# บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน

เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) หมายถึง เหล็กที่มีธาตุที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 2 % และ ยังมีธาตุอื่นผสมปนอยู่เล็กน้อย เช่น ฟอสฟอรัส กำมะถัน ซิลิกอน แมงกานีส นิเกิล โครเมียม โมลิบดินัม เป็นต้น การจำแนกชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอน ในที่นี้จะขออธิบายเฉพาะการจำแนกตาม ปริมาณการ์บอน โดยแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้ [8]

 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 0.3 % เป็นเหล็กกล้า คาร์บอนธรรมดา ไม่นิยมทำขึ้นรูปด้วยความร้อน นอกจากบางครั้งอาจใช้ทำอบอ่อนมาบ้างหลังจาก การรีดเย็นมาแล้ว จะมีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรท์ และเพิร์ลไลท์

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.3 – 0.6 %
 เหล็กชนิดนี้มักต้องทำการอบชุบ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในด้านความแข็ง ความเหนียว เหล็กชนิดนี้ขึ้นรูป
 ได้ง่าย มีโครงสร้างประกอบด้วยเฟอร์ไรท์ และเพิร์ลไลท์

เหล็กกล้าคาร์บอนสูง เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บินผสมอยู่ระหว่าง 0.6 – 2.0 % เหล็กชนิดนี้
 เกือบต้องทำการจุ่มเย็น และต้องอบคลายตัว เพื่อให้คลายตัวเสมอ เพราะมีความแข้งแรงสูงเหล็กชนิด
 นี้ต้องนำไปใช้งานที่ต้องการความแข้งแรงสูง ซึ่งมีโครงสร้างขึ้นอยู่กับส่วนผสมดังนี้

3.1 เหล็กกล้าการ์บอนสูง ที่มีการ์บอนตั้งแต่ 0.6 % แต่ไม่ถึง 0.83 % โครงสร้าง ประกอบด้วยเฟอร์ไรท์ และเพิร์ลไลท์

3.2 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง ที่มีคาร์บอน 0.83 % โครงสร้างเป็นเพิร์ลไลท์อย่างเดียว

3.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง ที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.83 % ถึง 2.0 % โครงสร้างเป็นเพิร์ลไลท์ และเซกันคารีซีเมนไทต์

#### 2.1.1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอน

คุณสมบัติของเหล็กกล้า ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณการ์บอนที่ผสมเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับรูปแบบ โครงสร้างผลึก คุณสมบัติของภาค และการกระจายของผลึกด้วย แต่การ์บอนจะมีผลกระทบต่อ คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้ามาก ซึ่งสามารถพิจารณาได้ จากรูปที่ 2.1



ร**ูปที่ 2.1** แสดงเส้นกราฟคุณสมบัติทางกลที่เกิดจากการ์บอนผสม [8]

เหล็กกล้าแต่ละชนิดจะนำไปใช้งานที่แตกต่างกันซึ่งแต่ละชนิดสามารถพิจารณาได้ในตารางที่ 2.1

ชนิด	คาร์บอน (%)	การใช้งาน		
เหล็กกล้า	0.02 - 0.10	ท่อ หมุดย้ำ ลวด ตะปู โซ่ สลักเกลียว เหล็กในงานก่อสร้าง		
คาร์บอนต่ำ	0.20 - 0.30	วัสดุ สำหรับการชุบผิวแข็งด้วยการผสมคาร์บอนลงไป		
		ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ เฟือง เพลาลูกเบี้ยว ลูกเบี้ยว ข้อเหวี่ยง		
		ชะแลง เหล็กในงานก่อสร้าง		
เหล็กกล้า	0.30 - 0.40	เพลา ชิ้นส่วนเครื่องจักร แกน สลักเกลียวชุบแข็ง		
คาร์บอน	0.40 - 0.50	เพลา เพลาลูกเบี้ยว เฟือง เพลาข้อเหวี่ยง ชิ้นส่วนที่ต้องชุบแข็ง		
ปานกลาง	0.50 - 0.60	สลักเกลียวที่ใช้กับงานหนัก ตีขึ้นรูป		
		ไขควง เฟืองชุบแข็งด้วยน้ำมัน		
เหล็กกล้า	0.60 - 0.70	แม่พิมพ์ตีขึ้นรูป เหล็กเครื่องมือ ชุดประแจหกเหลี่ยม		
คาร์บอนสูง	0.70 - 0.90	เครื่องทางการเกษตร สปริง สิ่ว เครื่องมือช้างไม้		
	0.90 - 1.00	สกัดงานเย็น เหล็กย้ำหัวหมุด ใบตัด กรรไกรตัดหญ้า สว่าน		
	1.00 - 1.20	เจาะ หิน เส้นถวดเครื่องคนตรี		
	1.20 - 1.30	สปริง ขวาน แหนบรถยนต์ มีด		
	1.30 - 1.40	คอกสว่าน ลูกปืน คอกต๊าป มีคตัค เครื่องทำสลักเกลียว		
		เครื่องมือตัดโลหะ ตะไบ มีด		
		มีคคว้าน เครื่องวัค ใบเลื่อย และเครื่องมือที่ต้องอาศัยความคม		
		ทุกชนิด		

ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของเหล็กกล้าการ์บอนปริมาณการ์บอน และการใช้งาน [8]

สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน เกรค AISI 1020 ที่ใช้ในการทคลองเชื่อมเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนรีคร้อน (Hot Rolled Steel) ตามมาตรฐานประเทศสหรัฐอเมริกามีส่วนผสมทางเกมี คือ 0.18-0.23% C, 0.3-0.6% Mn,0.04 % P และ 0.05% S ซึ่งจัคเป็นเหล็กกล้าประเภทคาร์บอนต่ำใช้สำหรับการเชื่อม ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

# 2.2 การบิดงอในงานเชื่อม

ในกระบวนการเชื่อมมีปัญหาที่พบบ่อยคือการบิดงอ (Distortion) หรือการเปลี่ยนแปลงมิติอยู่จำนวน มากสามารถจำแนกได้ตามลักษณะดังนี้ [9]

- 1. การหดตัวตามแนวขวาง (Transverse Shrinkage)
- 2. การหดตัวตามแนวขาวขนานกับแนวในการเชื่อม (Longitudinal Shrinkage)
- 3. การบิดงอเชิงมุมรอบๆแนวในการเชื่อม (Angular Distortion)

การหคตัวและการบิคงอที่เกิดขึ้นในระหว่างการประกอบและเชื่อมโครงสร้างนั้น มีความซับซ้อน มากกว่าที่เกิดรูปที่ 2.1 ตัวอย่าง เช่นเมื่อเกิดการหคตัวตามแนวยาวในแนวเชื่อมฟิลเลต รอยต่อก็ยังเกิด การโก่งงอได้แม้ว่าแนวเชื่อมจะอยู่ในแนวแกนสะเทิน (Neural Axis) ก็ตาม



ร**ูปที่ 2.2** ปัญหาการเสียรูปหรือการเปลี่ยนแปลงมิติในงานเชื่อม (ก) การหดตัวตามแนว ขวาง (ข) การหดตัวตามแนวยาว (ก) การเปลี่ยนแปลงมุมในการเชื่อมต่อชน (ง) การเปลี่ยนแปลงมุมในการเชื่อมฟิลเลต [9]

#### 2.2.1 สาเหตุของการบิดงอ

การบิดงอมีสาเหตุจากการที่เนื้องานเชื่อม (Weld Metal) และเนื้อโลหะ (Base Metal) ที่อยู่ติดกันมีการ งยายและหดตัวที่ไม่สม่ำเสมอในระหว่างที่ได้รับความร้อนและเย็นตัวในกระบวนการเชื่อม เนื้อโลหะ ที่เชื่อมเกิดการหดตัวในขณะที่เปลี่ยนเป็นของแข็ง (Solidification Shrinkage) และเกิดการหดตัวจาก ความร้อนของเนื้อโลหะที่หลอมละลายระหว่างทำการเชื่อม ระหว่างนั้นมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อ การหดตัวของโลหะและทำให้การทำนายการบิดงอให้แม่นยำทำได้ยาก เช่นคุณสมบัติทางกลและ คุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งใช้ในการกำนวณเช่น ความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength), โมดูลัส ของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity), และก่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ซึ่งจะมีก่า ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ก่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) และค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) มีค่าเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงต่างๆ เหล่านี้จึงทำ ให้การทำนายสิ่งที่เกิดขึ้นในขณะที่ให้ความร้อนหรือเย็นตัวทำได้ยาก [10]



รูปที่ 2.3 การเชื่อมฟิลเลต (ก) เกิดความเก้นภายในตามแนวยาวและแนวขวาง (ข) ถ้าแนว เชื่อม ไม่ติดกันกับชิ้นงาน จะเกิดการหดตัวของแนวเชื่อม [10]

รูปที่ 2.3 อธิบายถึงความเค้นภายในที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมฟิลเลตของเหล็กหนา 2 แผ่น ในแนวเชื่อม เกิดความเก้นตกค้างในแนวขวาง (Transverse Stress) และแนวยาว (Longitudinal Stress) ดังรูปที่ 2.3 ก) ส่วนความเค้นที่เกิดขึ้นเข้าสู่แนวเชื่อมได้อย่างไรให้พิจารณาจากรูปที่ 2.3 ข) ถ้าแนวเชื่อมฟิลเลต แยกออกจากชิ้นงาน เนื้องานเชื่อมจะหดตัวทำให้ปริมาตรลดลงเมื่อเย็นตัวที่อุณหภูมิห้องในขณะที่ไม่ ถูกยึดไว้และความเค้นตกค้างไม่มี แต่หากแนวเชื่อมถูกยึดไว้กับชิ้นงาน แนวจะถูกคึงให้ยึดออกตาม ์แนวขวางและแนวยาว โดยแรงตามขวางและแรงตามยาวที่เกิดจากความเค้นตามลำคับในเวลาเดียวกัน ้นั้นแนวเชื่อมต้องพยายามจะยืดให้ได้ตามขนาด จึงเกิดความเก้นที่สมมูลกันกับกวามแข็งแรงที่จุด ้คราก (Yield Strength) ขึ้น ความเค้นที่เกิดขึ้นดังกล่าวเรียกว่าความเค้นตกค้าง ซึ่งจะพยายามทำให้ ์แนวเชื่อมเสียรูป ในกรณีที่ยกตัวอย่างนี้เหล็กแผ่นซึ่งจะพยายามทำให้แนวเชื่อมเสียรูป ในกรณีที่ ้ยกตัวอย่างนี้เหล็กแผ่นซึ่งมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับแนวเชื่อม จึงเกิดการเสียรูปน้อย แต่อย่างไรก็ตาม การบิดงอเชิงมุมยังคงเกิดเมื่อแนวเชื่อมแนวแรกเริ่มเชื่อมแม้ว่าชิ้นงานจะจับยึดไว้ ก็ตาม การหดตัวใน ้ชิ้นงาน (Base Metal) ที่อยู่ติดกับแนวเชื่อมก็จะเพิ่มความเก้นที่เกิดขึ้นแถ้วนำไปสู่การบิดงอ เพราะใน ระหว่างการเชื่อมชิ้นงานที่อยู่ติดกับแนวเชื่อมจะได้รับ ความร้อนเกือบจะถึงจุดหลอมละลาย แต่ ้อุณหภูมิบริเวณที่ห่างออกไปเล็กน้อยยังคงต่ำอยู่ ความแตกต่างของอุณหภูมินี้ทำให้เกิดความไม่ ้สม่ำเสมอของการขยายตัวของโลหะ หรือการเกลื่อนตัวของโลหะ ถ้าชิ้นงานถกจับยึด เปรียบได้กับ แนวเชื่อมแรกที่เชื่อมลงไป เนื้อโลหะชิ้นงานบริเวณนั้นก็จะหดตัวเหมือนเนื้อแนวเชื่อมแต่ขณะที่ ้บริเวณรอบๆ ไม่ได้รับผลจากความร้อน ก็จะเกิดความเค้นภายในขึ้นในบริเวณแนวเชื่อม เป็นเหตุให้ ้เกิดการบิดงอขึ้น ปริมาณของเนื้อโลหะชิ้นงานที่ได้รับผลกระทบจากการบิดงอสามารถควบคุมได้ โดยกระบวนการเชื่อม เช่นความเร็วในการเชื่อมที่สูงกว่าจะลดขนาดของบริเวณที่ได้รับผลกระทบ จากการหดตัวได้



รูปที่ 2.4 ความเร็วในการเชื่อมที่สูงกว่าจะลดขนาดผลกระทบจากการหดตัว [10]

#### 2.2.2 การบิดงอเชิงมุม

การหคตัวหรือการบิดงอเชิงมุมจะเกิดในรอยต่อชน (Butt) รอยต่อเกย (Lap) รอยต่อรูปตัวที และ รอยต่อมุม ซึ่งเป็นผลมาจากการเชื่อมด้านเดียวหรือการเชื่อมสองด้านที่ไม่สมดุลกัน ดังแสดงใน รูปที่ 2.4 และปริมาณการหคตัวจะขึ้นกับความกว้างและความลึกของแนวเชื่อม สัมพันธ์กับความหนา เหล็กแผ่น ชนิดของรอยต่อ และลำดับการวางแนวเชื่อม รวมทั้งคุณสมบัติของวัสดุและพารามิเตอร์ ในกระบวนการเชื่อมด้วย ดังรูปที่ 2.5 แสดงถึงปริมาณการหคตัวเชิงมุมที่ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ [11]



ร**ูปที่ 2.5** การหดตัวเชิงมุม และมุมเอียงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดรูปตัวที ด้วยการเชื่อมฟิลเลตด้านเดียว [11]

# 2.3 กระบวนการเชื่อมมิก/แม๊ก (Metal Inert Gas Welding)

กระบวนการเชื่อมมิกเป็นกระบวนการเชื่อมที่นำมาชดเชยการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ สามารถเชื่อมโลหะได้หลายชนิดโดยเฉพาะโลหะหนา ในปี ค.ศ. 1948 กระบวนการเชื่อมมิกได้รู้จัก กันดีและนำมาใช้กันในทางการค้าอย่างแพร่หลายในตอนต้นนั้นกระบวนการเชื่อมนี้ใช้สำหรับ การ เชื่อมอะลูมิเนียมและใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุม ซึ่งเรียกว่ากรเชื่อม (MIG) (Metal Inert Gas Welding) และ ต่อมาได้มีการพัฒนาใช้แก๊ส CO<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub>และเป็นแก๊สปกคลุม เพื่อเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและ เหล็กกล้าผสมต่ำ สมาคมการเชื่อมสหรัฐอเมริกาเรียกการเชื่อมนี้ ว่า GMAW (Gas Metal Arc Welding) ส่วนในญี่ปุ่นและยุโรป เรียกกระบวนการเชื่อมที่ใช้ CO<sub>2</sub> ปกคลุมว่าแม็ก (MAG) ซึ่งมาจาก กำว่า Metal Active Gas เนื่องจากแก๊ส CO<sub>2</sub> เมื่อผ่านอาร์กจะเปลี่ยนเป็น Active Gas ที่มีความไวต่อ การเกิดปฏิกิริยา [12]



รูปที่ 2.6 การเชื่อมมิก/แม๊ก (GMAW) [12]

### 2.3.1 หลักการเชื่อมมิก/แม็ก

การเชื่อมมิก/แม็กเป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้รับความร้อนจากการอาร์กระหว่างลวดเชื่อม (Consumable Electrode) กับชิ้นงาน สำหรับลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมเปลือยแข็ง ที่ส่งป้อนอย่าง ต่อเนื่องไปยังบริเวณอาร์กและทำหน้าที่เป็นโลหะเดิมลงยังบ่อหลอมละลายอีกด้วย บริเวณบ่อหลอม ละลายจะถูกปกคลุมไว้ด้วยแก๊สปกคลุมไม่ให้เกิดการรวมตัวกับอากาศ ซึ่งอาจเป็นแก๊สบริสุทธิ์หรือ แก๊สผสมก็ได้

ข้อดี ของการเชื่อม มิก/แม็ก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมอื่นๆ มีดังนี้

- สามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม
- 2. แนวเชื่อมไม่มีสแลกหกคลุมจึงไม่เสียเวลาในการเกาะสแลกออก
- ไม่มีเขม่าและควันขณะเชื่อม
- 4. สามารถมองเห็นบ่อหลอมละลายของการเชื่อมได้อย่างชัดเจน
- 5. การเชื่อมกระทำได้เร็ว จึงประหยัดเวลาและลดต้นทุนการผลิต
- งานเชื่อมมีการเสียรูปน้อย
- 7. คุณภาพของแนวเชื่อมสูง
- 8. สามารถเชื่อมงานที่มีระยะห่างรอยต่อกว้าง (Gap) ได้อย่างต่อเนื่อง

 ๑. ลวคเชื่อมเป็นม้วนขาวสามารถเชื่อมได้แนวเชื่อมขาว และไม่มีเศษปลายลวคเชื่อมที่ต้องทิ้ง มากเหมือนกับการเชื่อมด้วยลวดไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์

ข้อเสีย ของการเชื่อม มิก/แม็ก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมอื่นๆ มีดังนี้

- 1. อุปกรณ์ซับซ้อนและไม่สะควกต่อการเคลื่อนย้าย
- ไม่สามารถเชื่อมในบริเวณจำกัดได้
- 3. ถ้าเชื่อมเหล็กที่สามารถชุบแข็งได้ (Harden ability) อาจทำให้แนวเชื่อมแตก เนื่องจากไม่มี สแลกปก
  - 4. คลุมแนวเชื่อมเพื่อช่วยลดอัตราเย็นตัว จึงทำให้แนวเชื่อมเย็นตัวเร็วและมีความแข็ง

5. ไม่เหมาะกับงานสนามหรือภายนอกอาการเนื่องจากลมอาจพัดเอาแก๊สปกกลุมหนีจาก บริเวณอาร์ก (ถ้าจะเชื่อมในสนามหรือภายนอกอาการ กวรทำที่กำบังลมให้ดี)

### 2.3.2 การนำไปใช้งาน

ในกระบนการเชื่อมมิก/แม็ก ทั้งหมดลวดเชื่อมจะถูกป้อนมายังหัวเชื่อมด้วยระบบอัตโนมัติที่สามารถ ควบคุมความเร็วการป้อนได้สำหรับการส่ายหัวเชื่อมนั้นขึ้นอยู่กับระบบการเชื่อม Semi Automatic Welding เป็นกระบวนการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติซึ่งอุปกรณ์ควบคุมการเชื่อมจะถูกควบคุมการทำงาน ด้วยมือยกเว้นการป้อนลวด

## 2.3.3 โลหะที่นำมาเชื่อม

ตอนแรกได้ใช้ มิก/แม็ก สำหรับเชื่อมแมกนีเซียม อะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้าไร้สนิมในปัจจุบัน สามารถนำไปเชื่อมโลหะและโลหะผสมได้เกือบทุกชนิดซึ่งโลหะบางชนิดต้องอุ่นก่อนหรือหลังเชื่อม สำหรับโลหะที่มีจุดหลอมตัวต่ำไม่ควรเชื่อมด้วย มิก/แม็ก เพราะจะไหม้กลายเป็นควันและแก๊สได้ง่าย ดังนั้นโลหะที่เคลือบผิวไว้ด้วยโลหะที่มีจุดหลอมตัวต่ำ (เช่น ตะกั่ว สังกะสี ฯลฯ) ก่อนเชื่อมควรกำจัด โลหะที่มีจุดหลอมตัวต่ำออกจากบริเวณรอยต่อเสียก่อน และเมื่อเชื่อมเสร็จแล้วจึงเคลือบใหม่ เพราะ โลหะที่มีจุดหลอมตัวต่ำอะทำให้สมบัติทางกลของโลหะงานเชื่อมต่ำลง

# 2.4 กระบวรการเชื่อมฟลักศ์คอร์ (Flux Cored Arc Welding)

กระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) เป็นกรับวนการเชื่อมอาร์กที่เกิดขึ้นระหว่างลวดเชื่อมกับ ชิ้นงาน ลวดเชื่อมจะถูกป้อนสู่อาร์กอย่างต่อเนื่องแก๊สปกคลุมบริเวณอาร์กได้จากฟลักซ์ที่บรรจุอยู่ ภายในลวดเชื่อมกระบวนการเชื่อมนี้อาจใช้หรือไม่ใช้แก๊สปกคลุมจากภายนอก [12] การเชื่อมฟลักซ์ กอร์เป็นการเชื่อมเดียกันกับการเชื่อมมิก/แม็ก ต่าง ๆ กันที่ลวดเชื่อมเท่านั้น การเชื่อมลักซ์คอร์แบ่ง ออกเป็นแบบใช้แก๊สปกคลุมจากภายนอก และใช้แก๊สปกคลุมที่เกิดการฟลักซ์ที่บรรจุอยู่ภายในลวด เชื่อม (Self Shielded)



ร**ูปที่ 2.**7 การเชื่อมฟลักซ์คอร์ (FCAW) [12]

## 2.4.1 หลักการเชื่อมฟลักซ์คอร์

การเชื่อมฟลักซ์คอร์ได้รับความร้อนจากการอาร์กระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน หลอมละลายผิวหน้า โลหะงานและปลายลวดเชื่อม โลหะลวดเชื่อมหลอมละลายจะถูกส่งถ่ายผ่านอาร์กสู่ชิ้นงานกลายเป็น แนวเชื่อม แก๊สปกคลุมได้จากการหลอมละลายของฟลักซ์ภายในลวดเชื่อม ซึ่งฟลักซ์ไม่เพียงแต่จะใช้ แก๊สปกคลุมเท่านั้น ยังทำหน้าที่กำจัดออกซิเจน (Deoxidizer), แตกตัวเป็นอิออน (Ionizer) ทำให้เกิด ความบริสุทธิ์และเติมธาตุผสมอีกด้วยส่วนแก๊สปกคลุมเพิ่มเติมจากภายนอกนั้นจะส่งผ่านไปยังนอช เซิลของหัวเชื่อมเพื่อปกคลุมบริเวณอาร์ก ฟลักซ์ภายในลวดเชื่อมเมื่อหลอมละลายแล้วจะลอยตัว ปกคลุมเนื้อโลหะแนวเชื่อมลวดเชื่อมจะถูกป้อนออกจากม้วนลวดเชื่อมด้วยระบบอัตโนมัติ การเชื่อม สามารถทำได้ทั้งด้วยมือและเครื่อง

### 2.4.2 ข้อดีและข้อจำกัด

กระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์ได้มีการนำมาใช้ในปี ค.ศ.1950 เนื่องจากมีผลดีกว่ากระบวนการเชื่อม อื่นๆ ให้คุณภาพแนวเชื่อมสูง ต้นทุนการผลิตคงที่ ซึ่งพอสรุปได้ ดังนี้

ข้อดี

- ให้อัตราการเติมเนื้อเชื่อมสูง
- 2. สามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม
- 3. สามารถเชื่อมวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าละมุน , เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กหล่อ
- 4. สามารถเชื่อมวัสดุบางและหนามาก ๆ ได้ให้การซึมลึกดี
- 5. ชนิคมีแก๊สปกคลุมในตัว (Self Shielded) สามารถทำงานเชื่อมในสนามได้
- 6 ลดความล้าของช่างเชื่อม

ข้อเสีย

- 1. อุปกรณ์เชื่อมยุ่งยากต่อการเคลื่อนย้าย
- มีควันและสะเก็ดเชื่อมกระเด็นมาก
- 3. ต้องเคาะสแลกออก
- 4. จำกัดระยะทางระหว่างงานเชื่อมกับชุดป้อนลวดเชื่อม
- ปลักซ์สามารถดูดความชื้น

## 2.4.3 การนำไปใช้งาน

กระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์นิยมใช้กันมากในระบบกึ่งอัตโนมัติและรอรองลงมาเป็นระบบอัตโนมัติ เต็มรูปแบบแต่ไม่สามารถใช้เป็นระบบเชื่อมด้วยมือเหมือนกับการเชื่อมลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ การเชื่อมสามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อมจึงขึ้นอยู่กับขนาดลวดเชื่อมที่ใช้เชื่อม

# 2.4.4 โลหะที่นำมาเชื่อม

วัสดุที่ที่นำมาเชื่อมด้วยฟลักซ์กอร์ ได้แก่ เหล็กกล้าการ์บอนต่ำ, การ์บอนปลานกลาง, เหล็กกล้าผสม ต่ำความแข็งแรงสูง, Quenched และ Temper Steel เหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กหล่อกระบวนการ เชื่อมฟลักซ์กอร์นอกจากใช้เชื่อมต่อแล้ว ยังนิยมนำไปใช้เชื่อมพอกผิวอีกด้วย ความหนาวัสดุงานจะแตกต่างตามกระบวนการเชื่อมที่ใช้แก๊สปกคลุมในตัวและแก๊สปกคลุมภายนอก เช่น การเชื่อมที่ใช้แก๊ส CO<sub>2</sub> จากภายนอกปกคลุมจะให้การซึมลึกหรือเชื่อมงานได้หนากว่ากระบวน การเชื่อมที่ไม่ใช้แก๊สปกคลุม (Self-Shielding)

### 2.5 การถ่ายโอนโลหะ (Metal Transfer)

### 2.5.1 การถ่ายโอนน้ำโลหะของกระบวนการเชื่อม มิก/แม๊ก

การถ่ายโอนโลหะ หมายถึง การที่โลหะลวดเชื่อมหลอมเป็นหยดและหลุดออกจากปลายลวดเชื่อม ผ่านการอาร์คเข้าสู่บ่อหลอมละลายบนโลหะชิ้นงาน ซึ่งการถ่ายโอนให้ได้หยดของโลหะจะเกิดจาก แรงที่กระทำต่อหยดโลหะที่ปลายลวดเชื่อม โดยปฏิกิริยารวมกันระหว่างแรงและส่วนผสมทางเคมี ของลวดเชื่อม ชนิดของแก๊สกลุม กระแสเชื่อม แรงดันเชื่อมและขนาดของลวดเชื่อม โดยแรงที่กระทำ ต่อหยดโลหะ เช่น แรงตึงผิว (Surface Tension) พลาสมาอาร์ก (Plasma Arc) ความเร็ว (Velocity) แรงโน้มถ่วง (Gravity) แรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro Magnetic Force) และพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) จะเป็นตัวกำหนดลักษณะการถ่ายโอนน้ำโลหะที่แตกต่างกันออกไป ทำให้เกิดรูปแบบการ ถ่ายโอนโลหะลักษณะต่างๆแบ่งออกได้ 4 แบบดังนี้ [6]

1. การถ่าขโอนโลหะแบบละออง (Spray Transfer) กระบวนการถ่าขโอนโลหะแบบสเปรย์ จะเกิดจากการหลอมของปลาขลวดเชื่อมเป็นหยดโลหะขนาดเล็ก วงรอบการถ่ายโอนจะเริ่มขึ้นเมื่อ ปลายลวดเชื่อมถูกหลอมละลายแล้วก่อตัวเป็นหยดโลหะขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลาง ของลวดเชื่อม หยดโลหะจะเรียวเล็กลงตรงส่วนที่ต่ออยู่ระหว่างปลายลวดเชื่อมและหยดโลหะนี้จะถูก แขกตัวหรือถูกบีบให้หลุดออก (Pinched-Off) จากปลาขลวดเชื่อมด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า หยดโลหะ ถูกถ่ายโอนอย่างรวดเร็วผ่านพลาสมาอาร์กลงสู่บ่อหลอมเหลวอย่างคงที่และต่อเนื่องตลอดเวลาที่ กระแสเชื่อมยังไหลผ่านลวดเชื่อมอยู่ ปริมาณหยดโลหะที่ถ่ายโอนอาจด่ำกว่าหรือสูงกว่าเป็นหลาย ร้อยหยดในเวลาหนึ่งวินาที กระบวนการถ่ายโอนแบบสเปรย์ต้องใช้ความเข้มของกระแสสูง เพื่อลวด เชื่อมจะได้หลอมเป็นหยดขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมอย่างรวดเร็วหยดที่มีขนาด เล็กนี้จะไม่มีผลต่อเสถียรภาพของการอาร์กการไหลพุ่งของหยดโลหะจึงเป็นเส้นตรงจากศูนย์กลาง ปลายลวดเชื่อมสู่บ่อหลอมละลาย ทำให้กำหนดทิศทางการถ่ายโอนได้ตามต้องการ ปริมาณความร้อน ที่เข้าสู่งานสูงแม้ลวดเชื่อมจะมีขนาดใหญ่ก็สามารถหลอมเป็นหยดขนาดเล็กได้ทันที ส่งผลให้เกิด การหลอมลึกของแนวเชื่อมมาก

2. การถ่ายโอนโลหะแบบหยด (Globular Transfer) วงรอบของการถ่ายโอนจะเริ่มเมื่อปลาย ลวดเชื่อมถูกหลอมเหลวให้เป็นหยดโลหะ จากนั้นเกิดการก่อตัวเพิ่มขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเส้นผ่าน ศูนย์กลางของลวดเชื่อมประมาณ 1.5 ถึง 2 เท่า ก่อนจะหลุดจากปลายของลวดเชื่อมแล้วถ่ายโอนผ่าน การอาร์คสู่บ่อหลอมละลายด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว ซึ่งจะทำให้อัตราการเติมเนื้อโลหะมาก และมีความร้อนสูงกว่าการถ่ายโอนโลหะแบบลัดวงจร การถ่ายโอนโลหะแบบหยดสู่บ่อหลอมเหลว จะใช้แรงโน้มถ่วงมากกว่าแรงที่เกิดจากการอาร์ค ดังนั้น กระบวนการถ่ายโอนแบบนี้จึงเหมาะกับงาน ที่ไม่ต้องการงานเชื่อมคุณภาพสูง มีขอบเขตใช้งานจำกัดเพราะปริมาณความร้อนเข้างานต่ำ สามารถ ทำการเชื่อมได้ดีกับงานที่อยู่ในแนวราบและแนวระดับใช้ระดับกระแสและแรงดันเชื่อมสูงกว่าการ ถ่ายโอนแบบลัดวงจร

3. การถ่ายโอนแบบลัดวงจร (Short Circuit Transfer วงรอบการถ่ายโอนจะเกิดขึ้นเมื่อปลาย ลวดเชื่อมและโลหะชิ้นงานถูกทำให้เกิดการอาร์กขึ้น และมีอุณหภูมิสูงพอที่จะหลอมปลายลวดเป็น หยดโลหะขนาดเล็ก ขณะเดียวกันลวดเชื่อมจะถูกป้อนเข้าสู่บ่อหลอมเหลว ด้วยอัตราเร็วสูงทำให้หยด โลหะบนปลายลวดเชื่อมสัมผัสกับบ่อหลอมเหลวก่อนจะแยกออกจากปลายลวดเชื่อม ทำให้เกิดการ ลัควงจร ไฟฟ้า (Short Circuit) โดยที่การอาร์คจะดับไปชั่วขณะจังหวะที่ลัควงจรอยู่นี้กระแสจะเพิ่ม สูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ปลายลวดเชื่อมที่หลอมเป็นหยดจะถูกบีบรัดออกแล้วถ่ายโอนสู่บ่อหลอมเหลว ด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว ซึ่งหยดโลหะที่ปลายลวดเชื่อมจะเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างช่องว่าง ปลายลวดเชื่อมกับบ่อหลอมเหลว เมื่อหยดโลหะที่ปลายลวดเชื่อมจะเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างช่องว่าง ปลายลวดเชื่อมกับบ่อหลอมเหลว เมื่อหยดโลหะหยดแรกหลุดจากปลายลวดเชื่อมแล้วก็จะเริ่มต้น อาร์กใหม่อีกครั้งหนึ่ง สภาวะอย่างนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องกันไปอย่างรวดเร็วมาก คือ มีความถิ่งองการ ลัควงจรราว 20 ถึง 200 ครั้งต่อวินาที กระแสและแรงดันเชื่อมจะตั้งอยู่ในช่วงต่ำจึงมีปริมาณความ ร้อนเข้าสู่งานน้อย สามารถใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็กได้ งานเชื่อมบิดตัวน้อย รอยหลอมทะลุและประกาย โลหะกระเด็นไม่มาก

4. การถ่ายโอนแบบพัลส์ (Pulse Spray Transfer) เป็นกระบวนการที่พัฒนามาแทนการถ่าย โอนโลหะแบบสเปรย์เพราะมีข้อจำกัดการใช้งาน แต่ยังคงรักษาการถ่ายโอนที่เป็นลักษณะแบบสเปรย์ อยู่การพัลส์ของกระแสเชื่อมจากระดับต่ำสุดถึงระดับสูงสุดที่ 60 ใซเกิลต่อวินาที่จังหวะการพัลส์แต่ละ ครั้งจะทำให้ปลายลวดเชื่อมเป็นหยดโลหะได้ 1 หยด และจะถ่ายโอนผ่านอาร์กสู่บ่อหลอมเหลวด้วย กวามถี่สม่ำเสมอต่อเนื่องกัน ระดับกระแสต่ำสุดจะตั้งในช่วงการถ่ายโอนแบบละออง การถ่ายโอน หยดโลหะจะเกิดขึ้นเมื่อกระแสพัลส์ถึงระดับสูงสุด หลังจากถ่ายโอนหยดโลหะแล้วกระแสจะลดลง ด่ำสุดตามที่ตั้งไว้ กระแสต่ำจะช่วยคงให้การอาร์กเกิดอยู่ตลอดเวลาช่วงจังหวะนี้การถ่ายโอนโลหะไม่ เกิดขึ้น การพัลส์ของกระแสสูงแล้วต่ำลงจะมีผลต่อการกวบคุมปริมาณกวามร้อนเข้าสู่งานเชื่อม โดย กวามร้อนเฉลี่ยจะต่ำกว่าการถ่ายโอนแบบละออง จึงเหมาะกับการเชื่อมงานในทุกตำแหน่งท่าเชื่อม งานบิดตัวน้อย สามารถใช้ลวดเชื่อมขนาดใหญ่ได้ และการถ่ายโอนหยดโลหะผ่านการอาร์คยังคงเป็น หยดขนาดเล็กอยู่ จึงประหยัดกว่าการใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็ก

## 2.5.2 การถ่ายโอนน้ำโลหะของกระบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์

การถ่ายโอนน้ำโลหะจากลวดเชื่อมผ่านการอาร์ก แบ่งออกได้ 3 ชนิด ได้แก่ แบบสเปรย์ (Spary), แบบ หยด (Globular), และแบบลัดวงจร (Short Circuiting) การถ่ายโอนน้ำโลหะของการเชื่อมฟลักซ์คอร์ ทั้งหมดกล้ายแบบหยดละเอียด (Globular) สำหรับแกนลวดโลหะผสมที่มัฟลักซ์ผสมอยู่ต่ำการถ่าย โอนน้ำโลหะจะเป็นแบบลัดวงจรกล้ายกับการเชื่อมมิก ลวดเชื่อมฟลักซ์กอรีจะหลอมละลายจากโลหะ ปลอกนอกของลวกเชื่อม และน้ำโลหะที่เกิดจากปลอกโลหะจะหยดเติมลงในแนวเชื่อม ส่วนฟลักซ์ที่ อยู่แกนกลางลวดเชื่อมจะแยกออกอยู่บนผิวหน้าบ่อหลอมเหลว [12]



**รูปที่ 2.8** การถ่านโอนน้ำโลหะของการเชื่อมฟลักซ์คอร์ [12]

ในกระแสเชื่อมต่ำจะให้น้ำโลหะที่ส่งผ่านการอาร์กโตกว่าในระดับกระแสสูงถ้าใช้ลวดเชื่อมขนาด 2.4 มม. แล้วเพิ่มกระแสเชื่อมจาก 350 แอมแปร์ เป็น 550 แอมแปร์ หยดน้ำโลหะที่ส่งผ่านการอาร์กจะ เปลี่ยนแปลง คือมีปริมาณหยดน้ำโลหะเพิ่มขึ้นและหยดน้ำโลหะเล็กลง ที่กระแสเชื่อม 550 แอมแปร์ การถ่ายดอนน้ำโลหะจะเป็นแบบสเปรย์แต่ก็มิใช้ว่าเมื่อใช้กระแสเชื่อมสูงขึ้นแล้วการถ่ายโอนน้ำ โลหะจะต้องเป็นแบบสเปรย์ เว้นแต่จะใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอน-ออกซิเจน

# 2.6 กระแสเชื่อม (Welding Current)

กระแสเชื่อม คือ กำลังไฟฟ้าที่เครื่องเชื่อมผลิตออกมา ซึ่งสามารถอ่านได้โดยตรงจากแอมป์มิเตอร์ของ เครื่องเชื่อม ในกระบวนการเชื่อมแมก กระแสเชื่อมจะสัมพันธ์ โดยตรงกับความเร็วของการป้อนลวด (Wire Feeder) ถ้าป้อนลวดเร็วขึ้นกระแสเชื่อมที่ผลิตออกมาก็จะมากขึ้นด้วย แต่ถ้าป้อนลวดช้าลง กระแสเชื่อมก็จะลดลงเช่นกัน แสดงในภาพประกอบ 2.9 โดยในกระบวนการเชื่อมดังกล่าว สามารถ แบ่งชนิดของกระแสเชื่อม เป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภทดังนี้ [3]



**รูปที่ 2.9** ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเชื่อมกับความเร็วในการป้อนถวด [3]

#### 2.6.1 กระแสเชื่อมแบบมาตรฐาน (Standard Arc Current)

กระแสเชื่อมแบบมาตรฐาน เป็นลักษณะของกระแสเชื่อมโดยทั่วๆ ไปซึ่งกระแสในขณะเชื่อมโดย เฉลี่ยตลอดการเชื่อมจะมีค่าคงที่ สำหรับกระบวนการเชื่อมแมก กระแสไฟเชื่อมจากเครื่องเชื่อมจะถูก ส่งไปสู่ท่อนำลวดภายในหัวเชื่อมผ่านไปยังลวดเชื่อมสู่ชิ้นงาน ซึ่งการกำหนดค่ากระแสในการเชื่อม ในทางปฏิบัติจะนิยมตั้งค่ากระแสเชื่อมโดยพิจารณาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดที่ใช้เชื่อม หรือจากกวามหนาของชิ้นงานเชื่อมเป็นหลัก

### 2.6.2 กระแสเชื่อมแบบพัลส์ (Pulsed Arc Current)

กระแสเชื่อมแบบพัลส์ เป็นกระแสที่เกิดจากการเปิดปิดวงจร (Switching) ระหว่างกระแสต่ำสุดกับ กระแสสูงสุด ดังนั้น ในเครื่องเชื่อมตัวเดียวจึงมีต้นกำลังแยกออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่ให้กระแส ต่ำสุด (Background Current) และส่วนที่ให้กระแสสูงสุด (Peak Current) เพื่อให้ได้กระแสพัลส์ที่ เหมาะสม การตั้งค่ากระแสในการเชื่อมจะต้องตั้งค่ากระแสสูงสุดให้สูงกว่าระดับกระแสช่วงเปลี่ยน (Threshold Level) ของการถ่ายโอนแบบละอองและค่าของกระแสต่ำสุดต้องตั้งในช่วงการถ่ายโอน แบบหยด ในขณะอาร์คช่วงกระแสค่าสูงจะเป็นการถ่ายโอนน้ำโลหะให้พุ่งเข้าสู่บ่อหลอมละลาย โลหะถูกแรงบีบรัดแยกตัวออกจากปลายลวดเชื่อมผ่านอาร์คสู่บ่อหลอมเหลวที่วงรอบพัลส์และ เกิดขึ้นซ้ำๆ กันอย่างต่อเนื่อง ในช่วงประมาณ 30-300 ครั้งต่อวินาที ลงสู่บ่อหลอมละลาย ส่วนช่วง กระแสค่าต่ำจะเป็นการรักษาการอาร์คให้คงที่และต่อเนื่อง ลักษณะของรูปแบบของกระแสพัลส์ แสดงในภาพประกอบ 2.10



รูปที่ 2.10 รูปแบบของกระแสเชื่อมแบบพัลส์ [3]

#### 2.7 แก๊สปกคลุม

แก๊สปกคลุมเป็นแก๊สที่ใช้ปกคลุมบริเวณเชื่อมและบ่อหลอมเหลวไม่ให้เกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชั่นหรือ สกปรก เนื่องจากวัสดุงานจะรวมตัวกับออกซิเจน ในโตเจน และไอน้ำในอากาศ [12]ในโตรเจนที่ฝัง ด้วอยู่ในแนวเชื่อม จะทำให้แนวเชื่อมมีความเหนียว (ductility) และความแข็งต่อแรงกระแทก (Impact Strength) ลดลงและแตกร้าวง่าย และถ้าในโตรเจนมีปริมาณมากจะทำให้แนวเชื่อม เป็นรูพรุน ออกซิเจนที่มีอยู่มากในเหล็กจะรวมตัวกับการ์บอนเป็นการ์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ซึ่งแก๊สนี้จะฝึง ด้วอยู่ในโลหะและเกิดเป็นรูพรุน และออกซิเจนที่อยู่ในเหล็กสามารถรวมตัวกับธาตุอื่น ๆ ที่อยู่ใน เหล็กได้เช่นกัน ซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบฝังตัวอยู่ภายในแนวเชื่อมส่วนไฮโดเจนที่อยู่ในไอน้ำเมื่อ แยกตัวออกมาจะรวมตัวกับเหล็กหรืออลูมิเนียมทำให้เกิดรูพรุนและแตกใต้แนวเชื่อม การหลีกเลี่ยง ปัญหาดังกล่าวนั้นกระทำได้โดยใช้แก๊สปกคลุม ซึ่งเดิมใช้แก๊สเฉื่อยจำพวก อาร์กอนและฮีเลียม แต่ ปัจจุบันใช้แก๊สการ์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และออกซิเจนผสมกับแก๊สเฉื่อย สำหรับแก๊สอิ่นเพื่อให้ได้ แนวเชื่อมที่มีกวามสมบูรณ์ก็ได้

### 2.7.1 แก๊สอาร์กอน

แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สเฉื่อยนำความร้อนต่ำ จึงเกิดเปลวอาร์กแคบและมีความเข้มสูงทำให้ได้รับพลัง งานและความร้อนสูง ดังนั้นแนวเชื่อมที่ได้จะแคบและซึมลึกดี การที่แก๊สอาร์กอนให้เปลวอาร์กที่เข้ม ทำให้เกิดปฏิกิริยาทำความสะอาดออกไซด์บนผิวของชิ้นงานเชื่อมโดยเฉพาะการเชื่อมอลูมิเนียม แก๊สอาร์กอนใช้เป็นแก๊สปกคลุมสำหรับเชื่อมมิกซึ่งใช้ในการเชื่อมโลหะนอกกลุ่มเหล็กและโลหะ ผสมได้แก่ อลูมิเนียม , แมงกานีส , อลูมิเนียมผสมกับแมงกานีสและทองแดง



**รูปที่ 2.11** แนวเชื่อมใช้แก๊สอาร์กอนปกคลุม [12]

## 2.7.2 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)

แก็ส CO<sub>2</sub> ซึ่งอยู่ในลักษณะของสารประกอบ ที่ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์กับออกซิเจน ซึ่งมีใช้เป็นแก๊สเฉื่อยเหมือนกับแก๊สอาร์กอนและแก๊สฮีเลียม ดังนั้นบริเวณอาร์กที่มีความร้อนสูงจะ เกิดออกซิเจนอิสระ เมื่อใช้แก๊ส CO<sub>2</sub> เป็นแก๊สปกคลุมและเปลวอาร์กที่เกิดขึ้นจะกว้างกว่าการใช้แก๊ส อาร์กอนแต่จะแคบกว่าการใช้แก๊สฮีเลียม แก๊ส CO<sub>2</sub> เป็นผลที่ได้จากการเผาแก๊สธรรมชาติ น้ำมันหรือ ถ่าน โค๊ก สำหรับแก๊ส CO<sub>2</sub> ที่ได้จาก การผลิตแอม โมเนีย และการหมักแอลกอฮอล์จะมีความบริสุทธิ์ 100 % แนวเชื่อมที่ปกคลุมด้วย CO<sub>2</sub> จะมีความกว้างปานกลาง การซึมลึกดี การหลอมละลายดีลักษณะ แนวเชื่อมดีและ ไม่เกิดการกัดแหว่งที่งอบแนวเชื่อม แต่การใช้แก๊ส CO<sub>2</sub> จะเกิดสะเก็ดเชื่อมและอาร์ก ไม่สม่ำเสมอโดยเฉพาะเมื่อใช้กับการส่งถ่ายน้ำโลหะลวดเชื่อมแบบ Open Arc

ดังนั้นการใช้แก๊ส CO<sub>2</sub> ปกคลุม จึงเหมาะแก่การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมขนาดเล็กโดยนำไปเชื่อมเหล็กกล้า ละมุน แก๊ส CO<sub>2</sub> มีราคาถูกกว่าแก๊สปกคลุมชนิดอื่น ๆ จึงทำให้ต้นทุนในการเชื่อมต่ำ และปริมารแก๊ส ที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อมโดยทั่วไปจะใช้ 25 C.F.H. (ลูกบาศก์ฟุตต่อชั่วโมง) ถ้าต้องการใช้อัตราการไหล ของแก๊สเกินกว่า 25 C.F.H. ควรใช้แบบ Manifold ที่ต่อแก๊ส CO<sub>2</sub> หลายถังขนานกันหรือติดตัวทำ ความร้อนไว้ระหว่างถังแก๊สกับเครื่องปรับความคันแก๊สก็ได้ การใช้ปริมาณการไหลของแก๊สมาก เกินไปอาจจะเป็นต้นทุนให้แก๊ส CO<sub>2</sub> เหลวภายในถังไหลออกมาด้วย

### 2.7.3 แก๊สอาร์กอนผสมแก๊สการ์บอนใดออกใชด์

การใช้ CO<sub>2</sub> เป็นแก๊สปกคลุมจะเกิดสะเก็ดกระเด็นและการอาร์กไม่สม่ำเสมอเมื่อผสมแก๊สอาร์กอนลง ไปปัญหาดังกล่าวจะลดลง ลักษณะของเปลวอาร์กและแนวเชื่อมจะแตกต่างกันตามความแกต่างของ อัตราส่วนผสมของแก๊สทั้งสอง ส่วนสมบัติเชิงกลนั้นเมื่อใช้แก๊สอาร์กอนผสมกับ CO<sub>2</sub> จะให้ผลดีกว่า การใช้แก๊ส CO<sub>2</sub>อย่างเดียว แก๊สผสมชนิดนี้ใช้กับเหลีกกล้าละมุน ซึ้งให้การซึมลึกดี ลดการเกิดรูพรุน และลวดเชื่อมหลอมละลายได้ดี

### 2.8 การเติบโตของเกรนในรอยเชื่อม (Grain Growth of weld)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาพบว่าโลหะที่มีธาตุผสมแตกต่างกันมีความ สัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาแตกต่างกันเพราะลักษณะของการเกิดเกรนในการเชื่อมสามารถเติบโต ได้ทั้ง Heat up และ Cool down ก็ได้การเติมธาตุผสมเข้าไปหลายๆชนิดสามรถหยุดยั้งการเติบโตของ เกรนได้เกิดเป็นสารประกอบโลหะ (Intermetallic compound) ที่บริเวณขอบเกรนสกัดกั้นไม้ให้เกรน เกิดการขยายตัว (ดังแสดงในรูปที่ 2.12) [13]



รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ เวลา และ ขนาดของเกรน [13]

ผลกระทบจากกรรมวิธีในการเชื่อมเนื่องจากกรรมวิธีการเชื่อม แต่ละวิธีมีความแตกต่างกันในด้าน Heat input ซึ่งกรรมวิธีการเชื่อมใดมี Heat input สูงจะได้เกรนที่มีขนาคโตเนื่องจากมีอัตราการเย็นตัว ช้าทำให้ HAZ ได้รับความร้อนสูงไปด้วย และมีความกว้างมาก จะพบกับการเชื่อมที่มีความหนามากๆ และกระบวนการเชื่อมที่มี Heat input สูง เช่น กรรมวิธีการเชื่อมแบบ Electro slag welding (ดังแสดงในรูปที่ 2.13)



รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ของกรรมวิธีการเชื่อมกับอุณหภูมิ เวลา และขนาดของเกรน [13]

# 2.9 โครงการสร้างบริเวณต่างๆ ที่ได้รับอิทธิพลจากการเชื่อม

ความร้อนที่ได้จากการเชื่อมนอกจากจะทำให้เกิดการหลอมละลายแล้วยังมีอิทธิพลต่อบริเวณขอบของ แนวเชื่อมที่ไม่หลอมละลายด้วยเช่นกัน รูป แสดงภาพบริเวณต่าง ๆ ของแนวเชื่อมที่ได้รับผลกระทบ จากกวามร้อนโดยแบ่งออกเป็น 5 บริเวณด้วยกัน คือ [14]

บริเวณ 1 บริเวณแนวเชื่อม (บริเวณที่มีการผสมของลวคเชื่อมกับชิ้นงาน)

(weld zone ; mixed zone)

บริเวณ 2 บริเวณที่ไม่มีการผสม (unmixed zone)

บริเวณ 3 บริเวณที่มีการหลอมละลายบางส่วน (partially-melted zone)

บริเวณ 4 บริเวณกระทบร้อน (heat effected zone ; HAZ)

บริเวณ 5 โลหะฐานที่ไม่มีผลกระทบ (uneffected base metal)



**รูปที่ 2.14** บริเวณต่าง ๆ ที่ได้รับผลจากการเชื่อม [14]

บริเวณ 1 บริเวณแนวเชื่อมหรือบริเวณที่มีการผสมของลวดเชื่อมและชิ้นงานบริเวณนี้ขณะ ทำการ อาร์กจะเกิดการกวน (Stir) จากแรงของการอาร์กที่ไม่สม่ำเสมอทำให้เนื้อโลหะอาจมีการผสมรวมกัน บางส่วนเป็นเนื้อเดียวกันสมบูรณ์ แต่อีกบางส่วนอาจไม่สมบูรณ์ ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคจะเป็น อย่างไรขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ ส่วนผสมทางเคมีความเป็นเนื้อเดียวกัน กลไกการแข็งตัว และ โครงสร้างจุลภาคแรกเริ่ม บริเวณ 2 บริเวณที่ไม่มีการผสมกันระหว่างเนื้อชิ้นงานกับลวดเชื่อม แต่มีการหลอมละลาขของเนื้อ ชิ้นงานเกิดขึ้นและเป็นแนวเชื่อมต่อจากบริเวณเชื่อมหรือบริเวณ 1 การขยายตัวของเกรนจาก การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลงจะเริ่มจากบริเวณ 2 นี้ ชั้นความหนาของบริเวณที่ 2 นี้จะมากหรือ น้อยขึ้นอยู่กับกระบวนการเชื่อม เช่น ในการเชื่อมอาร์กใต้ฟลั๊ก (Submerged Arc Welding) ความหนา ของบริเวณนี้จะอยู่ระหว่าง 0.05 ถึง 2.5 มม. อุณหภูมิที่เกิดจากการเชื่อมบริเวณนี้จะอยู่ระหว่าง 1,600 -1,700° Cซึ่งสามารถดูได้จากกราฟอุณหภูมิในรูปที่ 2.12 อุณหภูมินี้สูงกว่าอุณหภูมิของเส้นลิควิดัส หากพิจารณาจากแผนภาพเฟสของเหล็กกับการ์บอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณนี้จะต้อง ใช้วิธีการกัดกรดหรือกัดขึ้นรอยที่พิเศษกว่าปรกติ จึงจะสามารถตรวจสอบโกรงสร้างได้เพราะส่วน ผสมทางเคมีจะเป็นส่วนผสมเดียวกันกับชิ้นงานเชื่อม ทำให้ยากที่จะแยกแยะขอบเขตของโครงสร้าง ได้อย่างชัดเจน

บริเวณ 3 บริเวณที่มีการหลอมละลายบางส่วน บริเวณนี้จะไม่ได้เกิดขึ้นกับทุกๆ การเชื่อมแบบหลอม ละลายในเหล็กกล้า แต่จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่ทำการเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคใน พื้นที่เล็กๆที่สามารถเกิดการหลอมละลายได้ที่อุณหภูมิใกล้ๆกับลิควิดัส (ประมาณ 1,525°C) และ ขึ้นอยู่กับเวลาที่ทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ด้วยว่ายาวนานเพียงใด บริเวณ 3 นี้บางครั้งจะเรียกว่า "ลิคอชัน" (liquation) เพราะการหลอมละลายจะเกิดขึ้นตามขอบเกรนของโครงสร้างจุลภาคที่มีคุณลักษณะของ การแยกตัวขององค์ประกอบทางเคมีที่มีจุดหลอมละลายต่ำอยู่ที่ขอบเกรน

บริเวณ 4 บริเวณกระทบร้อน (HAZ) เป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนของของการเชื่อมทำให้ สมบัติทางกลและ โครงสร้างจุลภาคของ โลหะที่ถูกเชื่อมเปลี่ยนแปลง ไปจากเคิม ในที่นี้บริเวณ HAZ อาจรวมไปถึงบริเวณที่มีการหลอมละลายบางส่วนด้วย ในรูปที่ 2.14 เส้นโค้งที่แสดงระดับอุณหภูมิ ของแนวเชื่อมในบริเวณต่างๆ ของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 700°C จนถึงอุณหภูมิประมาณ 1,300°C เป็นช่วงของบริเวณ HAZ จะเห็นว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 727°C นั้นเป็นอุณหภูมิวิกฤติต่ำ AC ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเกิดขึ้น ส่วนจะเปลี่ยนโครงสร้างหรือ เฟสใดบ้างขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเกมีและอัตราการได้รับความร้อนขณะเชื่อมที่เพิ่มขึ้นว่าช้าหรือเร็ว และมีอัตราการเย็นตัวช้าเร็วมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียด ในหัวข้อต่อไป

บริเวณ 5 โลหะฐานที่ไม่มีผลกระทบใดๆ บริเวณนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคหรือ สมบัติทางกลใดๆ

## 2.10 หลักการการทดสอบมหาภาคงานเชื่อมโลหะ

การตรวจสอบงานเชื่อมโลหะด้วยการตรวจสอบมหาภาคเพื่อจุดประสงค์บางประการนี้ความสมบูรณ์ ของแนวเชื่อม จำนวนชั้นแนวเชื่อม บริเวณกระทบร้อน (Heat Effected Zone : HAZ) สแลกฝังในการ ซึมลึกของแนวเชื่อม และรูพรุนของงานเชื่อม การเตรียมชิ้นงานทดสอบ (Macro Specimen) โดยการ ขัดผิวและกัดด้วยน้ำนาเคมีตามความเหมาะสม แล้วตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Test) หรือใช้ กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่าเข้าช่วยตามมาตรฐาน ASME Section V การตรวจสอบที่ให้ผลดีที่สุดนั้น ผู้ตรวจสอบต้องรับผิดชอบและควบกุมการตรวจสอบตามวิชีอย่างถูกต้อง [15]

# 2.10.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ (Macro Specimen)

กรณีการตรวจสอบงานเชื่อม Fillet Weld ตามมาตรฐาน ASME Section IX การเตรียมชิ้นงานทดสอบตามขบวนการ (Procedure Specimen) ตาม QW - 183 เตรียมชิ้นทดสอบ ตาม QW - 462.4 (a) หรือ QW - 426.4 (d) ดังรูปที่ 2.15 และ 2.16

ความหนาของโลหะ T1	ความหนาของโลหะ T2
น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1/8 นิ้ว	เท่ากับ T1
มากกว่า 1/8 นิ้ว	เท่ากับหรือน้อยกว่า T1 แต่ไม่น้อยกว่า 1/8 นิ้ว



รูปที่ 2.15 แสดงรอยเชื่อมฟิลเลต (ขั้นต้น) QW - 462.4 (a) [15]



รูปที่ 2.16 แสดงรอยเชื่อมฟิลเลตในท่อ (ขั้นต้น) QW - 462.4 (d) [15]

ตัดชิ้นงานตามขวางออกเป็น 5 ชิ้นตาม QW - 464.4 (a) หรือ 4 ชิ้นตาม QW - 462.4 (d) การเตรียมชิ้นงานทดสอบสมรรถนะ (Performance Specimen) ตาม QW - 184 เตรียมชิ้นทดสอบตาม QW - 462.4 (b) หรือ QW - 462.4 (c) ดังรูปที่ 2.17 และ 2.18



รูปที่ 2.17 แสดงรอยเชื่อมฟิลเลต (สมรรถนะ) QW - 462.4 (b) [15]



รูปที่ 2.18 แสดงรอยเชื่อมฟิลเลตในท่อ (สมรรถนะ) QW- 462.4 (c) [15]

ตัดชิ้นงานตามขวางห่างจากขอบประมาณ 1นิ้ว ที่ปลายทั้ง 2 ด้านตามQW - 462.4 (b) หรือตัดส่วน หนึ่งของท่อ ตาม QW - 462.4 (c) สำหรับกรณีการตรวจสอบงานเชื่อมอื่น ๆ ให้ปฏิบัติตาม WPS ของ ขบวนการเชื่อมจริง

หมายเหตุ การตัดชิ้นงานทดสอบต้องระวังมิให้เกิดความร้อนหรือใช้แรงกคระหว่างการตัดมากเกินไป เพราะจะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนรูปได้

#### 2.11 การทดสอบความแข็ง

"กวามแข็ง" เป็นกำที่ใช้อยู่ในชีวิตประจำวัน แต่อย่างไรก็ตามการที่จะให้กำนิยามต่อกวามแข็งอย่าง ถูกต้องสมบูรณ์ได้นั้นเป็นการยากมาก ดังนั้นในด้านพลศาสตร์จึงมีวิธีการวัดกวามแข็งของโลหะอยู่ นานาชนิดแต่พอจะสรุปนิยามกวามแข็งได้ว่า กวามแข็งเป็นกวามต้านทานของวัสดุที่มีต่อแรงแปรรูป [16]

ในการทดสอบความแข็งของวัสดุที่ใช้ทางด้านอุตสาหกรรมแยกวิธีการทดสอบออกได้เป็น 4 วิธีการ ได้แก่ การทดสอบความแข็งบริเนล การทดสอบความแข็งร็อคเวล การทดสอบความแข็งวิคเกอซ์ และการทดสอบความแข็งชอร์ และแต่ละวิธีการทดสอบเป็นวิธีการทดสอบที่มีระบบการวัด ที่แตกต่างกันในขณะเดียวกันความแข็งที่ได้วัดถูกตัดสินโดยกำนิยามที่เป็นเอกเทศที่แต่ละ วิธีการอาศัยอยู่

 การทดสอบความแข็งบริเนล การทดสอบที่เรียกว่าการทดสอบความแข็งบริเนล เป็นวิธีการ ทดสอบโดยใช้เหล็กกล้าชุบแข็งรูปทรงกลมที่มีความยาวเส้นศูนย์กลางจำกัดกดลงบนผิววัสดุด้วยแรง ที่จำกัด หลังจากยกตุ้มเหล็กกล้านี้ขึ้นแล้ว วัดพื้นที่ด้านหน้าของรอยเว้าแล้วนำไปหารแรงกดที่ใช้ ผลลัพธ์ที่ได้จะเท่ากับความแข็ง



ก. เส้นผ่าศูนย์กลางของตุ้มเหล็กกล้า (มม.)
ข. ความลึกของรอยเว้า (มม.)
ค. เส้นผ่าศูนย์กลางของรอยเว้า (มม.)
ง. แรงกด (กก.)

$$= \frac{1}{3.14 \times n \times n}$$

ก. (มม.)	ง. (กก.)	ชิ้นงานที่ใช้	
10	3000	เหล็ก เหล็กกล้า	
10 10	1000 500	ทองแคง อะสูมิเนียม โลหะผสมชนิดเบา วัสดุที่แข็งและบาง	
5	750		

้ความหนาของชิ้นงานต้องมากกว่า 10 เท่าของความลึกของรอยเว้า

ความกว้างของชิ้นงานต้องมากกว่า 5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยเว้า ข้อควรระวังใน ——เวลามาตรฐานที่รักษาแรงกดเป็น 30 วินาที —— ผิวหน้าชิ้นงานต้องมีความเรียบ สามารถวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยเว้า การทดสอบ

– ได้ 0.01 มม.

2. การทดสอบความแข็งรีอคเวลในการทดสอบความแข็งรีอคเวล ให้แรงกดสองชนิดที่มีขนาด แตกต่างกันต่อผิวชิ้นงาน คือแรงกคพื้นฐาน 10 กก. และแรงกคทคสอบ 60 กก. 100 กก. และ150 กก. และวัดความลึกคลาดเคลื่อนของรอยเว้าโดยเกจวัดหน้าปัดที่ถูกติดตั้งกับเครื่องทดสอบตัวกดที่ใช้เป็น ้ตุ้มเหล็กกว้าที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.588 มม. หรือ 3.175 มม. หรือเป็นเพชรรูปทรงกรวยที่มีมุม 120° และปลายรัศมี 0.2 มม. ในกรณีที่ทดสอบชิ้นงานเหนียวเลือกใช้ตุ้มเหล็กกล้าแต่กรณีที่ทดสอบชิ้นงาน แข็งเลือกใช้เพชร เช่นในการทดสอบเหล็กกล้าทั่วไป ตอนแรกให้แรงกดพื้นฐาน 10 กก. ด้วยตุ้ม ้เหล็กกล้ำต่อจากนั้นให้แรงกดทดสอบจนถึง 100 กก. แล้วทำให้แรงกดนั้นกลับสู่สภาพเดิมคือจะถึง ระดับแรงกดพื้นฐาน10 กก. และอ่านมาตราวัคที่เกจวัคหน้าปัดแสดงให้เห็นโดยตรง

ความแข็งรีอคเวล (ตัวกดเป็นตุ้มเหล็กกล้ำ) = 130 – 500 × ความลึกของรอยเว้า ความแข็งรีอคเวล (ตัวกดเป็นเพชร) = 100 – 500 × ความลึกของรอยเว้า

3. การทคสอบความแข็งวิคเกอซ์การวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิดรามิค ฐานสี่เหลี่ยมที่ปลายหัวกดทำมุม 136° (เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) ้เป็นเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวเช่นเดียวกับ การทคสอบแบบ Brinell แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมากๆ ดังนั้นในการใช้งานจึง สามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ ซึ่งทำให้วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่า Brinell คือ ไม่ต้องคำนึงถึง อัตราส่วน P/D<sup>2</sup> และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดสองเนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็ก มาก

$$HV = \frac{1.854P}{d^2}$$

โดยที่

HV คือ ค่าความแข็งแบบ Vicker (kgf/mm²)

P คือ แรงกด (kgf)

d คือ ขนาดเส้นทะแยงมุม d<sub>1</sub> และ d<sub>2</sub> เฉลี่ย (mm.)



4. การทดสอบความแข็งชอร์ในการทดสอบนี้ทำให้น้ำหนักถ่วงซึ่งมีปลายเป็นเพชรตกลงบน ผิวหน้าของชิ้นงานจากความสูงที่จำกัด และวัดความสูงที่น้ำหนักถ่วงกระเด้งขึ้นในแนวตั้งฉากด้วย เกจวัดด้วยหน้าปัด เมื่อเทียบกับวิธีการทดสอบชนิดอื่น ความแม่นยำของผลการทดสอบนี้ไม่ค่อยสูง ในกรณีที่ทดสอบชิ้นงานที่เหนียวและอ่อนจะวัดได้ยากขึ้น เนื่องจากแรงเด้งกลับของน้ำหนักถ่วงถูก ดูดซึมอย่างมาก ดังนั้นเพื่อจะยกความแม่นยำของการวัดเลือกใช้น้ำหนักถ่วงที่มีปลายเป็นเหล็กกล้า น้ำหนักและความสูงในการตกลงของน้ำหนักถ่วงขึ้นอยู่กับระบบของแต่ละเครื่องทดสอบ แต่ใน การกำนวณความแข็งของชิ้นงานใช้สูตรเดียวกัน คือ

ความแข็งชอร์ = 
$$rac{1000}{65}$$
 X  $rac{101}{65}$  Array ที่น้ำหนักถ่วงเด้งกลับ



2.11.1 วิธีการทดสอบความแข็งของบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนในการอาร์ก



รูปที่ 2.19 วิธีการทคสอบความแข็งของบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนในการอาร์ก [16]

### ตารางที่ 2.2 แสดงชนิดของชิ้นงานที่จะทดสอบ [16]

	ก (มม.)	ข (มม.)	ค (มม.)
ชิ้นงานทคลองที่ถูกเชื่อมในอุณหภูมิห้อง	200	75	125
ชิ้นงานทคลองที่ถูกเชื่อมโคยการให้ความร้อนก่อนเชื่อม	200	150	125

### ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง



#### 2.12 โครงสร้างจุลภาคของโลหะ

 โครงสร้างจุลภาคของโลหะ คุณภาพของการผลิตโลหะนั้น เช่น ในแง่ความสะอาด ว่ามี สิ่งเจือปนเหลือค้างอยู่ในเนื้อโลหะหรือไม่กระบวนการผลิตโลหะนั้น เช่น โลหะที่ผ่านกานการรีดเย็น จะมีโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนไป และเมื่อนำไปอบอ่อน ก็จะมีโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนไปอีก ทั้งนั้น สมบัติเชิงกลของโลหะจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาคด้วย กล่าวคือโลหะที่มีส่วนผสมทางเคมี เหมือนกัน แต่มีโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันก็ย่อมมีสมบัติเชิงกลที่ต่างกันไปด้วย [17] 2. วิธีการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคกระบวนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะ เป็นกระบวนการที่ผ่านการศึกษามาแล้วอย่างเป็นระบบ และมีขั้นตอนที่ก่อนข้างจะแน่นอนตายตัว กล่าวคือ ด้องมีการเตรียมผิวหน้าของชิ้นงานที่จะศึกษาดูโครงสร้างก่อน จากนั้น จึงใช้อุปกรณ์ช่วย ซึ่งได้แก่ กล้องจุลทรรศน์ มาส่งดูโครงสร้างจุลภาคนั้นๆ ขั้นตอนในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค มีดังต่อไปนี้

2.1 การเตรียมผิวชิ้นงาน เริ่มจากการเตรียมชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค อาจจะต้อง ตัดชิ้นงานออกจากบางส่วนของชิ้นงานใหญ่ (ซึ่งได้แก่ผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนของโครงสร้างทาง วิสวกรรม) การตัดตัวอย่างอาจจะใช้เลื่อยมือ หรือเลื่อยกล หรือใช้ใบตัดที่เป็นเม็ดเซรามิกประเภทสาร ขัดสี (Abrasive Materials) ทั้งนี้ต้องเลือกวิธีตัดที่เหมาะสมไม่เกิดความร้อนแก่ชิ้นงานมากจนกระทั่ง ส่งผลกระทบให้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไป

จากนั้น นำชิ้นงานที่ได้มาชัดผิดหน้า โดยแบ่งเป็นสองชั้นคือ การขัดหยาบด้วยกระดาษทราย (เรียกว่า Grinding) และการขัดละเอียด (เรียกว่า Polishing) กระดาษทรายที่ใช้ขัด มีความละเอียดของเม็ดทราย ตั้งแต่เบอร์ 80, 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000,1200 ตามลำดับ โดยทั่วไปหากเป็นชิ้นงาน เหล็กกล้าขัดถึงกระดาษทรายเบอร์ 120 ก็เพียงพอแล้วสำหรับขั้นตอนการขัดหยาบ (สำหรับโลหะ บางชนิดเช่น อะลูมิเนียม ซึ่งมีความแข็งต่ำอาจจะต้องขัดถึงเบอร์ 4000) ข้อกวรระวังในการขัดหยาบ กือ ต้องขัดโดยมีน้ำไหลบนผิวหน้ากระดาษทรายเสมอเพื่อหล่อเย็นไม่ให้ผิวชิ้นงานร้อนขึ้น และ เพื่อให้น้ำพัดพาอนุภาคที่เกิดจากการขัดออกไปจากบริเวณผิวหน้าชิ้นงานด้วย

ต่อจากการขัดหยาบ เป็นขั้นตอนการขัดละเอียด นำชิ้นงานมาขัดบนผ้ากำมะหยี่ที่มีผงขัดฉาบอยู่ผงขัด ใด้แก่ เม็ดอะถูมินาซึ่งมีขนาด 1 µm หรือเล็กกว่า หรืออาจจะใช้ผงชนิดอื่น เมื่อขัดละเอียดแล้ว ผิวหน้าชิ้นงานจะเรียบ มีความมันวาวเหมือนกระจก สามารถนำไปส่องตรวจสอบด้วยกล้อง จุลทรรศน์ดูครั้งหนึ่งก่อน เพื่อดูว่ามีร่องรอยของการขัดกระดาษทรายหลงเหลืออยู่หรือไม่ และสามารถ มองเห็นสิ่งเจอปนบางอย่าง (โดยเฉพาะสิ่งเจอปนที่เป็นอโลหะ) ที่ผึงอยู่ในเนื้อเหล็กกล้าได้ด้วย แต่ อย่างไรก็ตามในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะ มักจะใช้สารเกมีที่เหมาะสมกัดผิวหน้า โลหะ (การกัดผิวหน้าโลหะ เรียกว่า Etching, น้ำยาที่ใช้เรียกว่า Etching Reagent หรือ Etchant) เพื่อให้เกิดความแตกต่างระหว่างเนื้อเกรมกับของเกรน และระหว่างเฟสต่างๆ ขึ้น จึงจะทำให้เห็นสิ่ง ต่างๆ ที่เป็นรายละเอียดของโครงสร้างจุลภาคได้ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว สารเกมีที่ใช้กัดผิวหน้า ของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน โดยทั่วไปใช้น้ำยาในตอล 2%(กรดในตริกเข้มข้น 2 cc ในแอลกอฮอล์ 98 cc) จุ่มผิวหน้าชิ้นงานที่ขัดจนเรียบเป็นกระจกแล้ว ลงในน้ำยาในตอล 2%ประมาณ 3 วินาที แล้ว นำชิ้นมาล้างน้ำ แล้วล้างแอลกอฮอล์ จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน เช่น ลมร้อนจากไดร์เป่าผม แล้ว นำใปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค หากน้ำยาทำปฏิกิริยากับผิวหน้าเหล็กน้อยไป ทำให้เห็นโลคงสร้าง ไม่ชัดเจน ก็สามารถนำไปกัดเพิ่มได้ แต่หากทำปฏิกิริยามากไป เรียกว่าเกิด over etching จะทำให้ โครงสร้างจุลภาคเสียไป ในกรณีนี้ต้องนำไปขัดผิวหน้าใหม่แล้วกัดผิวใหม่อีกครั้ง

2.2 การส่องด้วยกล้องจุลทรรสน์ เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค เริ่มจากการติดชิ้นงาน บนแท่นเพื่อทำให้ผิวหน้าชิ้นงานอยู่ในแนวระดับ แล้วนำไปส่งในกล้องจุลทรรสน์ ซึ่งกล้อง จุลทรรสน์ที่ใช้ในงานตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะนี้ ได้แก่ กล้องจุลทรรสน์แสงชนิดแสง สะท้อง กล้องจุลทรรสน์อิเล็กตรอนชนิดกวาด (Scanning Electron Microscope SEM) และชนิดส่อง ผ่าน (Transmission Electron Microscope TEM) โดยทั่วไป กล้องจุลทรรสน์แสงใช้ตรวจสอบที่ กำลังขยายไม่เกิน 2000 เท่า หากสูงกว่านั้นจำเป็นด้องใช้กล้องจุลทรรสน์แสงใช้ตรวจสอบที่ กำลังขยายไม่เกิน 2000 เท่า หากสูงกว่านั้นจำเป็นด้องใช้กล้องจุลทรรสน์อิเล็กตรอนแต่สำหรับใน หนังสือเล่มนี้ จะอ้างอิงกับการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรสน์แสงเท่านั้ ซึ่งในกล้องจุลทรรสน์แสง โดยทั่วไป มักติดตั้งเลนส์ที่ให้กำลังขยาย (ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของเลนส์วัตฉุและเลนส์ตา ดังนี้50, 100, 200, 500, 1000, 2000 เท่าตามลำดับ(รายละเอียดของขั้นตอนปฏิบัติในการตรวจสอบโครงสร้าง จุลภาคของโลหะสามารถสึกษาได้จาก "การเตรียมชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะ วิทยา (Metallographic Preparation) และ "กล้องจุลทรรสน์สำหรับการตรวจวิเกราะห์โครงสร้าง จุลภาคของโลหะ" โดยสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทสไทย ซึ่งพิมพ์เผยแพร่พร้อมกับหนังสือ เล่มนี้)

# 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ยงยุทธ ดุลยกุล (2551) [3] ได้ศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อม เหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกระแสเชื่อมและส่วนผสมของแก๊สคลุมที่แตกต่างกันโดยกรรมวิธีการเชื่อม แม๊กโดยผลการทดลองจากลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างมหาภาคการเชื่อมด้วยกระแสแบบ มาตรฐานที่แก๊สผสมทุกอัตราส่วนจะให้ลักษณะของแนวเชื่อมสมบูรณ์กว่าการเชื่อมด้วยแก๊สคลุม CO<sub>2</sub> 100% และให้ผลที่ดีกว่าการเชื่อมด้วยกระแสพัลส์

ฉัตรชัย ปัญธิเคช [5] ได้ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้วิธีการเชื่อม FCAW (Flux Core Wire Arc Welding) ระบบอัตโนมัติกับงานโครงสร้างเพื่อศึกษาผลของกระบวนการเชื่อม GMAW กับพารามิเตอร์เชื่อมที่ แตกต่าง ตัวแปรพารามิเตอร์ในการทดลองนี้ มีกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมมิก แรงดันการอาร์ค และ ความเร็วในการเชื่อมในข้อสรุปนี้พบว่าค่าของของการซึมลึกในแนวเชื่อมจะเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มค่า ของกระแสไฟเชื่อม แรงคันไฟฟ้า และความเร็วในการเชื่อมยังเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการซึมลึกใน แนวเชื่อม ส่วนค่าพารามิเตอร์มีผลต่อค่าความแข็งของโลหะเชื่อม และขนาดขอบเกรนของการ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากที่ใหญ่กว่าเป็นขนาดที่เล็กกว่าเมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้น Jeong-Ung Park A, Gyubaek An B, Hae-Woo Lee C. [18] ศึกษาถึงผลของโหลดภายนอกกับการบิด งอเชิงมุมในการเชื่อมต่อมุม ใช้กระบวนการเชื่อม FCAW และเหล็กเหนียว (SM400) ซึ่งประกอบด้วย แผ่นฐาน มาทำการทดลองโดยมีเงื่อนไขงานเชื่อม กระไฟฟ้า 240 A แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ 24 V และ กวามเร็วลวดเชื่อม 390 mm. /min พบว่า กวามเครียดในทิศทางตามยาวของแนวเชื่อมไม่ได้ส่งผล กระทบต่อการบิดงอตามยาวและการบิดงอเชิงมุม แต่มันก็ทำให้กวามเครียดตกค้างในทิศทางตามยาว ของแนวเชื่อม ส่วน pretensioning ทำให้กวามเครียดในทิศทางขวางของแนวเชื่อมทำให้บิดงองาน เชื่อมลดลงเชิงมุม 60% บนฐานชิ้นงานหนา 5 mm. และ 40% ในที่หนา 8 mm. เมื่อเทียบกับภาระ ภายนอกไม่มีแต่มันไม่ได้มีผลต่อกวามเครียดตกค้างในทิศทางตามยาวของเส้นทางเชื่อมและการเก็บ รักษาก่อนกวามตึงเครียด 60 นาทีหลังจากเสร็จสิ้นการเชื่อมทำลดลงบิดงอเชิงมุมได้ 23-25% เมื่อ เทียบกับการปล่อยกวามเครียดความตึงทันทีหลังจากเสร็จสิ้นการเชื่อม ก็หมายความว่าเวลาปล่อยมี ผลกระทบต่อการบิดงอเชิงมุม

Jiecai Feng, Liqun Li, Yanbin Chen, Zhenglong Lei, Hao Qin, Ying Li. [19] ได้ศึกษาถึงผลของ ความ เร็วในงานเชื่อมส่งผลทางพฤติกรรมของการหยดน้ำโลหะในกระบวนการเชื่อม GMAW จะ พบว่าพฤติกรรมการหยดน้ำโลหะมีความแตกต่างกันจากระดับความเร็วในกระบวนการเชื่อม GMAW เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าที่ 180A และ แรงดันไฟฟ้าที่ 30 V ความเร็ว 0.4 m./min ค่าความเร็วต่ำกว่าค่าการ หยดน้ำโลหะจะพบว่าแนวเชื่อมมีขนาดที่ใหญ่ และเมื่อความเร็วมากขึ้น หยดน้ำโลหะจะอยู่นอกบ่อ หลอมละลายทำให้แนวเชื่อมเล็กลงรวมถึงการหลอมละลายลดลง

Syarul Asraf Mohamata, Izatul Aini Ibrahima, Amalina Amira, Abdul Ghaliba. [20] ได้ศึกษาถึงผล ของพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันในกระบวนการ (FCAW) และพบว่า การเพิ่มขึ้นของการซึมลึกในแนว เชื่อมด้วยการเพิ่มค่ากระแสไฟเชื่อมจาก 90A, 150A และ 210A กระแสไฟเชื่อมเชื่อมเป็นปัจจัยที่มี อิทธิพลต่อการซึมลึก และ แรงดันไฟฟ้า ความเร็วในการเชื่อมยังเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการซึมลึกใน แนวเชื่อม ขนาดขอบเกรนของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากที่มีขนาดใหญ่กว่าเปลี่ยนเป็น ขนาดที่เล็กกว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจากการเชื่อมและค่าความแข็งสำหรับโลหะเชื่อมจะสูงกว่าใน HAZ FCAW ถ้าโลหะพื้นฐานเป็นเหล็กเหนียว ผลอื่น ๆจะมีผลต่อค่าความแข็งสำหรับโลหะเชื่อม และ HAZ มันแสดงให้เห็นในหลายพารามิเตอร์มีค่า HAZ สูงกว่าโลหะเชื่อม ความแข็งจะลดลงเมื่อ แรงคันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเชื่อมเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของขอบเกรนของจุลภาค Tso-Ling Teng, Chin-Ping Fung, Peng-Hsiang, Wei-Chun Yang. [21] ใด้ศึกษาถึงผลของการ วิเคราะห์ความเค้นตกค้าง และ บิคงอในการเชื่อมต่อมุมตัวที่จะพบว่ามีความเครียดตกค้างแนวขวาง แรงดึงสูงเกิดใกล้ฐานแนวเชื่อมเป็นระยะทางจากปลายฐานแนวเชื่อมเพิ่มความเครียด รวมทั้ง ความเครียดตกค้างแนวยาวแรงดึงขนาดใหญ่เกิดขึ้นใกล้ฐานของแนวเชื่อม และความเครียดอัดปรากฏ อยู่ห่างจากแนวเชื่อม ส่วนการกระจายอุณหภูมิพร้อมความหนาแปลนทำให้เกิดการบิคงอของแนว เชื่อมเชิงมุมขึ้นที่หน้าแปลนและ ความหนาหน้าแปลนจะมีแรงความเค้นตกค้างแรงดึงเพิ่มขึ้นใกล้ฐาน