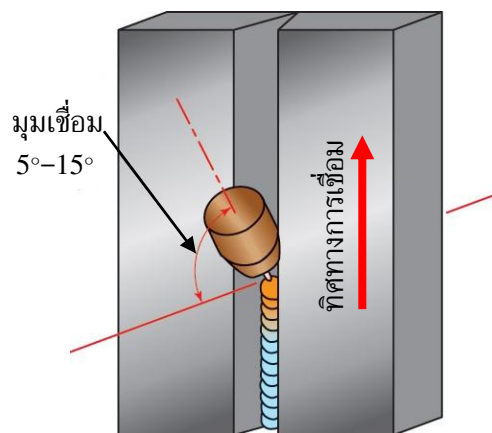


บทที่ 5

องค์ประกอบหรือปัจจัยในการเชื่อม Welding Parameter



ที่มา : 3 IN 1 Welding Machine, 2011



ที่มา : HALVERSON CTS, 2012

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 5 องค์ประกอบ หรือปัจจัยในการเชื่อม

- รู้และเข้าใจถึงความหมายและความสำคัญขององค์ประกอบหรือปัจจัยของขบวนการเชื่อม
- รู้และเข้าใจถึงองค์ประกอบหรือปัจจัยของขบวนการเชื่อมอาร์กถวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์
- รู้และเข้าใจถึงองค์ประกอบหรือปัจจัยของขบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม
- รู้และเข้าใจถึงองค์ประกอบหรือปัจจัยของขบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสสปกคลุม
- สามารถอธิบายถึงเหตุผลความบกพร่องของการเชื่อมที่เกิดจากความผิดพลาดของการปรับตั้งค่าองค์ประกอบหรือปัจจัยของขบวนการเชื่อม
- ตระหนักและมีจิตใต้สำนึกในการกำหนดองค์ประกอบหรือปัจจัยการเชื่อมที่ถูกต้องกับงานเชื่อมที่ต้องปฏิบัติ
- มีจรรยาบรรณในการพิจารณาและตัดสินใจกับปัญหาการกำหนดปัจจัยการเชื่อมเมื่อต้องปฏิบัติงานร่วมกับเพื่อนร่วมงาน หรือผู้อื่นที่มีส่วนได้ส่วนเสียกับงานที่ปฏิบัติการเชื่อม

“Welding Parameter” คือ องค์ประกอบหรือปัจจัยต่าง ๆ ที่นำมาใช้ร่วมกันแล้วสร้างเป็นงานเชื่อมโลหะที่สมบูรณ์ ซึ่งแต่ละองค์ประกอบหรือแต่ละปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อคุณภาพของงานเชื่อมในแต่ละด้านแตกต่างกัน เช่น มีผลกระทบในด้านรูปร่างของแนวเชื่อม ด้านโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อม ด้านคุณสมบัติทางกล ทางเคมี ทางกายภาพของแนวเชื่อม ด้านความบกพร่องของแนวเชื่อม ซึ่งรวมไปถึงด้านความสามารถในการเชื่อม และด้านต้นทุนของการเชื่อมประกอบ เป็นต้น โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าผลกระทบแต่ในละด้านนั้นได้รับการเอาใจใส่หรือให้ความสำคัญที่ไม่เท่ากัน ก็ขึ้นอยู่กับความจำเป็นและความต้องการของการนำแนวเชื่อมไปใช้ประโยชน์ ซึ่งในบางลักษณะงานอาจต้องเน้นความสำคัญผลกระทบด้านหนึ่งด้านใดเป็นพิเศษ เช่น งานเชื่อมประเภทถังภาชนะความดัน (Pressure vessel) เน้นความสำคัญตรวจสอบหาข้อบกพร่องของแนวเชื่อม งานเชื่อมประเภทโครงสร้างที่เน้นคุณสมบัติทางกลเป็นสำคัญ หรืองานเชื่อมประเภทประกอบชิ้นส่วนซึ่งเน้นความสามารถในการเชื่อมและต้นทุนในการผลิต อย่างไรก็ตามการที่วิศวกรงานเชื่อมหรือช่างเชื่อมจะสามารถสร้างเนื้อเชื่อมที่สมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์ได้นั้น ต้องรู้ถึงวิธีการเลือกและควบคุมองค์ประกอบหรือปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการเชื่อมได้เป็นอย่างดีและถูกต้องแม่นยำ ดังนั้น สารสำคัญในบทนี้เน้นการถ่ายทอดองค์ความรู้ เทคนิคต่าง ๆ ที่ได้จากประสบการณ์ และกรณีศึกษาจากผลงานวิจัยขององค์ประกอบหรือปัจจัยต่าง ๆ ของการเชื่อมโลหะที่มีประโยชน์ต่อวิศวกร ช่างเชื่อม และผู้ที่สนใจในเทคโนโลยีการเชื่อมโลหะ

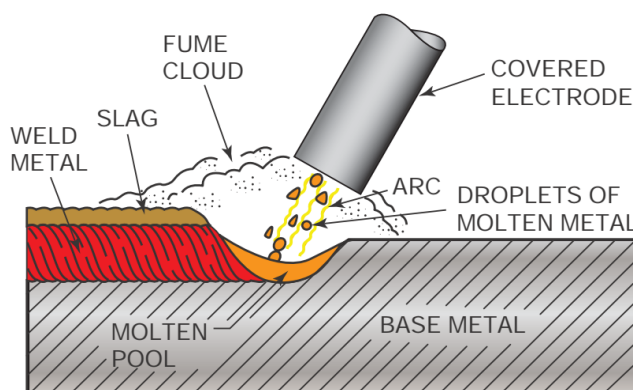
5.1 องค์ประกอบหรือการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding : SMAW)

เป็นกรรมวิธีการเชื่อมด้วยไฟฟ้าในลักษณะรูปแบบที่ทำให้เกิดอาร์ก และได้รับความร้อนจากการอาร์กระหว่างลวดเชื่อมที่มีสารฟลักซ์ (Electrode) กับชิ้นงาน (Metal) โดยสารฟลักซ์บนลวดเชื่อมเมื่อละลายทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันบรรยากาศ ส่วนตัวของลวดเชื่อมทำหน้าที่เป็นโลหะเติมเนื้อเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งพบว่าปัจจัยที่สำคัญที่ต้องควบคุมของกรรมวิธีการเชื่อมวิธีนี้ ซึ่งทำการอ้างอิงตาม William A. Bowditch et al. (2017) ที่ได้กล่าวไว้ในหนังสือ Welding Fundamentals ได้แก่

5.1.1 กระแสเชื่อม (Welding current) มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

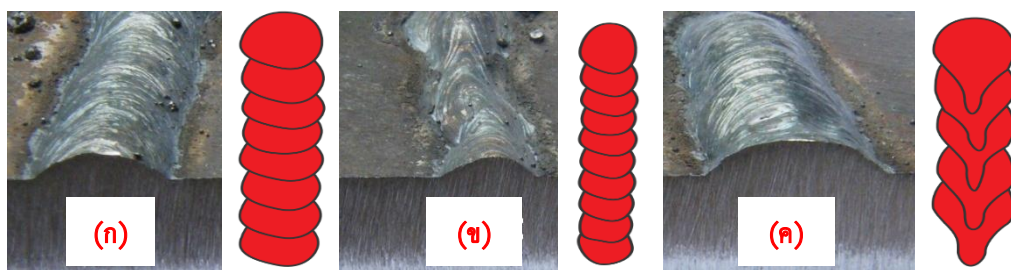
กระแสไฟฟ้าที่ใช้เป็นกระแสเชื่อมของวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยฟลักซ์ มีทั้งแบบกระแสตรง (Direct current : DC) และกระแสสลับ (Alternating current : AC) ที่อาศัยแหล่งความร้อนจากผลของความต้านทานต่อการไหลของอิเล็กตรอนของกระแสไฟฟ้า (จาก - ไป +) ที่กระโดดข้ามช่องว่างระหว่างปลายของลวดเชื่อม (Electrode) กับโลหะที่ถูกเชื่อม (Base metals) ยิ่งความต้านทานกระแสไฟฟ้ามากขึ้นเท่าใดก็ยิ่งสร้างความร้อน และอุณหภูมิของการอาร์กก็มากขึ้นเท่านั้น ซึ่งปกติอากาศเป็นตัวต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนไฟฟ้าที่สูง ดังนั้น ถ้าช่องว่างระหว่างปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงานเชื่อมนั้นมีมาก ก็ย่อมทำให้เกิดความร้อนจากการอาร์กมากขึ้น จากหลักการนี้เมื่อดึงกระแสเชื่อมที่สูงอัตราความต้านทานที่สูงตาม จึงเป็นเหตุทำให้ความร้อนในระหว่างการเชื่อมสูงขึ้น โลหะเกิดการ

หลอมละลายได้ง่ายและเร็ว ในทางกลับกัน ถ้าตั้งกระแสไฟเชื่อมที่ระดับต่ำอัตราความต้านทานก็ต่ำตาม และค่าความร้อนที่ได้ก็ลดลง อาร์กยาก หลอมละลายช้า บ่อหลอมละลายเล็ก ดังนั้นการเชื่อมด้วย กระแสเชื่อมที่ต่างกันย่อมส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม โดยสังเกตได้ว่ารูปทรงของหยดน้ำ โลหะของบ่อหลอมละลายมีความแตกต่างอย่างชัดเจน ดังแสดงการเปรียบเทียบจากแนวเชื่อมใน **รูปที่ 5.2** อ้างอิงตาม AWS Welding Handbook (2001)



รูปที่ 5.1 การเชื่อมอาร์ลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal arc welding : SMAW)

ที่มา : American Welding Society : SMAW, 2001.



รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบแนวเชื่อมที่ใช้กระแสเชื่อมต่างกัน (ก) กระแสเหมาะสม (ข) กระแสต่ำ และ

(ค) กระแสสูง ที่มา : Howard B. Cary. Modern welding technology, 6th, 2004.

จากประสบการณ์ของช่างเชื่อมและข้อมูลอ้างอิงจาก Larry Jeffus (2012) พบว่ากระแสเชื่อม ที่ถูกต้องและเหมาะสม ช่างเชื่อมพิจารณาจากคำแนะนำของผู้ผลิตลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ซึ่งปกติมีการระบุ ชัดเจนที่ข้างกล่องบรรจุลวดเชื่อม โดยจะสัมพันธ์กับขนาดของลวดเชื่อมกล่าวคือ ลวดเชื่อมที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางโตขึ้น ต้องเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อมที่สูงมากขึ้นตาม ดังตัวอย่างใน **ตารางที่ 5.1** หาก ช่างเชื่อมตั้งค่ากระแสเชื่อมไม่เหมาะสม อันได้แก่

1. การเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่ต่ำเกินไป (Welding current too low) มักพบปัญหาว่า เกิดการ อาร์กไม่สม่ำเสมอ บ่อหลอมละลายไม่สมบูรณ์ อัตราส่วนของ D/W ไม่เหมาะสม และเกิดสแลกหรือแก๊ส

ฝังใน ด้วยเหตุเพราะว่าบ่อหลอมละลายมีเวลาไม่หลอมเหลวนานมากพอที่จะให้ฟลักซ์ที่หุ้มลวดทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะเหลวได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลทำให้ได้ปริมาณแก๊สปกคลุมบ่อหลอมน้อยเกินไป และนอกจากนี้ยังพบอุปสรรคในการควบคุมระยะอาร์ก ซึ่งพบว่ากระแสเชื่อมต่ำระยะอาร์กต้องชิดจึงมีโอกาสมากที่ปลายลวดเชื่อมจะติดติดกับชิ้นงานเชื่อม และเกิดเป็นบ่อหลอมละลายแคบ ๆ และสุดท้ายแนวเชื่อมที่ได้จะเป็นรูปทรงที่มีความนูนสูงแต่เล็ก ดังแสดงตัวอย่างลักษณะของการเชื่อมที่กระแสต่ำเกินไปในรูปที่ 5.3 (ก)

2. การเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมที่สูงเกินไป (Welding current too high) ด้วยเหตุที่ปริมาณกระแสไฟที่เชื่อมสูงมีผลกระทบโดยตรงต่อแกนลวดโลหะที่เป็นตัวนำกระแส กล่าวคือ แกนลวดมีขีดจำกัดในการเป็นตัวนำ ดังนั้น ถ้ากระแสไหลผ่านมากเกินไป ตัวลวดจะเกิดการต้านกระแสที่สูงขึ้น ส่งผลทำให้มีความร้อนที่แกนลวดเพิ่มมากขึ้น จนเป็นเหตุให้ธาตุหรือสารเคมีที่ประกอบในฟลักซ์หุ้มเกิดการไหม้เป็นสีแดง พร้อมกับการสูญเสียไป และเกิดควันเชื่อมปริมาณมาก (Smoke) นอกจากนี้ยังพบปัญหาว่า การอาร์กมีความรุนแรงจนเกิดการกระเด็นของน้ำโลหะมากและมักหลอมติดแข็ง (Hard spatter) มีบ่อหลอมละลายกว้างลึก จึงมักได้แนวเชื่อมที่มีรูปทรงของส่วนด้านหน้า ต่ำแบน (Face side) และส่วนด้านหลังย้อยมากเกินไป (Root side) ดังแสดงตัวอย่างลักษณะของการเชื่อมที่กระแสสูงเกินไปในรูปที่ 5.3 (ข)

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างการเลือกขนาดของลวดเชื่อมที่สัมพันธ์กับช่วงของกระแสเชื่อม

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metals Fabrication*, 2011

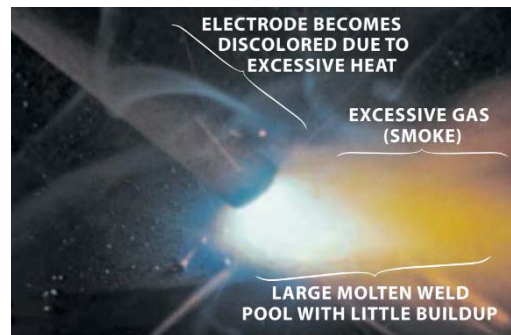
ชนิดของลวดเชื่อม มาตรฐาน (AWS)	ขนาด Ø ของลวดเชื่อม และ กระแสเชื่อม (แอมแปร์)		
	2.4 (มม)	3.2 (มม)	4.0 (มม)
E6010	40–80	70–130	110–165
E6011	50–70	85–125	130–160
E6012	40–90	75–130	120–200
E6013	40–85	70–120	130–160
E6016	75–105	100–150	140–190
E6018	70–110	90–165	125–220

จากที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการที่ช่างเชื่อมปรับตั้งกระแสไฟเชื่อมที่ผิดพลาดหรือไม่เหมาะสม เกิดผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพของแนวเชื่อม ดังนั้นช่างเชื่อมจึงต้องมีความละเอียดแม่นยำและรอบคอบขณะทำการปรับตั้งในแต่ละครั้ง ในทางปฏิบัติส่วนใหญ่ค่ากระแสเชื่อมมักยึดปฏิบัติตามข้อแนะนำจากผู้ผลิตลวดเชื่อมเป็นสำคัญ แต่พบว่าค่ากระแสนั้นมักระบุเป็นช่วงของกระแส เช่น ลวด E6016 ขนาด Ø ของลวดเชื่อม 2.4 มม ควรปรับตั้งกระแสเชื่อมให้อยู่ในช่วงระหว่าง 75–105

แอมแปร์ ช่วงของกระแสเชื่อมที่ต่างกันสามารถควบคุมให้ได้กระแสที่ค่าใดค่าหนึ่งที่เหมาะสมนั้น ข้างเชื่อมสามารถกำหนดได้ โดยการควบคุมระยะอาร์กระหว่างปลายลวดกับชิ้นงานในระหว่างการเชื่อม (Arc length) ความหมายคือ ถ้าเกิดความร้อนมากเนื่องจากกระแสสูงต้องปรับระยะอาร์กชิด (Short arc length) และถ้าเกิดความร้อนน้อยเนื่องจากกระแสต่ำต้องปรับระยะอาร์กห่าง (Long arc length) ซึ่งเทคนิคการปรับระยะอาร์กขณะเชื่อมก็เสมือนหนึ่งว่าเป็นการปรับปริมาณกระแสเชื่อม เพราะมีความสัมพันธ์กัน



(ก) การเชื่อมด้วยกระแสที่ต่ำเกินไป



(ข) การเชื่อมด้วยกระแสที่สูงเกินไป

รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมด้วยกระแสที่ต่ำและสูงเกินไป

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metals Fabrication*, 2011

5.1.2 ระยะอาร์ก (Arc length) มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

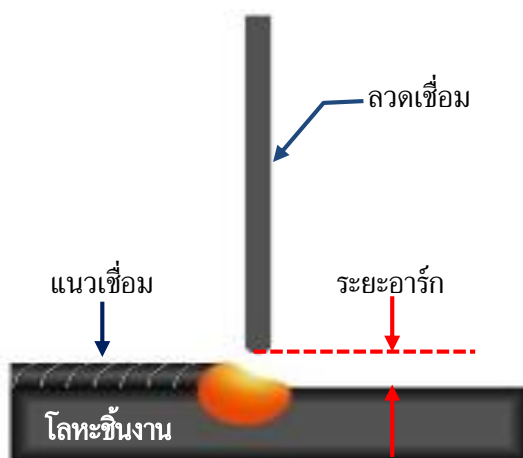
Hobart (2008) ได้ให้คำแนะนำไว้ในคู่มือปฏิบัติการแนวทางการเชื่อมว่า ระยะอาร์ก หมายถึง ช่องระยะห่างระหว่างปลายของลวดเชื่อม (Electrode) กับผิวของชิ้นงาน (Base metals) ซึ่งกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์นี้ ตัวลวดเชื่อมทำหน้าที่เป็นตัวเติมเนื้อโลหะลงไปในบ่อหลอมละลาย โดยในขณะที่อาร์กแกนของลวดเชื่อมเกิดการหลอมละลายและสั้นลงเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง เราจึงเรียกลวดเชื่อมในลักษณะนี้ว่า ลวดเชื่อมแบบสิ้นเปลือง (Consumable) ดังนั้น ข้างเชื่อมต้องป้อนลวดเชื่อมเข้าหาบ่อหลอมละลายอย่างต่อเนื่อง เพื่อควบคุมระยะอาร์กให้สม่ำเสมอและคงที่ตลอดการเชื่อม ดังแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมในรูปที่ 5.4 ซึ่งทักษะนี้กรณีที่เชื่อมด้วยมือข้างเชื่อมต้องผ่านการฝึกฝนมาอย่างชำนาญ ถ้าควบคุมได้ไม่ดีหรือไม่คงที่อย่างสม่ำเสมอจะมีผลต่องานเชื่อม ดังที่กล่าวต่อไปนี้

1. กรณีที่เชื่อมระยะอาร์กสั้นเกินไป (Arc length too short) พบว่า ระยะของช่องว่างระหว่างปลายของลวดเชื่อมกับบ่อหลอมละลายบนชิ้นงานจะแคบและชิด ซึ่งส่งผลทำให้ระยะการถ่ายโอนน้ำโลหะจากปลายลวดสั้นลง หรือจะให้ความหมายว่าน้ำโลหะหยดลงบนชิ้นงานเร็วเกินไปประจวบกับบ่อหลอมละลายที่มีขนาดเล็ก จึงได้แนวเชื่อมที่มีลักษณะรูปทรงสูงและแคบบริเวณรอบ ๆ แนวเชื่อมเกิด

สะเกิดเชื่อมน้อย นอกจากนี้ ยังพบปัญหาว่ามีโอกาสที่ปลายลวดเชื่อมจะติดกับชิ้นงานเชื่อมนั้นมีสูงมาก โดยเฉพาะช่วงเชื่อมฝึกหัดหรือช่วงที่ยังมีความชำนาญในการควบคุมหัวเชื่อมไม่มากพอ ซึ่งสร้างความเสียหายแก่ลวดเชื่อมและผิวชิ้นงานเชื่อมเป็นอย่างมาก ดังแสดงรูปตัวอย่างการเชื่อมที่ดังระยะอาร์กสั้นเกินไปในรูปที่ 5.5 (ก)

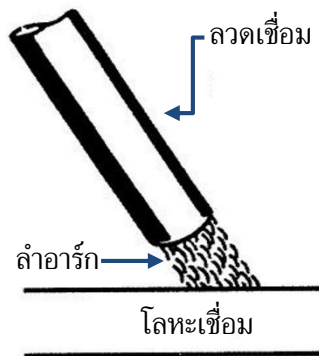
2. กรณีที่เชื่อมระยะอาร์กยาวเกินไป (Arc length too long) รูปแบบจะตรงกันข้ามกับระยะอาร์กสั้น กล่าวคือ ระยะช่องว่างของปลายลวดเชื่อมกับผิวชิ้นงานเชื่อมมีความกว้าง การถ่ายโอนของน้ำโลหะจากปลายลวดตกลงในบ่อหลอมละลายที่กว้างจะเกิดได้ช้า เพราะความห่างของปลายลวดเชื่อมจึงทำให้แนวเชื่อมมีรูปทรงที่ใหญ่และแบน และด้วยเหตุที่ระยะอาร์กยาวเกินไปยังส่งผลทำให้เกิดการอาร์กที่รุนแรงมีน้ำโลหะบางส่วนตกนอกบ่อหลอมละลายเป็นสะเก็ดโลหะ (Spatter) กระจายทั่วบริเวณรอบข้าง ๆ ของแนวเชื่อม ดังแสดงรูปตัวอย่างการเชื่อมที่ดังระยะอาร์กสั้นเกินไปในรูปที่ 5.5 (ข)

เมื่อศึกษาถึงพฤติกรรมหรือกลไกของการอาร์กระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 5.6 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อเคลื่อนปลายลวดเข้าหาชิ้นงานจนได้ระยะที่สามารถทำการอาร์กได้ ลำของการอาร์กจะกระโดดเข้าไปหาตัวนำไฟฟ้า (ชิ้นงานเชื่อม) ในตำแหน่งที่อยู่ใกล้มากที่สุด ดังนั้นถ้าทำการเชื่อมในระยะที่สั้นโอกาสที่ลำอาร์กจะอาร์กกับผิวรอยบากที่เอียง (Bevel) มีสูงมาก และจะไม่อาร์กกับส่วนที่ลึกลงไปจึงพบว่าการไม่หลอมหรือหลอมน้อยเกินไปที่บริเวณด้านล่างของรอยต่อ (Root) ทำให้ส่วนหลอมละลายไม่มากพอที่ซึมลึกไปถึงผิวรอยต่อด้านหลังของชิ้นงานเชื่อม ในทางกลับกันถ้ากรณีระยะอาร์กยาวเกินไปลำอาร์กก็จะเกิดการอาร์กกับผิวส่วนบนของก้นด้านลึกของรอยบาก และกระจายบ่อหลอมออกด้านกว้างมากกว่าด้านลึกทำให้แนวเชื่อมแบนและกว้าง ส่วนแนวซึมลึกก็ไม่สมบูรณ์ ดังตัวอย่างลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยระยะอาร์กที่แตกต่างกันในรูปที่ 5.7

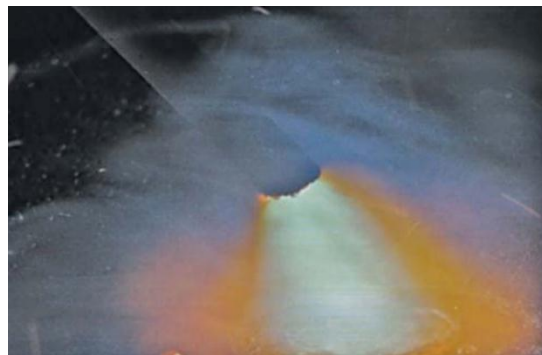
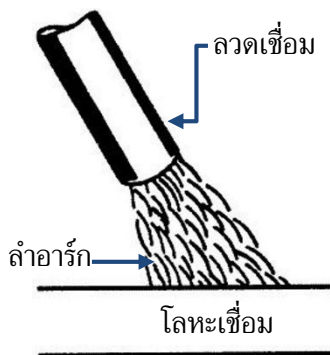


รูปที่ 5.4 องค์ประกอบของระยะอาร์กในการเชื่อม

ที่มา : Wc Welding. Com, 2018



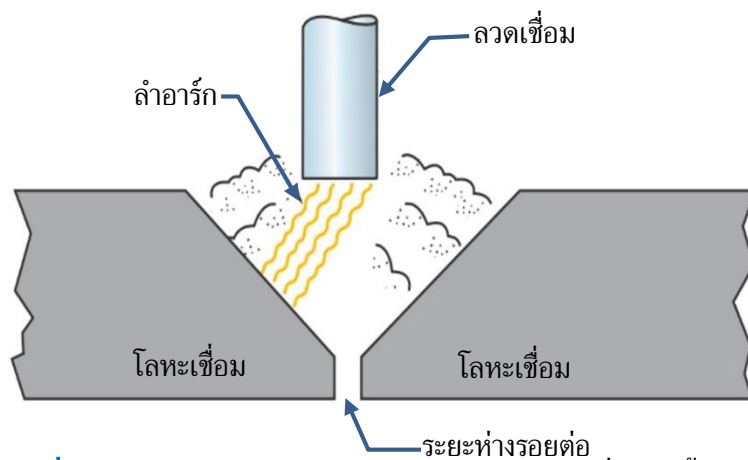
(ก) การเชื่อมที่ระยะอาร์กสั้นเกินไป (Arc length too short)



(ข) การเชื่อมที่ระยะอาร์กยาวเกินไป (Arc length too long)

รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมที่ระยะอาร์กสั้นและยาวเกินไป

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metals Fabrication*, 2011



รูปที่ 5.6 พฤติกรรมหรือกลไกของการอาร์กกระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metals Fabrication*, 2011



รูปที่ 5.7 ลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยระยะอาร์กที่แตกต่างกัน

ที่มา : *Welding guide, 2017*

การปรับตั้งระยะอาร์กที่เหมาะสมช่างเชื่อมต้องพิจารณาร่วมกับองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีความสัมพันธ์กันโดยมีหลักการพิจารณาของแต่ละองค์ประกอบ ดังนี้

ก. องค์ประกอบของความหนาของชิ้นงานโลหะเชื่อม (Thickness of base metal) โดยถ้าชิ้นงานโลหะที่บางต้องปรับตั้งระยะอาร์กอยู่ในช่วงอาร์กสั้นหรืออาร์กชิด (Short arc length) ส่วนกรณีที่ชิ้นงานโลหะมีความหนาที่มากต้องปรับตั้งระยะอาร์กอยู่ในช่วงของอาร์กยาว (Long arc length) หรืออาร์กห่างกับโลหะที่ต้องการเชื่อม

ข. องค์ประกอบของกระแสไฟเชื่อม (Welding current) การเชื่อมด้วยกระแสที่ต่ำต้องตั้งระยะอาร์กยาวหรือห่าง และในทางกลับกันการเชื่อมด้วยกระแสที่สูงต้องตั้งระยะอาร์กสั้นหรือชิดกับโลหะที่ต้องการเชื่อม

ค. องค์ประกอบของความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) การเชื่อมด้วยความเร็วต่ำหรือเดินลวดช้าต้องตั้งระยะอาร์กสั้นหรือชิด ส่วนการเชื่อมด้วยความเร็วสูงหรือเดินลวดเร็วต้องตั้งระยะอาร์กยาวหรือห่างกับโลหะที่ต้องการเชื่อม

นอกจากที่กล่าวมาข้างต้น ยังมีองค์ประกอบหรือปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจไม่กระทบโดยตรง เช่น ท่าเชื่อมต่าง ๆ ชนิดของฟลักซ์ อุณหภูมิของลวดเชื่อม อุณหภูมิของโลหะงาน และ สภาพแวดล้อมของแรงลมบริเวณที่เชื่อม เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ต้องนำมาพิจารณาร่วมด้วยในบางงานเชื่อมที่อาจมีโอกาสดังกล่าวหรือข้อบกพร่องในแนวเชื่อมได้ง่าย หรืองานเชื่อมที่ต้องการคุณภาพของแนวเชื่อมที่สูง

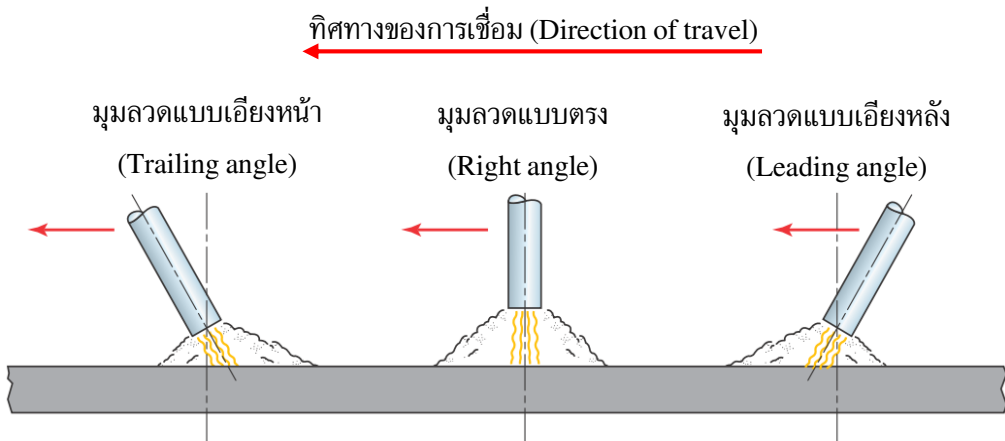
5.1.3 มุมลวดเชื่อมและการส่ายลวดเชื่อม (Electrode angle and Electrode weaving)

James Scott (2013) กล่าวถึงลวดเชื่อมสำหรับกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์นี้ว่ามีบทบาทสำคัญอย่างยิ่ง เพราะหัวอาร์ก โลหะเติม และแก๊สปกคลุม ทั้งหมดอยู่รวมกันที่ลวดเชื่อม ดังนั้น ลวดเชื่อมจึงเป็นองค์ประกอบหรือปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมขบวนการเชื่อมและคุณภาพของแนวเชื่อม นอกจากนี้การส่ายของลวดเชื่อมขณะที่ทำการเชื่อมก็เป็นองค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อรูปร่าง

หรือรูปทรงของแนวเชื่อมโดยตรง โดยจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดที่เกี่ยวกับบทบาทของลวดเชื่อมในแง่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. มุมลวดเชื่อม (Electrode angle)

ขณะทำการเชื่อมช่างเชื่อมต้องควบคุมมุมมองของลวดเชื่อมให้คงที่สม่ำเสมอตลอดเวลาขณะอาร์ก ซึ่งต้องใช้ทักษะที่ชำนาญมากพอสมควรและไม่ใช่ว่าเรื่องง่ายสำหรับช่างเชื่อมฝึกหัด โดยมุมมองของลวดเชื่อมคือ มุมองศาของลวดเชื่อมกับผิวชิ้นงานโลหะเชื่อม ซึ่งขนาดของมุมลวดเชื่อมมีได้ 3 แบบที่อ้างอิงกับทิศทางของการเชื่อม (Direction of travel) ได้แก่ มุมลวดแบบเอียงหน้า (Trailing angle) มุมลวดตรงหรือตั้งฉาก (Right angle) และมุมลวดแบบเอียงหลัง (Leading angle) ดังแสดงในรูปที่ 5.8 โดยรูปแบบการเอียงของมุมลวดมีอิทธิพลต่อการเชื่อม เพราะมุมต่างกันจะเกิดแรงเป่าน้ำโลหะเหลวและ ฟลักซ์เหลวออกจากปลายลวดเชื่อมไปยังบ่อหลอมละลายแตกต่างกัน ดังรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

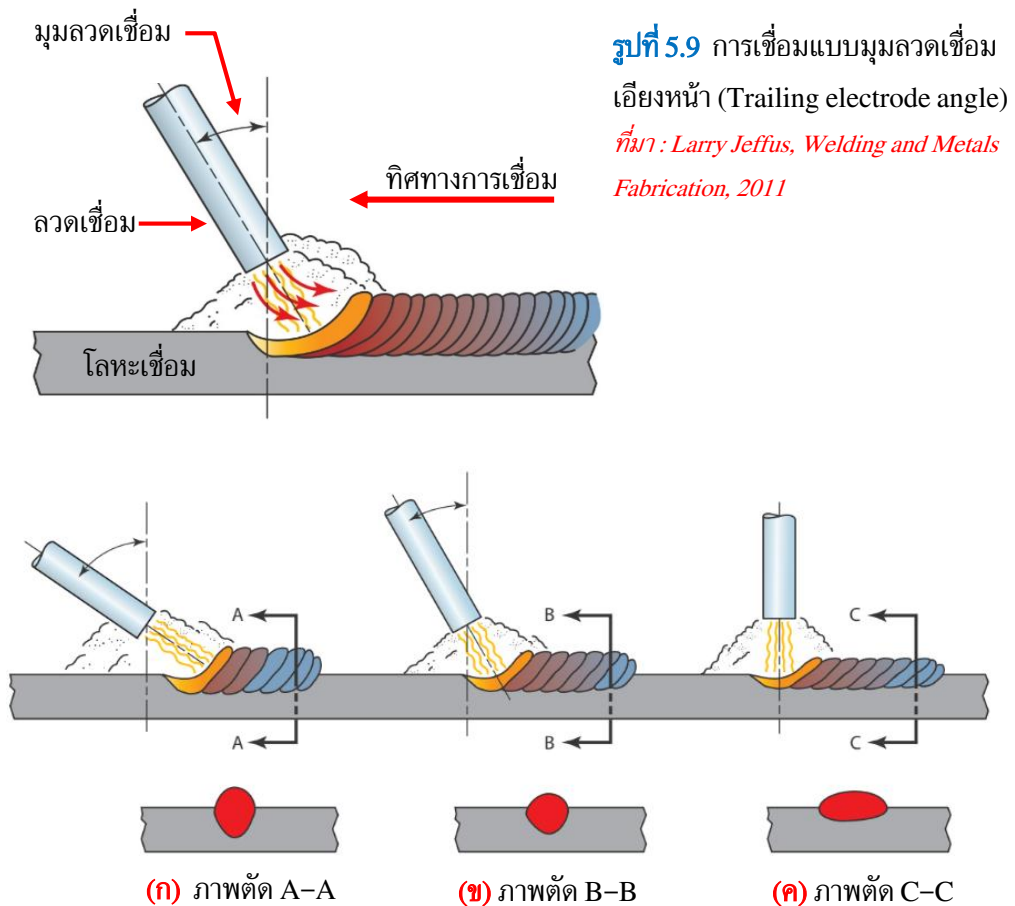


รูปที่ 5.8 รูปแบบการเอียงของมุมลวดเชื่อมที่อ้างอิงกับทิศทางของการเชื่อม

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metals Fabrication*, 2011

ก. มุมลวดแบบเอียงหน้า (Trailing electrode angle) การเอียงมุมลวดเชื่อมแบบนี้พฤติกรรมของน้ำโลหะเหลวกับฟลักซ์เหลวจากการอาร์กของปลายลวดเชื่อมจะผลักดันให้ออกไปในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของการเชื่อม (ดันออกไปด้านหลัง) ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ทำให้แนวเชื่อมไม่เกิดปัญหาของเหลวจากบ่อหลอมล้นไปเกาะทับกับแนวเชื่อมที่แข็งตัวไปแล้ว ที่เรียกกันว่า Cold lap ซึ่งเป็นที่มาของข้อบกพร่องชนิดสแลกฝังใน (Slag inclusions) นอกจากนี้ การเอียงมุมลวดแบบนี้ยังทำให้เกิดแรงผลักดันที่พุ่งลงไปสู่ด้านล่างของบ่อหลอมละลาย (Weld pool bottom) เป็นเหตุให้เกิดการเพิ่มส่วนหลอมละลายบริเวณด้านล่างของบ่อหลอมได้มากขึ้น ส่งผลทำให้แนวเชื่อมเกิดการหลอมลึก (Deeper penetration) โดยที่องศาของการเอียงไปข้างหน้ายิ่งมากขึ้น การหลอมลึกก็ยิ่งลึกมากขึ้น ดังแสดงการ

เปรียบเทียบของสามมุมลวดเชื่อมแบบเอียงหน้าที่แตกต่างกันและได้แนวเชื่อมหลอมลึกต่างกัน ที่ปรากฏในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบการซึมลึกของแนวเชื่อมที่ใช้มุมลวดเชื่อมเอียงหน้าองศาต่างกัน

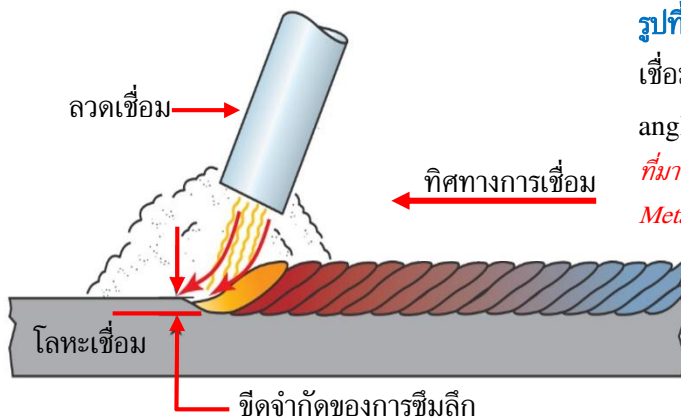
ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metals Fabrication*, 2011

ข. มุมลวดแบบเอียงหลัง (Leading electrode angle) เป็นการเอียงมุมลวดเชื่อมที่มีพฤติกรรมในลักษณะเกิดแรงพลัดดันน้ำโลหะกับฟลักซ์ที่หลอมเหลวจากการอาร์กของปลายลวดเชื่อมให้ออกไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเชื่อม (ดันออกไปด้านหน้า) ดังแสดงในรูปที่ 5.11 การเอียงลวดเชื่อมแบบนี้ต้องระมัดระวังไม่ให้น้ำโลหะเหลวกระเพื่อมหรือดันย้อนมาทับกับแนวเชื่อมที่แข็งตัวผ่านมาแล้วที่เรียกกันว่า Cold lap ซึ่งเป็นปัญหาก่อให้เกิดข้อบกพร่องชนิดสแลกฝังในแนวเชื่อม (Slag inclusions) นอกจากนี้ยังต้องควบคุมมุมลวดไม่ให้เอียงหลังมากเกินไป เพราะจะเกิดการพลัดดันน้ำโลหะเหลวกับน้ำฟลักซ์ที่เหลวกระเด็นหรือล้นออกไปทับผิวชิ้นงานโลหะที่ยังไม่หลอมบนบริเวณด้านหน้าทิศทางการเชื่อม

และเกิดการแข็งตัวกลายเป็นสแลก ซึ่งเมื่ออาร์กดับไป สแลกดังกล่าวจะไม่หลอมละลายแต่กลับฝังตัวอยู่ในแนวเชื่อมจนเกิดเป็นข้อบกพร่องขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.12 จากประสบการณ์มีข้อแนะนำเทคนิควิธีการป้องกันการเกิด Cold lap และ Slag inclusions ดังนี้

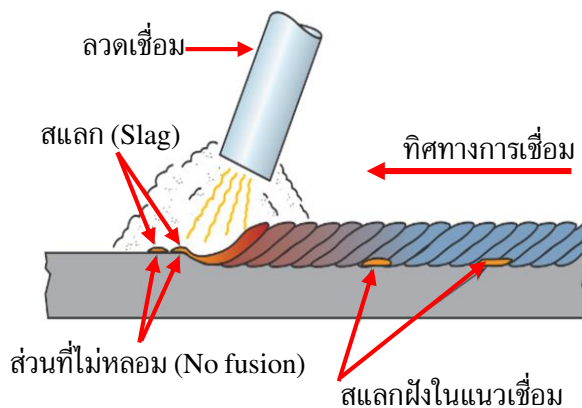
- ควบคุมมุมลวดแบบเอียงหลังให้น้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้
- ต้องควบคุมบ่อหลอมละลายของโลหะเชื่อมให้สมบูรณ์
- เลือกใช้ลวดเชื่อมแบบเน้นการซึมลึกเพื่อลดความนูนของแนวด้านบน (Face weld)
- ส่ายลวดเชื่อมไปหน้าและหลังเพื่อหลอมบริเวณขอบของบ่อหลอมละลาย (ขอบหน้าคือโลหะที่ยังไม่หลอม และขอบหลังคือโลหะแนวเชื่อมที่แข็งตัวแล้ว)

การเอียงมุมลวดเชื่อมแบบเอียงหลังในระดับองศาเอียงต่างกัน มีผลต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5.13 เห็นได้ชัดว่ามุมลวดเชื่อมเอียงหลังมากดังรูปที่ 5.13 (ก) แนวเชื่อมเล็ก ส่วนนูนต่ำ การซึมลึกน้อย และในทางกลับกันถ้ามุมลวดเอียงหลังน้อยหรือไม่เอียง (90°) ดังรูปที่ 5.13 (ค) แนวเชื่อมมีขนาดใหญ่ นูนสูง ซึมลึกมาก ส่วนมุมลวดเอียงที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5.13 (ข) ที่มีขนาดความกว้าง ความลึก และความสูงของแนวเชื่อมเป็นไปตามเกณฑ์ที่ยอมรับ อย่างไรก็ตามการปรับเอียงมุมของลวดเชื่อมที่เหมาะสม อาจมีขีดจำกัดตามลักษณะของการออกแบบรอยต่อหรือขีดจำกัดตามสภาพแวดล้อมของสถานที่ปฏิบัติงาน โดยช่างเชื่อมสามารถใช้ดุลพินิจในการตัดสินใจเลือกใช้ขนาดองศาการเอียงของมุมลวดได้ตามความเหมาะสม



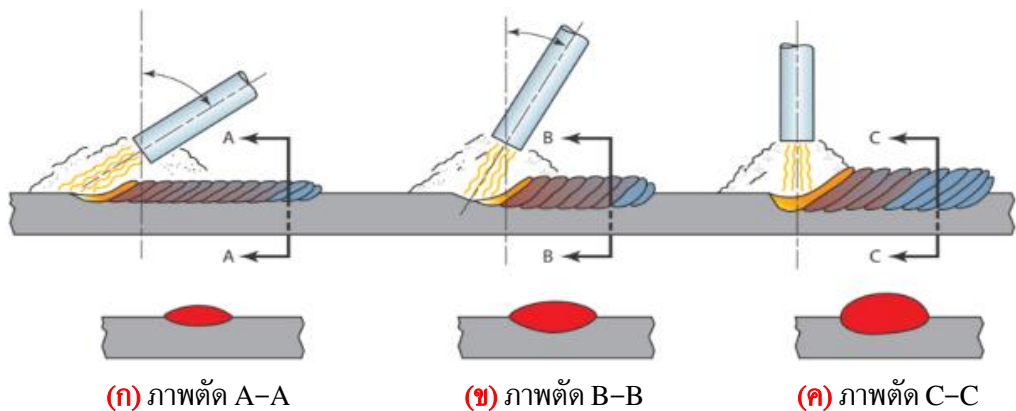
รูปที่ 5.11 การเชื่อมแบบมุมลวดเชื่อมเอียงหลัง (Leading electrode angle)

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metals Fabrication*, 2011



รูปที่ 5.12 การเชื่อมแบบมุม
ลวดเชื่อมเอียงหลัง (Leading
electrode angle)

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and
Metals Fabrication*, 2011



รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบการซึมลึกของแนวเชื่อมที่ใช้มุมลวดเชื่อมเอียงหลังองศาต่างกัน

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metals Fabrication*, 2011

2. การส่ายลวดเชื่อม (Electrode weaving)

จัดเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่างเชื่อมทุกคนต้องรู้และเข้าใจเป็นอย่างดี เพราะเป็นหลักการที่คู่กับทักษะของการควบคุมการเคลื่อนของลวดเชื่อม (Electrode manipulation) ในขณะที่กำลังทำการเชื่อม โดยภาษานิยมที่ใช้เรียกสื่อสารกัน คือ “การส่ายลวดเชื่อม” ซึ่งการส่ายลวดเชื่อมของช่างเชื่อม Edward R. Bohnart (2017) ได้กล่าวว่า มีบทบาทสำคัญที่ซึ่งสามารถที่จะกำหนดหรือควบคุมลักษณะของแนวเชื่อมในด้านต่าง ๆ ได้ อันได้แก่ ขนาดของความกว้าง ความนูน การซึมลึก รวมไปถึง ข้อบกพร่อง จำพวกกรูพรุน รอยกัดแห้ว รอยเกยทับ และ slag ผังในของแนวเชื่อม จากบทบาทที่สำคัญดังกล่าวนี้จึงได้มีการพยายามคิดค้นหารูปแบบทักษะการส่ายลวดเชื่อม (Weave pattern) ที่ถูกต้องเหมาะสมกับชนิดของรอยต่อและตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงรูปแบบการส่ายลวดในแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้กัน ในรูปที่ 5.14 โดยช่างเชื่อมจะพิจารณาเลือกรูปแบบการส่ายลวดด้วยตนเองตาม

ประโยชน์และความต้องการของลักษณะแนวเชื่อมที่ออกแบบตามชนิดของรอยต่อ ซึ่งรอยต่อเหมือนกัน อาจเลือกรูปแบบการส่ายลวดต่างกันก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นที่นำมาพิจารณาร่วม เช่น ชีตจำกัดของพื้นที่เชื่อม หรือความไม่สะดวกในตำแหน่งทำเชื่อม เป็นต้น

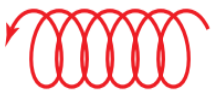




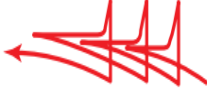




จากประสบการณ์ของผู้เขียนพบว่า การส่ายลวดเชื่อมแบบวงกลม (Circular pattern) เป็นรูปแบบที่ใช้กันมากในการเชื่อมทำราบของรอยต่อแบบ ต่อชน ต่อตัวที่ และ ต่อมุมด้านนอก รวมถึง การสร้าง ขนาดและรูปร่างของผิวแนวเชื่อม โดยการควบคุมขนาดของวงกลมในการส่าย กล่าวคือ ถ้าส่ายลวดเชื่อมเป็นวงกลมเล็ก ๆ ใด ๆ จะได้แนวเชื่อมที่แคบ (Narrow bead) แต่มีการซึมลึกที่มาก ในทางกลับกัน ถ้าส่ายเป็นวงกว้าง ใหญ่ ๆ จะได้แนวเชื่อมที่กว้าง (Wide bead) แต่การซึมลึกจะน้อยหรือตื้น

การส่ายลวดเชื่อมแบบตัว ซี (“C” pattern) และแบบสี่เหลี่ยม (Square pattern) เหมาะสำหรับการเชื่อมในตำแหน่งทำราบ (1G) มากที่สุด แต่ก็ยังสามารถที่จะนำไปใช้กับการเชื่อมในตำแหน่งทำตั้ง (3G) ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับกรณีการต่อชิ้นงานที่มีช่องว่างระหว่างชิ้นงานมากเกินไป (Large gap) การส่ายลวดจะเป็นการเพิ่มเนื้อโลหะในช่องว่างได้เป็นอย่างดี หรืออาจใช้กับกรณีที่ชิ้นงานหนา-บาง แตกต่างกันก็สามารถเพิ่มเนื้อโลหะบริเวณรอยต่อให้หนาใกล้เคียงกันได้ และสามารถทำการเชื่อมได้ง่ายขึ้นพร้อมกับยังควบคุมขนาดของแนวเชื่อมให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้

สำหรับรูปแบบการส่ายลวดเชื่อมแบบตัว เจ (“J” pattern) การส่ายลวดเชื่อมแบบนี้ใช้ได้ดีในการเชื่อมทำราบต่อเกย (1F) กับทำตั้ง (3G) ทั้งหมด และ ทำขนานนอนต่อชน (2G) รวมถึงต่อเกย(2F) โดยรูปแบบการส่ายจะช่วยควบคุมความร้อนให้สะสมอยู่ที่แผ่นที่มีความหนามากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5.15 ตลอดจนยังช่วยควบคุมการเสริมสร้างเนื้อเชื่อม (Reinforcement) ให้พอกติดอยู่ในรูปแบบของลักษณะรูปทรงของแนวเชื่อมที่ต้องการและมีความสม่ำเสมอของขนาดแนวเชื่อม

การส่ายลวดเชื่อมรูปแบบตัว T (“T” pattern) เหมาะสำหรับการเชื่อมมุม (Fillet welds) ในตำแหน่งทำเชื่อมทำตั้ง (3F) และ ตำแหน่งทำเชื่อมทำเหนือศรีษะ (4F) ดังแสดงรูปแบบการส่ายลวดในรูปที่ 5.16 ซึ่งนิยมใช้ในการเชื่อมรอยต่อที่มีความลึกที่เชื่อมด้วยกระแสไฟสูง ๆ (Hot pass) การส่ายลวดแบบนี้ป้องกันการเกิดข้อบกพร่องรอยแหว่งของขอบแนวเชื่อมได้เป็นอย่างดี

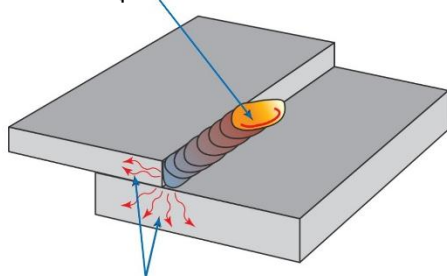
นอกจากรูปแบบการส่ายลวดเชื่อมที่กล่าวมาข้างต้นนั้น พบว่าในเชิงเทคนิคการปฏิบัติยังมีรูปแบบการส่ายลวดอีกหลากหลายรูปแบบ ที่ซึ่งอาจเกิดจากชิตจำกัดหรือข้อกำหนดบางอย่างในทางการเชื่อมต่อ ดังแสดงเพิ่มเติมเป็นตัวอย่างในรูปที่ 5.17

	
สายแบบวงกลม	สายแบบสี่เหลี่ยม
	
สายแบบซิกแซก	สายแบบเดินหน้า-ถอยหลัง
	
สายแบบรูปเลข 8	สายแบบรูปตัว T
	
สายแบบรูปตัว v	สายแบบรูปตัว v คว่ำ
	
สายแบบรูปตัว c	สายแบบรูปตัว j

รูปที่ 5.14 การสายลวดเชื่อมในรูปแบบต่าง ๆ ที่ช่างเชื่อมนิยมเลือกใช้ใช้งาน

ที่มา : Cengage Learning, 2012

ส่วนรองรับน้ำโลหะของบ่อหลอมที่
สามารถควบคุมขนาดของแนวเชื่อม



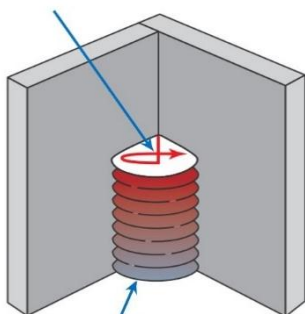
การกระจายของความร้อน

รูปที่ 5.15 การสายลวดรูปแบบตัว J ที่

กระจายความร้อนไปยังแผ่นที่หนา

ที่มา : Cengage Learning, 2012

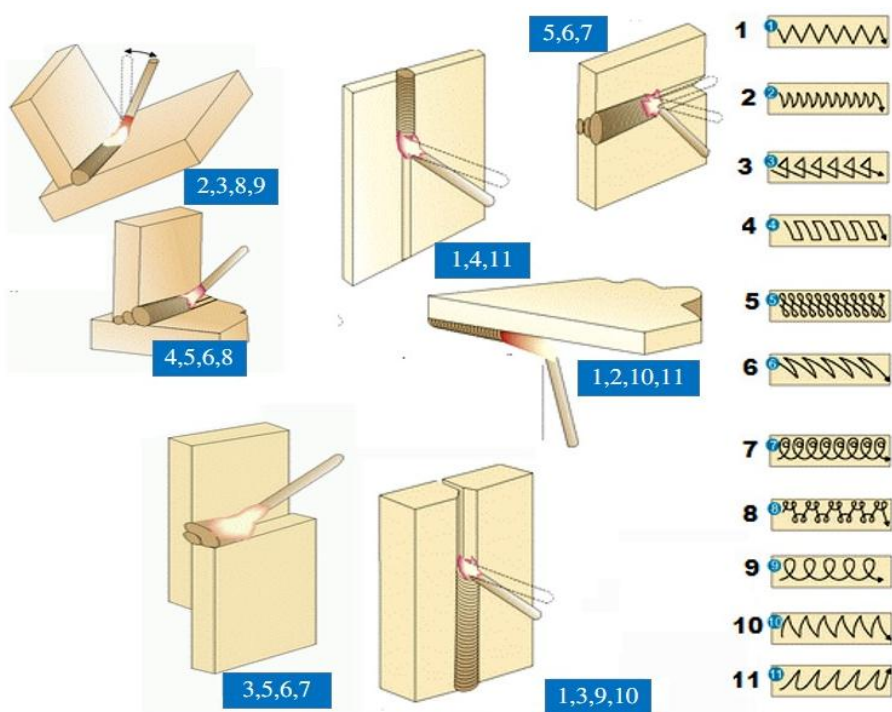
รูปแบบการส่ายลวดเชื่อม



การเชื่อมมุมทำตั้ง

รูปที่ 5.16 การส่ายลวดเชื่อมในรูปแบบต่าง ๆ ที่ช่างเชื่อมนิยมเลือกใช้งาน

ที่มา : Cengage Learning, 2012



รูปที่ 5.17 รูปแบบการส่ายลวดเชื่อมที่หลากหลายรูปแบบที่แนะนำในตำแหน่งทำเชื่อมต่าง ๆ

ที่มา : Welding Beads–An introduction welders universe, 2018

5.1.4 ความเร็วเชื่อม (Welding speed or Travel speed)

หมายถึง อัตราความเร็วในการเคลื่อนที่ของลวดเชื่อมต่อหน่วยเวลา เช่น มิลลิเมตร/วินาที (mm/s) เซนติเมตร/นาที (cm/min) นิ้ว/นาที (in/min) และ เมตร/ชั่วโมง (m/h) เป็นต้น ช่างเชื่อมสามารถเลือกหน่วยวัดตามค่าความละเอียดของงานที่เหมาะสม และความถนัดของผู้เชื่อม โดยความเร็วจะถูกกำหนดโดยมือของผู้ควบคุมหัวเชื่อม หรือชุดอุปกรณ์ควบคุมความเร็วในกรณีเชื่อมแบบ

อัตโนมัติ (Automatic welding) ซึ่งเป็นที่ทราบกันทั่วไปว่า ความเร็วในการเชื่อมมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบอื่นในการเชื่อม อ้างอิงจาก Miller Welds. (2018) ได้แก่ กระแสเชื่อม (Welding current) ระยะอาร์ก (Arc voltage) และ ค่าความร้อนที่ป้อนสู่ชิ้นงาน (Heat input) ดังแสดงใน **สมการที่ 5.1**

$$\text{ความเร็วเชื่อม (mm/min)} = \frac{\text{กระแสเชื่อม(A)} \times \text{ระยะอาร์ก(V)} \times 60}{\text{ค่าความร้อนที่ป้อนสู่ชิ้นงาน (J/mm)}}$$

สมการที่ 

- โดยที่ – ความเร็วเชื่อม มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร/นาที (mm/min)
- กระแสเชื่อม มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Ampere)
 - ระยะอาร์ก มีหน่วยเป็น โวลท์ (Voltage)
 - ค่าความร้อนที่ป้อนสู่ชิ้นงานต่อความยาว มีหน่วยเป็น จูล/มิลลิเมตร (J/mm)

ในทางปฏิบัติถ้าช่างเชื่อมต้องการเพิ่มความเร็วในการเชื่อมสามารถทำได้โดยการปรับเพิ่มกระแสเชื่อมที่เครื่องเชื่อม กล่าวคือ กระแสที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าปริมาณความร้อนที่ป้อนสู่ชิ้นงานเพื่อการหลอมละลายสูงขึ้น โลหะเชื่อมจะหลอมละลายได้ง่ายและเกิดบ่อหลอมละลายที่กว้าง แนวเชื่อมมีขนาดโตและอาจทะลุเป็นรูได้ แต่ถ้าช่างเชื่อมปรับเพิ่มความเร็วในการเชื่อมให้เร็วขึ้น ก็จะสามารถควบคุมความสมดุลของบ่อหลอมละลายได้ดีและมีแนวเชื่อมที่เหมาะสม ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการที่จะเพิ่มความเร็วในการเชื่อมเพื่อการเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตรอยเชื่อม (Weld joint productivity)

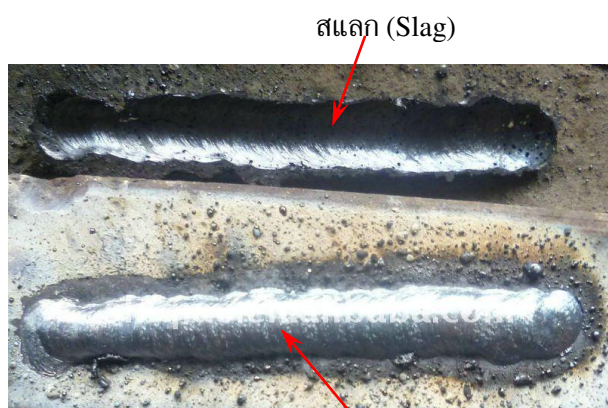
อย่างไรก็ตาม อัตราความเร็วในการเชื่อมที่ถูกต้องและเหมาะสมนั้น ถูกกำหนดขึ้นโดยวิศวกรงานเชื่อม ที่ระบุไว้ในข้อกำหนดขั้นตอนในการเชื่อมที่รู้จักกันดีในนามของ WPS (Welding Procedure Specification) ที่มีการพิจารณาร่วมกับองค์ประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อม อันได้แก่

- | | |
|--|---|
| 1. ชนิดและขนาดของกระแสไฟเชื่อม | 2. ชนิดของการต่อหัวของอิเล็กโทรดเชื่อม |
| 3. ตำแหน่งและท่าเชื่อม | 4. อัตราการหลอมละลายของอิเล็กโทรดเชื่อม |
| 5. ความหนาและชนิดของโลหะเชื่อม | 6. ชนิดของการออกแบบรอยต่อ |
| 7. การถ่ายเทโลหะอิเล็กโทรดไปยังชิ้นงาน | 8. สภาพพื้นผิวของโลหะเชื่อม |

ถ้าช่างเชื่อมปฏิบัติตามลำดับขั้นตอนที่กำหนดไว้ใน WPS อย่างละเอียดและถูกต้องจะได้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์แบบ ดังลักษณะของแนวเชื่อมที่สแลกหลุดออกมาเองโดยไม่ต้องใช้ขี้นเคาะแสดงไว้ใน **รูปที่ 5.18**

จากการทดลองทำการเชื่อมด้วยอัตราความเร็วแตกต่างกัน เพื่อศึกษาเปรียบเทียบลักษณะของแนวเชื่อม โดยเปรียบเทียบแนวเชื่อมที่ทำการทดลองเชื่อมที่ระดับความเร็วต่ำเกินไป (Travel too slow) ความเร็วที่เหมาะสมหรือถูกต้อง (Travel suitable/correct) และความเร็วที่สูงเกินไป (Travel too fast) พบว่า ลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อมแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดง ใน **รูปที่ 5.19**

กล่าวคือ ในกรณีที่ช่างเชื่อมเลือกใช้ระดับอัตราความเร็วเชื่อมที่ช้าเกินไป บ่อหลอมละลายกว้างมาก ความร้อนสะสมในชิ้นงานสูง แนวเชื่อมที่ได้มีขนาดใหญ่และนูน ส่วนซึมลึกสูงมาก ขณะเชื่อมน้ำโลหะเชื่อมจะถูกทับถมซ้อน ๆ กันตลอดแนว ส่วนของขอบเขตบริเวณของผลกระทบร้อน (HAZ) ก็กว้างมาก ซึ่งไม่เป็นที่พึงประสงค์ของรอยเชื่อมต่อโลหะ และในทางกลับกันถ้าเชื่อมด้วยระดับอัตราความเร็วเชื่อมที่เร็วเกินไป พบว่าบ่อหลอมละลายแคบ ส่วนซึมลึกลึกน้อย แนวเชื่อมเล็ก อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะสูงมาก จึงมักเป็นเหตุให้เกิดสารมลทินและแก๊สสะสมอยู่ตรงกลางของแนวเชื่อม เพราะสารมลทินและแก๊สดังกล่าวไม่สามารถหนีออกมาได้ทันเวลากับการเย็นตัว จึงมักเกิดการฝังตัวอยู่ในแนวเชื่อม เป็นฉนวนเหตุที่เกิดการแตกร้าวของตรงกลางแนวเชื่อม ดังแสดงรอยแตกร้าวในรูปที่ 5.20 ส่วนในกรณีที่อัตราความเร็วเชื่อมที่เหมาะสมถูกต้องแนวเชื่อมก็สมบูรณ์



แนวเชื่อม (Weld bead)

รูปที่ 5.18 ลักษณะของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยที่องค์ประกอบของการเชื่อมที่เหมาะสมและถูกต้อง

ที่มา : วิชาญ ช่วยพันธ์ เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคโนโลยีการเชื่อม, 2016



ความเร็วเชื่อมเหมาะสม

ความเร็วเชื่อมช้าเกินไป

รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน

ที่มา : วิชาญ ช่วยพันธ์ เอกสารประกอบการสอน วิชาเทคโนโลยีการเชื่อม, 2562



รูปที่ 5.20 ลักษณะของการแตกร้าวที่

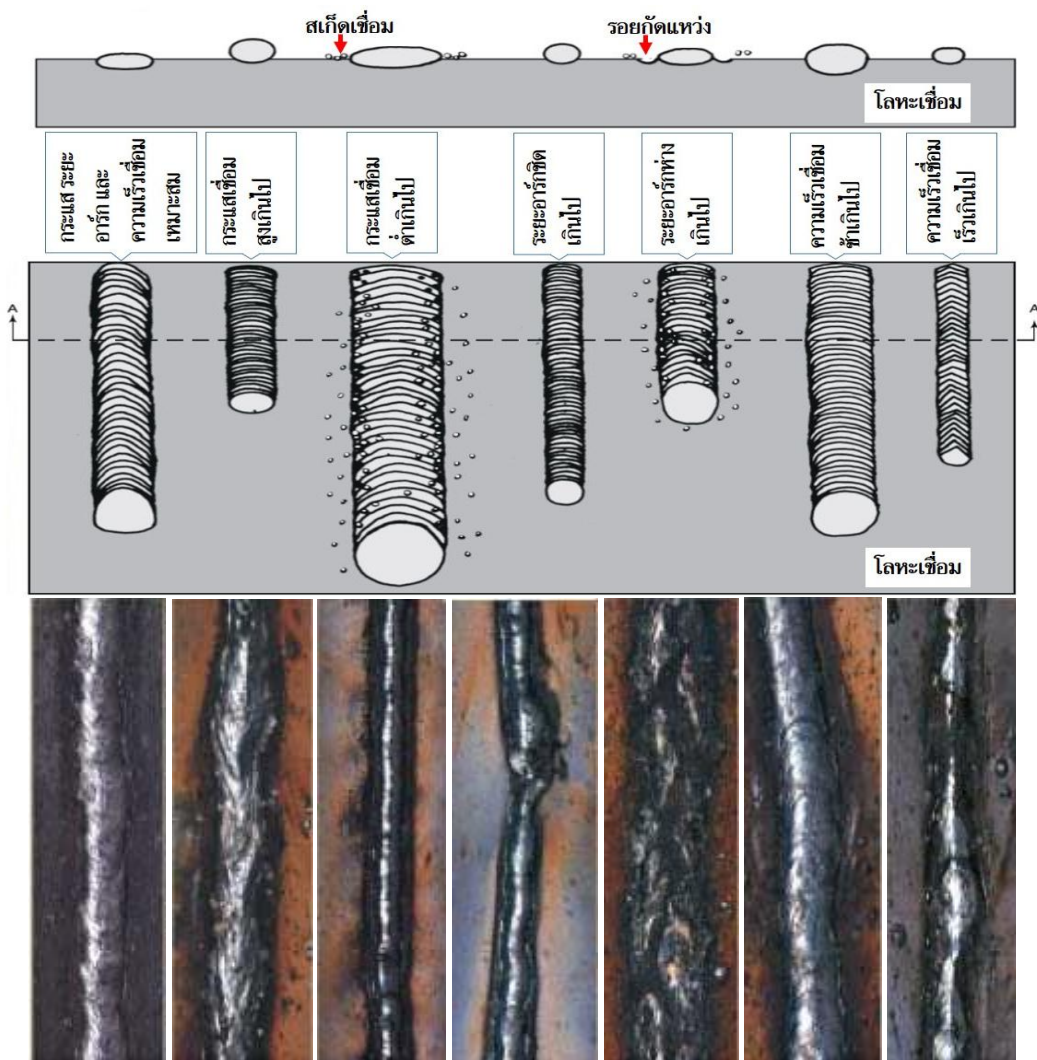
เกิดตรงกลางของแนวเชื่อม

ที่มา : วิชาญ ช่วยพันธ์ เอกสารประกอบการ

สอน วิชาเทคโนโลยีการเชื่อม, 2562

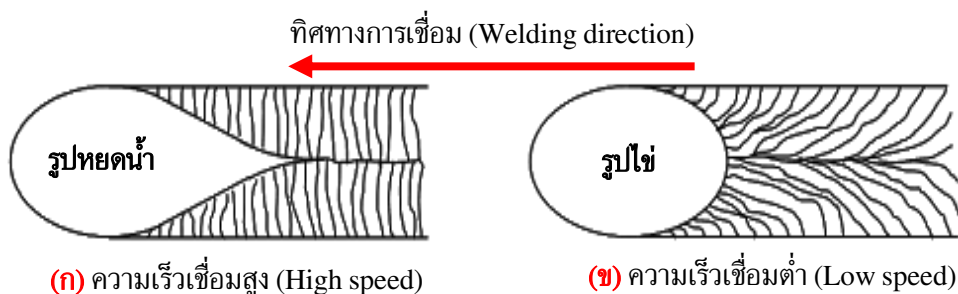
จาก**สมการที่ 5.1** ที่ได้กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่า องค์ประกอบหรือปัจจัยของการเชื่อมมีความสัมพันธ์ต่อกันของ ความเร็วเชื่อม กระแสเชื่อม และระยะอาร์กกดเชื่อม ดังนั้น วิศวกรงานเชื่อม หรือช่างเชื่อมสามารถที่จะควบคุมหรือระบอบองค์ประกอบของการเชื่อมเพียงตัวใดตัวหนึ่งใน WPS ก็จะสามารถส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบตัวอื่น ๆ ตามไปด้วย เพื่อทำการเชื่อมให้ได้แนวเชื่อมที่เกิดความสมบูรณ์ ตัวอย่างเช่น ถ้าช่างเชื่อมปรับกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าความร้อนที่ป้อนสู่ชิ้นงานสูงขึ้นตาม ต้องทำการเพิ่มความเร็วในการเชื่อมไม่เช่นนั้นแนวเชื่อมจะเกิดบ่อหลอมที่ใหญ่ แนวเชื่อมแบนราบ สะเก็ดโลหะกระจายไปทั่วหรืออาจเกิดขึ้นงานทะลุเป็นรูได้ เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบหรือปัจจัยของการเชื่อมที่กล่าวมามีผลกระทบโดยตรงต่อลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อม ดังแสดงลักษณะของแนวเชื่อมออกมาเป็นภาพสเก็ตและชิ้นงานทดลองเชื่อมจริงที่ปัจจัยการเชื่อมที่แตกต่างกันใน**รูปที่ 5.21**

R.S. Parmar (1996) ได้แสดงความคิดเห็นไว้ว่า องค์ประกอบของความเร็วในการเชื่อม นอกจากจะมีผลต่อรูปร่างทางกายภาพภายนอกของแนวเชื่อมแล้วยังมีผลต่อรูปร่างของทิศทางการเย็นตัว (Direction of solidification) โดยเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างระดับมหภาค (Macrostructure) จะเห็นได้ชัดเจนว่าแนวเชื่อมที่เกิดจากความเร็วในการเชื่อมสูง บ่อหลอมละลายของโลหะเชื่อมมีรูปร่างเป็นรูปหยดน้ำ (Teardrop shape) เป็นเหตุให้เกิดทิศทางการเย็นตัวที่วิ่งเข้าหาที่กลางของแนวเชื่อมที่ค่อนข้างตั้งฉากกับทิศทางการเชื่อม (Welding direction) ดังแสดงใน**รูปที่ 5.22 (ก)** ในทางกลับกัน ถ้าความเร็วในการเชื่อมต่ำบ่อหลอมละลายจะมีรูปร่างเป็นรูปคล้ายไข่ (Elliptical shape) ทิศทางการเย็นตัวจะตั้งฉากน้อยลงมากจนเกือบเป็นมุม 45 องศา ที่วิ่งเข้าหาจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อม ดังแสดงใน**รูปที่ 5.22 (ข)** ซึ่งกลไกของทิศทางการเย็นตัวที่ต่างกันนี้มีผลต่อการโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และอาณาเขตของผลกระทบจากความร้อน (Heat affected zone) โดยจะอธิบายถึงรายละเอียดในบทของเรื่องโลหะวิทยางานเชื่อม



รูปที่ 5.21 ลักษณะของแนวเชื่อมบนภาพสเก็ดและชิ้นงานทดลองเชื่อมจริงที่มีปัจจัยการเชื่อมที่แตกต่างกัน

ที่มา : Material Handling Blog– How to spot a good weld VS Bad weld, 2020



รูปที่ 5.22 เปรียบเทียบรูปทรงบ่อหลอมละลายและทิศทางการเย็นตัวของแนวเชื่อมที่ต่างความเร็วเชื่อม

ที่มา : WJM Technologies–Excellence in material joining, 2013

5.2 องค์ประกอบหรือปัจจัยการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding : GMAW)

เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กที่ใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม ซึ่งเป็นทราบกันดีว่าเป็นกระบวนการเชื่อมที่พัฒนาจากพื้นฐานของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้าหุ้มฟลักซ์ โดยที่รู้จักกันในชื่อของการเชื่อมมิก/แม็ก (Metal Inert Gases : MIG / Metal Active Gases : MAG) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่นิยมนำมาใช้งานกันมากเพราะทำงานได้สะดวกและรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ด้วยเหตุที่เป็นการเชื่อมที่อาศัยเทคโนโลยีการเชื่อมที่สูงขึ้นและทันสมัยมากขึ้น ช่วงเชื่อมที่จะปฏิบัติการเชื่อมจำเป็นต้องมีทั้งทักษะการเชื่อมและความรู้ในการปรับตั้งองค์ประกอบของการเชื่อม (Welding parameters) ตัวอย่างเช่น ทักษะในการสังเกตหรือดูบ่อหลอมละลาย ทักษะการควบคุมขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม รวมถึงสัดส่วนของปริมาณการซึมลึก ส่วนความรู้ความเข้าใจในการกำหนดหรือปรับตั้งค่าองค์ประกอบของการเชื่อมบนเครื่องเชื่อม (Welding machine) ได้แก่

1. กระแสไฟเชื่อม (Welding current)
2. แรงดันอาร์ก (Arc voltage)
3. ความเร็วป้อนลวด (Wire feed speed)
4. มุมเอียงหัวเชื่อม (Gun angle)
5. ความเร็วเชื่อม (Welding speed)
6. ระยะโผล่ลวด (Wire electrode extension)

องค์ประกอบหรือปัจจัยการเชื่อมดังกล่าวข้างต้นเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของรอยเชื่อมต่อและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ รวมถึงการเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตที่สูงขึ้น ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงพยายามเน้นถึงการสร้างความรู้ความเข้าใจถึงวิธีการปรับหรือกำหนดปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเชื่อม รวมไปถึงข้อจำกัดและข้อควรระวังไว้ในแต่ละองค์ประกอบจากประสบการณ์การทำงานโดยตรงดังต่อไปนี้

5.2.1 กระแสไฟเชื่อม (Welding current)

ปริมาณของกระแสไฟที่ใช้เชื่อมมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่ออัตราการป้อนเติมเนื้อลวดเชื่อม รูปทรงและขนาดของแนวเชื่อม รวมไปถึงระยะการซึมลึกของแนวเชื่อมซึ่งอ้างอิงตาม FRONIUS

(2018) โดยในทางปฏิบัติถ้าเลือกการเชื่อมแบบระบบแรงดันอาร์คคงที่กระแสไฟเชื่อมจะถูกควบคุมด้วยปุมปรับอัตราการป้อนลวด คือเมื่ออัตราการป้อนลวดเร็วเพิ่มขึ้น กระแสไฟเชื่อมก็จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ถ้าเลือกการเชื่อมแบบระบบที่กระแสคงที่กระแสเชื่อมจะปรับตั้งที่ปุมหน้าชุดควบคุมของเครื่องเชื่อม กระแสไฟเชื่อมที่เพิ่มสูงขึ้นจะเพิ่มอัตราการหลอมละลายของลวดเชื่อมมากขึ้น ดังแสดงใน **รูปที่ 5.23** เส้นกราฟอัตราการหลอมละลายจะมีความชันมากเมื่อกระแสไฟเชื่อมปริมาณสูง และค่อนข้างราบที่ระดับปริมาณกระแสไฟเชื่อมต่ำ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ปลายของลวดเชื่อมที่ไหลออกมาจากท่อนำกระแสจึงมีความต้านทานต่อความร้อนโดยไม่หลอมย้อนกลับเข้าไปในท่อนำกระแส

ปริมาณกระแสไฟเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ทำให้ต้องป้อนลวดด้วยอัตราที่เร็วขึ้น เพราะเกิดบ่อหลอมละลายที่กว้าง ย่อมส่งผลโดยตรงต่อขนาดแนวเชื่อมที่ใหญ่ขึ้น นูนขึ้น และมีการซึมลึกของแนวเชื่อมที่มากขึ้น ดังแสดงการเปรียบเทียบขนาดของแนวเชื่อมที่ใช้กระแสไฟเชื่อมที่แตกต่างกันแต่ขนาดของลวดเชื่อมเท่ากัน ใน **รูปที่ 5.24** นอกจากนี้กระแสไฟเชื่อมยังต้องคำนึงถึง ความหนาแน่นของกระแส (Current density) ซึ่งจะหมายถึงจำนวนแอมแปร์ของกระแสต่อขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดเชื่อม ดัง **สมการที่ 5.2** เป็นไปตามคำแนะนำของผู้ผลิตเครื่องเชื่อม Lincoln Electric-GMAW (2014)

ยกตัวอย่าง เช่น ถ้าช่างเชื่อมปรับตั้งให้ปริมาณของกระแสคงที่ 200 แอมแปร์ แล้วทดลองเลือกใช้ลวดเชื่อมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 และ 1.2 มม. ทำการเปรียบเทียบกัน ดังแสดงใน **ตารางที่ 5.2** จะพบว่ากระแสไฟเชื่อมที่ใช้กับลวดเชื่อมขนาด 0.9 มม. จะมีความหนาแน่นของกระแสมากกว่าขนาดลวดเชื่อม 1.2 มม. และนอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าขนาดของลวดเชื่อมที่มีขนาดเล็ก (0.9 มม.) มีระยะของการซึมลึกได้มากกว่าขนาดใหญ่ (1.2 มม.) ที่ระดับปริมาณกระแสเชื่อมที่เท่ากัน กล่าวคือ เนื่องจากความร้อนที่ได้จากกระแสที่เท่ากัน ลวดขนาดเล็กใช้ความร้อนเพื่อหลอมละลายลวดน้อยกว่าลวดที่มีขนาดใหญ่ จึงเหลือปริมาณความร้อนที่มากกว่าที่จะนำไปใช้หลอมละลายชิ้นงานโลหะเชื่อม จึงทำให้เกิดระยะการซึมลึกได้มากกว่า ซึ่งแสดงเปรียบเทียบให้เห็นส่วนการซึมลึกที่แตกต่างกันดังใน **รูปที่ 5.25** ดังนั้น จะพบว่าในทางปฏิบัติการที่ช่างเชื่อมจะเลือกใช้ลวดเชื่อมตามขนาดต่าง ๆ ที่มีอยู่นั้น ต้องเลือกให้มีความเหมาะสมสัมพันธ์กันกับปริมาณของกระแสไฟเชื่อม ต้องไม่น้อยหรือมากเกินไป โดยทั่วไปผู้ผลิตลวดเชื่อมมักจะมีคำแนะนำการเลือกกระแสไฟเชื่อมกับขนาดของลวดเชื่อมที่เหมาะสม ดังตัวอย่าง ข้อเสนอแนะใน **ตารางที่ 5.3**

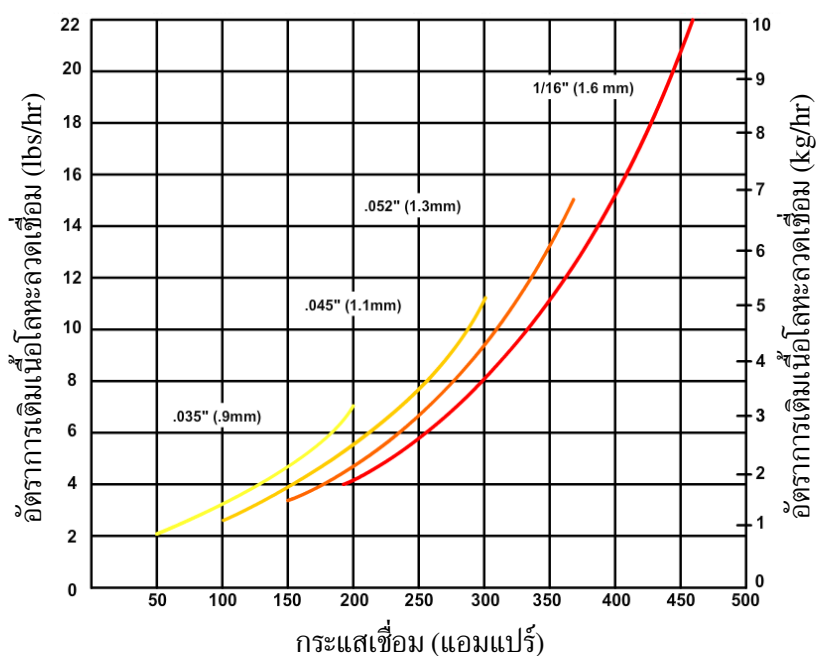
$$\text{ความหนาแน่นกระแส (A/mm}^2\text{)} = \frac{\text{จำนวนแอมแปร์ (A)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดลวดเชื่อม (mm}^2\text{)}}$$

สมการที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างแสดงเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสที่ขนาดลวดเชื่อมต่างกัน

ที่มา : มานะสินธ์ พิมพ์สาร ค่มือการเชื่อม มิก-แม็ก พิมพ์โดย เอ็มแอนดร้า 2554

ขนาด Ø ของลวดเชื่อม (mm)	พื้นที่หน้าตัดลวดเชื่อม (mm ²)	กระแสเชื่อม (A)	ความหนาแน่นกระแส (A/mm ²)	อัตราการเติมเนื้อโลหะ (kg/hr)
0.9	0.636	200	200/0.636 = 314.46	3.2
1.2	1.130	200	200/1.13 = 176.99	2.8



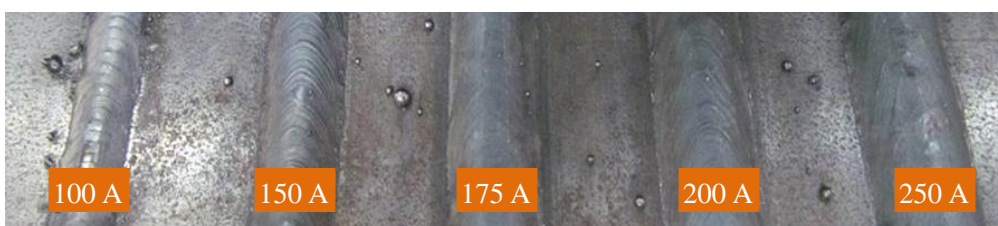
รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ของค่ากระแสเชื่อมกับอัตราการเติมเนื้อโลหะเชื่อมด้วยแก๊ส CO₂

ที่มา : Richard L. Tittle, *Welding and Welding Technology*, 1973

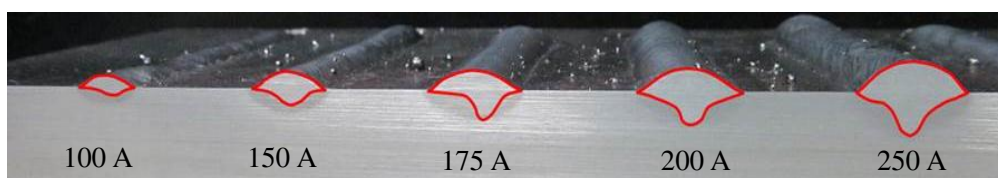
ตารางที่ 5.3 ตัวอย่างแนะนำการเลือกขนาดลวดเชื่อมกับกระแสเชื่อมที่เหมาะสม

ที่มา : มานะสินธุ์ พิมพ์สาร คู่มือการเชื่อม มิก-แม็ก พิมพ์โดย เอ็มแอนดร้า 2554

ขนาด ϕ ของลวดเชื่อม (มม)	ช่วงปริมาณกระแสเชื่อมที่เหมาะสม (แอมแปร์)
0.8	50-140
0.9	65-160
1.0	100-220
1.2	105-375
2.4	210-550
3.2	375-600



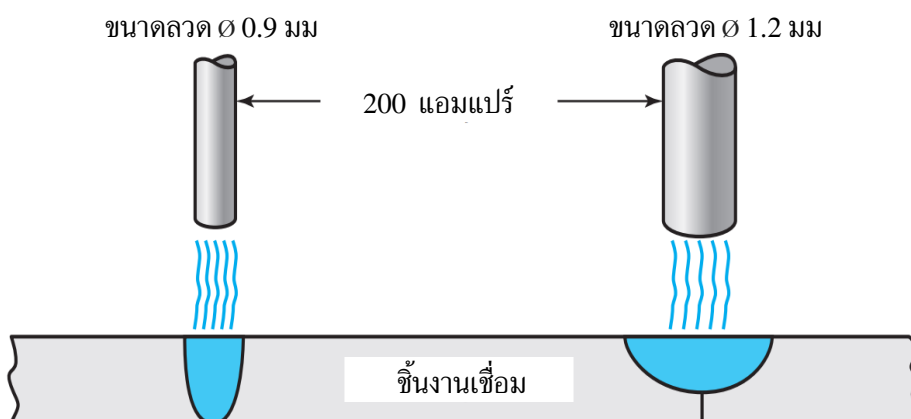
(ก) ภาพแนวเชื่อมด้านบน (Topside view)



(ข) ภาพตัดขวางแนวเชื่อม (Cross section)

รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ของค่ากระแสเชื่อมกับอัตราการซึมลึกของแนวเชื่อม

ที่มา : EWI, Gas Metal Arc Welding Basics : Welding Current & Welding Voltage, 2015

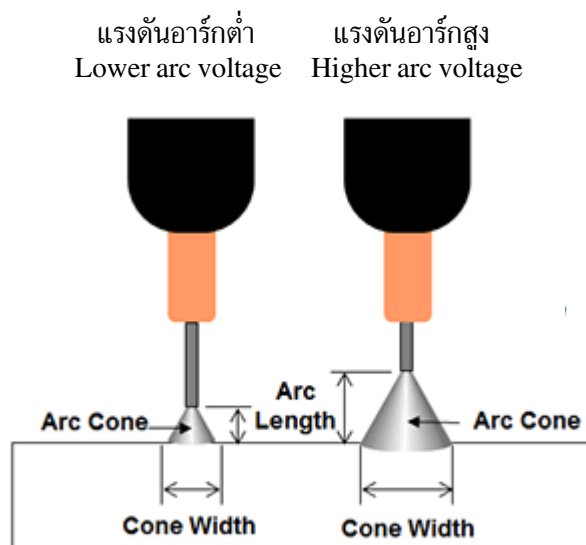


รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบระยะการซึมลึกของแนวเชื่อมที่กระแสเท่ากันขนาดลวดต่างกัน

ที่มา : Edward R. Bohnart : Welding Principles and Practices, 2017

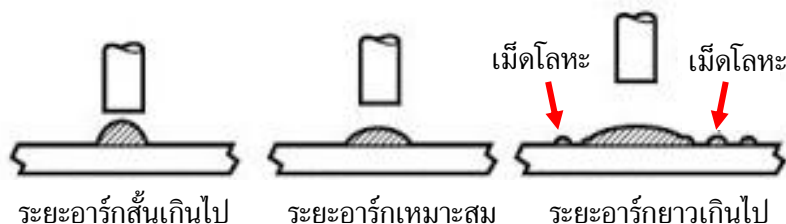
5.2.2 แรงดันอาร์ก (Arc voltage)

Lincoln Electric (2019) กรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กที่ใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อมจะเกิดการอาร์กขึ้นระหว่างลวดเชื่อมที่ไหลไหลออกมาที่ขั้วงาน ซึ่งระยะห่างของการอาร์กเรียกว่า แรงดันอาร์ก หรือ ระยะอาร์ก ของ กระบวนการเชื่อม ถ้าช่างเชื่อมเลือกใช้ระบบปรับแรงดันคงที่สามารถปรับตั้งได้ที่ชุดควบคุมหน้าปัดของเครื่องเชื่อม โดยเครื่องเชื่อมจะคงระดับแรงดันอาร์กไว้คงที่ตลอดเวลาตามที่ตั้งไว้ และจะคงรักษาระยะของการอาร์กไว้อย่างสม่ำเสมอ หมายถึง ถ้าระยะอาร์กสั้น (Short arc length) แรงดันอาร์กก็จะลดต่ำลง (Low arc voltage) และในทางกลับกันถ้าระยะอาร์กยาว (Long arc length) แรงดันอาร์กก็จะสูงขึ้นตาม (High arc voltage) ดังแสดงในรูปที่ 5.26 ในทางปฏิบัติเป็นที่ทราบกันดีว่าการเลือกปรับตั้งระยะอาร์กมีผลต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อมโดยตรง กล่าวคือ กรณีเชื่อมด้วยระยะอาร์กที่สั้นแนวเชื่อมที่ได้มีขนาดเล็กและนูน แต่ถ้าในกรณีที่เชื่อมด้วยระยะอาร์กที่ยาวจะได้แนวเชื่อมที่กว้างและแบนราบข้างยังเกิดเม็มน้ำโลหะกระเด็นออกมามาก ดังแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นแนวเชื่อมที่แตกต่างกันในรูปที่ 5.27 และในรูปที่ 5.28 แสดงตัวอย่างของลักษณะของแนวเชื่อมที่ผ่านการทดลองเชื่อมด้วยแรงดันอาร์กที่ค่าระดับของแรงดันที่ต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าแรงดันอาร์กที่สูงมีบทบาทต่อการหลอมลึกที่มากขึ้น และมีขนาดของแนวเชื่อมที่กว้าง อย่างไรก็ตาม ที่แรงดันอาร์กที่สูงการควบคุมบ่อหลอมละลายและหัวเชื่อมย่อมยากขึ้นด้วย จึงต้องใช้ช่างเชื่อมที่มีทักษะและความชำนาญการเชื่อมที่ค่อนข้างสูง โดยความถูกต้องและเหมาะสมในการปรับแรงดันอาร์กต้องพิจารณาร่วมกันกับขนาดของลวดเชื่อม ชนิดของแก๊สปกคลุม ตำแหน่งท่าเชื่อม การออกแบบรอยต่อ และขนาดความหนาของชิ้นงานเชื่อม



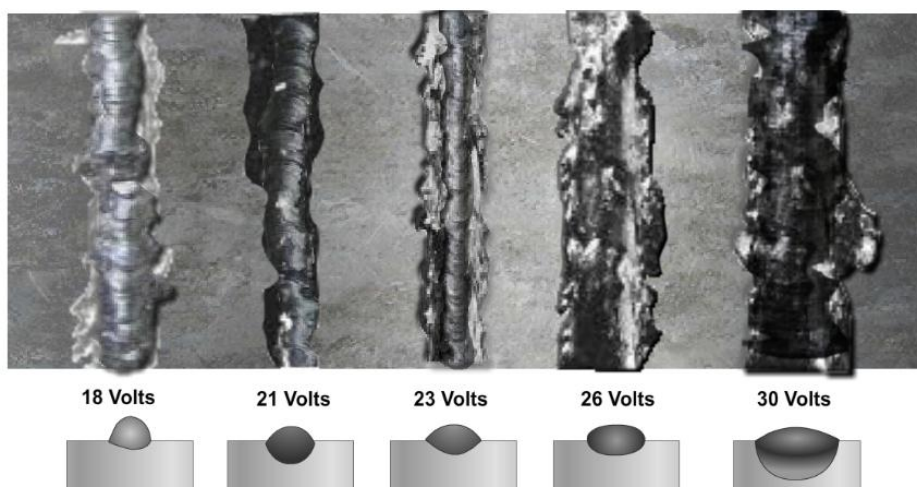
รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ของแรงดันอาร์ก (Arc voltage) กับระยะอาร์ก (Arc length)

ที่มา : Lincoln Electric : Process and theory, 2019



รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ของระยะอาร์ก (Arc length) ต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม

ที่มา : Lincoln Electric : Process and theory, 2019



รูปที่ 5.28 ลักษณะของแนวเชื่อมที่ผ่านการทดลองเชื่อมภายใต้แรงดันอาร์กแตกต่างกัน

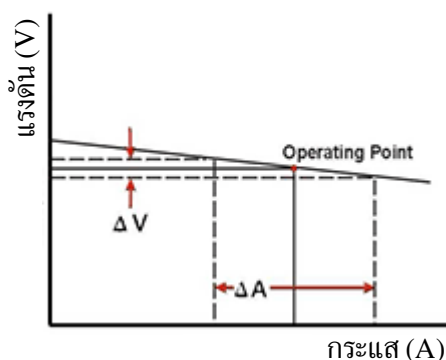
ที่มา : Welding Theory and Application, Army Technical Manual, USA, 1993

5.2.3 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟเชื่อม แรงดันอาร์ก และอัตราการป้อนลวด

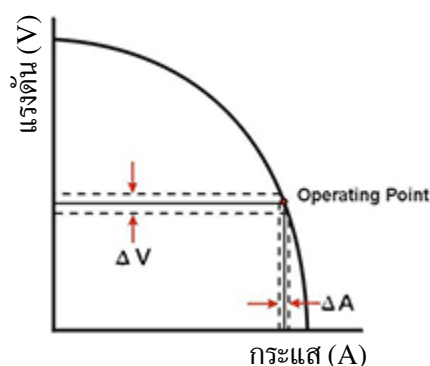
(Relationship of welding current, arc voltage, and wire feed speed)

Lincoln Electric (2011) ได้แสดงข้อมูลไว้ในหลักทฤษฎีและขบวนการของกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กที่ใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม (GMAW) มีหลักการปรับตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับการอาร์กและกระแสไฟเชื่อมที่ดูจะแตกต่างจากกรรมวิธีการเชื่อมแบบอื่น ๆ วิธีการคือ จะตั้งค่าคงที่ของแรงดันอาร์กที่เครื่องเชื่อม และค่ากระแสไฟเชื่อมจะถูกกำหนดให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเกิดจากการควบคุมด้วยความเร็วในการป้อนลวดเชื่อม (Wire feed speed) กล่าวคือ ถ้าอัตราการป้อนของลวดเข้าสู่ชิ้นงานเร็วมากขึ้น เครื่องเชื่อมจะปรับกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นโดยอัตโนมัติ ในขณะที่ระดับความดันคงที่ ในทางกลับกันถ้าอัตราการป้อนของลวดช้าลง เครื่องเชื่อมก็จะปรับลดกระแสไฟเชื่อมลงอย่างมีสัดส่วนที่เหมาะสม ดังในรูปที่ 5.29 (ก) เป็นการอธิบายเหตุผลว่าทำไมช่างเชื่อมจึงนิยมเลือกกำหนดแรงดันอาร์กที่เครื่องเชื่อม ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงปริมาณกระแสที่ค่อนข้างคงเมื่อกำหนดค่าแรงดันอาร์กบน

เครื่องเชื่อมที่คงที่ โดยการเปลี่ยนแปลงเฉพาะความเร็วของการป้อนลวด วิธีนี้ค่อนข้างง่ายในการควบคุมบ่อหลอมละลายและขนาดของแนวเชื่อม ส่วนเหตุผลที่ไม่นิยมนิยามค่าคงที่ของกระแสไฟเชื่อมที่เครื่องเชื่อม ก็เพราะว่าไม่สามารถที่จะสร้างแรงดันอาร์กให้คงที่ได้ โดยมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อกระแสที่ในระดับปริมาณที่สูงขึ้น ดังที่แสดงความสัมพันธ์ใน **รูปที่ 5.29 (ข)** ซึ่งวิธีนี้ต้องคอยระมัดระวังในการควบคุมความเร็วของการป้อนลวดที่บางครั้งอาจเกิดการหลอมที่รุนแรงจนหัวเชื่อมไหม้หรือลวดหลอมยากจนลวดติดกับชิ้นงานเชื่อม เป็นเหตุทำให้ควบคุมหรือกำหนดขนาดแนวเชื่อมยากมาก ช่างเชื่อมมักไม่ค่อยเลือกใช้วิธีนี้



(ก) การตั้งค่าแบบวิธีแรงดันคงที่ของเครื่องเชื่อม



(ข) การตั้งค่าแบบวิธีกระแสคงที่ของเครื่อง

รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบหลักวิธีการปรับตั้งค่าแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ กับแบบกระแสไฟเชื่อม
คงที่สำหรับการอาร์กแบบ GMAW

ที่มา : LINCON Electric – Process and Theory, 2011

ตามหลักการความสัมพันธ์ข้างต้นที่กล่าวมาว่า กระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนลวดเร็วขึ้น จะมีผลกระทบโดยตรงต่อการเพิ่มความร้อนให้กับชิ้นงานเชื่อม (Heat input) และเพิ่มขนาดของแนวเชื่อมซึมลึก (Weld penetration) แต่ก็ไม่เสมอไป ในสภาวะอัตราการป้อนลวดที่สูงช่างเชื่อมสามารถลดผลกระทบดังกล่าวได้ด้วยการควบคุมแรงดันอาร์ก ซึ่งจะไดงานเชื่อมที่เหมือนกับการปรับลดอัตราการป้อนลวดช้าลง ดังนั้น ช่างเชื่อมสามารถเลือกที่จะควบคุมการเชื่อมด้วยวิธีกำหนดอัตราการป้อนลวดหรือแรงดันอาร์กอย่างใดก็ได้ตามความถนัด โดยปกติผู้ผลิตลวดเชื่อมมักมีข้อมูลแนะนำเพื่อช่วยเป็นแนวทางให้เลือกใช้อุปกรณ์ประกอบที่ถูกต้องเหมาะสม ดังแสดงเป็นตัวอย่างใน **ตารางที่ 5.4** ซึ่งอ้างอิงจากหนังสือของ Larry Jeffus (2011)

ในทางปฏิบัติช่างเชื่อมต้องปรับตั้งอัตราการป้อนลวดตามข้อกำหนดวิธีดำเนินการเชื่อม (WPS) ในกรณีที่ไม่ได้กำหนดไว้ ช่างเชื่อมสามารถปรับตั้งเองตามความเหมาะสม ร่วมกับองค์ประกอบอื่น ๆ โดยอาจมีผู้ช่วยปรับในขณะที่กำลังทำการเชื่อมอยู่ ซึ่งมีข้อดีที่หาค่าที่เหมาะสมได้ง่ายและรวดเร็ว หรืออาจปรับด้วยตนเองโดยที่ทดลองเชื่อมบนโลหะทดลองก่อนจนกว่าจะได้ค่าอัตราการป้อนลวดที่

เหมาะสม เทคนิคการการปรับค่าของการเชื่อม GMAW แนะนำว่าควรปรับองค์ประกอบทีละตัว ไม่ควรปรับพร้อม ๆ กันหลายตัวในเวลาเดียวกัน โดยมีตัวแปรอื่น ๆ อีกหลายตัวร่วมด้วยที่มีผลต่อการปรับองค์ประกอบในการเชื่อม ได้แก่ ความหนาของชิ้นงานเชื่อม ชนิดของรอยต่อ ตำแหน่งท่าเชื่อม ตำแหน่งรอยต่อ แก๊สปกคลุม อุณหภูมิชิ้นงาน และรวมไปถึงทักษะความชำนาญของช่างเชื่อม

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลแนะนำเชิงเทคนิคในการปรับตั้งองค์ประกอบของขบวนการเชื่อมอาร์กใช้แก๊ส

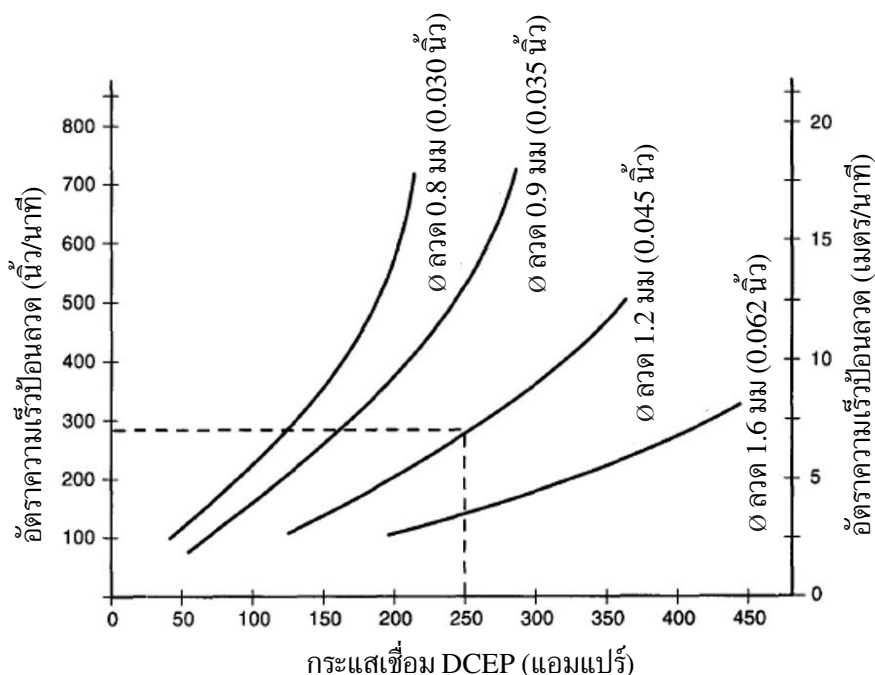
ปกคลุม (Recommended GMAW setup)

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metals Fabrication*, 2011

ข้อมูลแนะนำเชิงเทคนิคในการปรับตั้งองค์ประกอบของการเชื่อม (Recommended GMAW setup)			
การถ่ายเทน้ำโลหะแบบ Short circuit arc			
ขนาด Ø ของลวดเชื่อม (นิ้ว)	กระแสเชื่อม (แอมป์)	แรงดัน (โวลต์)	ความเร็วป้อนลวด (นิ้ว/นาที)
0.023	45–70–90	14–15–16	150–300–380
0.030	60–100–140	14–15–16	150–220–350
0.035	90–130–160	15–17–19	180–250–300
0.045	130–160–200	17–18–19	125–150–200
0.052	150–160–200	17–18–20	135–140–190
การถ่ายเทน้ำโลหะแบบ Spray metal arc			
ขนาด Ø ของลวดเชื่อม (นิ้ว)	กระแสเชื่อม (แอมป์)	แรงดัน (โวลต์)	ความเร็วป้อนลวด (นิ้ว/นาที)
0.023	100–110–125	23–23–25	400–450–620
0.030	160–180–200	24–25–26	500–520–650
0.035	180–200–230	25–26–27	400–480–550
0.045	260–300–340	25–27–30	300–350–500
0.052	275–325–400	26–28–33	265–310–390
หมายเหตุ เชื่อมด้วยระบบกระแสตรงขั้วบวก (DCEP) และ อัตราการไหลของแก๊ส 35 ถึง 45 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที			

จากที่กล่าวมาข้างต้นกระแสเชื่อม แรงดันอาร์ก และอัตราการป้อนลวดมีความสัมพันธ์กัน ที่ช่างเชื่อมต้องกำหนดหรือปรับตั้งให้เหมาะสม พบว่ายังมีตัวแปรเรื่องขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดป้อนหรือที่เข้าใจกัน คือขนาดความโตของลวดนั่นเอง ซึ่งมีความสำคัญต่ออัตราการป้อนลวดโดยตรง ซึ่งผู้ผลิตลวดเชื่อม KOBELCO (2015) ได้แสดงข้อมูลไว้และได้นำมาอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 5.30 เป็นการยกตัวอย่างของลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel wires) ที่ขนาดต่าง ๆ กัน เห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อลวดมีขนาดที่โตขึ้นต้องลดอัตราการป้อนให้ช้าลง ในทางกลับกันถ้าต้องการเพิ่ม

อัตราการป้อนลวดเพื่อที่จะเชื่อมได้รวดเร็วมากขึ้นต้องทำการปรับเพิ่มกระแสเชื่อมควบคู่กัน โดยความสัมพันธ์นี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันชนิดเกรตต์ลวดเชื่อม เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า “Burn off Characteristic” คือ คุณลักษณะการหลอมละลาย



รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ของขนาดลวด อัตราการป้อนลวด และกระแสเชื่อมของ GMAW

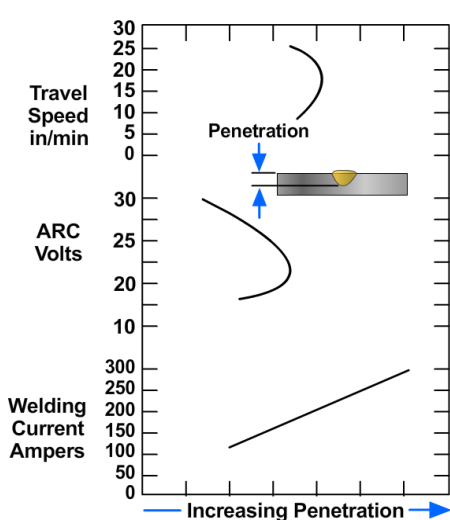
ที่มา : KOBELCO-Essential factors in gas shielding metal arc welding, 2015

5.2.4 ความเร็วเชื่อม (Welding speed)

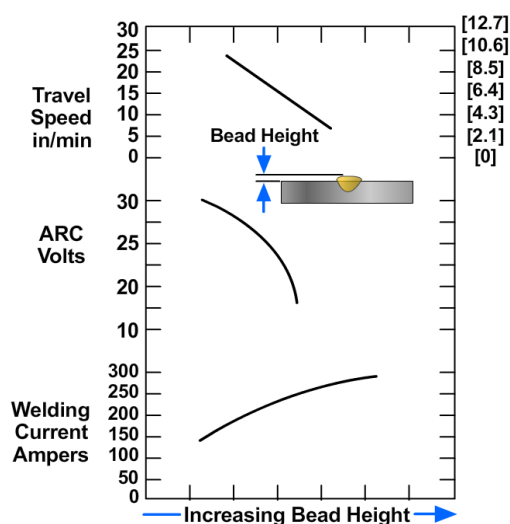
หมายถึง อัตราการความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมต่อหน่วยเวลาในระหว่างการเชื่อม ซึ่งวัดเป็นหน่วยของความยาวของแนวเชื่อมต่อเวลาที่ใช้การเชื่อม โดยอาจวัดเป็นหน่วยนิ้วต่อนาที (in/min) มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) หรือ มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/sec) ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของงานที่ทำการเชื่อม หรือตามข้อกำหนดของวิศวกรออกแบบงานเชื่อม (WPS) กรณีการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ ความเร็วในการเชื่อมถูกควบคุมโดยมือของช่างเชื่อม ส่วนกรณีการเชื่อมแบบอัตโนมัติจะถูกควบคุมโดยระบบกลไกจักรกล ซึ่งความเร็วของการเชื่อมนั้นจะมีความสัมพันธ์กับแรงดันอาร์ก และกระแสเชื่อมที่ต้องนำมาพิจารณาประกอบร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.31 ที่อ้างอิงจาก NAVEDTRA (2011) โดยระบุว่าส่งผลกระทบโดยต่อ (ก) ระยะการซึมลึกของแนวเชื่อม (Penetration) (ข) ความสูงหรืออนุของแนวเชื่อม (Bead height) และ(ค) ความกว้างของแนวเชื่อม (Bead width) กล่าวคือ

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.31 ถ้าความเร็วในการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นปริมาณความร้อนถ่ายโอนไปละลายชิ้นงานได้น้อยลง ส่งผลทำให้บ่อหลอมละลายเล็กลง เพราะเกิดการหลอมละลายเฉพาะบริเวณผิว

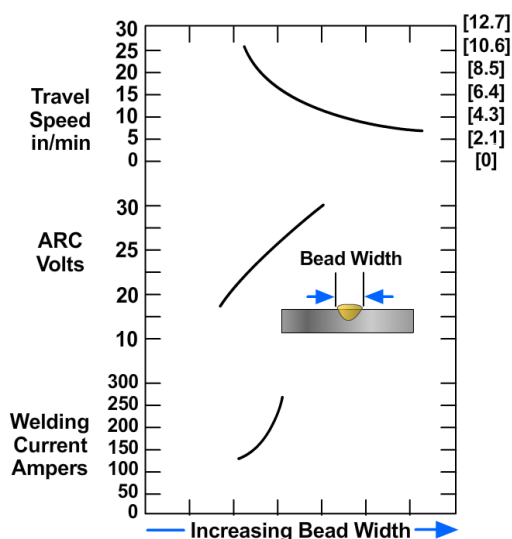
ของชิ้นงานอันเป็นเหตุให้ระยะซึมลึกน้อย และแนวเชื่อมมีความนูนสูงมาก ซึ่งปัญหานี้แก้ไขโดยช่างเชื่อมต้องควบคุมให้เกิดการอาร์กที่ขอบด้านหน้าของบ่อหลอมละลายเสมอ (Puddle) ในทางกลับกันถ้าความเร็วเชื่อมลดต่ำลงหรือช้าลง ชิ้นงานมีเวลารับความร้อนได้มากขึ้น อัตราการป้อนเติมลวดต่อหน่วยความยาวจะเพิ่มขึ้น บ่อหลอมจะละลายกว้างขึ้นและตื้น ส่งผลให้แนวเชื่อมมีขนาดโตและมีระยะการซึมลึกที่มากขึ้น จากบทบาที่กล่าวมาข้างต้นของความเร็วในการเชื่อมที่มีผลกระทบต่อขนาดและลักษณะของแนวเชื่อมนั้น ได้มีการทดลองเชื่อมชิ้นงานที่ระดับอัตราความเร็วเชื่อมที่ต่างกัน พบว่า ได้แนวเชื่อมที่มีความแตกต่างกันเป็นไปตามหลักการที่กล่าวมาอย่างชัดเจน ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 5.32



(ก) ระยะซึมลึกของแนวเชื่อม



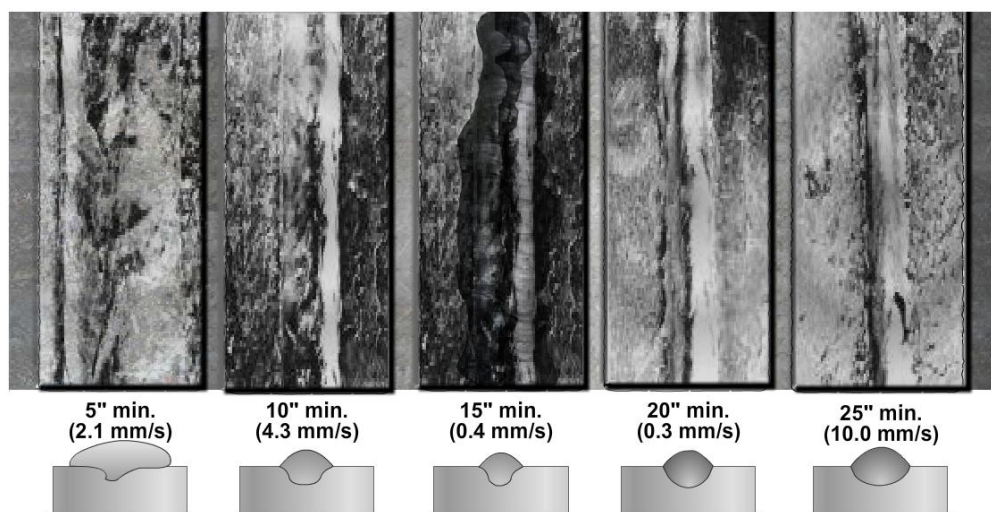
(ข) ความสูงหรือนูนของแนวเชื่อม



(ค) ความกว้างของแนวเชื่อม

รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชื่อม แรงดันอาร์กและกระแสเชื่อมที่มีผลต่อแนวเชื่อม

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011



รูปที่ 5.32 ขนาดและลักษณะของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยอัตราความเร็วแตกต่างกัน

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011

5.2.5 ระยะโผล่ลวดเชื่อม (Electrode extension)

ระยะโผล่ของลวดเชื่อมเป็นองค์ประกอบการเชื่อมที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการเชื่อมแบบมิก-แม็ก โดยบางครั้งอาจเรียกว่า Wire extension หรือ Actual stickout ซึ่งหมายถึงระยะห่างระหว่างปลายของท่อนำกระแส (Contact tube) กับปลายของลวดเชื่อม (Electrode) โดยเป็นช่วงระยะที่ใช้สำหรับการอุ่นลวดเชื่อมเพื่อเตรียมอาร์กกับชิ้นงานเชื่อม ความร้อนที่ใช้อุ่นลวดเกิดจากค่าความต้านทานกระแสเชื่อม ซึ่งมีสูตรการหาค่าความร้อนได้ดังนี้ อ้างอิงจาก NAVEDTRA 14250A, 2011

$$\text{ค่าความร้อนจากความต้านทาน} = I^2 \times R \quad \text{สมการที่ } \textcircled{5.3}$$

เมื่อ I = กระแสเชื่อม

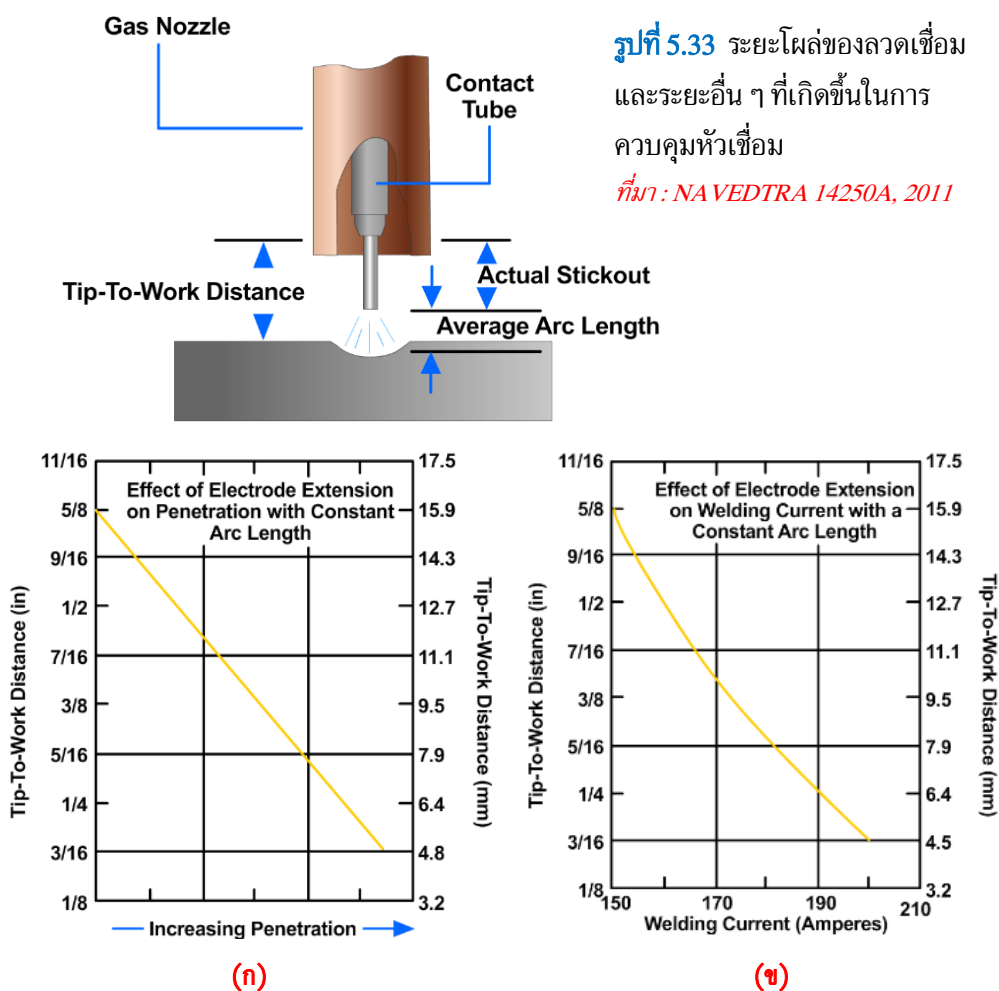
R = ความต้านทานกระแสเชื่อม

นอกจากนี้ ยังมีองค์ประกอบอื่นที่เกี่ยวข้องกับระยะโผล่ลวดเชื่อมที่ต้องควบคุมไปพร้อม ๆ กันบนชุดของหัวเชื่อม ได้แก่ ระยะห่างจากปลายของท่อนำกระแสถึงชิ้นงานเชื่อม (Tip-to-work distance) และ ระยะเฉลี่ยจากปลายของลวดเชื่อมถึงชิ้นงานเชื่อม (Average arc length) หรือที่เข้าใจกันดีว่าเป็นระยะอาร์กของการเชื่อม ดังแสดงรายละเอียดของของระยะต่าง ๆ ของหัวเชื่อมในรูปที่ 5.33

อิทธิพลของระยะโผล่ของลวดเชื่อมมีผลกระทบโดยตรงกับปริมาณกระแสเชื่อมที่แปรเปลี่ยน และระยะขีมิลึกที่เปลี่ยนแปลงของแนวเชื่อมภายใต้ระยะอาร์กที่คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5.34 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่า ระยะโผล่ของลวดเชื่อมที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อกระแสเชื่อมเพิ่มมากขึ้นตาม และทำให้ปริมาณของกระแสเชื่อมสามารถไหลผ่านได้น้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 5.34 (ก) ซึ่ง

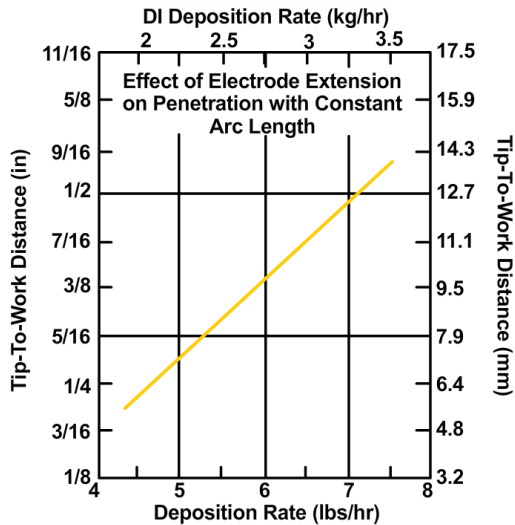
เป็นต้นเหตุให้แหล่งของความร้อนที่ใช้อุ่นลวดเชื่อมก่อนการอาร์กเพื่อการหลอมเหลวลดต่ำลงแบบอัตโนมัติ (Automatic decreased) ลวดเชื่อมหลอมยากขึ้น ในขณะที่อัตราการป้อนลวดคงเดิมและระยะอาร์กคงที่ ดังนั้น แนวเชื่อมที่ได้จึงมีระยะการหลอมซึมลึกที่น้อย แนวเชื่อมเล็ก และนูนสูง ในทางตรงกันข้ามถ้าระยะโผล่ของลวดเชื่อมลดต่ำลงค่าความต้านทานต่อกระแสเชื่อมลดลง กระแสไหลผ่านได้มากขึ้นสร้างความร้อนเพื่ออุ่นลวดได้มากและเร็วขึ้น ลวดหลอมง่ายบ่อหลอมละลายกว้างขึ้น แนวเชื่อมที่ได้จึงมีระยะซึมลึกที่มากและแนวเชื่อมมีขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 5.34 (ข)

ได้มีการทดลองหาอัตราการเติมเนื้อโลหะจากการหลอมละลายของลวดเชื่อมที่ระยะโผล่ของลวดเชื่อมแตกต่างกัน พบว่า ระยะโผล่ของลวดเชื่อมที่เพิ่มมากขึ้นมีแนวโน้มของปริมาณการเติมเนื้อโลหะที่มีอัตราที่สูงขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของกระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นแบบอัตโนมัติขณะปฏิบัติการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5.35



รูปที่ 5.34 ผลกระทบของระยะโผล่ลวดเชื่อมต่อ (ก) ระยะซึมลึก และ (ข) กระแสเชื่อม

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011



รูปที่ 5.35 ผลกระทบของระยะโพล์

ลวดเชื่อมต่ออัตราการเติมเนื้อ

โลหะ (ที่กระแสเชื่อม 145

แอมแปร์ และ ระยะอาร์คคงที่)

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011

จากคำแนะนำของผู้ผลิตเครื่องเชื่อมแบบอาร์กที่ใช้แก๊สปกคลุมหรือ มิก-แม็ก ระบุไว้ในกระบวนการเชื่อมทุกชนิดของการถ่ายโอนน้ำโลหะ จะกำหนดให้ตั้งระยะโพล์ของลวดเชื่อมที่ถูกต้องและเหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 5.5 ซึ่งระยะโพล์ลวดที่แนะนำต้องพิจารณาควบคู่กับขนาดของลวดเชื่อม โดยลวดเชื่อมขนาดเล็กต้องเลือกระยะโพล์ลวดที่น้อย และเพิ่มระยะโพล์ลวดมากขึ้นเมื่อขนาดของลวดเชื่อมโตขึ้น เช่น ขนาดลวดเชื่อม 0.8 – 1.2 มิลลิเมตร ตั้งระยะโพล์ลวดที่เหมาะสมอยู่ที่ 3.2 – 10 มิลลิเมตร หรือ ถ้าขนาดของลวดเชื่อมโตขึ้นเป็น 2.0 – 2.4 มิลลิเมตร ตั้งระยะโพล์ลวดที่เหมาะสมอยู่ที่ 25.4 – 31.8 มิลลิเมตร เป็นต้น

ตารางที่ 5.5 ระยะโพล์ลวดเชื่อมที่ถูกต้องและเหมาะสมของแต่ละชนิดของการถ่ายโอนโลหะ

ที่มา : Andrew D. Althouse and et. al., Modern Welding, 2020

ระยะโพล์ลวดเชื่อมที่ถูกต้องและเหมาะสมของการเชื่อมแบบอาร์กที่ใช้แก๊สปกคลุม หรือ มิก-แม็ก	
ชนิดของการถ่ายโอนโลหะ (Metal transfer)	ระยะโพล์ลวดเชื่อม (Electrode extension)
แบบ Short Circuiting	6 – 13 มิลลิเมตร หรือ 1/4 – 1/2 นิ้ว
แบบ Spray transfer	13 – 25 มิลลิเมตร หรือ 1/2 – 1 นิ้ว

** หมายเหตุ ระยะโพล์ลวดเชื่อมจะแปรผันตรงกับขนาดลวดเชื่อม

5.2.6 มุมหัวเชื่อม (Nozzle angles)

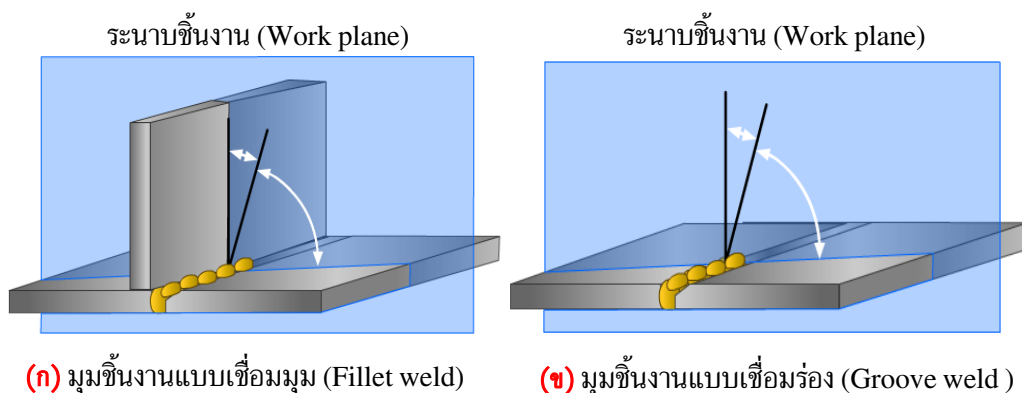
มุมหัวเชื่อมในกรณีวิธีการเชื่อมแบบอาร์กที่ใช้แก๊สปกคลุม หรือ มิก-แม็ก มีความหมายเดียวกันกับมุมของลวดเชื่อม (Electrode angles) ด้วยเหตุที่ลวดเชื่อมอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของหัวเชื่อมเสมอ โดยที่มุมของหัวเชื่อมที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการเชื่อมจะมี 2 มุมเสมอ ที่กล่าวไว้ในผลงาน

เขียนของ Andrew D. Althouse et al. (2020) ที่ระบุว่าช่างเชื่อมต้องคอยควบคุมให้อยู่ในมุมมองศาที่ถูกต้องและเหมาะสมทั้งคู่ เพราะเป็นตัวแปรที่สำคัญในการสร้างความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม ซึ่ง 2 มุมที่สอดคล้องกับคำอธิบายในเอกสารของ NAVEDTRA 14250A, 2011 มุมดังกล่าวก็คือ

1. มุมหัวเชื่อมตามแนวขวาง (Transverse nozzle angles) หรือ บางครั้งเรียกว่า มุมชิ้นงาน (Work angle) เป็นมุมที่เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมหรือลวดเชื่อมวัดทำมุมกับพื้นผิวของชิ้นงานเชื่อมในแนวระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5.36 (ก) และ (ข) เป็นการแสดงให้เห็นภาพของมุมมองศาในแนวขวาง ของแนวเชื่อมมุม (Fillet weld) และแนวเชื่อมร่อง (Groove weld) ตามลำดับ ส่วนกรณีการเชื่อมท่อ (Pipe) มุมตามแนวขวางจะวัดจากมุมที่เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมหรือลวดเชื่อมวัดทำมุมกับผิวท่อในแนวระนาบที่เลยออกไปจากศูนย์กลางท่อเรื่อย ๆ ไปกับบ่อหลอมละลายจากการเชื่อม

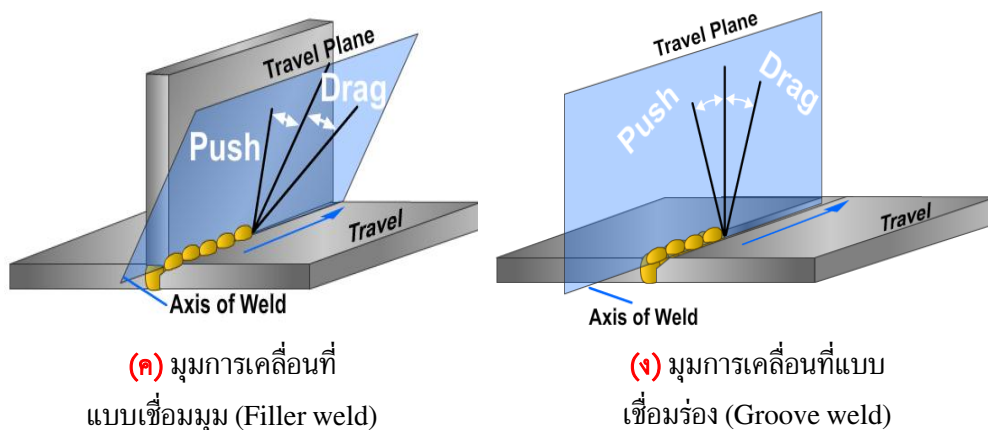
2. มุมหัวเชื่อมตามแนวยาว (Longitudinal nozzle angles) หรือบางครั้งเรียกว่า มุมการเคลื่อนที่หัวเชื่อม (Travel angle) เป็นมุมที่เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชื่อมหรือลวดเชื่อมวัดทำมุมกับเส้นอ้างอิงที่ตั้งฉากกับแนวแกนของรอยต่อเชื่อมในแนวระนาบของการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5.37 (ก) และ (ข) เป็นการแสดงให้เห็นมุมมองศาของการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมหรือลวดเชื่อม ในการเชื่อมแบบเชื่อมมุม (Fillet weld) และแนวเชื่อมร่อง (Groove weld) ตามลำดับ สำหรับการเชื่อมท่อมุมการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมจะวัดกับเส้นอ้างอิงเลยออกไปจากศูนย์กลางของท่อตลอดการเชื่อมในแนวระนาบของแกนแนวเชื่อม (Axis of weld) ซึ่งมุมของหัวเชื่อมตามแนวยาวในขณะที่ทำการเชื่อมสามารถเอียงมุมหัวเชื่อมหรือมุมของลวดเชื่อมให้อยู่ในท่าเชื่อมได้ทั้งแบบเชื่อมถอยหลัง (Backhand welding) และเชื่อมเดินหน้า (Forehand welding)

มุมหัวเชื่อมตามแนวยาวจะมีทั้งมุมเชื่อมที่เป็นแบบดึงหรือลาก (Pulling angle) โดยมุมแบบนี้หัวเชื่อมจะเอียงไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเชื่อม (Welding direction) จึงเรียกมุมเชื่อมแบบนี้ว่า Backhand welding และมุมเชื่อมที่เป็นแบบดันหรือผลัก (Pushing angle) มุมลักษณะนี้หัวเชื่อมจะเอียงไปในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการเชื่อม ดังนั้น จึงเรียกมุมเชื่อมแบบนี้ว่า Forehand welding ซึ่งแสดงเปรียบเทียบความแตกต่างของมุมเชื่อมทั้งสองในรูปที่ 5.38 นอกจากนี้ยังพบว่าระดับมุมเอียงของหัวเชื่อมมีผลต่อระยะการซึมลึกของแนวเชื่อม กล่าวคือ มุมเชื่อมแบบดึงหรือลากจะให้ระยะซึมลึกมากที่สุดต้องอยู่ในช่วงมุมเอียงระหว่าง 15 ถึง 20 องศา ส่วนมุมเชื่อมแบบดันหรือผลักต้องอยู่ในช่วง 15 ถึง 30 องศา นอกจากมีผลต่อระยะซึมลึกแล้ว มุมหัวเชื่อมในการเคลื่อนที่ยังมีผลกระทบโดยตรงต่อขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5.39 ซึ่งเปรียบเทียบให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของทิศทางการเอียงของมุมหัวเชื่อมกับระยะการซึมลึกและลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อม ตัวอย่างเช่น การเชื่อมที่มุมดึงหรือลากจะลดความสูงของแนวเชื่อมจะลดลงส่วนความกว้างจะเพิ่มขึ้น เป็นต้น



รูปที่ 5.36 ลักษณะของมุมเชื่อมตามขวาง ของงานเชื่อมมุม และ งานเชื่อมร่อง

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011

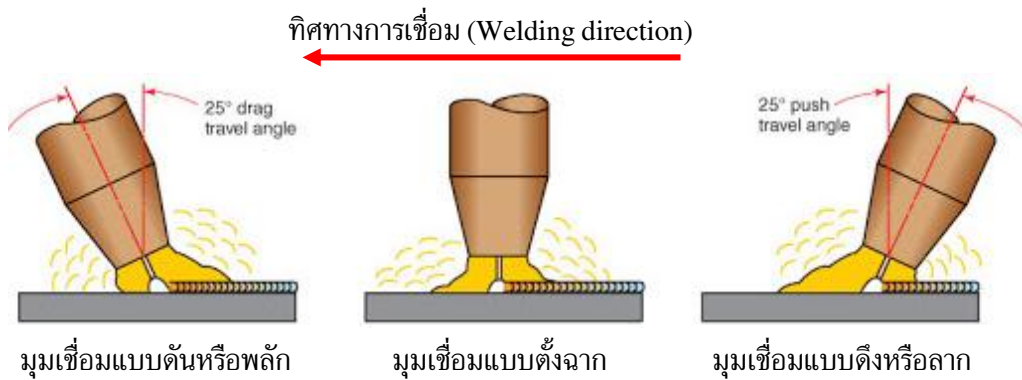


รูปที่ 5.37 ลักษณะของมุมเชื่อมตามแนวยาวของงานเชื่อมมุม และงานเชื่อมร่อง

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011

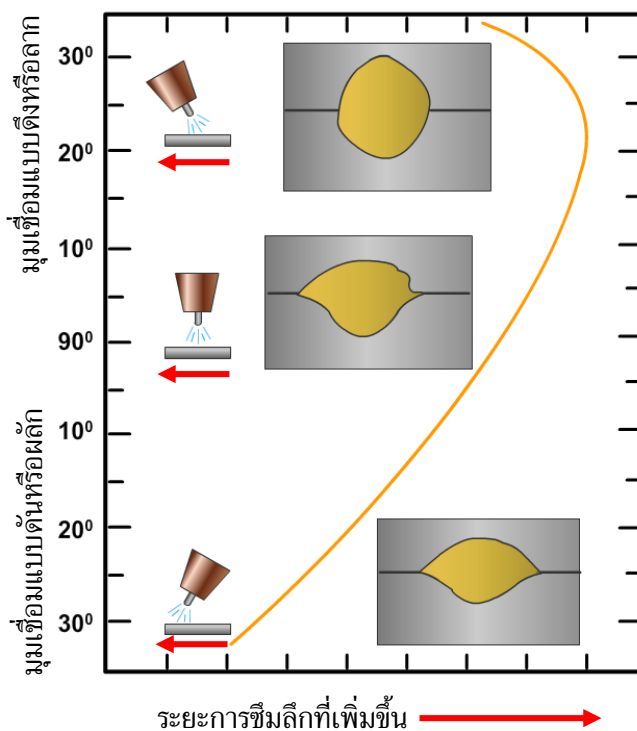
ข้อเสนอแนะสำหรับการเลือกใช้มุมของหัวเชื่อมจากประสบการณ์ของช่างเชื่อม

1. มุมเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมระหว่าง 5 ถึง 15 องศา เป็นช่วงมุมที่เหมาะสมกับทุกตำแหน่งทำเชื่อม ซึ่งช่างเชื่อมสามารถควบคุมบ่อหลอมละลายได้ง่าย แนวเชื่อมมีโอกาสเกิดข้อบกพร่องน้อย
2. มุมหัวเชื่อมเคลื่อนที่แบบดันหรือผลัก (Forehand welding) เหมาะที่จะเลือกใช้กับการเชื่อมโลหะอุณหภูมิต่ำ เพราะความร้อนป้อนเข้าสู่ชิ้นงานค่อนข้างต่ำ แต่ให้ระยะการซึมลึกดี
3. มุมหัวเชื่อมเคลื่อนที่แบบดึงหรือลาก (Backhand welding) เป็นมุมหัวเชื่อมที่นิยมเลือกใช้กันเหมาะสมที่จะเลือกใช้กับการเชื่อมจำพวกเหล็กกล้าทั่ว ๆ ไปได้ดี ให้ระยะซึมลึกมาก



รูปที่ 5.38 ลักษณะความแตกต่างของมุมเอียงหัวเชื่อม

ที่มา : Andrew D. Althouse, et. al., *Modern Welding*, 12th, 2020



รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ของทิศทางการเอียงของมุมหัวเชื่อมกับระยะการเชื่อมลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อม

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011

จากข้อมูลรายละเอียดที่กล่าวมาข้างต้นเกี่ยวกับมุมการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม พอจะสรุปลักษณะเฉพาะตัวหรือพฤติกรรมของการเอียงมุมหัวเชื่อมแบบดึงหรือลากกับแบบดันหรือผลักดังต่อไปนี้

ลักษณะเฉพาะของมุมหัวเชื่อมเคลื่อนที่แบบดึงหรือลาก (Backhand welding) มีดังนี้

1. รูปร่างของแนวเชื่อมนูนสูงและแคบ
2. ระยะซึมลึกมากเนื่องจากพฤติกรรมบ่อหลอมละลายอยู่หลังเปลวอาร์กเชื่อม
3. แนวทิศทางที่จะทำการเชื่อมมองเห็นได้ยาก เหตุเพราะมีหัวฉีดแก๊ส (Gas nozzle) มาปิดบัง
4. มุมเอียงของหัวเชื่อมมากเกินไปโอกาสเกิดโพรงอากาศได้มากด้วยเหตุจากเกิดการดูดอากาศเข้าหาบ่อหลอมละลายสูง
5. ข้างเชื่อมมองเห็นบ่อหลอมละลายได้ชัดเจนจึงง่ายต่อการควบคุมขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อมได้ดี
6. ขณะทำการเชื่อมจะเกิดประกายไฟจากอาร์กเชื่อมที่น้อย

ลักษณะเฉพาะของมุมหัวเชื่อมเคลื่อนที่แบบดันหรือผลัก (Forehand welding) มีดังนี้

1. รูปร่างของแนวเชื่อมมีลักษณะแบนราบและกว้าง
2. ระยะซึมลึกน้อยเนื่องจากพฤติกรรมบ่อหลอมละลายอยู่นำหน้าเปลวอาร์กเชื่อม
3. แนวทิศทางที่ทำการเชื่อมมองเห็นได้ง่าย เหตุเพราะไม่โดนปิดบังด้วยหัวฉีดแก๊ส (Gas nozzle)
4. มุมเอียงของหัวเชื่อมมากเกินไปโอกาสเกิดประกายไฟมาก และกระเด็นนำหน้าทิศทางเชื่อม (ยิ่งมุมเอียงมากประกายไฟจะยิ่งมากขึ้น และมีขนาดเม็ดประกายไฟที่ใหญ่ขึ้น)
5. ข้างเชื่อมมองเห็นบ่อหลอมละลายได้ยากเพราะปิดบังด้วยหัวฉีดแก๊ส จึงยากต่อการควบคุมขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม

5.2.6 แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม (Shielding gas)

กรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กที่ใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม (GMAW) ชนิดของแก๊สที่ใช้และอัตราการไหลไปปกคลุมแนวเชื่อมจึงมีความสำคัญและต้องพิจารณาเลือกใช้ให้ถูกต้องและเหมาะสม ด้วยเหตุเพราะแก๊สปกคลุมมีผลกระทบโดยตรงต่อ รูปร่างและขนาดของแนวเชื่อม ระยะซึมลึก อัตราการป้อนเติมลวด ปริมาณการเกิดควันเชื่อม ประกายไฟ อัตราความเร็วของการเชื่อม ชนิดการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะ และสมบัติของแนวเชื่อมที่ได้ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่ากล่าวของ Andrew D. Althouse (2020) และจากข้อมูลประสบการณ์ของช่างเชื่อม พบว่า การเชื่อมโลหะประเภทที่เป็นพวกกลุ่มเหล็ก (Ferrous metals) นิยมใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สอาร์กอน + แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($\text{Ar} + \text{CO}_2$) และ แก๊สอาร์กอน + แก๊สออกซิเจน ($\text{Ar} + \text{O}_2$) โดยเป็นที่ทราบกันดีว่ากรณีช่างเชื่อมเลือกใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเดียว (100% CO_2) ปริมาณความร้อนป้อนสู่ชิ้นงานเชื่อมสูงมาก อัตราการสิ้นเปลืองลวดสูง (Burn off rate) เกิดระยะซึมลึกมาก อัตราความเร็วการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมสูง แนวเชื่อมกว้างและนูน ขณะเชื่อมเกิดประกายไฟกระเด็นปริมาณมาก เป็นที่นิยมกันมากเพราะราคาค่อนข้างต่ำ ส่วนกรณีเลือกแก๊สปกคลุมชนิดอาร์กอนอย่างเดียว (100% Ar)

หรือ แก๊สอาร์กอนผสมแก๊สออกซิเจน ($Ar + O_2$) พบว่า ปริมาณความร้อนที่ป้อนสู่ชิ้นงานเชื่อมค่อนข้างน้อย อัตราการสิ้นเปลืองลวดต่ำ ระยะซึมลึกไม่มาก แนวเชื่อมที่ได้จึงมีลักษณะรูปร่างแคบและแบนราบ ข้างยังเกิดควันขณะเชื่อมน้อย และประกายไฟจากการอาร์กน้อยเช่นกัน สำหรับการเลือกใช้แก๊สปกคลุม ชนิดแก๊สอาร์กอนผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($Ar + CO_2$) พฤติกรรมโดยรวมจะให้ผลต่อการเชื่อม อยู่ระดับกลาง ๆ ระหว่างแก๊สปกคลุมทั้งสองชนิดที่กล่าวมาข้างต้น

สำหรับโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metals) แก๊สปกคลุมแนวเชื่อมที่ช่างเชื่อมนิยมเลือกใช้เป็นชนิดแก๊สอาร์กอนอย่างเดียว (100% Ar) และแก๊สอาร์กอนผสมฮีเลียม ($Ar + He$) กรณีที่ใช้แก๊สอาร์กอนอย่างเดียวพบว่าเกิดระยะซึมลึกน้อยและอัตราการสิ้นเปลืองลวดต่ำ รูปร่างแนวเชื่อมแคบ และแบนราบ มีประกายไฟจากการอาร์กปริมาณน้อย แต่ราคาค่อนข้างต่ำและหาซื้อได้ง่าย ส่วนกรณีเลือกแก๊สชนิดอาร์กอนผสมฮีเลียม จะให้ปริมาณความร้อนที่ป้อนสู่ชิ้นงานสูง ทำให้เกิดระยะซึมลึกมาก อัตราการสิ้นเปลืองลวดสูง แนวเชื่อมจึงมีลักษณะที่กว้างและนูนโค้ง ราคาแก๊สฮีเลียมค่อนข้างแพงจึงมีการใช้งานน้อย

นอกจากการพิจารณาเลือกชนิดของแก๊สสำหรับปกคลุมแล้วช่างเชื่อมจะต้องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (Flow rate) ผ่านหัวฉีดแก๊ส (Gas nozzle) ให้แก๊สไหลกระจายออกมาปกคลุมบ่อหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ ซึ่งอัตราการไหลที่เหมาะสมต้องราบเรียบสม่ำเสมอ และมีแนวไหลเป็นเส้นตรง (Laminar flow) ถ้าอัตราการไหลสูงมากเกินไปจะเกิดปรากฏการณ์แก๊สหมุนปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งขณะหมุนจะมีการดูดอากาศจากภายนอกเข้ามามาก ทำให้เกิดโพรงอากาศและข้อบกพร่องในแนวเชื่อม แต่ถ้ากำหนดอัตราการไหลของแก๊สน้อยเกินไปจะไม่สามารถปกคลุมแนวเชื่อมได้ทั่วทุกส่วน แก๊สจากภายนอกก็มีโอกาสเข้ามารวมตัวกับบ่อหลอมละลายเกิดเป็นรูพรุนต่อแนวเชื่อมได้ ดังนั้น ช่างเชื่อมต้องตระหนักและพิจารณาเลือกองค์ประกอบที่เกี่ยวกับแก๊สปกคลุมให้ถูกต้องและเหมาะสม โดยมีองค์ประกอบอื่น ๆ ร่วมด้วย ได้แก่ ชนิดของโลหะเชื่อม (Base metals) ความหนาของโลหะเชื่อม เป็นต้น ซึ่งปกติจะมีข้อมูลคำแนะนำจากผู้ผลิตแก๊สที่สามารถสืบค้นได้ทั่วไป หรือ ตัวอย่างคำแนะนำการเลือกใช้ชนิดของแก๊ส อัตราการไหลของแก๊ส ที่สัมพันธ์กับชนิดของโลหะเชื่อมและความหนาโลหะ ดังแสดงใน **ตารางที่ 5.6** และรูปร่างของแนวเชื่อมที่เลือกใช้แก๊สแตกต่างกันใน **รูปที่ 5.40**

ปัจจัยสำคัญอีกประการที่ต้องพิจารณาให้สัมพันธ์กับอัตราการไหลของแก๊สปกคลุม นั่นก็คือ ระยะห่างของหัวฉีดแก๊ส (Tip-to-Work Distance) ซึ่งมีผลกระทบต่อการเกิดโพรงอากาศ และ ปริมาณแก๊สในโตรเจนเข้าไปรวมตัวในแนวเชื่อม ยิ่งระยะห่างมากก็ยิ่งจะสร้างโอกาสให้ไนโตรเจนและแก๊สที่ไม่พึงประสงค์อย่างอื่นเข้ามารวมตัวกับน้ำโลหะเหลวของบ่อหลอมละลายได้มากยิ่งขึ้น ดังตัวอย่างการเลือกอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมกับระยะห่างของหัวฉีดแก๊สที่เหมาะสม ที่ขนาดลวดและกระแสเชื่อมที่ต่างกันใน **ตารางที่ 5.7**

ตารางที่ 5.6 คำแนะนำการเลือกใช้ชนิดแก๊สปกคลุมและอัตราการไหลสำหรับกลุ่มชนิดโลหะเชื่อม

ที่มา : Andrew D. Althouse and et. al. , Modern Welding, 12th , 2020

ชนิดโลหะ	ความหนา		อัตราการไหลของแก๊ส		ชนิดของแก๊ส
	นิ้ว (Inches)	มิลลิเมตร (mm)	ลูกบาศก์ฟุต/ชม Ft ³ /hr	ลิตร/นาที lmp	
อลูมิเนียม	1/16	1.6	25	12	100% Ar
และอลูมิเนียม	1/8	3.2	35	16	
ผสม	1/4	6.3	35	16	
	3/8	9.6	40	19	75% Ar + 25% He
	3/4	19	90	42	
เหล็กกล้า	1/16	1.6	25	12	75% Ar + 25% CO ₂ (สำหรับ Short circuiting transfer)
คาร์บอน	1/8	3.2	25	12	
และเหล็กกล้า	1/4	6.3	30	14	
ผสม	3/8	9.6	35	16	98% Ar + 2% O ₂
	3/4	19	50	24	(สำหรับ Spay transfer)
เหล็กกล้าไร้สนิม	1/16	1.6	30	14	90% He + 7.5% Ar + 2.5% CO ₂ (สำหรับ Short circuiting transfer)
และโลหะนิกเกิล	1/8	3.2	30	14	
ผสม	1/4	6.3	35	16	
	3/8	9.6	35	16	98% Ar + 2% O ₂
	1/2	12.7	40	19	(สำหรับ Spay transfer)
แมกนีเซียม	1/16	1.6	50	24	100% Ar
และแมกนีเซียม	1/8	3.2	50	24	Ar หรือ 75% Ar + 25% He
ผสม	1/4	6.3	60	28	
	3/8	9.6	60	28	
ทองแดง	1/8	3.2	25	12	Ar หรือ 75% Ar + 25%
และทองแดงผสม	1/4	6.3	35	16	He
	3/8	9.6	40	19	

ตารางที่ 5.7 ตัวอย่างการเลือกอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมกับระยะห่างของหัวฉีดแก๊สที่เหมาะสม

ที่มา : มานะศิษฐ์ พิมพ์สาร คู่มือการเชื่อม มิก-แม็ก 2554

ขนาด Ø ลวดเชื่อม (mm)	กระแสเชื่อม (A)	ระยะห่างของหัวฉีดแก๊ส (mm)	อัตราการไหลของแก๊ส ปกคลุม (L/min)
1.2	100 ถึง 200	10 ถึง 15	15 ถึง 25
	200 ถึง 300	15 ถึง 20	20 ถึง 30
1.6	200 ถึง 300	15 ถึง 20	20 ถึง 30
	300 ถึง 450	20 ถึง 25	20 ถึง 30



รูปที่ 5.40 รูปร่างกับระยะการซึมลึกของแนวเชื่อมที่เลือกใช้แก๊สปกคลุมต่างชนิดกัน

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011

5.3 องค์ประกอบการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW)

กรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กทั้งสแตนเลสที่ใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม หรือการเชื่อมทิก (TIG) นี้ เป็นการเชื่อมแบบหลอมละลายที่อาศัยการอาร์กของลวดทั้งสแตนเลส (Non-consumable) โดยมีแก๊สเฉื่อยช่วยปกคลุมบ่อหลอมละลายของแนวเชื่อม ซึ่งการควบคุมกระบวนการเชื่อมและคุณภาพของแนวเชื่อมต้องอาศัยการเลือกองค์ประกอบในการเชื่อมให้ถูกต้องและเหมาะสม จากประสบการณ์จริงของช่างเชื่อม TIG และ CK Worldwide (2016) พอจะจัดกลุ่มขององค์ประกอบที่เป็นตัวแปรสำคัญ ๆ ออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มตัวแปรที่เลือกขึ้นต้น หรือเลือกกำหนดก่อน (Reselected or fixed variables)
2. กลุ่มตัวแปรที่สามารถปรับได้ขั้นแรก (Primary adjustable variables)
3. กลุ่มตัวแปรที่สามารถปรับได้ขั้นที่สอง (Secondary adjustable variables)

ในทางปฏิบัติช่างเชื่อมต้องเลือกตัวแปรขึ้นต้นขึ้นมาก่อน หรือที่ต้องเลือกกำหนดขึ้นก่อนการเชื่อมให้เรียบร้อย จากนั้นก็มาปรับตัวแปรลำดับขั้นแรกที่ทำเมื่อเปิดระบบของเครื่องเชื่อมแล้ว ส่วนตัว

แปรชั้นที่สองเป็นการปรับในระหว่างที่กำลังทำการเชื่อม โดยจะอธิบายเพิ่มในรายละเอียดของตัวแปรต่าง ๆ ของแต่ละกลุ่มดังต่อไปนี้

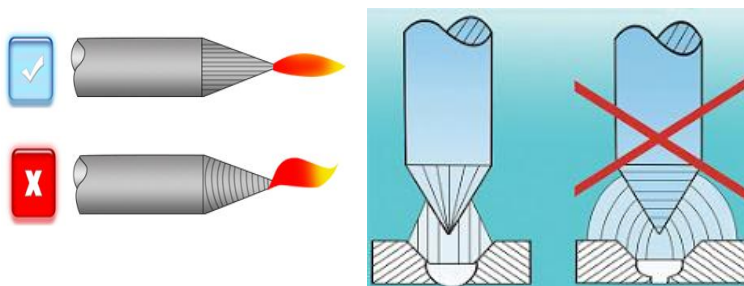
กลุ่มตัวแปรที่เลือกขึ้นต้นหรือเลือกกำหนดก่อน (Reselected or fixed variables) ตัวแปรกลุ่มนี้จะถูกกำหนดขึ้นมาก่อนที่จะทำการเชื่อม ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ในขณะทำการเชื่อม โดยมีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับชนิดของลวดทังสเตนและรูปร่าง (Tungsten electrodes and shape) ชนิดและขนาดของลวดเชื่อมเติม (Filler metals and sizes) ชนิดของกระแสเชื่อม (Welding current) และชนิดของแก๊สปกคลุม (Shielding gases)

กลุ่มตัวแปรที่สามารถปรับได้ขั้นแรก (Primary adjustable variables) เป็นตัวแปรที่ใช้สำหรับควบคุมกระบวนการเชื่อมหลังจากได้กำหนดเลือกตัวแปรขั้นต้นไปเรียบร้อยแล้ว เพื่อให้ได้มาซึ่งขนาดและรูปร่างของแนวเชื่อม ความกว้างและความสูงของแนวเชื่อม การซึมลึก ความสม่ำเสมอของการอาร์กและความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม ตัวแปรเหล่านี้ ได้แก่ ปริมาณช่วงกระแสไฟเชื่อม (Welding current range) แรงดันอาร์ก (Arc voltage) และ ความเร็วในการเชื่อม (Welding speed)

กลุ่มตัวแปรที่สามารถปรับได้ขั้นที่สอง (Secondary adjustable variables) ตัวแปรกลุ่มนี้การปรับจะเกิดขึ้นในขณะระหว่างทำการเชื่อม ได้แก่ มุมเอียงของลวดทังสเตนกับชิ้นงาน (Tungsten electrodes angle) มุมเอียงของลวดเชื่อมเติมและการป้อนลวด (Filler metal angle and filler metal feed)

5.3.1 ลวดทังสเตน และมุมหัวเชื่อมลวดทังสเตน (Tungsten electrodes and Torch angle)

ลวดทังสเตนในการเชื่อมทิก (TIG) ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดที่สำคัญต่อการอาร์กเพื่อสร้างบ่อหลอมละลายบนชิ้นงานโลหะเชื่อม โดยที่ตัวลวดทังสเตนเองไม่หลอมละลายเพราะ ทังสเตนมีจุดหลอมเหลวสูงถึง $3,410^{\circ}\text{C}$ ลวดทังสเตนที่นิยมใช้กันมีทั้งที่เป็นลวดทังสเตนบริสุทธิ์และทังสเตนผสม ซึ่งสามารถแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ดังแสดงใน **ตารางที่ 5.8** อ้างอิงจาก Moniz B.J. and Miller R.J. (2004) ซึ่งแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่เหมาะสมกับการเลือกใช้งานแตกต่างกัน นอกจากนี้ช่างเชื่อมจะต้องพิจารณาเลือกชนิดของลวดทังสเตนให้ถูกต้องแล้วนั้น ยังต้องทำการลับปลายของแท่งทังสเตนให้ถูกวิธี ซึ่งต้องลับในแบบทิศทางตามแนวยาวของแท่งทังสเตน (Lengthwise grinding) ห้ามลับแบบตามขวางของแท่งทังสเตน (Crosswise grinding) ดังแสดงการลับปลายทังสเตนที่ถูกต้องใน **รูปที่ 5.41**



รูปที่ 5.41 วิธีการลับปลายลวดทังสเตน
ที่มา : Becken Technology, 2019

ตารางที่ 5.8 ชนิดของลวดทั้งสแตนสำหรับการเชื่อมทิก (TIG)

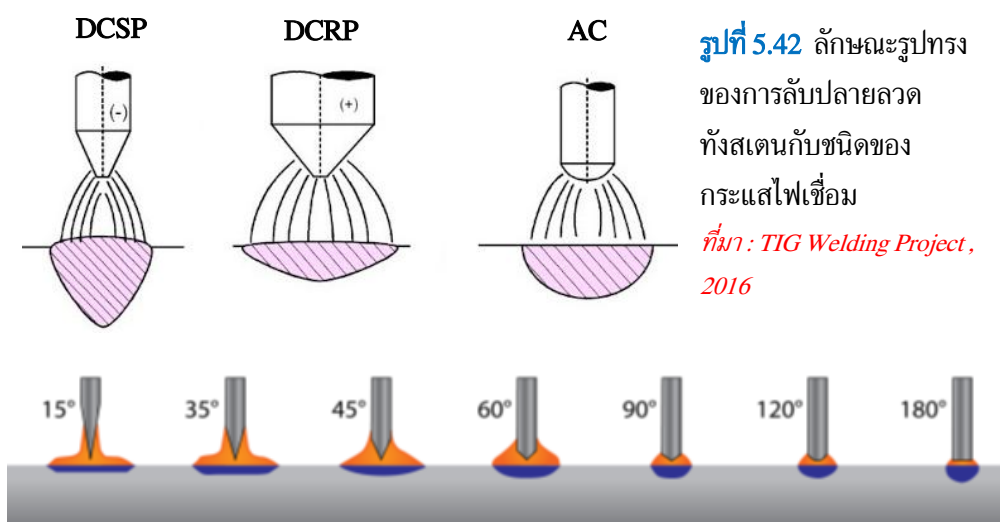
ที่มา : Moniz B.J. and Miller R.J. *Welding skills*, 2004

ชนิดของลวด ทั้งสแตน	มาตรฐาน AWS- ASTM	สัญลักษณ์สี	การใช้งาน
ทั้งสแตนบริสุทธิ์	EWP	เขียว	ใช้กับการเชื่อมกระแสไฟ AC มีความสามารถในการนำกระแสต่ำกว่าชนิดอื่น ใช้เชื่อมอลูมิเนียม แมกนีเซียม ด้วยการแต่งปลายลวดมนเรียบ อาร์กสม่ำเสมอ
ทั้งสแตนผสมทอเรียบ ออกไซด์			ใช้กับการเชื่อมกระแสไฟ DC มีความสามารถนำกระแสสูง อาร์กได้ดีกว่า EWP มีอายุการใช้งานสูง ละลายฝังในบ่อหลอมได้ยาก เหมาะกับการเชื่อมเหล็กกล้าด้วยกระแส DCEN ไม่เหมาะกับกระแสไฟ AC เพราะแต่งปลายลวดได้ไม่โค้งมน อาร์กได้ดีกว่า EWP และ EWZr
0.9–1.2 ThO ₂	EWTh1	เหลือง	
1.8–2.2 ThO ₂	EWTh2	แดง	
2.8–3.2 ThO ₂	EWTh3	ม่วงแดง	
3.8–4.2 ThO ₂	EWTh4	ส้ม	
ทั้งสแตนผสม เซอร์โคเนียมออกไซด์			ใช้กับการเชื่อมกระแส AC อาร์กเรียบและปลายลวดโค้งมนดีความสามารถในการนำไปใช้งานมีสมบัติอยู่ระหว่าง EWP กับ EWTh ละลายฝังในบ่อหลอมได้ยากกว่า
0.3–0.5 ZrO ₂	EWZr-1	น้ำตาล	
0.7–0.9 ZrO ₂	EWZr-2	ขาว	EWP
ทั้งสแตนผสมแลนแทน ออกไซด์			ใช้กับการเชื่อมและตัดด้วยพลาสมา ไม่แพร่รังสี อายุการใช้งานยาวนานกว่า EWTh
0.9–1.2 LaO ₂	EWL a-1	ดำ	
ทั้งสแตนผสมซีเรียม ออกไซด์			ใช้กับการเชื่อมได้ทั้งกระแสไฟ AC และ DC ใช้งานได้ดีเทียบเคียงได้กับ EWTh ไม่แพร่รังสี อายุการใช้งานยาวนานกว่า EWP
1.0 CeO ₂	EWCe-1	ชมพู	
2.0 CeO ₂	EWCe-2	เทา	
ทั้งสแตนผสมโลหะอื่น	EWG	–	ถูกระบุโดยผู้ผลิต ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับการใช้งานเฉพาะอย่าง

E = Electrode , W = Tungsten

การลับปลายลวดทั้งสแตนตามแนวยาวของแท่งลวด มีข้อดีช่วยให้การส่งถ่ายกระแสไฟเชื่อมไปในทิศทางเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ และราบเรียบทำให้สามารถควบคุมบ่อหลอมละลายได้ง่าย เปลวไฟอาร์กมีขนาดเล็ก ง่ายต่อการควบคุมขนาดและทิศทางการเชื่อม ส่วนถ้าลับปลายลวดตามแนวขวางของแท่งลวด การส่งถ่ายกระแสไฟเชื่อมจะไม่สม่ำเสมอ และมักเกิดการแตกหรือหลุดของเนื้อทั้งสแตนเข้าไปฝังในตัวอยู่ในบ่อหลอมละลายได้ง่าย

นอกจากการพิจารณาถึงทิศทางการกลับปลายของแท่งลวดทั้งสแตนเลสแล้ว ค่ามุมมองของการกลับก็มีความสัมพันธ์ต่อชนิดของกระแสไฟเชื่อม กล่าวคือ กระแสไฟเชื่อมชนิด DC มุมของปลายลวดจะต้องเป็นมุมแหลม ส่วนกระแสไฟเชื่อมชนิด AC จะเป็นมุมโค้งมนดังแสดงในรูปที่ 5.42 และมุมมองของปลายลวดทั้งสแตนเลสที่ยื่นน้อยหรือเป็นปลายแหลมจะได้แนวเชื่อมที่มีระยะซึมลึกน้อยแต่แนวกว้าง ในทางกลับกันยิ่งมุมปลายลวดมากหรือเป็นปลายมนก็จะได้แนวเชื่อมที่มีระยะซึมลึกมากแต่แนวเชื่อมแคบ ดังแสดงการเปรียบเทียบแนวเชื่อมที่มุมปลายลวดทั้งสแตนเลสแตกต่างกันในรูปที่ 5.43



รูปที่ 5.42 ลักษณะรูปทรง

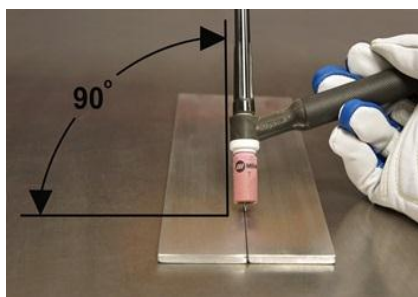
ของการกลับปลายลวด
ทั้งสแตนกับชนิดของ
กระแสไฟเชื่อม

ที่มา : TIG Welding Project,
2016

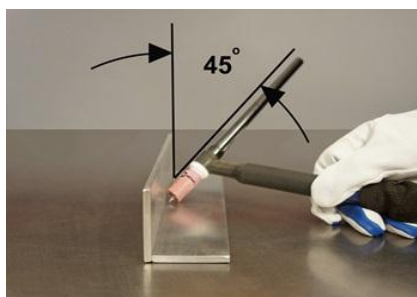
รูปที่ 5.43 เปรียบเทียบลักษณะของแนวเชื่อมที่สัมพันธ์กับมุมมองปลายลวดทั้งสแตน

ที่มา : Andrew D. Althouse, et. al., Modern Welding, 12th, 2020

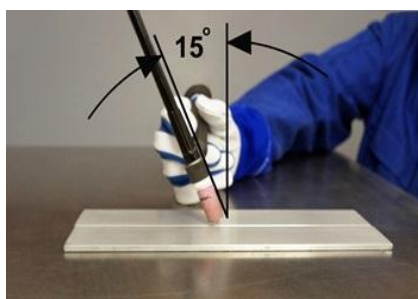
มุมหัวเชื่อมลวดทั้งสแตนเลส ซึ่งจะหมายถึง มุมของหัวเชื่อมที่ประกบกับลวดทั้งสแตนเลส (Torch) โดยถูกควบคุมด้วยช่างเชื่อม มุมที่ต้องควบคุม มี 2 มุมคือ มุมระหว่างลวดทั้งสแตนเลสกับระนาบของชิ้นงานเชื่อม ที่เรียกว่า มุมชิ้นงาน (Work angle) โดยมุมชิ้นงานของการเชื่อมแบบต่อชน (Butt weld) หัวเชื่อมจะทำมุม 90° แต่สำหรับมุมชิ้นงานของการเชื่อมต่อแบบเชื่อมมุม หัวเชื่อมจะทำมุม 45° ส่วน มุมระหว่างลวดทั้งสแตนเลสกับรอยต่อตามแนวยาวของแนวเชื่อม เรียกว่า มุมการเคลื่อนที่หัวเชื่อม (Travel angle) ซึ่งจะทำมุม 15° เท่ากันทั้งเชื่อมแบบต่อชนและแบบเชื่อมมุม ดังแสดงด้วยมุมเชื่อมแต่ละแบบในรูปที่ 5.44 ขณะทำการเชื่อมช่างเชื่อมแต่ละคนอาจมีทักษะการควบคุมหัวเชื่อมได้แม่นยำแตกต่างกัน โดยสามารถยอมให้ผิดพลาดได้เล็กน้อย เพราะมุมเอียงของหัวเชื่อมมีผลต่อขนาดและคุณสมบัติของแนวเชื่อมอย่างชัดเจน เช่น ถ้ามุมหัวเชื่อมเอียงทั้งสแตนเลสให้อาร์กพุ่งเข้าหาชิ้นงานข้างใดข้างหนึ่ง จะเกิดการกัดขอบแนวเชื่อมด้านตรงข้ามและเกิดการหลอมไม่ละลายไม่สมบูรณ์ขึ้นในแนวเชื่อม เป็นต้น สำหรับมุมการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมถ้ามุมมองมากแนวเชื่อมที่ได้มีระยะซึมลึกมากด้วยและมีรูปร่างแนวเชื่อมนูนสูง ในทางกลับกันถ้ามุมมองศาลจะเกิดผลตรงกันข้าม



(ก) มุมขึ้นงาน เชื่อมต่อชน (Butt weld)



(ข) มุมขึ้นงาน เชื่อมมุม (Fillet weld)



(ค) มุมการเคลื่อนหัวเชื่อม (Travel angle)

รูปที่ 5.44 มุมขึ้นงาน (Work angle) และมุมการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม (Travel angle)

ที่มา : Miller Welding tips, 2018

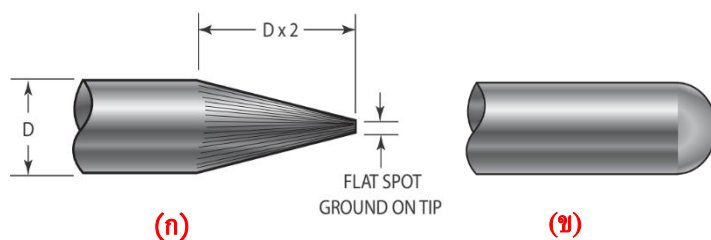
5.3.2 ชนิดของลวดป้อนเติมและโลหะเชื่อม (Filler metals and base metals)

การเชื่อมทิกสามารถเชื่อมได้ทั้งแบบเติมลวดเชื่อม (Filler metal process) และแบบไม่เติมลวดเชื่อม (Non-filler metal process) หรือที่เรียกกันว่า Autogenous welding process กรณีที่เชื่อมแบบเติมลวดต้องเลือกลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับโลหะที่เชื่อม โดยปกติจะเลือกลวดเชื่อมที่เป็นชนิดและเกรดเดียวกันกับโลหะที่เชื่อม ซึ่งบางครั้งนิยมเรียกลวดเชื่อมทิกว่า “ลวดเชื่อมเปลือย” หมายถึงเป็นแท่งลวดโลหะที่ไม่มีสารพอกหุ้มนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 5.45 ส่วนขนาดของลวดเชื่อมมีหลายขนาดสามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสม สำหรับชนิดของโลหะเชื่อมต้องเลือกใช้ให้สัมพันธ์กันกับรูปทรงของปลายลวดทั้งสอง โดยกรณีเชื่อมโลหะกลุ่มที่เป็นชนิดเหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้สนิมจะเลือกใช้ปลายลวดทั้งสองแบบแหลม ส่วนกรณีเชื่อมโลหะอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสมจะต้องเลือกใช้ปลายลวดทั้งสองแบบโค้งมน ดังแสดงในรูปที่ 5.46



รูปที่ 5.45 ชนิดของลวดเชื่อมป้อนเติมของการเชื่อมทิก

ที่มา : Arc-Zone. Com[®], 2014



รูปที่ 5.46 ปลายลวด
ทังสเตน (ก) สำหรับเชื่อม
เหล็กกล้าและเหล็กกล้าไร้
สนิม (ข) สำหรับเชื่อม
อลูมิเนียมและอลูมิเนียม
ผสม ที่มา: *Cengage
learning, 2012*

การป้อนเติมลวดลงในบ่อหลอมละลายของกระบวนการเชื่อมทิก จะเกิดขึ้นหลังจากที่ปลายลวดอาร์กทั้งสเดนสร้างบ่อหลอมละลายบนชิ้นงานที่มีขนาดโตเพียงพอและสามารถที่จะซึมลึกได้ตามต้องการ ซึ่งจากประสบการณ์ของช่างเชื่อมพบว่าเทคนิคการป้อนเติมลวดมี 2 วิธี คือ

1. เทคนิคการป้อนเติมลวดแบบหยด (Drop by Drop) เป็นเทคนิคการป้อนลวดแบบดึงเข้า-ออกจากบ่อหลอมละลาย ดังแสดงในรูปที่ 5.47 (ก) โดยควบคุมให้ปลายลวดหลอมเหลวแล้วเติมลงในบ่อหลอมละลาย แล้วดึงปลายลวดออกจากบ่อหลอม เพื่อให้อาร์กหลอมละลายลวดที่เติมเข้าไปหลอมละลายเข้ากันได้ดีกับเนื้อโลหะในบ่อหลอมละลาย จากนั้นป้อนเติมลวดรอบใหม่ โดยทำซ้ำ ๆ ในลักษณะนี้ไปจนกว่าจะได้แนวเชื่อมที่ป้อนเติมลวดอย่างสมบูรณ์ แต่ต้องระวังอย่าดึงปลายลวดเติมออกจากบ่อหลอมละลายจนเลยอาณาเขตของแก๊สปกคลุม เพราะทำให้ปลายลวดเติมสัมผัสกับบรรยากาศและเกิดออกไซด์ขึ้นได้

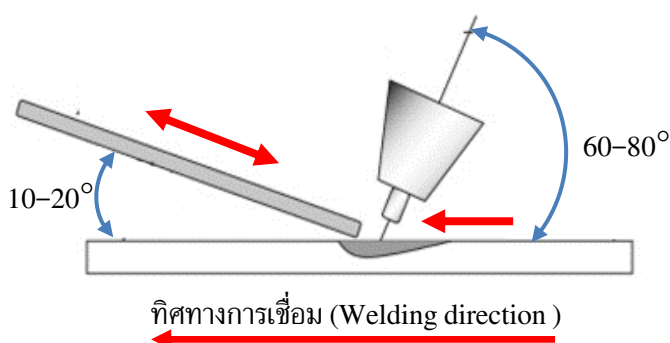
2. เทคนิคการป้อนเติมแบบต่อเนื่อง (Continuous) เป็นเทคนิคการป้อนเติมลวดแบบที่ป้อนลวดเติมเข้าไปที่ด้านหน้าของบ่อหลอมละลายชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง และทำการส่ายหัวเชื่อมในลักษณะเดินหน้า-ถอยหลัง เหตุผลเพื่อต้องการให้เนื้อโลหะป้อนเติมกับเนื้อโลหะบ่อหลอม ผสมผสานเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีทุกบริเวณของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5.47 (ข)

5.3.3 ระยะยื่นของปลายแท่งลวดทังสเตน (Tungsten electrode extension)

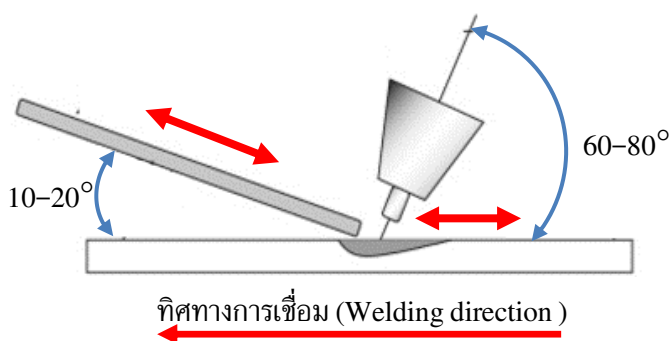
การเชื่อมทิกอาศัยการอาร์กของปลายแท่งลวดทังสเตนกับชิ้นงาน โดยมีการกำหนดระยะของปลายลวดทังสเตนที่ยื่นเลยออกจากหัวฉีดแก๊ส (Nozzle) ให้เหมาะสม ซึ่งโดยทั่วไปมีขนาดเท่ากับ 1-2 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทังสเตน ดังแสดงในรูปที่ 5.48 ถ้าระยะยื่นของลวดทังสเตนออกมามากเกินไป จะทำให้ปลายของลวดทังสเตนมีโอกาสสัมผัสกับบ่อหลอมละลายหรือลวดเติมได้ง่าย ข้ายังต้องใช้แก๊สเพื่อปกคลุมในปริมาณที่มากกว่าปกติ ในทางกลับกันถ้าระยะยื่นของลวดทังสเตนยื่นออกมาน้อย โอกาสที่ปลายลวดทังสเตนจะสัมผัสกับบ่อหลอมละลายและลวดเติมก็ลดน้อยลง ปลายลวดไม่ค่อยสกปรก แต่มีผลกระทบกับหัวฉีดแก๊ส เพราะอยู่ชิดกับบ่อหลอมละลาย ซึ่งโอกาสที่เมื่อน้ำโลหะกระเด็นมาติดที่ปลายหัวฉีดแก๊สก็มากขึ้น อาจสร้างความเสียหายต่อรูฉีดพ่นแก๊ส

ได้ นอกจากนี้ยังมีข้อด้อยที่ขณะทำการเชื่อมช่างเชื่อมมองเห็นบ่อหลอมละลายได้ยากมาก เพราะถูกปิดบังด้วยเงาของหัวเชื่อม จึงต้องอาศัยทักษะและความชำนาญในการควบคุมหัวเชื่อมที่ค่อนข้างสูง

จากประสบการณ์ที่ช่างเชื่อมพบเจอ พบว่าระยะยื่นของลวดทั้งสแตนที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับลักษณะของรอยเชื่อมต่อ ตัวอย่างเช่น ถ้าเป็นการเชื่อมต่อแบบเชื่อมมุม (Fillet weld) ดังแสดงในรูปที่ 5.49 (ก) ระยะยื่นของปลายลวดทั้งสแตนต้องมาก โดยปลายลวดต้องเกือบจรดส่วนลึกสุดของรอยต่อ และสามารถเห็นบ่อหลอมละลายได้ชัดเจน ส่วนรอยเชื่อมต่อที่ใช้ระยะยื่นของลวดทั้งสแตนน้อยมากจะเป็นการเชื่อมแบบต่อขอบ (Edge flange) รูปที่ 5.49 (ข) นอกจากนี้ระยะยื่นของลวดทั้งสแตนยังขึ้นอยู่กับชนิดของกระแสเชื่อม AC หรือ DC และขนาด ϕ ของลวดทั้งสแตน



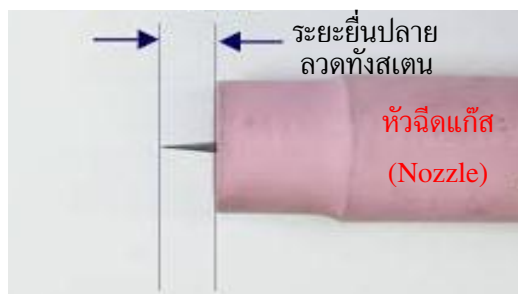
(ก) เทคนิคการป้อนเติมลวดแบบหยด (Drop by Drop)



(ข) เทคนิคการป้อนเติมแบบต่อเนื่อง (Continuous)

รูปที่ 5.47 เทคนิคการป้อน
ลวดเติม (Filler metal)
แบบหยด (Drop by Drop)
กับ แบบต่อเนื่อง
(Continuous) ของ
กระบวนการเชื่อมทิก

ที่มา : Gene Mathers. *The
Welding of Aluminium and
its Alloys*, 2002



รูปที่ 5.48 ระยะยื่นของปลายแท่งลวด
ทั้งสแตน (Tungsten electrode
extension) ของกระบวนการเชื่อมทิก
ที่มา : Gene Mathers. *The Welding of
Aluminium and its Alloys*, 2002



(ก) ระยะยื่นลวดทั้งสแตนแบบเชื่อมมูม



(ข) ระยะยื่นลวดทั้งสแตนแบบเชื่อมขอบ

รูปที่ 5.49 เปรียบเทียบระยะยื่นของปลายลวดทั้งสแตนที่สัมพันธ์กับลักษณะของแนวเชื่อมต่อ

ที่มา : Andrew D. Althouse, et al., *Modern Welding*, 2020

5.3.4 กระแสไฟเชื่อม (Welding current)

การเชื่อมทิก ช่างเชื่อมสามารถเลือกชนิดกระแสไฟเชื่อมตามลักษณะการเชื่อมต่อและชนิดของโลหะเชื่อม โดยชนิดของกระแสที่นิยมเลือกใช้กันมี 3 ชนิด อ้างอิงตาม Priyanka Chougale et al. (2018) ดังนี้

1. ชนิดกระแสตรงขั้วลบ (Direct Current Electrode Negative : DCEN) หัวเชื่อมหรือลวดทั้งสแตนเป็นขั้วลบ (-) และชิ้นงานเป็นขั้วบวก (+) เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงานมากกว่าที่ลวดทั้งสแตน แนวเชื่อมที่ได้จึงมีระยะซึมลึกมากและรูปร่างแนวเชื่อมที่เล็กแคบ เหมาะกับการเชื่อมงานที่เป็นกลุ่มโลหะเหล็ก ไม่เหมาะกับโลหะชนิดที่หลอมละลายง่ายจำพวกโลหะอลูมิเนียมหรือแมกนีเซียม ดังแสดงในรูปที่ 5.50 (ก)

2. ชนิดกระแสตรงขั้วบวก (Direct Current Electrode Positive : DCEP) กระแสไฟเชื่อมชนิดนี้ หัวเชื่อมหรือลวดทั้งสแตนเป็นขั้วลบ (+) และชิ้นงานเป็นขั้วบวก (-) เกิดความร้อนขึ้นที่ลวดทั้งสแตนมากกว่าที่ชิ้นงาน ดังนั้นจึงเหมาะกับการเชื่อมงานที่ต้องการแนวเชื่อมกว้างแต่ระยะซึมลึกลดน้อย นิยมใช้เชื่อมโลหะกลุ่มอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม โลหะแมกนีเซียมและแมกนีเซียมผสม เพราะกระแสไฟเชื่อมชนิดนี้ขณะอาร์กจะเกิดปฏิกิริยาทำความสะอาดผิวออกไซด์บนผิวชิ้นงานเชื่อมได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 5.50 (ข)

3. ชนิดกระแสสลับความถี่สูง (Alternative Current & High Frequency : ACHF) เป็นกระแสไฟเชื่อมชนิดกระแสสลับที่ครึ่งรอบแรก (First half cycle) ทั้งสแตนเป็นขั้วบวก (+) ออกไซด์ที่ผิวชิ้นงานตรงที่อาร์กจะถูกขจัดออกไป (Clean) ส่วนครึ่งรอบหลัง (Second half cycle) ทั้งสแตนเป็นขั้วลบ (-) ชิ้นงานจะเกิดความร้อน (Heat) โดยมีระบบความถี่สูงมาช่วยกระตุ้นการอาร์ก เหมาะกับการเชื่อมโลหะกลุ่มอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม โลหะแมกนีเซียมและแมกนีเซียมผสม ซึ่งต้องขจัดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวชิ้นงานออกก่อนที่จะขึ้นงานจะหลอมละลายดังแสดงในรูปที่ 5.50 (ค)

นอกจากเลือกชนิดของกระแสไฟเชื่อมที่ถูกต้องและเหมาะสมแล้วนั้น การกำหนดขนาดของกระแสเชื่อมก็มีผลต่อแนวเชื่อมอย่างมาก โดยควบคุมได้จากชุดควบคุมหน้าเครื่องเชื่อมหรือปรับที่ปุ่มมือกดหรือเท้าเหยียบ ส่วนการเชื่อมแบบอัตโนมัติจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรมการเชื่อม ขนาดของกระแสเชื่อมกำหนดได้จากขนาดและชนิดของลวดทั้งสแตนเลส ชนิดกระแสเชื่อม ตำแหน่งท่าเชื่อม การออกแบบรอยต่อ ความหนาของชิ้นงานและช่วงกระแสของเครื่องเชื่อม ถ้าขนาดกระแสสูงขึ้นระยะการซึมลึกและขนาดของแนวเชื่อมจะเพิ่มขึ้นตาม แต่ถ้าสูงมากเกินไปก็จะเกิดรอยกัดแห้ว (Undercut) และซึมลึกมากเกินไปผิวแนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ ส่วนกรณีขนาดกระแสเชื่อมต่ำการซึมลึกและขนาดของแนวเชื่อมจะตรงกันข้าม ในตารางที่ 5.9 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของขนาดและชนิดกระแสไฟเชื่อมที่ลวดทั้งสแตนเลสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน



(ก) DCEN, DC-



(ข) DCEN, DC+



(ค) ACHF

รูปที่ 5.50 ชนิดของกระแสไฟเชื่อมของกระบวนการเชื่อมทิก

ที่มา : Miller Electric Guideline to GTAW, 2020

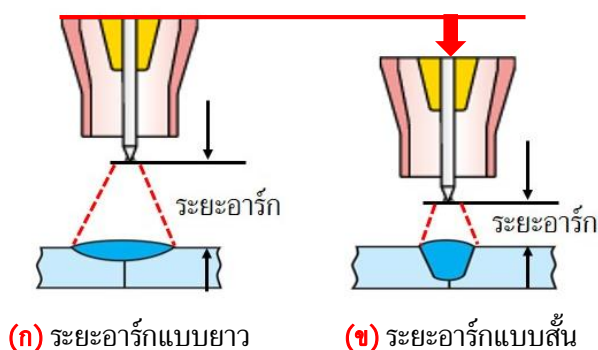
ตารางที่ 5.9 ชนิดและขนาดของกระแสไฟเชื่อมที่ขนาด ๘ ลวดทั้งสแตนเลสแตกต่างกัน

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication, 2012

ขนาด ๘ ของลวดทั้งสแตนเลส		ชนิดกระแสไฟเชื่อม		
นิ้ว (in)	มิลลิเมตร (mm)	DCEN	DCEP	AC
0.04	1	15-60	ไม่แนะนำ	10-50
1/16	2	70-100	10-20	50-90
3/32	2.4	90-200	15-30	80-130
1/8	3	150-350	25-40	100-200
5/32	4	300-450	40-55	160-300

5.3.5 แรงดันอาร์ก (Arc voltage)

Wichan Chuaiphan et al. (2020) ได้ข้อมูลจากผลการวิจัยในการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกด้วยขบวนการเชื่อมทิก พบว่า แรงดันอาร์กในการเชื่อมขึ้นอยู่กับปัจจัยของชนิดแก๊สปกคลุม และช่องว่างระยะห่างของปลายลวดทั้งสแตนกับผิวชิ้นงานโลหะเชื่อม โดยเมื่อระยะอาร์กเปลี่ยนจะแสดงผลออกมาที่ค่าของโวลต์ (Voltage) ที่หน้าชุดควบคุมที่เครื่องเชื่อม ซึ่งค่าโวลต์จะเปลี่ยนแปลงขึ้น-ลง ตามระยะห่างของปลายลวดทั้งสแตนกับชิ้นงานที่ถูกควบคุมโดยช่างเชื่อม ถ้าเป็นการเชื่อมด้วยระบบอัตโนมัติจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรมที่ตั้งกำหนดไว้ แรงดันอาร์กมีความสัมพันธ์กับชนิดของแก๊สปกคลุม เช่น แก๊สปกคลุมชนิดแก๊สฮีเลียม (He) จำเป็นต้องใช้แรงดันอาร์กที่สูงและให้ระยะการซึมลึกที่มากกว่าแก๊สปกคลุมชนิดอาร์กอน (Ar) ส่วนระยะของการอาร์ก (Arc length) มีผลกระทบโดยตรงต่อระดับแรงดันอาร์ก กล่าวคือ ระยะอาร์กจะแปรผันตรงกับแรงดันอาร์ก โดยถ้าสร้างระยะอาร์กสูงมากเกินไป (Too long arc length) จะเกิดผลเสียกับแนวเชื่อมที่ผิวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ ระยะการซึมลึกลึกน้อย แก๊สปกคลุมจะกระจายออกไปเป็นวงกว้างไม่เพียงพอที่จะปกคลุม ซึ่งสังเกตได้ชัดเจนจากสีของผิวแนวเชื่อม (โดยเฉพาะในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม) ในทางตรงกันข้าม ถ้าระยะอาร์กสั้นเกินไป (Too short arc length) มักพบปัญหาปลายของแท่งลวดทั้งสแตนจุ่มลงไปนบ่อหลอมละลายทำให้ปลายลวดสกปรก ซึ่งลดประสิทธิภาพการอาร์กของลวดลง ข้ำ้วยังทำให้หัวเชื่อมได้รับความร้อนสูงมากเกินไป และเกิดความเสียหายด้านอายุการใช้งาน เพราะขณะเชื่อมจะใกล้ชิดติดกับบ่อหลอมละลายมากเกินไป โดยในรูปที่ 5.51 (ก) และ (ข) แสดงเปรียบเทียบให้เห็นถึงระยะอาร์กแบบยาวกับระยะอาร์กแบบสั้นตามลำดับ จากประสบการณ์ในการเชื่อมด้วยมือของช่างเชื่อม พบว่ากรณีทำการเชื่อมแบบเติมลวด (Filler metal) ระยะอาร์กที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 1.5–6.0 มิลลิเมตร แต่ถ้าเป็นกรณีที่เชื่อมแบบไม่เติมลวด (Autogenous welding) ระยะอาร์กจะสั้นลงเพราะไม่ต้องการบ่อหลอมละลายที่กว้างมาก



รูปที่ 5.51 เปรียบเทียบให้เห็นถึงระยะอาร์กแบบยาวกับระยะอาร์กแบบสั้น

ที่มา : ASM Handbook Vol. 06A–Gas Tungsten Arc Welding, 2017

5.3.6 ชนิดแก๊สปกคลุม และอัตราการไหล (Type and flow rate of shielding gases)

Miller guidelines for GTAW (2018) แนะนำเกี่ยวกับแก๊สปกคลุมแนวเชื่อมสำหรับการเชื่อมทิกว่า มีทั้งเป็นชนิดบริสุทธิ์ (Pure gas 99.99%) และชนิดผสม (Mixtures gas) โดยแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่โดดเด่นแตกต่างกันไป สามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสมของลักษณะงานที่จะเชื่อม โดยจะต้องพิจารณาร่วมกับปัจจัยการเชื่อมอื่น ๆ ด้วย ซึ่งแก๊สปกคลุมที่นิยมเลือกใช้งานกัน ดังนี้

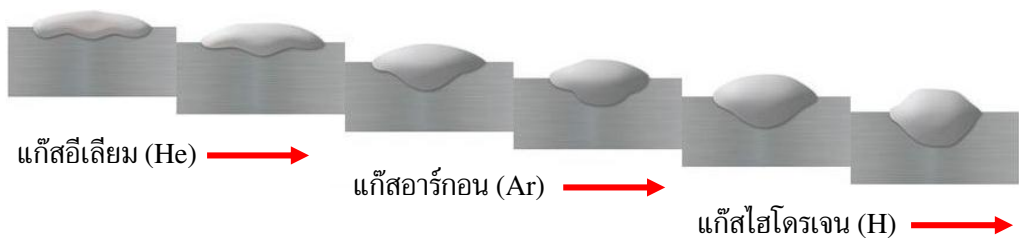
1. แก๊สอาร์กอน (Argon gas) เหมาะกับการเชื่อมโลหะทุกชนิด ที่ความบริสุทธิ์ 99.95% จะอาร์กเรียบสม่ำเสมอ ชีมลิกน้อย ขจัดออกไซด์บนผิวโลหะได้ดี อัตราการไหลของแก๊สไม่ต้องมาก และช่วยในการเริ่มต้นอาร์กได้ดี ที่สำคัญคือราคาถูกหาซื้อง่าย

2. แก๊สฮีเลียม (Helium gas) มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เปลวอาร์กกว้างและให้ค่าความร้อนสูง เชื่อมได้รวดเร็ว เหมาะกับการเชื่อมแบบอัตโนมัติใช้เชื่อมได้ทุกชนิดโลหะ มีความบริสุทธิ์ 99.99% ราคาแพงกว่าอาร์กอน

3. แก๊สอาร์กอนผสมฮีเลียม (Ar + He 15–75%) แก๊สผสมนี้เหมาะกับการเชื่อมแบบอัตโนมัติ และกับโลหะงานทุกชนิด โดยฮีเลียมช่วยรุกรุนและแตกขณะร้อน เดินหัวเชื่อมได้รวดเร็วลดการบิดงอ แต่อัตราการไหลสูงทำให้สิ้นเปลืองแก๊สมาก

4. แก๊สอาร์กอนผสมไฮโดรเจน (Ar + H 7%) แก๊สผสมนี้เหมาะกับการเชื่อมโลหะกลุ่มเหล็กกล้าผสม เช่น กลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิม กลุ่มเหล็กกล้าผสมนิกเกิลสูงและโมลิบดีนัมสูง ซึ่งแก๊สชนิดนี้ช่วยลดรุกรุนและสามารถเพิ่มความเร็วเชื่อมได้สูง

จากคุณสมบัติของแก๊สปกคลุมแต่ละชนิดที่กล่าวมาเมื่อนำมาทำการเขียนภาพลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อมจะเห็นภาพได้ชัดเจนถึงความกว้าง ระยะชีมลิกและความนูนของแนวเชื่อม ดังตัวอย่างภาพแสดงเปรียบเทียบแนวเชื่อมของการใช้แก๊สปกคลุมในการเชื่อมแต่ละชนิดในรูปที่ 5.52

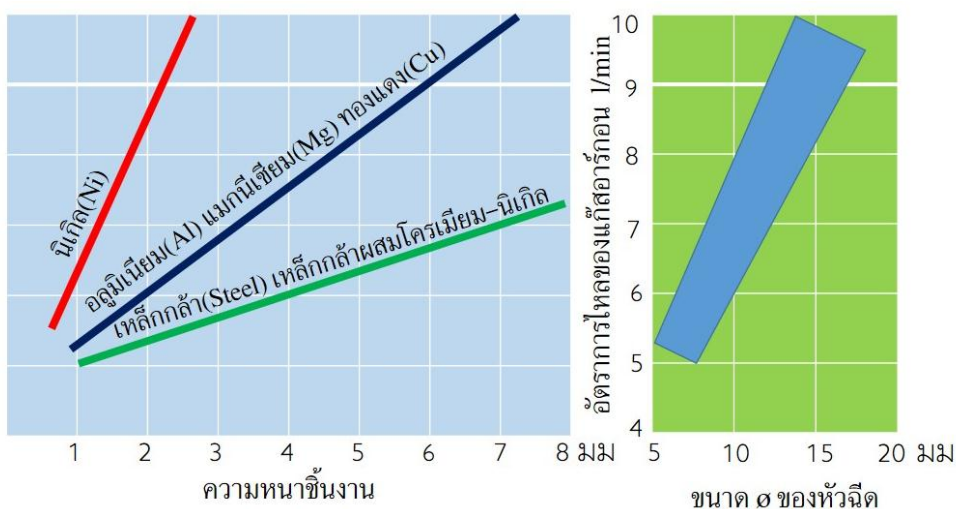


รูปที่ 5.52 ภาพเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อมที่ใช้แก๊สปกคลุมต่างชนิดกัน

ที่มา : Fabricating and Welding, 2019

สำหรับอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมต้องปล่อยให้ไหลออกมามากเพียงพอในการที่จะกระจายครอบคลุมบ่อหลอมละลาย โดยขึ้นอยู่กับขนาด Ø ของหัวฉีดแก๊ส (Nozzle) ความเร็วในการเชื่อม และชนิดกับความหนาของโลหะเชื่อม ซึ่งขึ้นงานยิ่งหนามากยิ่งต้องเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สที่มากขึ้น

เช่นเดียวกับขนาดของหัวฉีดแก๊สที่โตขึ้นต้องปรับอัตราการไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงตัวอย่างการปรับอัตราการไหลของแก๊สที่สัมพันธ์กันกับชนิดของโลหะเชื่อมและขนาดของหัวฉีดแก๊สใน **รูปที่ 5.53**



รูปที่ 5.53 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนกับชนิดโลหะและขนาดหัวฉีดแก๊ส

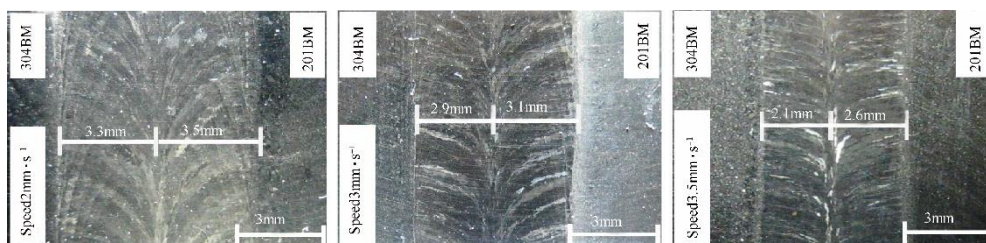
ที่มา : *Fabricating and Welding, 2019 (เขียนภาพใหม่)*

5.3.7 ความเร็วเชื่อม (Welding speed)

อัตราความเร็วของการเชื่อมที่สูงเป็นความต้องการของช่างเชื่อมเพราะเป็นการเพิ่มขีดความสามารถของการผลิต แต่ไม่ได้หมายความว่าสามารถเพิ่มความเร็วได้ตามต้องการเพราะถ้าเลือกใช้ความเร็วในการเชื่อมที่สูงเกินไปก็เกิดปัญหาขึ้นกับแนวเชื่อมได้ ซึ่งต้องพิจารณาพร้อมกับปัจจัยการเชื่อมตัวอื่น ๆ ได้แก่ กระแสเชื่อมและแรงดันอาร์ก โดยความสัมพันธ์เหล่านี้มีผลกระทบต่อค่าพลังงานความร้อนที่จะป้อนเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อม (Heat input) ดังนั้น จึงเป็นที่ทราบกันดีของช่างเชื่อมว่า ถ้าความเร็วเชื่อมสูงจะได้แนวเชื่อมที่มีขนาดเล็กและการซึมลึกน้อย และจะเกิดผลตรงกันข้ามเมื่อความเร็วเชื่อมลดลง ดังผลการวิจัยการเชื่อมทิกในเหล็กกล้าไร้สนิมที่ความเร็วเชื่อมแตกต่างกัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าที่ความเร็วเชื่อมต่ำขนาดแนวเชื่อมจะโตกว่าความเร็วเชื่อมสูงสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Wichan Chuaiphan et al. (2019) ดังแสดงผลอยู่ใน **รูปที่ 5.54** และนอกจากนี้ ปัจจัยของความหนาชิ้นงานเชื่อมก็มีผลต่อความเร็วในการเชื่อม โดยชิ้นงานที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจะต้องปรับความเร็วในการเชื่อมที่ลดลง ดังแสดงเปรียบเทียบความหนาที่เพิ่มขึ้นกับความเร็วเชื่อมที่ลดลงของกระบวนการเชื่อมทิกและการเชื่อมพลาสมาใน **รูปที่ 5.55**

ซึ่งโดยหลักของการเชื่อมทิก (GTAW) กับการเชื่อมพลาสมา (PAW) มีกลไกของขบวนการเชื่อมที่คล้ายกันมาก เพราะการเชื่อมพลาสมาเกิดจากการพัฒนาขบวนการเชื่อมทิก โดยอาศัยพลังงานความร้อนจากการอาร์กของแก๊สกับแท่งอิเล็กโทรดเพื่อสร้างแก๊สพลาสมา ที่ให้พลังงานความร้อนที่สูงและรวดเร็วกว่าการเชื่อมทิก แต่มีต้นทุนการเชื่อมที่สูงกว่าอาจไม่เป็นที่นิยมเท่ากับขบวนการเชื่อมทิก แต่ใน

ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ขบวนการเชื่อมทั้งคู่เชื่อมร่วมกันที่เรียกกันว่า “Hybrid welding” ซึ่งจะเพิ่มความเร็วในการเชื่อมได้เร็วขึ้นอย่างมาก ดังแสดงการร่วมกันของการเชื่อมในรูปที่ 5.56



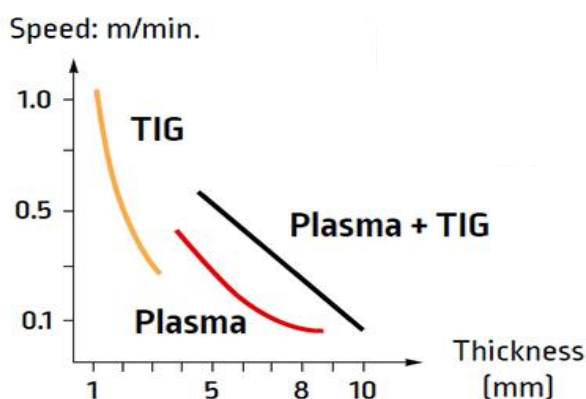
(ก) ความเร็วเชื่อมต่ำ
(2 mm/sec)

(ข) ความเร็วเชื่อมปานกลาง
(2.5 mm/sec)

(ค) ความเร็วเชื่อมสูง
(3 mm/sec)

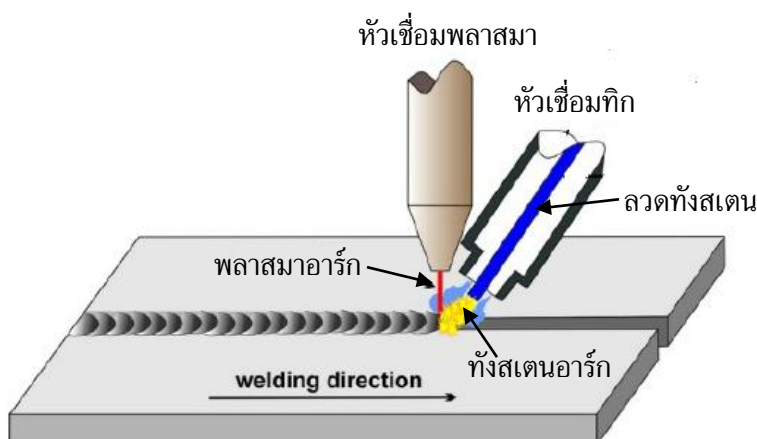
รูปที่ 5.54 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชื่อมกับขนาดของแนวเชื่อม

ที่มา : Wichan Chuaiphon, Journal of Defence Technology, Vol.15 Issue 2, 170–178, 2019



รูปที่ 5.55 ความสัมพันธ์ของ
ความเร็วเชื่อมกับความหนา
ของชิ้นงานของการเชื่อมทิก
และการเชื่อมพลาสมา

ที่มา : Lincoln Electric, TIG & Plasma Installation, 2018



รูปที่ 5.56 การเชื่อมแบบ Hybrid ของ TIG กับ PAW

ที่มา : Lincoln Electric, TIG & Plasma Installation, 2018

จากที่กล่าวมาตั้งแต่ต้นของบทเรียนนี้ ได้อธิบายและยกตัวอย่างงานวิจัยประกอบการอธิบายถึงองค์ประกอบของขบวนการเชื่อม ไม่ว่าจะเป็นองค์ประกอบของการเชื่อม MMAW การเชื่อม GMAW และ GTAW จะเห็นได้ว่าแต่ละขบวนการเชื่อมมีองค์ประกอบหลักที่คล้ายกัน แต่ก็มีส่วนประกอบย่อยที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละขบวนการเชื่อมที่แตกต่างแยกย่อยกันออกไป ซึ่งโดยภาพรวมขององค์ประกอบการเชื่อมที่มีพื้นฐานแตกต่างกัน แต่ก็มีความสัมพันธ์ซึ่งกันละกัน และยังมีอิทธิพลต่อกันของแต่ละองค์ประกอบในหลากหลายแง่มุมในมิติต่าง ๆ มากมาย ด้วยข้อมูลที่มีมากนี้ผู้เขียนไม่สามารถนำเสนอได้ทุกขบวนการเชื่อม ซึ่งในบทเรียนนี้ผู้เขียนได้พยายามนำเสนอถึงขบวนการเชื่อมสำคัญ ๆ ที่เป็นที่ยอมรับและมีการเลือกใช้งานกันมากทั้งในสถานประกอบการขนาดเล็ก โรงงานประกอบชิ้นส่วนขนาดใหญ่และบุคคลที่เป็นช่างเชื่อมทั่ว ๆ ไป ซึ่งยังมีอีกหลายขบวนการเชื่อมที่ยังไม่ได้กล่าวถึงในบทเรียนนี้ โดยผู้เขียนได้นำไปเสนอสอดแทรกและกล่าวถึงไว้แล้วในบทเรียนที่ 3 และบทเรียนที่ 4 ของหัวข้อที่ว่าด้วยกรรมวิธีการเชื่อมกลุ่มเติมลวดเชื่อม (Welding processes– Consumable) และกรรมวิธีการเชื่อมกลุ่มที่ไม่มีการเติมลวดเชื่อม (Welding processes– Non Consumable) ซึ่งได้นำเสนอไว้ทุกขบวนการเชื่อม

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 5

Arc length – ระยะอาร์ก

Autogenous welding – การเชื่อมแบบไม่เติม
ลวด

Backhand welding – การเชื่อมถอยหลัง

Backhand welding – การเชื่อมถอยหลัง

Bead height – ความสูงของแนวเชื่อม

Burn off characteristic – คุณลักษณะการ
หลอมละลาย

Burn off rate – อัตราการสิ้นเปลืองลวดสูง

Consumable – ลวดเชื่อมชนิดสิ้นเปลือง

Contact tube – ท่อนำกระแสเชื่อม

Continuous filler – การป้อนลวด
แบบต่อเนื่อง

Current density – ความหนาแน่นของกระแส
เชื่อม

Direction travel – ทิศทางการเชื่อม

Drop by drop filler – การป้อนลวดแบบหยด

Electrode angle – มุมลวดเชื่อม

Electrode manipulation – การควบคุมการ
เคลื่อนที่ลวดเชื่อม

Electrode weaving – การส่ายลวดเชื่อม

Elliptical shape – บ่อหลอมที่ความเร็วเชื่อม
ต่ำ (รูปไข่ไก่)

First half cycle – กระแสสลับครึ่งรอบแรก

Forehand welding – การเชื่อมเดินหน้า

Gas Metal Arc Welding – การเชื่อมอาร์ก
โลหะแก๊สปกคลุม

Gas nozzle – หัวฉีดแก๊ส

Gas Tungsten Arc Welding – การเชื่อมอาร์ก
ทังสเตนแก๊สปกคลุม

Laminar flow – แก๊สไหลแบบราบเรียบ

Leading angle – มุมลวดเชื่อมเอียงหลัง

Long arc length – ระยะอาร์กห่าง

Longitudinal nozzle angles – มุมการเชื่อม
ตามแนวยาว

Metal transfer – การถ่ายโอนน้ำโลหะ

Mixture gases – แก๊สปกคลุมแบบผสม

Narrow bead – แนวเชื่อมที่แคบ

Non-Consumable – ลวดทังสเตนอาร์ก

Penetration – ระยะซึมลึกแนวเชื่อม

Primary adjustable variable – ตัวแปรที่
สามารถปรับได้ขั้นลำดับแรก

Pulling angle – มุมการเชื่อมแบบดึง/ลาก

Pushing angle – มุมการเชื่อมแบบดัน/ผลัก

Reselected variables – ตัวแปรเลือกขั้นต้น/
เลือกก่อน

Right angle – มุมลวดเชื่อมตรง/ตั้งฉาก

Second half cycle – กระแสสลับครึ่งรอบหลัง

Secondary adjustable variable – ตัวแปรที่
สามารถปรับได้ขั้นลำดับสอง

Shielded Metal Arc Welding – การเชื่อม
อาร์กลวดหุ้มฟลักซ์

Short arc length – ระยะอาร์กชิด

Teardrop shape – บ่อหลอมที่ความเร็วเชื่อม
สูง (รูปหยดน้ำ)

Tip – to – Work distance – ระยะห่างปลายท่อนำ
กระแสถึงชิ้นงานเชื่อม

Trailing angle – มุมลวดเชื่อมเอียงหน้า

Transverse nozzle angles – มุมหัวเชื่อมตาม
แนวขวาง

Turbulent flow – แก๊สไหลแบบปั่นป่วน

Weld pool – บ่อหลอมละลาย

Welding current – กระแสเชื่อม

Welding parameter – องค์ประกอบการเชื่อม

Welding speed – ความเร็วเชื่อม

Wide bead – แนวเชื่อมที่กว้าง

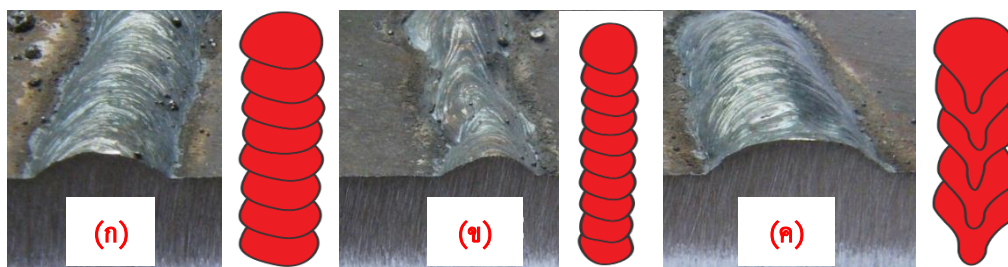
Wire electrode extension – ระยะโผล่ลวด

Wire feed speed – ความเร็วการป้อนลวด

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5

ข้อที่ 1. จงอธิบายถึงความหมายของ “Welding parameter” พร้อมบอกถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคุณภาพของแนวเชื่อม (พยายามยกตัวอย่างประกอบการอธิบาย)

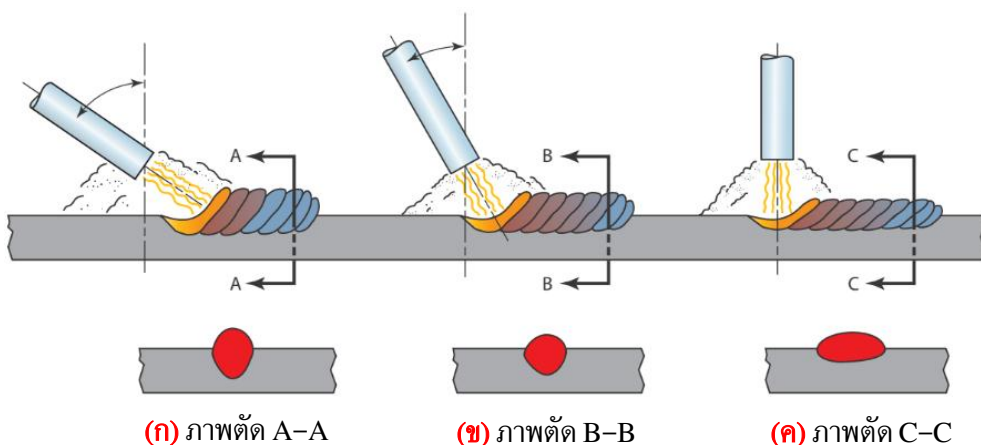
ข้อที่ 2. จงอธิบายถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยกระแสไฟเชื่อมต่างกันของการเชื่อม SMAW ต่อลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อม โดยใช้รูปข้างล่างนี้ประกอบการอธิบาย



แนวเชื่อมที่ใช้กระแสเชื่อมต่างกัน (ก) กระแสเหมาะสม (ข) กระแสต่ำ และ (ค) กระแสสูง

ที่มา : Howard B. Cary. Modern welding technology, 6th 2004.

ข้อที่ 3. จากรูปข้างล่างนี้ จงอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยของการเอียงมุมของลวดเชื่อม (Electrode angle) ที่มีต่อรูปร่างของแนวเชื่อม (Weld bead) ของขบวนการเชื่อม SMAW



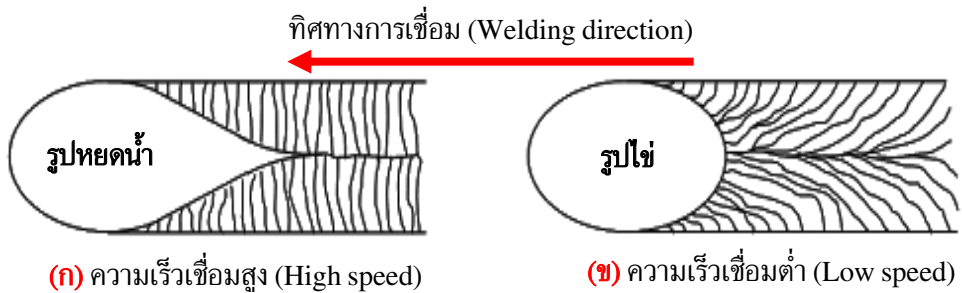
รูปเปรียบเทียบการซึมลึกของแนวเชื่อมที่ใช้มุมลวดเชื่อมเอียงหน้าองศาต่างกัน

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metals Fabrication, 2011

ข้อที่ 4. จงบอกรูปแบบการส่ายลวดเชื่อม (Electrode weaving) ที่นิยมเลือกใช้กัน (ตอบด้วยวิธีการวาดรูปเพื่อแสดงทิศทางการส่ายลวดเชื่อม)

ข้อที่ 5. จงเขียนสูตรสมการสำหรับการคำนวณหาความเร็วของการเชื่อม (Welding speed)

ข้อที่ 6. จากรูปจงอธิบายถึงกลไกทิศทางการเย็นตัวของบ่อหลอมละลายที่แตกต่างกันของการเชื่อมที่ปัจจัยความเร็วในการเชื่อมต่างกัน



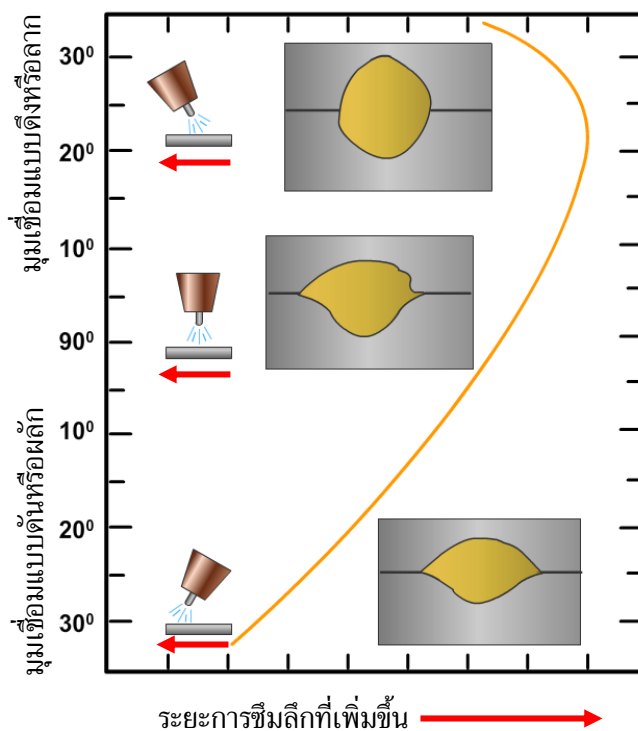
รูปเปรียบเทียบรูปทรงบ่อหลอมละลายและทิศทางการเย็นตัวที่ความเร็วเชื่อมต่างกัน

ที่มา : WJM Technologies–Excellence in material joining, 2013

ข้อที่ 7. จงอธิบายความแตกต่างของการตั้งค่าแบบวิธีแรงดันคงที่ กับแบบวิธีกระแสคงที่บนเครื่องเชื่อมของขบวนการเชื่อม GMAW

ข้อที่ 8. ระยะไหลของปลายลวดเชื่อม (Electrode extension) ของขบวนการเชื่อม MIG/MAG มีผลกระทบอย่างไรกับประสิทธิภาพของการเชื่อม

ข้อที่ 9. จากรูปข้างล่างนี้จงอธิบายความสัมพันธ์ของมุมหัวเชื่อม (Nozzle angle) กับอัตราการซึมลึกของขบวนการเชื่อม MIG/MAG

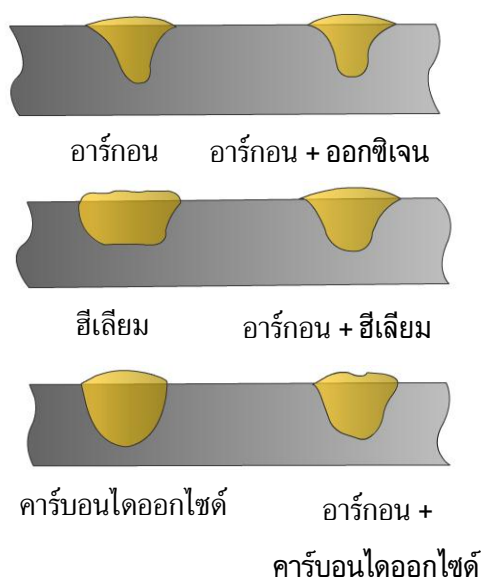


รูปความสัมพันธ์ของทิศทางการเอียงของมุมหัวเชื่อมกับระยะการซึมลึกและลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อม

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011

ข้อที่ 10. จงอธิบายการเคลื่อนหัวเชื่อมแบบดันหรือผลัก (Forehand welding) กับการเคลื่อนหัวเชื่อมแบบดึงหรือลาก (Backhand welding) (วาดรูปประกอบการอธิบาย)

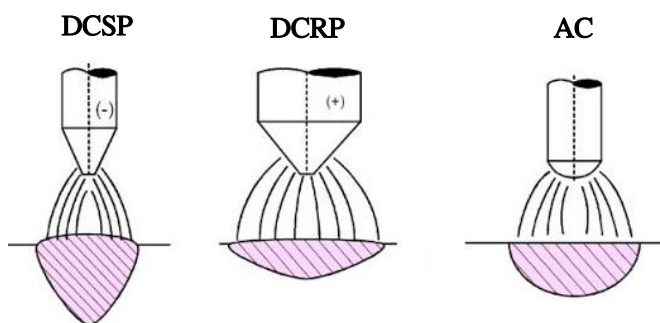
ข้อที่ 11. ขบวนการเชื่อม GMAW จะต้องใช้แก๊สปกคลุม (Shielding gas) ซึ่งเป็นปัจจัยการเชื่อมที่สำคัญ และมีผลต่อแนวเชื่อม จงอธิบายถึงสมบัติของแก๊สปกคลุมแต่ละชนิดที่มีต่อลักษณะของแนวเชื่อม โดยใช้รูปข้างล่างนี้ประกอบการอธิบาย



รูปร่างกับระยะการซึมลึกของแนวเชื่อมที่เลือกใช้แก๊สปกคลุมต่างชนิดกัน

ที่มา : NAVEDTRA 14250A, 2011

ข้อที่ 12. จากรูปข้างล่างนี้จงอธิบายถึงความสัมพันธ์ของค่ามุมองศาการปลายลวดทั้งสแตนด์กับชนิดของกระแสไฟฟ้าที่เชื่อม



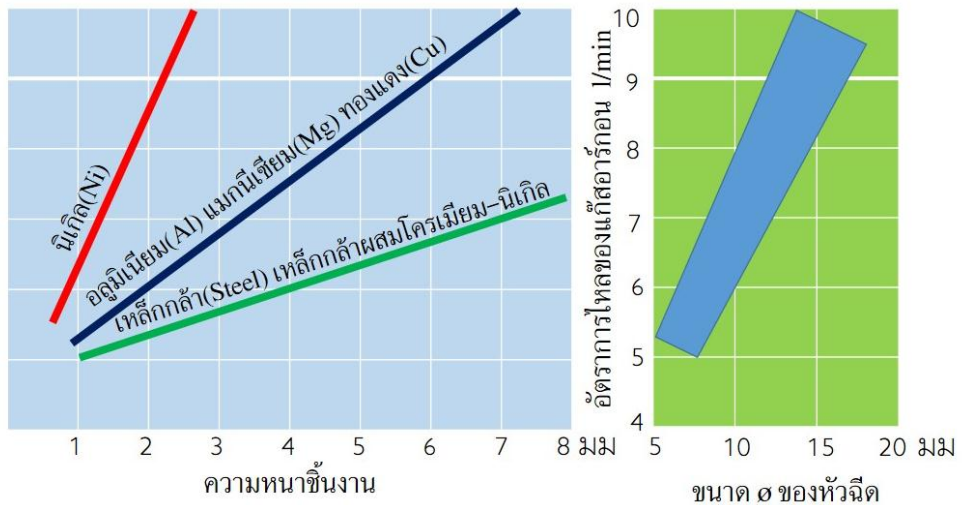
รูปลักษณะรูปทรงของการปลายลวดทั้งสแตนด์กับชนิดของกระแสไฟเชื่อม

ที่มา : TIG Welding Project, 2016

ข้อที่ 13. ขบวนการเชื่อมทิก (GTAW) สามารถเชื่อมได้ทั้ง DCEN หรือ DCEP และ ACHF จงบอกเหตุผลที่จะใช้ในการพิจารณาเลือกชนิดของกระแสไฟเชื่อมดังกล่าวให้เหมาะสมกับงานที่จะเชื่อม (ยกตัวอย่างประกอบการอธิบายเหตุผล)

ข้อที่ 14. จงให้เหตุผลว่าเหตุใดระยะยื่นของปลายแท่งลวดทั้งสแตนเลสและไทเทเนียมของการเชื่อมที่แตกต่างกันระหว่างการเชื่อมขอบ (Edge flange welding) กับการเชื่อมมุม (Fillet welding)

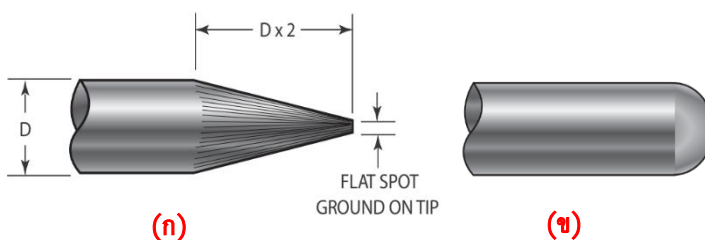
ข้อที่ 15. จากรูปกราฟข้างล่างนี้อธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยการเชื่อมทีระหว่างอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมและขนาดหัวฉีดเมื่อต้องเชื่อมกับโลหะต่างชนิดกัน



รูปความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนกับชนิดโลหะและขนาดหัวฉีดแก๊ส

ที่มา : *Fabricating and Welding, 2019 (เขียนภาพใหม่)*

ข้อที่ 16. การกลับปลายลวดทั้งสแตนสำหรับการเชื่อมโลหะแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ตามรูปข้างล่างนี้เป็น การเปรียบเทียบการกลับปลายลวดทั้งสแตนสำหรับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมกับโลหะอลูมิเนียม จง ให้เหตุถึงความแตกต่างของมุมที่กลับ



รูปปลายลวดทั้งสแตน (ก)
สำหรับเชื่อมเหล็กกล้า
และเหล็กกล้าไร้สนิม (ข)
สำหรับเชื่อมอลูมิเนียม
และอลูมิเนียมผสม

ที่มา : *Cengage learning, 2012*

บรรณานุกรมบทที่ 5

- American Welding Society (AWS), *Welding Handbook – Welding Science & Technology* Volume 1, Ninth Edition, AWS publisher, 2001.
- American Welding Society, A 5.1/A5.1–*Specification for carbon steel electrodes for shielding metal arc welding*. American Welding Society, UAS, 2004.
- Andrew D. Althouse, Carl H. Turnquist, William A. Bowditch, Kevin E. Bowditch and Mark A. Bowditch. *Modern Welding*. Goodheart–Willcox Publisher, 12th Edition, Manufactured in the United States of America, 2020.
- CK WORLDWIDE. *Technical Specifications for TIG Welding*. By CK Master TIG. August, 2016.
- Department of the Army. *Welding Theory and Application*, TC 9–237, Department of the Army Technical Manual, Headquarters, Washington D.C., 1993.
- Edward R. Bohnart, *Welding–Principles and Practices*. 5th Edition, McGraw–Hill Education, New York, United States, 2017.
- EWM–We Are Welding. *MIG/MAG Welding Dictionary*. 11–2020.
- FRONIUS. *Training Documentation –Metal Inert Gas Welding (MIG) / Metal Active Gas Welding (MAG)*“MIG/MAG Welding”, 2018.
- FRONIUS. *Training Documentation –Tungsten Inert Gas Welding*“TIG Welding”, 2019.
- G.K. Vijayaraghavan and S. Sundaravalli, *Welding Technology*. Suchitra publications, Anna University, Chennai, India, 2013.
- Gabriella Cristina da Silva Costa and Andre Alves de Resende. *Evaluation of TIG–MIG/MAG Welding Process in Direct Polarity*. Research Article, SN Applied Sciences. 8 January, 2020.
- Hobart Institute of Welding Technology. *Technical Guides EW–472–Shielded Metal Arc Welding*. Hobart welding school publisher, 2008.
- Howard B. Cary, *Modern Welding Technology Welding*, 6th Edition, Pearson education. NJ, USA, 2004.
- James Scott, *A basic handbook for arc welding applications*. Kindle Edition, 2013.
- JASIC. *The Power in Inverter Technology. Guide to MIG/MAG Welding*. By Wilkinson Star, 10–2017.

- Joseph Abbott and Karen Mitchell Smith. *Tech Careers–Welding Technology*. TSTC Publishing, 2011.
- KOBELCO Steel. *Essential Factors in Gas Shielding Metal Arc Welding*. Kobe steel, LTD, Tokyo, Japan, 2015.
- Larry Jeffus and Lawrence Bower. *Welding: Skill, Processes and Practices for Entry-Level Welders*. 1st Edition. Delmar Cengage Learning. Clifton Park, New York, UAS, 2010.
- Larry Jeffus. *Welding and Metal Fabrication*. Delmar Cengage Learning publisher, Clifton Park NY. USA, 2011.
- LINCOLN ELECTRIC. *Gas Metal Arc Welding–Product and Procedure Selection*. Editor by : Jeff Nadzam, Senior Application Engineering. Issue date 08–2014.
- Miller Electric. *The Booklet Guidelines to Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)*. UG–215 994, July, 2003.
- Miller Welds. *Guidelines for Gas Tungsten arc welding (GTAW) –Processes*. International Headquarters, USA, 215994 F, 01–2018.
- Miller Welds. *Guidelines for shielded metal arc welding (SMAW)*. International Headquarters, WI 54914 USA, 2018.
- Moniz B.J. and Miller R.J. *Welding Skills*. 3rd Edition. American Technical Publisher, Inc., USA, 2004.
- NAVEDTRA. *User Manual–Chapter 10 Gas Metal Arc Welding*. Navedtra 14250A, 2011.
- O.P. Khanna. *A Text Book of Welding Technology*. Dhanpat Rai Publications, India, Reprinted, 2017.
- Priyanka Chougale and Prof. M.A. Sutar. *A Comparative Study of Metal Inert Gas Welding and Tungsten Inert Gas Welding Processes: A Review*. International Journal of Advance Research in Science and Engineering. Vol. 07, Special Issue No. 03, February, 2018.
- R.S. Parmar. *Welding Processes and Technology*. Khanna Publishers, 1996.
- Richard L. Tittle, *Welding and Welding Technology*. McGraw–Hill, Inc. Publishers, 1973.
- Roger Timings, *Fabrication and Welding Engineering*. 1st Edition, 2017.
- SOLAS. *Thermal Processes Module 2–Metal Active Gas Shielded Welding (MAGA/MIG): Unit 4 Trade of Pipefitting Phase 2*. SOLAS Education and Training Authority, 2014.
- Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Effect of Hydrogen in Argon Shielding Gas for Welding Stainless Steel Grade SUS 201 by GTA Welding Process*. Journal of Advance Joining Processes. Vol. 1, 2020.

- Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion of TIG Welding Joints Alternative Low-Cost Austenite Stainless Steel Grade 216*. Journal of Advance Joining Processes. Vol. 2, 100027, 2020.
- Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Optimization of TIG Welding Parameter in Dissimilar Joints of Low Nickel Stainless Steel AISI 205 and AISI 216*. Journal of Manufacturing processes. Vol. 58, 163–178, 2020.
- William A. Bowditch, Kevin E. Bowditch and Mark A. Bowditch, *Welding Technology Fundamentals*. Fourth Edition, 2014.
- William A. Bowditch, Kevin E. Bowditch and Mark A. Bowditch. *Welding Fundamentals*, Goodheart–Willcox Publisher, 5th Edition, Manufactured in the United States of America, 2017.
- WWS Group–Weldability. *An Introduction to MIG Welding*, 2011.

