แรงดันกด (Forge pressure) เป็นแรงดันจาก Electrode จะดันกดต่อจากแรงดันในข้อ ก. จนกว่าชิ้นงานจะเย็นตัวและแข็งติดกันแน่นก่อนสิ้นสุดการเชื่อม



### 3.3 เวลาที่เชื่อม

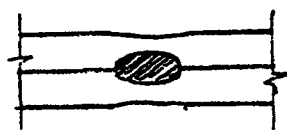
ในการเชื่อมแต่ละจุดจะมีเวลา 4 ช่วงเวลาดังกันอาจจะปรับด้วยเครื่องควบคุมเวลาอัตโนมัติหรือบังคับด้วยมือก็ได้เวลา 4 ช่วงคือ

3.3.1 เวลาบีบอัด (Squeeze time) เป็นช่วงที่ Electrode ส่งแรงมาบีบอัดชิ้นงานให้สัมผัสกันแน่นและกระแสไฟฟ้าเริ่มไหลผ่านชิ้นงาน

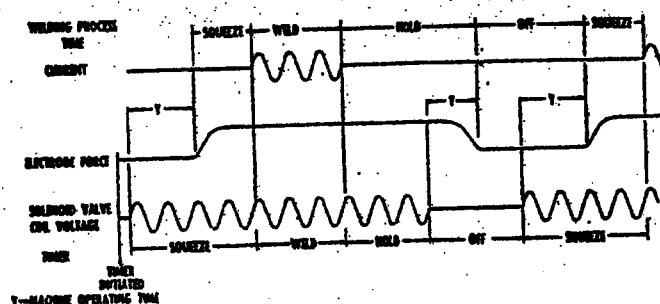
3.3.2 เวลาเชื่อม (Weld time) เป็นช่วงที่กระแสไหลผ่านชิ้นงานจนอยู่ในสภาวะพลาสติก

3.3.3 เวลายึด (Hold time) เป็นช่วงเวลาที่ Electrode บีบอัดชิ้นงานตรงบริเวณรอยเชื่อมให้ยึดแน่นติดกัน จากนั้นกระแสไฟถูกตัดออกรอยเชื่อมเริ่มเย็นตัวลง

3.3.4 เวลาหยุด (Off time) เป็นช่วงเวลาที่ Electrode ถูกปล่อยออกจากชิ้นงานและเป็นการสิ้นสุดการเชื่อมรอยเชื่อม 1 รอบ และพร้อมจะเริ่มเชื่อมรอยต่อไป ดังรูปที่ 3.6, 3.7

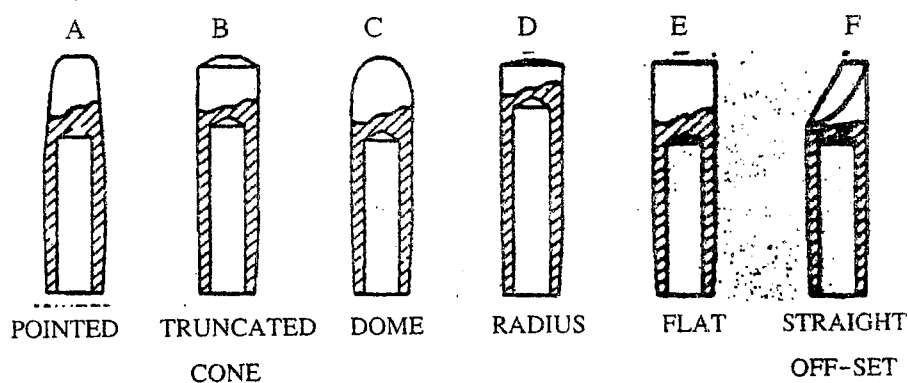


รูปที่ 3.6 รอยเชื่อม



รูปที่ 3.7 ช่วงเวลาการเชื่อมจุด

3.4 พื้นที่สัมผัสของหน้า Electrode เป็นสิ่งที่กำหนดขนาดความโตของรอยเชื่อม ซึ่งฝังต้องขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้า แรงดันบิบัติ เวลาที่เชื่อม ขนาดความหนาของชิ้นงาน ชนิดของโลหะชิ้นงาน เป็นต้น ที่สำคัญพื้นที่ผิวหน้าสัมผัสของ Electrode ต้องสะอาดอยู่เสมอ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบบต่าง ๆ ของผิวหน้าอิเล็กโทรดชนิดจุด

แรงดันที่ใช้ในการเชื่อม จะควบคุมได้โดยการปรับแรงดันสปริง หรือแรงดันของไฮดรอลิค หรือแรงดันของลม ซึ่งขึ้นอยู่กับกรอกแบบเครื่องเชื่อมนั้น ๆ ที่ Electrode จะมีการระบายความร้อนด้วยน้ำ และมีแบบต่าง ๆ ให้เลือกใช้เหมาะสมกับงานที่เชื่อม จุดประสงค์ของการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุด คือการเชื่อมให้ได้รอยเชื่อมเป็นจุด ซึ่งจะต้องใช้พลังงาน ไฟฟ้า แรงดัน เวลา และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางผิวหน้า Electrode ให้สัมพันธ์กับความหนาของโลหะงาน

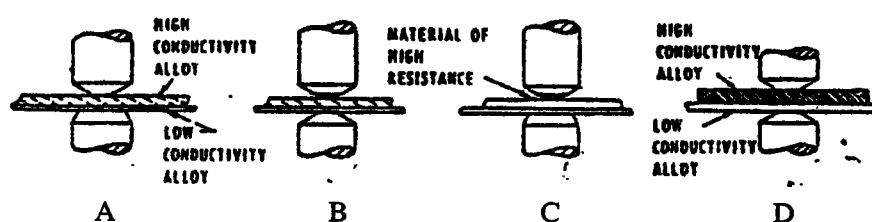
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าประมาณต่าง ๆ ในการเชื่อมแบบความต้านทานชนิดจุดเหล็กเหนียว

ความหนาแผ่นโลหะ	กำลังไฟฟ้า	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางผิวหน้า Electrode	แรงดัน	เวลาเชื่อม 1 รอย
มม.	กิโลวัตต์	มม.	นิวตัน	วินาที
0.5	4	4.8	270	0.5
0.9	8	4.8	450	0.8
1.6	10	4.8	900	0.9
3.3	16	6.4	1,200	1.9
4.8	20	6.4	1,800	3.0
6.4	30	6.4	2,300	4.0

### 3.5 ความสมดุลความร้อนขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้คือ

- 3.5.1 ความสัมพันธ์ของความร้อนและการเป็นตัวนำไฟฟ้าของชิ้นงานเชื่อม
- 3.5.2 ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานที่นำมาเชื่อม
- 3.5.3 ความร้อนและการเป็นตัวนำไฟฟ้าของ Electrode
- 3.5.4 ขนาดรูปร่างและลักษณะของ Electrode

ยกตัวอย่างการเชื่อมจุดของชิ้นงานที่มีส่วนผสมและขนาดเหมือนกันความร้อนจะแผ่กระจายสมดุลกัน แต่ถ้าชิ้นงานหนึ่งนำไฟฟ้าได้ดีกว่าอีกชิ้นหนึ่ง เช่น เหล็กนำไฟฟ้าได้ดีกว่าแอสแตนเลส ความร้อนก็จะแผ่ขยายไม่สมดุลกัน ดังนั้นจำเป็นต้องมีเทคนิคในการเชื่อมด้วย ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เทคนิคการทำให้ความร้อนสมดุลในการเชื่อมจุดโลหะต่างชนิด

รูปที่ 3.9 A แสดงความร้อนสมดุลถูกต้องโดยใช้ Electrode ที่มีผิวหน้าสัมผัสน้อยกว่าบนเหล็กเหนียวส่วนด้านแอสแตนเลสจะมีผิวสัมผัสมากกว่า

รูปที่ 3.9 B แสดงความร้อนสมดุลถูกต้องโดยใช้ Electrode ซึ่งผิวหน้ามีวัสดุซึ่งต้านทานความร้อนได้สูง เช่น ทังสเตนหรือโมลิบดีนัม (Tungsten or Molybdenum) เพื่อให้การหลอมละลายของเหล็กเพียงพอเหมาะกับการหลอมละลายของแอสแตนเลส

รูปที่ 3.9 C ชี้ให้เห็นเทคนิคทั้ง 2 ที่กล่าวมา

รูปที่ 3.9 D ชี้ให้เห็นความร้อนสมดุลโดยเพิ่มความหนาโลหะชิ้นที่เป็นตัวนำความร้อนได้ดีกว่า (เหล็กเหนียว)

## บทที่ 4

### การตรวจสอบและทดสอบรอยเชื่อม (Destructive testing)

#### 4.1 จุดประสงค์

เพื่อตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อมว่ามีความบกพร่องภายในรอยเชื่อมและได้มาตรฐานหรือไม่ จำเป็นต้องมีการตรวจสอบดังกล่าว

#### 4.2 มาตรฐานในการเชื่อม

ช่างเชื่อมทุกคนต้องรับผิดชอบงานที่ตัวเองเชื่อมทุกครั้ง ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลงานที่มีคุณภาพมาตรฐานสูง มีข้อควรปฏิบัติดังนี้

4.2.1 ต้องทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานเชื่อมทุกครั้ง ต้องจัดฝุ่นละออง สนิม จาระบี น้ำ น้ำมัน และสิ่งสกปรกอื่น ๆ

4.2.2 ต้องเว้นระยะห่างของรอยต่อให้พอเหมาะกับความหนาของชิ้นงาน

4.2.3 การเชื่อมต่อบนแบบ Fillet ความหนาของแผ่นงานกับระยะห่างของรอยต่อต้องเท่ากัน แต่ถ้าวรอยต่อห่างขนาดของรอยเชื่อมต้องบวกด้วยความหนาแผ่นงานเสมอ

4.2.4 ถ้ามีการกำหนดอุณหภูมิอุ่นชิ้นงานก่อนและหลังการเชื่อมต้องปฏิบัติตามนั้น

4.2.5 ลวดเชื่อมต้องมีส่วนผสมที่เหมาะสมกับชิ้นงานเชื่อมเสมอ

4.2.6 เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเชื่อมให้เหมาะกับความหนาชิ้นงาน

4.2.7 ถ้ามีรอยแตกร้าวในรอยเชื่อมต้องเจียรในออกก่อนที่จะเชื่อมทับแนวต่อไป

4.2.8 จุดเชื่อมยึดถ้ามีการแตกร้าวต้องเจียรในออกก่อนที่จะเชื่อมแนวเชื่อมจริงทับลง

4.2.9 รอยเชื่อมที่มีรูพรุน สลักฝังตัว ต้องจัดออกก่อนเชื่อมแนวต่อไป

4.2.10 ปลายสุดของแนวเชื่อมต้องเชื่อมเติมให้เต็ม

4.2.11 ต้องทำความสะอาดแนวเชื่อมที่เชื่อมเสร็จทุกครั้งก่อนเชื่อมแนวต่อไป

4.2.12 กำหนดให้ส่วนเกิน และส่วนลดของความยาวแนวเชื่อมจากแบบงานหรือพิมพ์เขียวได้ไม่เกิน 1 มม.

4.2.13 ความนูนของแนวเชื่อมไม่ควรเกิน 1.5 มม.

4.2.14 รอยเว้าของแนวเชื่อมไม่เป็นที่ยอมรับสำหรับแนวเชื่อมที่รับแรงสูง

4.2.15 แนวเชื่อมที่มีร่องรอยต่อชิดกัน เมื่อหลอมละลายจะต้องซึมลึกตลอดแนวหน้าตัดของงาน ถึงแม้ว่าจะไม่มีแผ่นปะกบด้านหลังรอยเชื่อมก็ตาม

### 4.3 การตรวจสอบรอยเชื่อม แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

#### 4.3.1 การตรวจสอบแบบทำลาย (Destructive testing)

เป็นการตรวจสอบที่รอยเชื่อมนั้นต้องมีการแตงชิ้นงานด้วยเครื่องเจียรระไน ก่อนมีการทดสอบ เช่น การบิดโค้ง การงอ การทุบตี ชิ้นงานอาจจะเป็นรูปร่างลักษณะต่าง ๆ หรือจะเป็นชิ้นงานทดสอบ (Specimen)

#### 4.3.2 การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive testing)

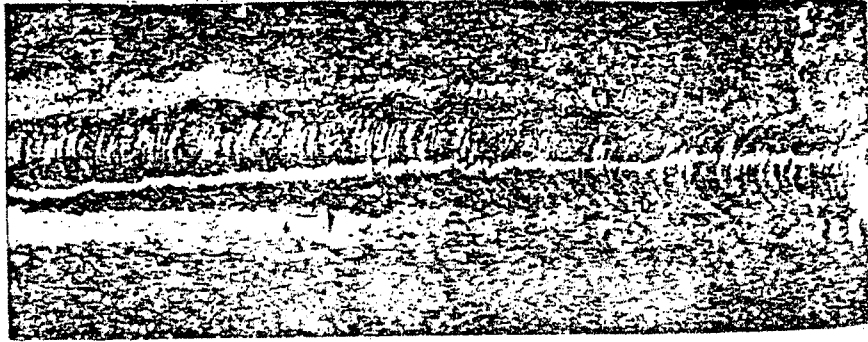
การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย เป็นการทดสอบรอยเชื่อมด้วยวิธีการที่ไม่ทำให้รอยเชื่อมเกิดการเสียหาย โดยยังคงสภาพเดิมไว้มีการตรวจสอบทั้งภายในและภายนอกรอยเชื่อม แบ่งออกได้ดังนี้

1) การตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยตาเปล่า (Visual inspection) เป็นการดูรายละเอียดภายนอกของรอยเชื่อม เช่น ความกว้าง ความยาว ความนูน ผิวหน้า บริเวณด้านข้างรอยเชื่อม ปลายสุด รูพรุนที่ผิวหน้า รอยแตกร้าว เม็ดโลหะกระเด็น เนื้อรอยเชื่อมที่เกยผิวของงาน เป็นต้น สามารถตรวจได้รวดเร็ว ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เครื่องมือประกอบด้วย ไฟฉาย เกจวัดรอยเชื่อม แวนขยาย

2) การตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยผงแม่เหล็ก (Magnetic partical inspection) เป็นการตรวจสอบหา รูพรุน รอยแตกร้าว การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ วิธีนี้มีประสิทธิภาพดีมาก แต่ใช้ได้กับโลหะที่เป็นจำพวกเหล็กและโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กได้เท่านั้น หลักการคือ ใช้ผงแม่เหล็กพ่นหรือโรยบนผิวหน้างานที่จะตรวจแล้วผ่านกระแสไฟฟ้าที่มีแอมป์สูง โวลต์ต่ำไหลผ่านชิ้นงานหรือใช้แม่เหล็กไฟฟ้า แม่เหล็กถาวรก็ได้ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก บริเวณที่เกิดการเสียหายหรือบกพร่อง เส้นแม่เหล็กก็จะจับตัวกันเป็นกลุ่มหรือเส้น หรือเบี่ยงเบนไปดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 เส้นแรงแม่เหล็กบิดเบน



รูปที่ 4.2 ผงแม่เหล็กจับตัวเป็นเส้นที่ผิวหน้างานมีรอยแตกร้าว

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นรอยสียาวตามแนวเชื่อมอาจจะคิดว่าเป็นรอยแตกร้าว แต่อาจจะ เป็นรอยเชื่อมไม่สมบูรณ์ตลอดแนวความยาวก็ได้

ผงแม่เหล็กที่ใช้แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดแห้ง และเปียก

ผงแม่เหล็กแห้งจะอาบสีแดง ดำ เทา ขาว เพื่อให้สีติดกับเนื้อผิวโลหะงานที่นำมาตรวจ สอบ

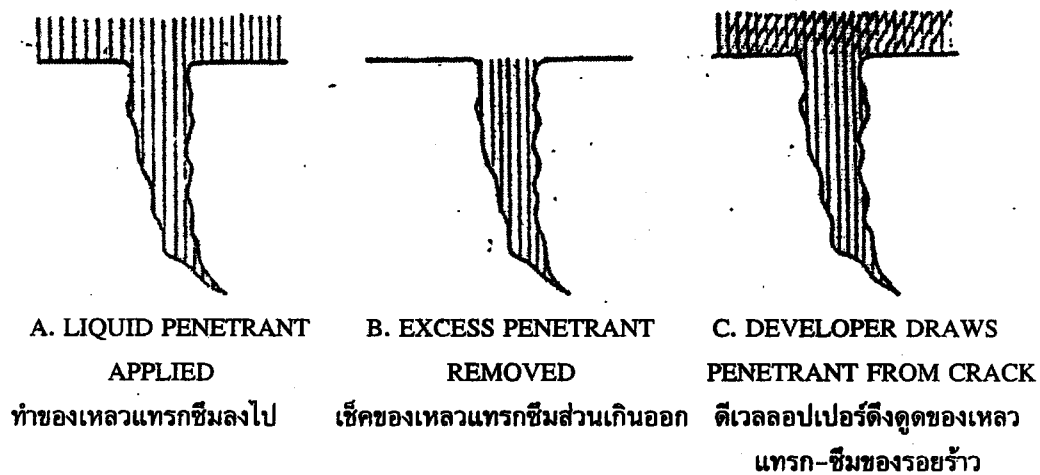
ผงแม่เหล็กเปียก เนื้อผงจะละเอียดกว่าแบบแห้ง จะผสมกับน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมัน กัด น้ำมันพาราฟิน

ผิวชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบ ต้องเจียรไนแต่งให้เรียบและสะอาดสารเรืองแสงพวกนี้จะซึม ลงไปในรูพรุน และรอยแตกร้าวได้ง่าย ซึ่งได้ผลดีกว่าชนิดผงแห้งและผงแม่เหล็กที่จับตัวเป็นกลุ่ม หรือเส้นจะมีขนาดใหญ่กว่าจุดเสีย ทำให้สามารถตรวจพบจุดเสียเล็ก ๆ ที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า ได้

### 3) การตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยของเหลวซึมซาบ (Liquid penetrant inspection)

การตรวจสอบวิธีนี้ส่วนมากจะใช้กับชิ้นงานโลหะที่มีใช้พวกเหล็กแต่เหล็กก็ สามารถใช้ได้เหมือนกัน ใช้ตรวจสอบรอยแตกร้าว รูพรุนเฉพาะผิวหน้ารอยเชื่อม

หลักการตรวจสอบก็คือ ใช้ของเหลวเรืองแสงทาหรือพ่นลงไปในบนผิวหน้ารอย เชื่อมที่นำมาตรวจสอบ โดยต้องทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานก่อนให้สะอาดปราศจากสิ่งสกปรก ต่าง ๆ แล้วทิ้งไว้ชั่วระยะเวลาหนึ่งให้ของเหลวซึมเข้าไปในรอยแตกร้าวหรือรูพรุนพอได้เวลาที่ กำหนดไว้ก็จะเช็ดน้ำยาออกให้หมดแล้วเป่าให้แห้ง จากนั้นพ่นน้ำยา Developer ทับลงไปเพื่อให้ ทำปฏิกิริยากับสีย้อมหรือสีเรืองแสงที่อยู่ข้างในจุดเสียบนชิ้นงานและจะปรากฏเป็นสีบริเวณจุดเสีย บนรอยเชื่อมให้เห็นได้อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.3



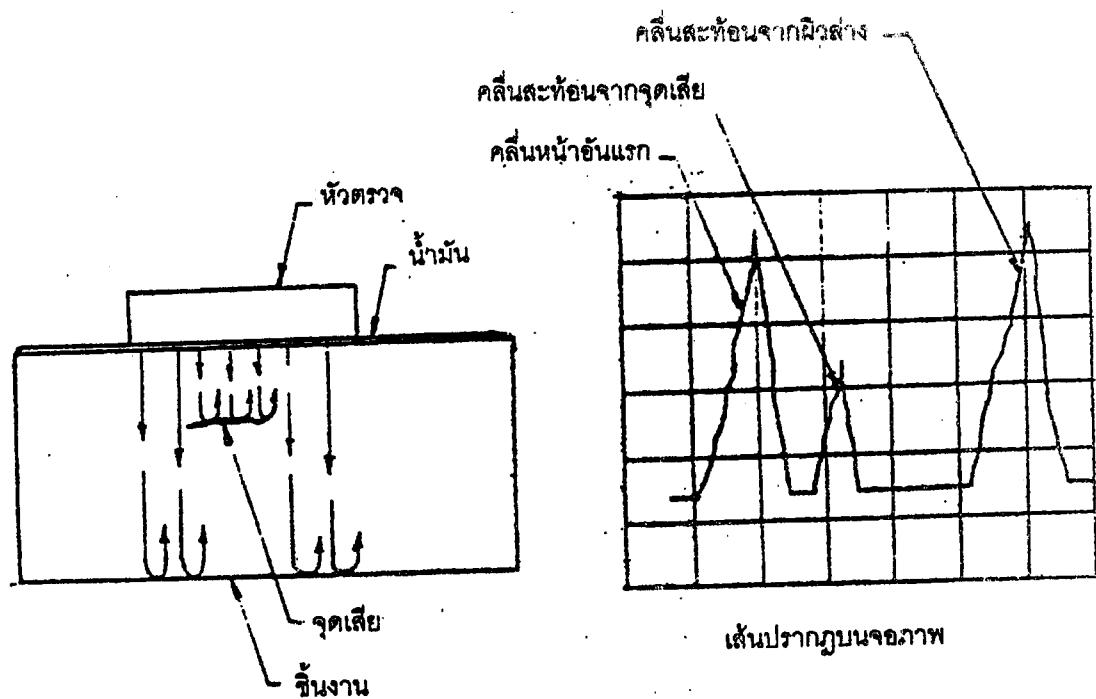
รูปที่ 4.3 การตรวจสอบรอยแตกร้าวด้วยของเหลวซึมซาบ

#### 4) การตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic inspection)

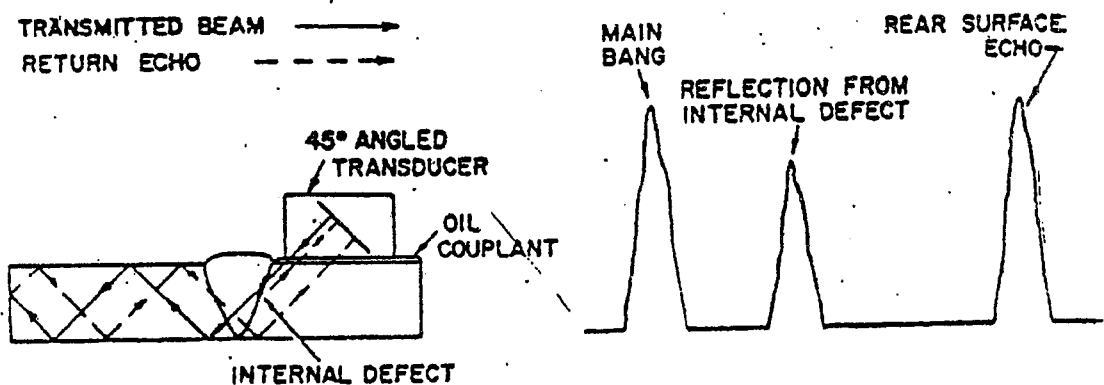
เป็นการตรวจสอบจุดเสียโดยการส่งคลื่นที่มีความถี่สูง (High frequency sound wave) ไปยังจุดที่ต้องการตรวจสอบ พลังงานคลื่นความถี่สูงจะส่งผ่านโลหะงานโดยมีการสูญเสียน้อยมาก จุดเสียที่เกิดขึ้นจะปรากฏบนจอภาพของเครื่อง วิธีนี้ตรวจสอบได้ทั้งชิ้นงานที่เป็นเหล็กและไม่ใช่เหล็ก

หลักการคล้ายกับการค้นหาเรือดำน้ำด้วยคลื่นเสียงสะท้อนกลับ (Echo) โดยใช้หัวตรวจหรือหัวสัมผัส (Transducer or search unit) ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลและเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าสลับกัน ส่งความถี่สูงของคลื่นเสียงผ่านรอยเชื่อมโดยผ่าน film บาง ๆ ของน้ำมันหรือสารบางอย่างที่ทาเคลือบผิวชิ้นงานไว้ การกระตุ้นด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีความถี่สูงจะส่งผ่านโลหะงานทำให้หัวตรวจเกิดการสั่นสะเทือนภายในอันเป็นต้นกำเนิดของความถี่สูงของคลื่นเสียง เมื่อคลื่นความถี่สูงที่ประมาณ  $\frac{1}{2}$  - 5 เมกกะเฮิร์ต ไปกระทบเข้ากับจุดเสียภายในรอยเชื่อมหรือชิ้นงานทำให้เกิดการสะท้อนกลับของพลังงานมายังหัวตรวจและส่งผลให้ปรากฏบนจอภาพ ส่วนคลื่นความถี่สูงที่ไม่พบจุดเสียก็จะถูกส่งต่อไปยังผิวของด้านตรงข้ามแล้วสะท้อนกลับซึ่งใช้เวลานานกว่าจะสะท้อนถึงหัวตรวจ วิธีนี้ตรวจสอบได้ทั้งชิ้นงานที่เป็นเหล็กและไม่ใช่เหล็ก

จากสัญญาณ (Signal) ที่ปรากฏบนจอภาพของเครื่องอัลตราโซนิกจะเป็นลักษณะแนวตั้งและช่วงเวลาที่เกิดสัญญาณอื่น ๆ จะปรากฏออกมาเป็นแนวนอน ดังนั้นจุดเสียจะวัดได้จากความสูงของสัญญาณส่วนตำแหน่งที่เสียจะวัดได้จากระยะของเส้นในแนวนอน การหาขนาดและตำแหน่งที่เกิดจุดเสียจำเป็นต้องใช้การคำนวณและใช้หลักฐานอ้างอิงซึ่งเป็นมาตรฐานประกอบ ตามรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 หลักการทำงานของเครื่องอัลตราโซนิกตรวจสอบชิ้นโลหะงาน



รูปที่ 4.5 การใช้หัวตรวจทำมุมกับชิ้นงานในการตรวจด้วยเครื่องอัลตราโซนิก



รูปนี้เป็นการตรวจสอบรอยเชื่อมโลหะหนาและโลหะบางที่เชื่อมยึดติดกัน ซึ่งเป็นการเชื่อมแบบ Fillet อาจต้องใช้หัวตรวจท่ามุมกับชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.6

#### 5) การตรวจสอบรอยเชื่อมโดยการแผ่รังสี (Radiographic inspection)

เป็นการใช้รังสี x-ray หรือรังสี Gamma-ray ซึ่งมีกำลังมากพอแผ่รังสีไปน รอยเชื่อมและจะถูกบันทึกไว้ในฟิล์มถ่ายภาพ

รังสี X ได้จากเครื่อง Electrode ส่วนรังสี Gamma ได้จากการแผ่รังสีของสารกัมมันตภาพรังสี เช่น Cobolt 60, Iridium 192, Tolum 170 และ Cesium 137

หลักการตรวจต้องทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานก่อนแล้ววางแผ่นฟิล์มไว้ด้านหลังชิ้นงาน จากนั้นก็ส่งรังสีผ่านทะลุชิ้นงานเข้าไปเก็บภาพไว้ในแผ่นฟิล์ม แผ่นงานที่หนากว่าจะดูดกลืนพลังงานได้มากกว่าแผ่นชิ้นงานบาง แผ่นอลูมิเนียมจะดูดซับพลังงานได้น้อยกว่าทั้งสเดน

สารกัมมันตภาพรังสีที่ใช้ในการตรวจมีข้อดีคือมีพลังเจาะทะลุสูง เครื่องจ่ายรังสีขนาดเล็กขนย้ายสะดวก เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวไม่ได้ต้องใช้เวลาส่งและรับรังสีนานซึ่งต้องระมัดระวังในการใช้และขนย้ายเครื่อง

การพิจารณาฟิล์มจากการถ่ายภาพรังสี มีดังนี้คือ

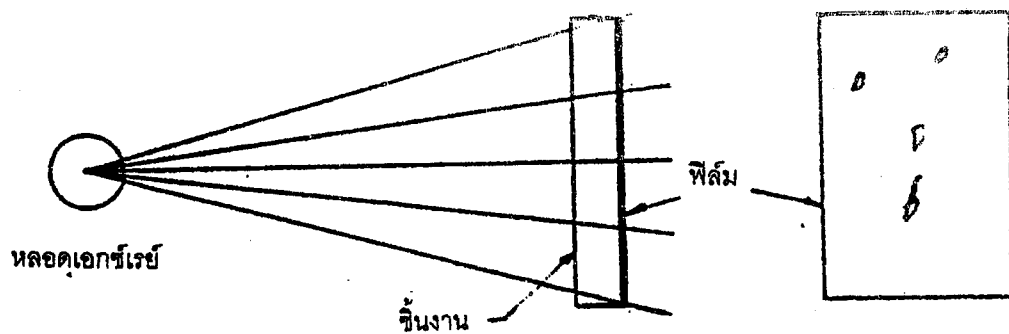
1. ถ้าปรากฏเป็นรอยสีดำยาวปะปนอยู่ ณ ที่ใดที่หนึ่งหรือตลอดแนวเชื่อมแสดงว่ามีสแลครวมตัวอยู่ในรอยเชื่อม
2. ถ้าปรากฏเป็นเงาสีดำเล็ก ๆ จำนวนมากแสดงว่าเป็นรูพรุนขนาดเล็กถ้าสีดำกลมใหญ่จะเป็นรูพรุนขนาดใหญ่หรืออาจเป็นช่องโหว่หรือผิวหน้าเป็นหลุมเป็นบ่อ
3. ถ้าปรากฏเป็นเส้นสีดำขนาดเล็ก ๆ อาจเป็นเส้นตรงหรือคดเคี้ยวไปตามรอยเชื่อมหรืออยู่ตามแนวขวางรอยเชื่อม แสดงว่าเป็นรอยแตกร้าว
4. ถ้าปรากฏเป็นเส้นสีดำตรงและยาวตลอดอยู่ตรงกลางแนวเชื่อมพอดี แสดงว่าการหลอมละลายซึมลึกไม่ตลอดรอยเชื่อม
5. ถ้าปรากฏเป็นเงาดำพรั่ ๆ บริเวณขอบรอยเชื่อมแสดงว่าเป็นแอ่งเว้าเกิดข้างรอยเชื่อม ถ้าเป็นเงาดำพรั่ขนาดกว้างอยู่กลางรอยเชื่อมและยาวตลอดแนวเชื่อมต่อแสดงว่าการหลอมละลายไม่สมบูรณ์

การพิจารณาฟิล์มต้องอาศัยความชำนาญ ถ้าผิดพลาดก็จะทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมส่วนที่คิดว่าเป็นจุดเสียและควรพิจารณาสิ่งต่อไปนี้ เช่น

- ชนิดของโลหะ
- ความหนาโลหะ
- โครงสร้างโลหะ

วิธีการนี้ได้ผลแน่นอนและละเอียดแต่ใช้เวลามากและเสียค่าใช้จ่ายก็มากด้วย ข้อดีอีกอย่างหนึ่งคือสามารถเก็บฟิล์มบันทึกภาพไว้เป็นหลักฐานได้

ฟิล์มที่รับความเข้มของรังสีผ่านมากจะเห็นเป็นเงาดำในฟิล์มบริเวณที่รังสีผ่านน้อยจะเป็นสีขาว เพราะฉะนั้นจุดเสียต่าง ๆ เช่น รูพรุน รอยแตก ร้าว สแลค หรือการเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์จะปรากฏเป็นสีดำบนฟิล์ม ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 หลักการตรวจรอยเชื่อมโดยใช้เอ็กซ-เรย์

### บรรณานุกรม

1. งานเชื่อมโลหะ 2 (WELDING 2) โดยสมบูรณ์ เต็งหงษ์เจริญ, เจริญ พรหมคชุต และ บัณฑิต ใจชื่น
2. การเชื่อมประสานโลหะ โดย ชูชาติ เกษรมาลา
3. เทคโนโลยีการเชื่อม โดย ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. คู่มือของเครื่องเชื่อม “TRANSPOCKET 145” ของ Fronius Machine
5. การเชื่อมพลาสติก ของ อนันต์ ทองมอญ
6. คู่มือเครื่องเชื่อมพลาสติก แบบ WA-51 HOT-JET ยี่ห้อ “WINNING”