

บทที่ 3

กรรมวิธีการเชื่อม : กลุ่มเติมลวดเชื่อม Welding Processes : Consumable



ที่มา : MIG Welding Guide, 2020

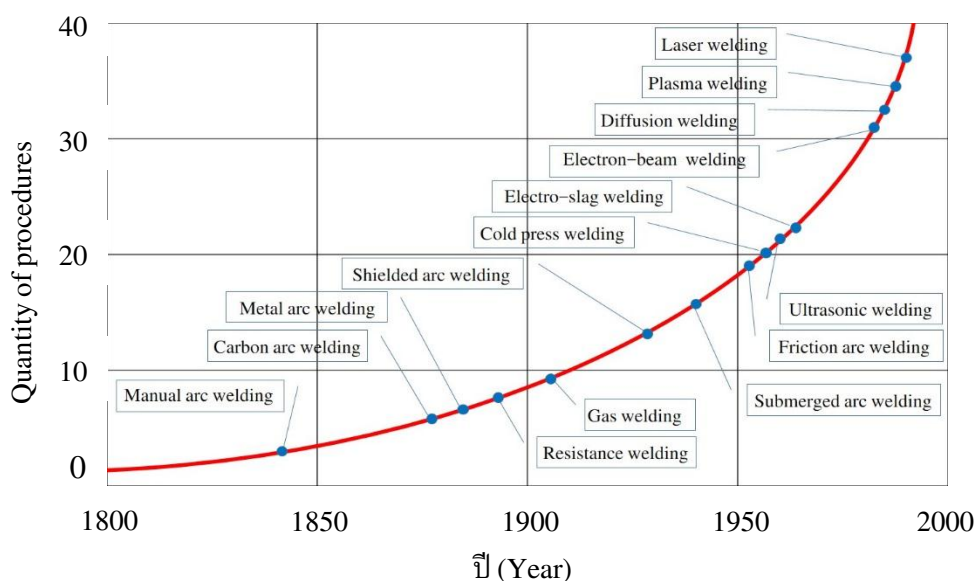


ที่มา : Oerlikon Welding, 2018

จุดประสงค์การเรียนรู้ บทที่ 3 กรรมวิธีการเชื่อม : กลุ่มเติมลวดเชื่อม

- รู้และเข้าใจในหลักเกณฑ์การแยกกลุ่มประเภทของกรรมวิธีการเชื่อมแบบเติมลวดเชื่อม
- สามารถบอกถึงพัฒนาการปรับปรุงกรรมวิธีการเชื่อมเดิมมาเป็นกรรมวิธีการเชื่อมสมัยใหม่ที่ทันสมัยกับเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าของการเชื่อม
- รู้จักมาตรฐานในการแบ่งประเภทและรหัสหรือโค้ดของกรรมวิธีการเชื่อม
- รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW)
- รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW)
- รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW)
- รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (SAW)
- รู้และเข้าใจถึงหลักและวิธีการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม (ESW)

“Welding Processes” หมายถึง กรรมวิธีในการต่อโลหะให้ติดกันโดยการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหลอมเหลว หรือจะให้ติดกันโดยใช้แรงกด ซึ่งจะใช้ลวดเชื่อมเติมหรือไม่ใช้ก็ได้ อ้างอิงตามมาตรฐาน American Welding Society : AWS (2001) ซึ่งอาจมีอีกหลายมาตรฐานที่ได้ให้ความหมายของการเชื่อมไว้ โดยมีหลักความหมายพื้นฐานที่เหมือนกันคือการต่อวัสดุต่าง ๆ ให้ติดกัน อาจมีการขยายความเพิ่มเติมเพื่อให้ครอบคลุมถึงทุกกรรมวิธีการเชื่อม ซึ่งด้วยเหตุที่การเชื่อมมีการปรับปรุงพัฒนาเทคนิคการเชื่อมแบบใหม่ ๆ อยู่อย่างต่อเนื่อง โดยที่นำเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้ามาช่วยเสริมขีดความสามารถในแต่ละกรรมวิธีการเชื่อมแบบเดิม ๆ ให้ดีขึ้นจนเกิดวิธีการเชื่อมแบบใหม่ ๆ ที่หลากหลายและทันสมัยมากขึ้น จนถึงปัจจุบันมีวิธีการเชื่อมให้เลือกใช้มากมายหลายวิธี ดังแสดงเส้นทางช่วงเวลาการเกิดขึ้นของกรรมวิธีการเชื่อมแบบต่าง ๆ ที่ใหม่ ๆ ที่พัฒนาขึ้นมา ในรูปที่ 3.1



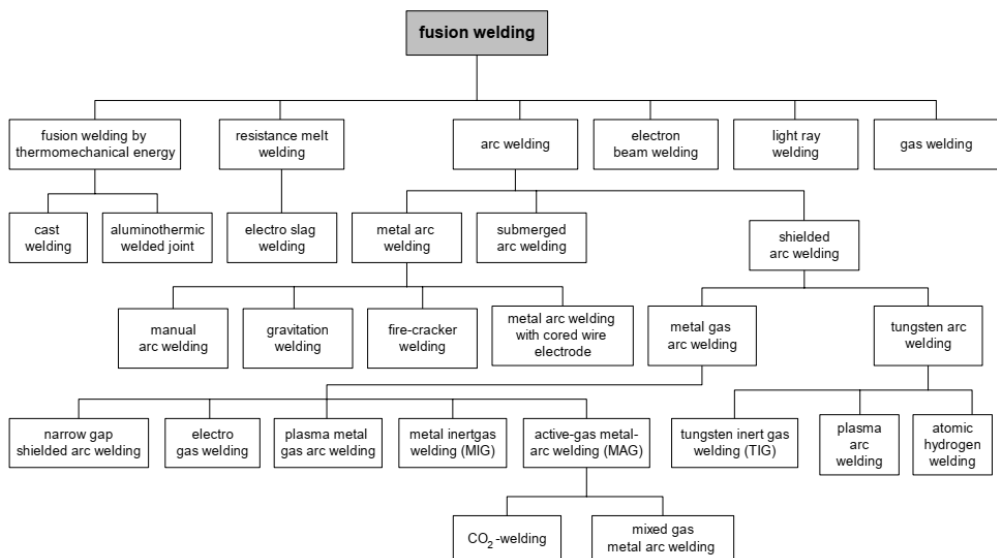
รูปที่ 3.1 ช่วงเวลาของการเกิดกรรมวิธีการเชื่อมแบบต่าง ๆ

ที่มา : IIW – Welding processes and equipment, 2015 (เขียนใหม่)

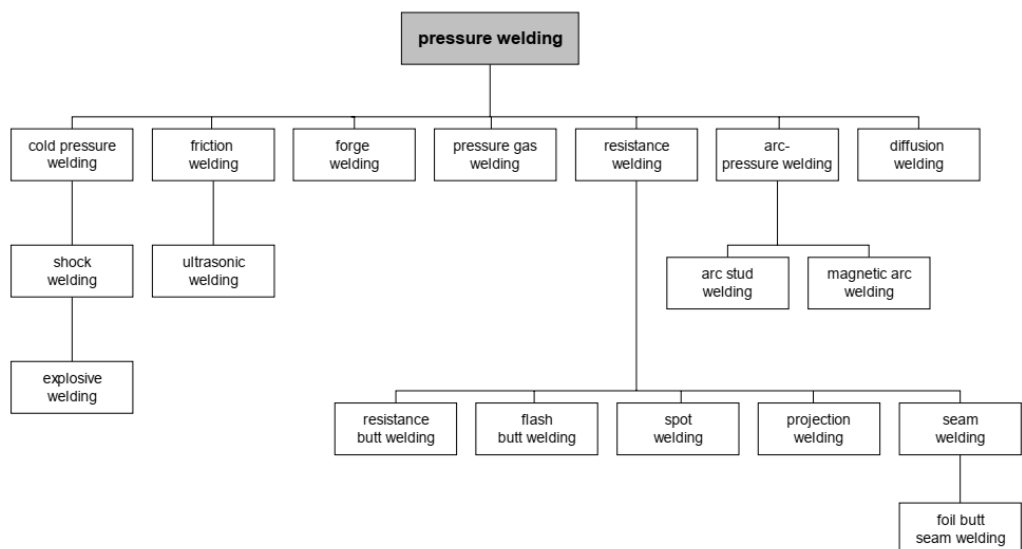
สถาบันการเชื่อมสากล (International Institute of Welding : IIW) เป็นสถาบันการเชื่อมที่อ้างอิงมาตรฐานยุโรป BS EN ISO 4063 : 2010 ได้ทำการจัดแบ่งกลุ่มกรรมวิธีการเชื่อม ออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ ได้แก่

1. กลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding processes)
2. กลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมแบบใช้แรงอัด (Pressure welding processes)

โดยแต่ละกลุ่มกรรมวิธีจะมีเทคนิคและวิธีการเชื่อมที่แยกย่อยได้อีกหลายวิธีการเชื่อมดังแสดงในแผนผังของรูปที่ 3.2 (ก) และ (ข)



(ก) กลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding processes)



(ข) กลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมแบบใช้แรงอัด (Pressure welding processes)

รูปที่ 3.2 การแบ่งกลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมตามมาตรฐานยุโรป BS EN ISO 4063 : 2015 (IIW)

ที่มา : Guideline document, Welding Processes and Equipment, IIW-IWE, 2015

มาตรฐานสมาคมการเชื่อมแห่งสหรัฐอเมริกา (American Welding Society : AWS) ได้จัดแบ่งหมวดหมู่ของกรรมวิธีการเชื่อมโดยอาศัย 2 หลักการ ดังนี้

1. หลักการของพลังงานที่ใช้กับการถ่ายเทน้ำโลหะเชื่อม (Metal transfer)
2. หลักการของการไหลแทรกซึมของน้ำโลหะลวดเชื่อมสู่รอยเชื่อม (Capillary attraction)

โดยจากหลักการดังกล่าวข้างต้น AWS จึงได้จัดกลุ่มของกรรมวิธีการเชื่อมได้ 6 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การแบ่งกลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมตามมาตรฐานสมาคมการเชื่อมอเมริกา (AWS)

ที่มา : *Welding Inspection Handbook, 3rd edition. American Welding Society, 2000*

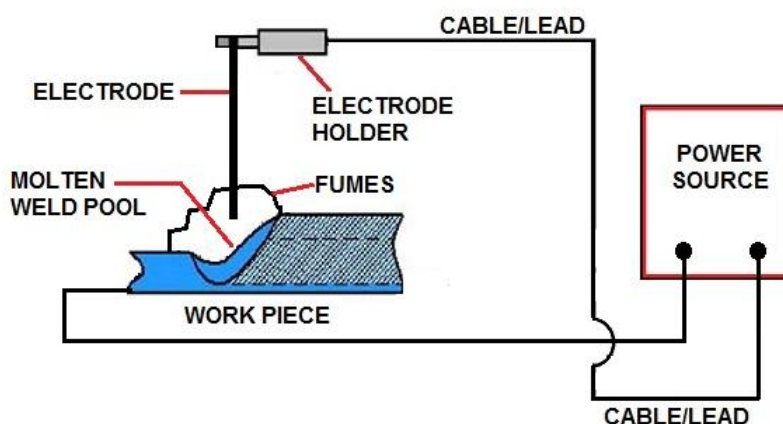
การแบ่งกลุ่มชนิดการเชื่อมที่อ้างอิง มาตรฐานสมาคมการเชื่อมอเมริกา (AWS)	
กรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์ก (Arc Welding)	Manual Metal Arc Welding : MMAW
	Gas Metal Arc Welding : GMAW
	Gas Tungsten Arc Welding : GTAW
	Submerged Arc Welding : SAW
	Flux Cored Arc Welding : FCAW
	Electro Slag Welding : ESW
	Atomic Hydrogen Welding : AHW
กรรมวิธีการเชื่อมแก๊ส (Gas Welding)	Stud Arc Welding : SW
	Air – Acetylene Welding : AAW
	Oxy – Acetylene Welding : OAW
	Oxy – Hydrogen Welding : OHW
	Pressure Gas Welding : PGW
กรรมวิธีการเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance Welding)	Resistance Spot Welding : RSW
	Resistance Seam Welding : RSEW
	Percussion Welding : PEW
	Flash Welding : FW
	Upset Welding : UW
กรรมวิธีการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding)	Cold Welding : CW
	Roll Welding : ROW
	Diffusion Welding : DFW
	Forge Welding : FOW
	Friction Welding : FRW
	Explosion Welding : EXW
กรรมวิธีการเชื่อมอาศัยความร้อนกับสารเคมี (Thermo-Chemical Welding)	Ultrasonic Welding : USW
	Thermit Welding : TW
กรรมวิธีการเชื่อมอาศัยพลังงานสูง (Intense Energy Welding)	Plasma Arc Welding : PAW
	Electron Beam Welding : EBM
	Laser Beam Welding : LBW

ถึงแม้ว่าการจัดแบ่งกลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมของแต่ละมาตรฐานอาจมีความแตกต่างกัน แต่โดยรวมต่างก็ได้กล่าวถึงกรรมวิธีการเชื่อมที่มีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันอย่างครบถ้วน ซึ่งกรรมวิธีการเชื่อมที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าบางกรรมวิธีรู้จักกันดีและมีการใช้งานกันเป็นประจำ แต่บางกรรมวิธีอาจไม่ค่อยได้พบเห็นเนื่องจากใช้กับงานเฉพาะทางหรือเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีขีดจำกัดในการเชื่อมต่อ ด้วยเหตุที่กรรมวิธีการเชื่อมที่มากหลากหลายวิธีการ ผู้เขียนอาจไม่สามารถกล่าวถึงได้ทุกกรรมวิธี ในบทนี้จะเลือกในบางกรรมวิธีที่มีความต้องการใช้งานกันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในงานด้านอุตสาหกรรม การผลิต โดยมุ่งเน้นเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจถึงเรื่องของ เครื่องมืออุปกรณ์ วิธีการเชื่อม การกำหนดปัจจัยการเชื่อม รวมไปถึง ข้อควรระวังและความปลอดภัย และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องของแต่ละกรรมวิธีการเชื่อมสำหรับวิศวกรการเชื่อม (Welding Engineer) เป็นสำคัญ

กลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมอาร์ก (Arc Welding Processes Groups)

3.1 การเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding : SMAW)

เป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กที่อาศัยกระแสไฟฟ้า จนเป็นที่รู้จักกันในชื่อของการเชื่อมไฟฟ้า (Electric arc welding) อาศัยหลักการอาร์กของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างปลายของลวดเชื่อมที่มีฟลักซ์หุ้ม (Covered electrode) กับผิวหน้าของชิ้นงานโลหะเชื่อม (Base metal / Work piece) การอาร์กกระหว่างช่องว่างเกิดเป็นความร้อนไปหลอมละลายปลายลวดและชิ้นงานเกิดเป็นบ่อหลอมละลาย (Weld pool) เมื่อบ่อหลอมละลายเย็นตัวลงชิ้นงานก็จะติดกันเป็นแนวเชื่อม ส่วนฟลักซ์ที่หุ้มแกนลวดเชื่อมจะหลอมละลายขณะอาร์ก และทำหน้าที่เป็นแก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายป้องกันอากาศจากภายนอกเข้ามารวมตัวกับน้ำโลหะ พร้อมทั้งช่วยควบคุมอัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมได้อีกด้วย ซึ่งเมื่อฟลักซ์แข็งตัวจะแข็งและเปราะที่เรียกว่า สแลก (Slag) จำกัตออกได้ง่ายด้วยการใช้ค้อนเคาะ โดยองค์ประกอบที่กล่าวมาข้างต้นของหลักการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW)

ที่มา : WWW.Weldingandndt.com. 2018

3.1.1 ชนิดของกระแสไฟเชื่อม (Type of welding current)

เครื่องเชื่อม (Welding machine) ที่นำมาใช้ในการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟเชื่อมในวงจร และส่งจ่ายกระแสไฟไปตามสายเชื่อมเพื่อการอาร์กกระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ซึ่งเครื่องเชื่อมมีทั้งเครื่องเชื่อมแบบกระแสตรง (DC) เครื่องเชื่อมแบบกระแสสลับ (AC) และเครื่องเชื่อมที่มีทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ (DC/AC) โดยช่างเชื่อมสามารถเลือกกระแสไฟเชื่อมได้ตามที่ต้องการ การเลือกกระแสไฟเชื่อมนั้นจะเลือกตามชนิดของลวดเชื่อมที่ใช้งาน ซึ่งกระแสไฟเชื่อมที่ใช้งานกันมี 3 ประเภท คือ

1. กระแสไฟตรงขั้วลบต่อกับลวดเชื่อม (Direct Current Electrode Negative : DCEN)

การต่อขั้วแบบนี้เป็นการเชื่อมต่อขั้วเชื่อมด้วยกระแสตรงขั้วตรง คือ หัวเชื่อม/ลวดเชื่อมจะต่อเป็นขั้วลบ (Negative) ส่วนสายดิน/ชิ้นงานจะต่อเป็นขั้วบวก (Positive) โดยอิเล็กตรอนจะวิ่งจากลวดเชื่อม (-) ไปยังชิ้นงาน (+) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) การวิ่งของอิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าชน (Bump) กับชิ้นงาน ผลของการวิ่งชนทำให้ที่ชิ้นงานเกิดความร้อนมากกว่าที่ลวดเชื่อม 2/3 หรือ 70% ส่วนเกิดที่ลวดเชื่อม 1/3 หรือ 30% เหมาะสำหรับการเชื่อมที่ต้องการแนวเชื่อมที่หลอมลึกและแคบ

2. กระแสไฟตรงขั้วบวกต่อกับลวดเชื่อม (Direct Current Electrode Positive : DCEP)

การต่อขั้วแบบนี้เป็นการเชื่อมต่อขั้วเชื่อมด้วยกระแสตรงกลับขั้ว คือ หัวเชื่อมหรือลวดเชื่อมจะต่อเป็นขั้วบวก (Positive) ส่วนสายดิน/ชิ้นงานจะต่อเป็นขั้วลบ (Negative) โดยอิเล็กตรอนจะวิ่งจากชิ้นงาน (-) ไปยังลวดเชื่อม (+) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ข) การวิ่งของอิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าชน (Bump) กับปลายลวดเชื่อม ผลของการวิ่งชนทำให้ที่ลวดเชื่อมเกิดความร้อนมากกว่าที่ชิ้นงาน 2/3 หรือ 70% ส่วนเกิดที่ชิ้นงาน 1/3 หรือ 30% เหมาะสำหรับการเชื่อมที่ต้องการแนวเชื่อมที่กว้างและการหลอมที่ตื้น

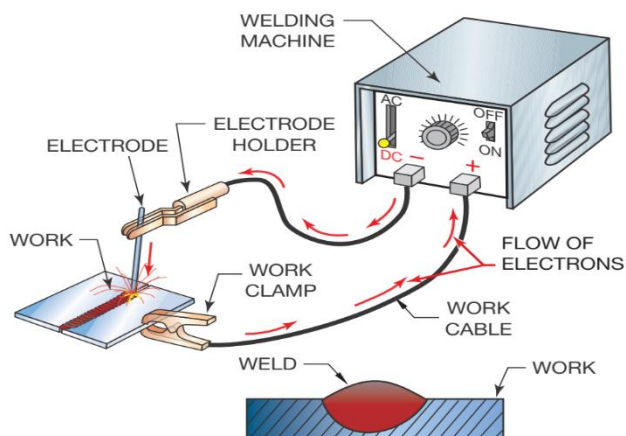
3. กระแสไฟสลับ (Alternative Current : AC)

เป็นกระแสไฟเชื่อมที่มีลักษณะการไหลแบบสลับขั้วจากขั้วบวก (+) ไปยังขั้วลบ (-) ซึ่งเป็นแบบคลื่น SIN WAVE ซึ่งผลการขึ้น-ลงของคลื่นจะมีกระแสผ่านที่ 0 จำนวน 2 ครั้ง ผ่านคลื่นบวก และคลื่นลบ อย่างละ 1 ครั้ง ใน 1 วินาที จะเกิดสลับกันไปแบบนี้จำนวน 50 ครั้ง หรือ 50 เฮิร์ต จึงถือได้ว่ากระแสไฟสลับไม่มีขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) และ (ข) ความร้อนที่เกิดขึ้นจะสมดุล คือ เกิดที่ชิ้นงาน 1/2 หรือ 50% และเกิดที่ลวดเชื่อม 1/2 หรือ 50% จากการที่กระแสไฟเคลื่อนที่แบบสลับ จะมีผลทำให้เปลวอาร์กเปลี่ยนขนาดตลอดเวลา การอาร์กจึงไม่สม่ำเสมอขณะเชื่อม ซึ่งช่างเชื่อมสามารถฟังได้จากเสียงของการอาร์กที่เกิดจากการสลับขั้ว ช่างเชื่อมที่เลือกใช้กระแสไฟเชื่อมแบบสลับต้องใช้ทักษะในการควบคุมหัวเชื่อมสูง เมื่อเทียบกับการเลือกใช้กระแสไฟตรง ซึ่งมีทิศทางการไหลไปในทิศทางเดียว ความสม่ำเสมอของการอาร์กจะดีกว่า และควบคุมการเชื่อมได้ง่ายกว่า (เป็นข้อมูลที่อ้างอิงจากความรู้สึกของช่างเชื่อมส่วนใหญ่ ซึ่งบางคนอาจรู้สึกต่างไปจากนี้) ตัวอย่างการเลือกกระแสไฟเชื่อมจากข้อกำหนดของลวดเชื่อม เช่น ลวดเชื่อม AWS A5.1 E6013

AWS หมายถึง มาตรฐานของ American Welding Society

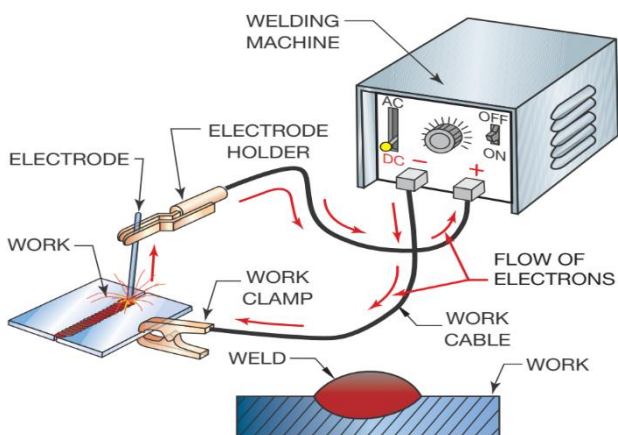
A 5.1 หมายถึง ข้อกำหนดของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน

E6013 หมายถึง ประเภทของลวดเชื่อมชนิดที่อยู่ในกลุ่มของ A 5.1 ที่ลงท้ายด้วยเลข 13 ซึ่งมีความหมายว่า เป็นลวดหุ้มฟลักซ์รูโกล์ เชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม ใช้กระแสไฟเชื่อมได้ทั้ง AC กระแสไฟเชื่อม DCEN และ DCEP โดยเป็นหน้าที่ของช่างเชื่อมที่จะต้องพิจารณาเลือกกระแสไฟเชื่อม ที่ต้องพิจารณา ร่วมกับปัจจัยการเชื่อมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น การละลายเนื้อเข้าด้วยกันของลวดเชื่อมกับชิ้นงานเชื่อม (Dilution) ที่มีผลกระทบโดยตรงกับชนิดของกระแสไฟเชื่อม เป็นต้น



(ก) กระแสไฟตรงขั้วลบต่อกับลวดเชื่อม (Direct Current Electrode Negative : DCEN)

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and metal fabrication*, 2012.



(ข) กระแสไฟตรงขั้วบวกต่อกับลวดเชื่อม (Direct Current Electrode Positive : DCEP)

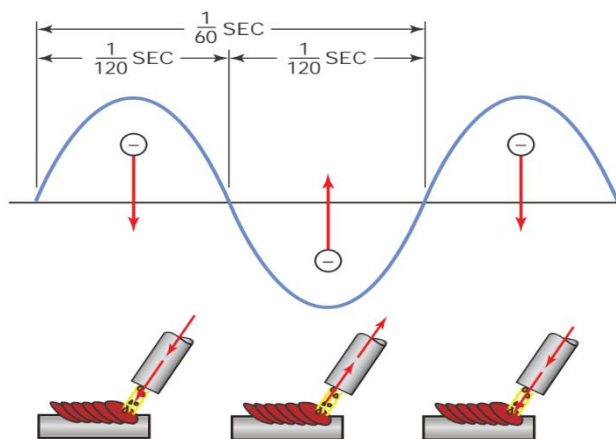
ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and metal fabrication*, 2012.

รูปที่ 3.4 การต่อขั้วกระแสไฟเชื่อมสำหรับกระแสไฟตรง (Direct Current : DC)

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and metal fabrication*, 2012.

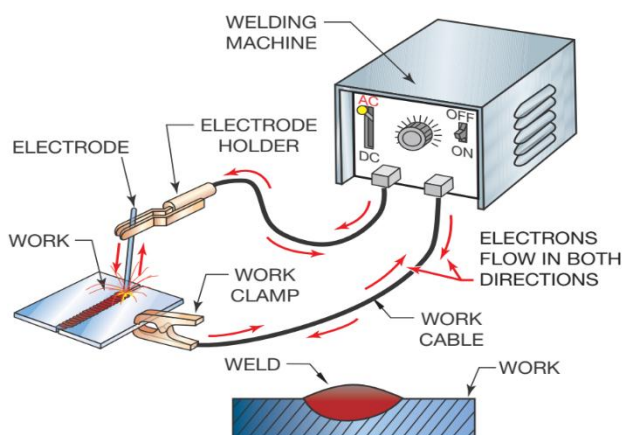
นอกจากการเลือกชนิดของกระแสเชื่อมดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ระดับของกระแสไฟเชื่อม (Welding current) ก็มีบทบาทที่สำคัญต่อการอาร์กที่สร้างขนาดของบ่อหลอมละลาย กล่าวคือ กระแสไฟ (Amperage) จะทำหน้าที่ร่วมกับแรงดัน (Voltage) ตามกฎของโอห์ม ในการป้อนพลังงานเพื่อการอาร์กหลอม ซึ่งก็คือค่าวัตต์ (Wattage) ของพลังงานไฟฟ้า ถ้ากระแสไฟสูงจะทำให้ค่าวัตต์สูงขึ้น

ตามส่งผลให้เกิดการอาร์กหลอมที่เป็นวงกว้าง บ่อหลอมละลายจึงกว้างและลึก และจะตรงกันข้ามกับกรณีที่กระแสต่ำ และวัตต์ต่ำ ดังแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 3.6



(ก) การไหลแบบสลับขั้วจากขั้วบวก (+) ไปยังขั้วลบ (-) ซึ่งเป็นแบบคลื่น SIN WAVE ของกระแสไฟฟ้าสลับ

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and metal fabrication*, 2012.

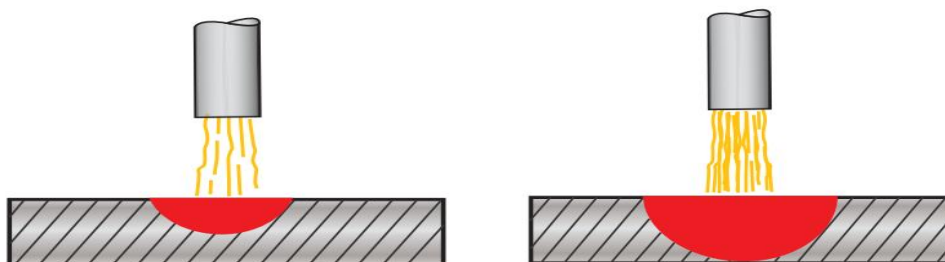


(ข) ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนในวงจรกระแสไฟเชื่อม สำหรับกระแสไฟฟ้าสลับ (Alternative Current : AC)

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and metal fabrication*, 2012.

รูปที่ 3.5 การต่อขั้วกระแสไฟเชื่อมสำหรับกระแสไฟสลับ (Alternative Current : AC)

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and metal fabrication*, 2012.



(ก) บ่อหลอมละลายกระแสไฟเชื่อม/วัตต์ต่ำ

(ข) บ่อหลอมละลายกระแสไฟเชื่อม/วัตต์สูง

รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบขนาดบ่อหลอมละลายที่กระแสไฟเชื่อม/วัตต์ต่างกัน

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and metal fabrication*, 2012.

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเชื่อม (Welding equipment)

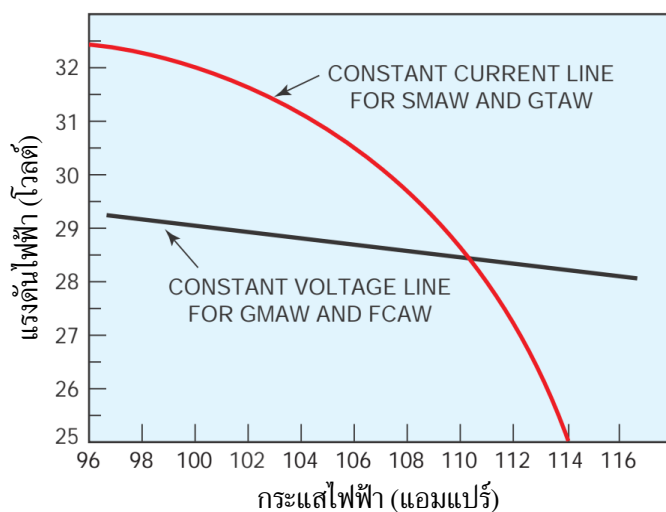
การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์มีเครื่องมือที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญคือ เครื่องเชื่อม (Welding machine) ชนิดและประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อมจะมีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมเป็นสำคัญ การแบ่งชนิดของเครื่องเชื่อมไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของการจ่ายพลังงานเชื่อม กับตามลักษณะต้นกำเนิดของพลังงานเชื่อม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การแบ่งตามลักษณะของการจ่ายพลังงานเชื่อม มี 2 แบบ คือ

ก. เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบกระแสคงที่ (Constant Current : CC) ขณะวงจรปิดจะไม่มีกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะสูง จนกว่าจะทำการทำการเปิดวงจร และกระแสไฟฟ้าเชื่อมที่สูงขึ้นนี้ จะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าลดต่ำลง เหมาะสำหรับการเชื่อม SMAW และ GTAW

ข. เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบแรงดันคงที่ (Constant Voltage : CV) ขณะวงจรเปิดจะไม่มีกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในวงจรจะอยู่ที่ค่าใดค่าหนึ่ง และจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก (ค่อนข้างคงที่) เมื่อปิดวงจร จึงเหมาะกับการนำมาใช้ในการเชื่อมแบบออตโนมิตและกึ่งออตโนมิต ได้แก่ การเชื่อม GMAW และ FCAW

โดยเส้นกราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของทั้งสองแบบของการจ่ายพลังงานเชื่อมดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบ

พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลง
ของทั้งสองแบบของการจ่าย
พลังงานเชื่อมดัง

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and
metal fabrication*, 2012

2. การแบ่งตามลักษณะต้นกำเนิดของพลังงานเชื่อม มี 2 ลักษณะ คือ เครื่องเชื่อมแบบกระแสไฟตรง ที่เรียกกันว่า กระแสไฟ DC กับเครื่องเชื่อมแบบกระแสไฟสลับ ที่เรียกกันว่า กระแสไฟ AC ซึ่งพอจะแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

ก. เครื่องเชื่อมชนิดผลิตกระแสไฟตรง (Motor generator welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมที่ผลิตกระแสไฟตรงจ่ายให้กับชุดต้นเครื่องเชื่อม โดยชุดต้นกำลังของเครื่องเชื่อม มี 2 ประเภท คือ ถ้าเป็นในโรงงานอุตสาหกรรมจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับต่อจากไฟฟ้าโรงงาน เพื่อขับให้มอเตอร์หมุน

ไปขับเคลื่อนเนอเรเตอร์หรือไดนาโม ซึ่งเกิดจากขดลวดหมุนตัดกับสนามแม่เหล็กทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดที่ผลิตกระแสไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ก) ส่วนอีกประเภทเป็นงานภาคสนามหรือนอกสถานที่ซึ่งไม่มีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ประเภทนี้จะขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ (Engine driven generators) ที่ใช้เชื้อเพลิงแก๊สโซลีนหรือดีเซล ดังตัวอย่างเครื่องเชื่อมในดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ข)



(ก) เครื่องเชื่อมขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์



(ข) เครื่องเชื่อมขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์

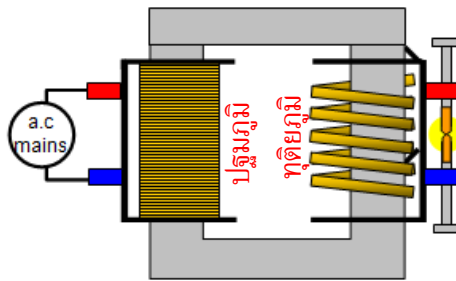
รูปที่ 3.8 ชนิดของเครื่องเชื่อมชนิดกระแสไฟตรงจากมอเตอร์ (Motor generator)

ที่มา : Lincoln Electric. Welding machine. 2016.

ข. เครื่องเชื่อมชนิดหม้อแปลงกระแสไฟสลับ (Transformer welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมที่อาศัยหลักการทำงานเหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้า คือ แปลงแรงเคลื่อนของไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) จาก 220 โวลต์ / 380 โวลต์ ซึ่งเป็น Line Voltage ให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ที่ 20-40 โวลต์ที่ใช้สำหรับการเชื่อม โดยภายในเครื่องเชื่อมจะมีขดลวดปฐมภูมิ (Primary coil) กับขดลวดทุติยภูมิ (Secondary coil) พันรอบแกนเหล็ก เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ก) และตัวอย่างเครื่องเชื่อมแบบ Transformer ในรูปที่ 3.9 (ข) เครื่องเชื่อมแบบนี้มีจำหน่ายทั่วไป ราคาค่อนข้างถูก แต่กระแสเชื่อมไม่ค่อยจะราบเรียบ สก๊อตโลหะเกิดในปริมาณมาก ใช้กับลวดเชื่อมเกรดพิเศษไม่ได้ สิ้นเปลืองกระแสไฟฟ้าสูง

ค. เครื่องเชื่อมชนิดหม้อแปลงและเรียงกระแสไฟฟ้า (Transformer – rectifiers welding machine) เครื่องเชื่อมชนิดนี้สามารถใช้ได้กับทั้งระบบไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ โดยรับกระแสไฟสลับแล้วแปลงเป็นกระแสไฟตรง ด้วยอุปกรณ์ชุดเรกติฟายเออร์ (Silicon Controlled Rectifier : SCR) ด้วยวิธีการนำวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้ามาซ้อนกันเป็นชั้น ๆ กับโลหะที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทางเดียวและยังป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับมาในทิศทางชั้นเหล่านั้น โดยยอมให้กระแสไฟสลับคลื่นบวก (+) เพียงครึ่งที่ไหลผ่านได้ การไหลทางเดียวคงที่และสม่ำเสมอของคลื่นบวก จะทำให้เกิดเป็นกระแสไฟตรงที่ไหลผ่านชุดเรกติฟายเออร์ซึ่งนำไปใช้งาน เครื่องเชื่อมแบบนี้จะได้กระแสไฟ

เชื่อมที่นุ่มนวลกว่าแบบหม้อแปลง ใช้เชื่อมได้กับทุกชนิดลวดเชื่อมหุ้มฟลัก แต่สิ้นเปลืองกระแสไฟฟ้าค่อนข้างสูง ดังแสดงหลักการแปลงและเรียงกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 3.10 (ก) และ รูปตัวอย่างเครื่องเชื่อมในรูปที่ 3.10 (ข)



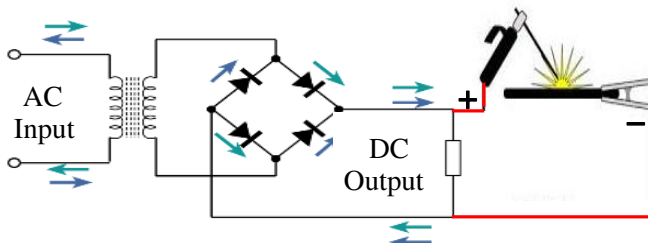
(ก) หลักการของขดลวดแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในเครื่องเชื่อม



(ข) เครื่องเชื่อมไฟฟ้าชนิด Transformer

รูปที่ 3.9 หลักของการแปลงแรงเคลื่อนในเครื่องเชื่อม และเครื่องเชื่อมชนิด Transformer

ที่มา : Miller Welding Machine, 2015



(ก) หลักการแปลงกระแสไฟตรงไปเป็นกระแสไฟสลับภายในเครื่องเชื่อม



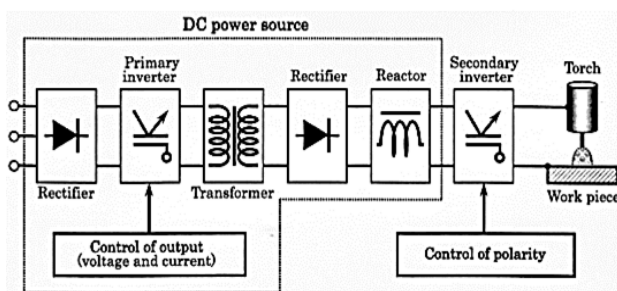
(ข) เครื่องเชื่อมไฟฟ้าชนิด Transformer-rectifier

รูปที่ 3.10 หลักการแปลงกระแสไฟ AC ไปเป็น DC ในเครื่องเชื่อม และเครื่องเชื่อมชนิด

Transformer-rectifier ที่มา : Miller Welding Machine, 2015

ง. เครื่องเชื่อมชนิดอินเวอร์เตอร์ (Inverter welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมชนิดที่สามารถใช้ได้ทั้งระบบไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรง (AC/DC) ซึ่งมีระบบชุดอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ควบคุมความถี่ให้สูงขึ้น จากคลื่นความถี่ 50 Hz ให้สูงขึ้นถึง 20 kHz ด้วยชุดควบคุมกำลังทรานซิสเตอร์ โดยมีชุดเรกติไฟเออร์ทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าสลับ AC (Input) ไปเป็นกระแสตรง DC จากนั้นก็

เปลี่ยนเป็นกระแสสลับที่ความถี่สูงขึ้น ถัดไปก็จัดเรียงกระแสใหม่อีกครั้งด้วยชุดเรกติไฟเออร์ ส่งผลทำให้เกิดคลื่นความถี่สูงและเรียบด้วยกระแสตรง DC (Output) เพื่อใช้งาน ดังนั้นระบบเครื่องเชื่อมชนิดนี้จะเป็นแบบกระแสคงที่ (Constant Current : CC) เป็นการอธิบายระบบการทำงานจากผู้ผลิตเครื่องเชื่อม Miller welding machine (2015) ดังแสดงหลักการแปลงกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 3.11 (ก) และ รูปตัวอย่างเครื่องเชื่อมในรูปที่ 3.11 (ข)



(ก) ระบบวงจรของเครื่องเชื่อมชนิดอินเวอร์เตอร์

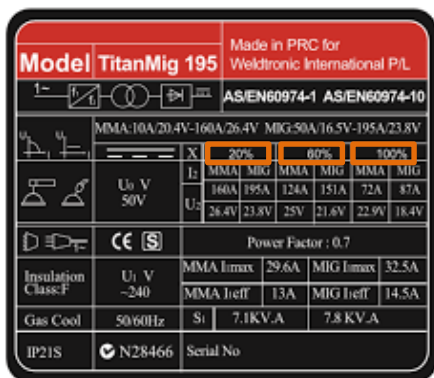
รูปที่ 3.11 ระบบวงจรภายในและเครื่องเชื่อมชนิดอินเวอร์เตอร์ ที่มา : Miller Welding Machine, 2015



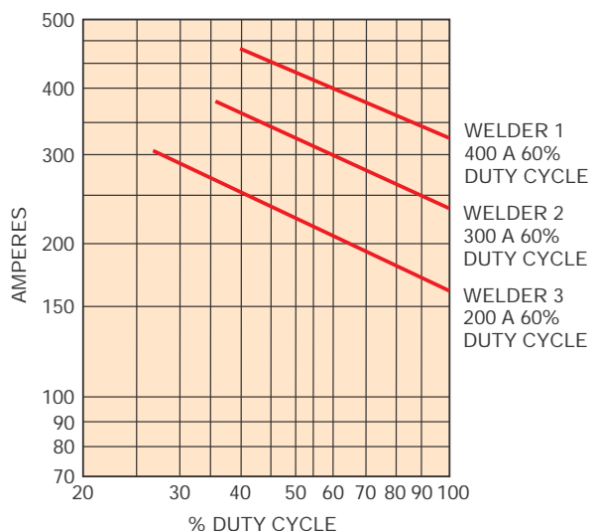
(ข) เครื่องเชื่อมไฟฟ้าชนิด Inverter

ประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อม (Duty cycle) ข้างเชื่อมสามารถตรวจสอบได้จากป้ายที่แสดงรายละเอียดของเครื่อง (Name plate) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ก) ซึ่งหมายถึง ชีตความสามารถในการใช้งานของเครื่องเชื่อม โดยเทียบอัตราส่วนระหว่างเวลาที่ทำการเชื่อมต่อเวลาทั้งหมด ซึ่งเวลาทั้งหมดจะเทียบจาก 10 นาที เช่น ผู้ผลิตเครื่องเชื่อมระบุไว้ที่ Name plate ของเครื่องเชื่อมว่า Duty cycle 60 % นั้นหมายถึง เครื่องเชื่อมนี้สามารถปฏิบัติการเชื่อมงานได้ติดต่อกันได้นาน 6 นาที แล้วหยุดพัก 4 นาที แล้วจึงจะปฏิบัติการเชื่อมงานได้ต่อ จะสังเกตเห็นว่าเวลารวมกันทั้งหมด 10 นาที ถ้าปฏิบัติการเชื่อมงานติดต่อกันเกิน 6 นาที เครื่องเชื่อมจะตัดระบบการใช้งาน และอาจเกิดความเสียหายหรืออายุการใช้งานของเครื่องเชื่อมสั้นลงได้ ประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อมจะสัมพันธ์กับระดับปริมาณของกระแสไฟเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ข) เครื่องเชื่อมประเภทนี้จะเป็นชนิดกระแสคงที่ (Constant Current : CC) ได้แก่ เครื่องเชื่อมของกรรมวิธี SMAW กรรมวิธี CAW และกรรมวิธี Stud arc welding เป็นต้น

โดยเป็นที่ทราบกันดีว่ามีเครื่องเชื่อมบางชนิดที่มี Duty cycle 100 % หมายถึง สามารถปฏิบัติการเชื่อมงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องหยุดพัก ซึ่งจะเป็นเครื่องเชื่อมแบบอัตโนมัติชนิดแรงเคลื่อนคงที่ (Constant Voltage : CV) ได้แก่ เครื่องเชื่อมของกรรมวิธี GMAW กรรมวิธี GTAW กรรมวิธี SAW และกรรมวิธี FCAW เป็นต้น



(ก) Name plate ของเครื่องเชื่อม



(ข) ความสัมพันธ์ของ Duty cycle กับ ปริมาณกระแสไฟเชื่อม

รูปที่ 3.12 ประสิทธิภาพของเครื่องเชื่อม (Duty cycle)

ที่มา : Lincoln Electric, Welding Machine, 2016

นอกจากเครื่องเชื่อมแล้วยังมีอุปกรณ์อื่น ๆ อีกหลายอย่างที่มีความสำคัญที่ต้องใช้สำหรับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) ดังต่อไปนี้

1. หัวจับลวดเชื่อม (Electrode holder) หรือหัวเชื่อม เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้จับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ด้วยปากจับที่ทำด้วยวัสดุโลหะนำไฟฟ้า พร้อมห่อหุ้มด้วยวัสดุเซรามิกส์เพื่อให้ทนต่อความร้อนจากเปลวไฟอาร์ก ส่วนด้ามจับทำด้วยวัสดุพลาสติกชนิดแข็งที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อน หัวจับลวดเชื่อมมีหลายขนาดหลายแบบและหลายหลากสี สามารถเลือกใช้ตามความถนัดของช่างเชื่อมเอง ดังแสดงตัวอย่างหัวจับลวดเชื่อมในรูปที่ 3.13 (ก)

2. หัวจับสายดิน (Ground clamp) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการจับ หรือ เหล็กที่รองรับชิ้นงาน เพื่อต้องการให้ครบวงจรของกระแสไฟเชื่อม โดยสายดินต้องจับยึดให้แน่นมากเพียงพอต่อการไหลของกระแสในวงจร ถ้าหลวมหรือไม่แน่นมากพอจะมีผลทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน สายเชื่อมจะเกิดความร้อน หรือเกิดการอาร์กได้ ดังแสดงตัวอย่างหัวจับสายดินในรูปที่ 3.13 (ข)

3. สายเชื่อมไฟฟ้า (Welding cable / Welding leads) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทำหน้าที่เป็นสายนำไฟฟ้าหรือทางผ่านของกระแสไฟฟ้าจากขั้วเครื่องเชื่อมไปยังบริเวณที่ต้องการอาร์ก สายเชื่อมในระบบของการเชื่อมมี 2 เส้น คือ เส้นที่ต่อจากเครื่องเชื่อมไปยังหัวเชื่อม ที่เรียกกันว่าสายหัวเชื่อม ส่วนอีกเส้นต่อจากเครื่องเชื่อมไปยังชิ้นงาน ที่เรียกกันว่าสายดิน ซึ่งทั้งสองเส้นเป็นโลหะทองแดง เล็ก ๆ หลายเส้นพันกันอย่างมีระเบียบ และห่อหุ้มด้วยฉนวนป้องกันกระแสไฟฟ้า กันน้ำได้ดี อ่อนตัวสามารถม้วนได้สะดวก โดยทั่วไปมักมีสีดำหรือสีส้ม สายเชื่อมที่ดีต้องมีค่าความต้านทานการไหลของกระแสที่ต่ำ ซึ่งความยาวและขนาดของโลหะทองแดงของสายเชื่อมมีผลต่อปริมาณกระแสที่ไหลผ่านดังแสดง

ความสัมพันธ์ใน **ตารางที่ 3.2** และที่ปลายสายจะยัดด้วยหางปลาทองแดงเพื่อ่ายในการเชื่อมต่อสายเข้ากับหัวเครื่องเชื่อม ดังแสดงตัวอย่างสายเชื่อมไฟฟ้าใน **รูปที่ 3.13 (ค)**

ตารางที่ 3.2 ขนาดของสายเชื่อมไฟฟ้าตามมาตรฐานอเมริกา (American Wire Gauge : AWG)

ที่มา : American Wire Gauge standard : AWG, 2015

ความยาวของสายเชื่อมไฟฟ้า		กระแสไฟเชื่อมที่สามารถไหลผ่าน (Welding current flows through) : แอมแปร์								
		100	150	200	250	300	350	400	450	500
ฟุต (ft)	เมตร (m)	ขนาดของลวดทองแดงพันเกลียว (Copper welding cable) : # No								
50	15	2	2	2	2	1	1/0	1/0	2/0	2/0
75	23	2	2	1	1/0	2/0	2/0	3/0	3/0	4/0
100	30	2	1	1/0	2/0	3/0	4/0	4/0		
125	38	2	1/0	2/0	3/0	4/0				
150	46	1	2/0	3/0	4/0					
175	53	1/0	3/0	4/0						
200	61	1/0	3/0	4/0						
250	76	2/0	4/0							
300	91	3/0								
350	107	3/0								
400	122	4/0								

4. เครื่องมือทำความสะอาด (Cleaning tools) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทำความสะอาดทั้งก่อนและหลังการเชื่อมมีหลายอย่าง ได้แก่ 1. ค้อนเคาะสแลก (Chipping hammer) ใช้สำหรับขจัดสแลกและเม็ดโลหะบนแนวเชื่อมออกไปด้วยการเคาะ ซึ่งออกแบบปลายหัวค้อนให้เล็กแหลม ที่สามารถเคาะตามซอกเล็ก ๆ ได้ถนัด 2. แปรงลวด (Wire brush) ใช้สำหรับแปรงขัดทำความสะอาดแนวเชื่อม มีหลายรูปแบบทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ 3. คีมจับชิ้นงาน (Pliers) ใช้สำหรับจับชิ้นงานเชื่อมขณะร้อนเพื่อทำความสะอาดมีหลายขนาดให้สามารถเลือกใช้ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานเชื่อม ดังแสดงตัวอย่างเครื่องมือทำความสะอาดดังกล่าว ใน **รูปที่ 3.13 (ง)**

5. อุปกรณ์ป้องกันอันตราย (Protective equipment) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญยิ่งที่จะสร้างความปลอดภัยแก่ช่างเชื่อมขณะปฏิบัติงานเชื่อม ซึ่งมีทั้งอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (Personal protective equipment : PPE) และอุปกรณ์สำหรับเพื่อความปลอดภัยระหว่างปฏิบัติงาน (Operation

protective equipment) อุปกรณ์ทั้งสองส่วนดังกล่าวนี้ ได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 1 และตัวอย่างบางชนิดแสดงในรูปที่ 3.13 (จ)

6. ตู้อบลวดเชื่อมและกระบอบอก่อนลวดเชื่อม (Electrode drying oven and portable) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกันสำหรับการจัดความชื้นในลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ โดยตู้อบลวดเชื่อมมีลักษณะเป็นตู้ดังรูปที่ 3.14 (ก) ใช้อบลวดปริมาณครั้งละมาก ๆ ที่อุณหภูมิ 260 ถึง 425 °C เป็นระยะเวลา 1-2 ชั่วโมง มักติดตั้งไว้ประจำที่แน่นอนเพื่อเตรียมให้ช่างเชื่อมมารับไปใช้ ซึ่งช่างก็จะเอาไปใส่ในกระบอบอก่อนลวดเชื่อมของตนเอง ดังแสดงลักษณะของกระบอบอก่อนลวดแบบตั้งตรง และแบบตั้งแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ข) และ (ค) ที่มีอุณหภูมิการอบลวดประมาณ 30 ถึง 140 °C โดยส่วนใหญ่จะอบลวดเชื่อมประเภท Low hydrogen electrode หรือ Basic electrode ที่ซึ่งจำเป็นต้องอบไล่ความชื้นก่อนนำไปเชื่อม



(ก) ท้าวจับลวดเชื่อม (Electrode holder)



(ข) ท้าวจับสายดิน (Ground clamp)



(ค) สายเชื่อมไฟฟ้า (Welding cable)



(จ) อุปกรณ์ป้องกันอันตราย (Protective equipment)



(ง) เครื่องมือทำความสะอาด (Cleaning tools)

รูปที่ 3.13 อุปกรณ์สำหรับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW)

ที่มา : Welder Partal, 2020



(ก) ตู้อบลวดเชื่อม



(ข) กระบอกอุ่นลวดเชื่อมแบบตั้งตรง



(ค) กระบอกอุ่นลวดเชื่อมแบบแนวนอน

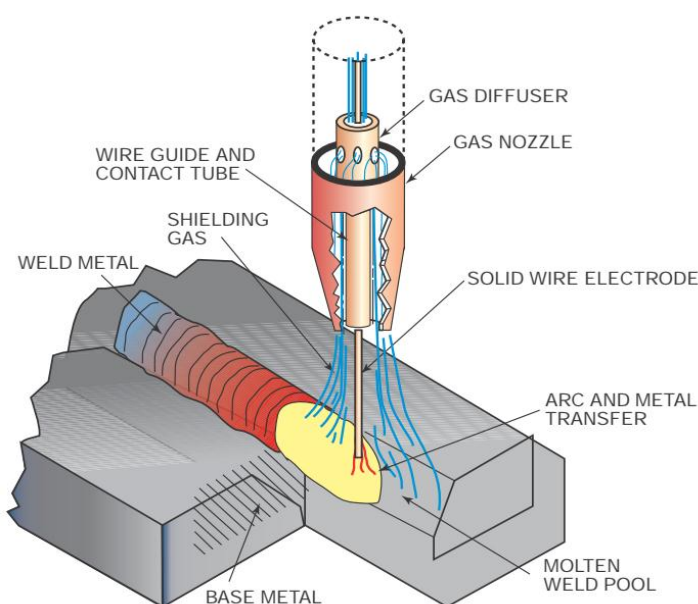
รูปที่ 3.14 อุปกรณ์สำหรับการอบและอุ่นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

ที่มา : Welding equipment, 2019

3.2 การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding : GMAW)

Willian A. Bowditch, et al. (2009) ได้กล่าวถึงกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมไว้ว่า เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่พัฒนามาต่อยอดมาจากการเชื่อมแบบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์หรือเชื่อมไฟฟ้าที่รู้จักกัน โดยเป็นการเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อมเส้นเปลี่ยนขนาดเล็ก (Consumable electrode) ป้อนจากถ้อยลวด ซึ่งจะถูกป้อนส่งผ่านหัวเชื่อม หรือปืนเชื่อม (Torch / Welding gun) ออกมาอย่างต่อเนื่องผ่านท่อนำลวด และท่อนำกระแส (Contact tip) เส้นลวดเชื่อมจะสัมผัสกับท่อนำกระแส ทำให้กระแสไฟเชื่อมสามารถไหลเข้าสู่เส้นลวดเชื่อมได้ และเมื่อปลายของเส้นลวดที่ไหลออกมาสัมผัสหรือแตะกับชิ้นงาน (Work / Base metal) ก็จะมีการอาร์กขึ้น (Arc) ความร้อนจากการอาร์กนี้จะทำให้โลหะชิ้นงานเกิดการหลอมละลายขึ้น และในขณะเดียวกันที่ปลายของลวดเชื่อมก็จะเกิดการหลอมละลายเช่นกัน โดยเป็นหยดน้ำ

โลหะเหลวที่จะถ่ายโอนสู่บ่อหลอมละลาย (Weld pool) ซึ่งบ่อหลอมละลายดังกล่าวจะถูกปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อยที่ไหลมาจากถังบรรจุผ่านหัวฉีดแก๊ส (Gas Nozzle) เพื่อทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แก๊สอื่น ๆ จากบรรยากาศภายนอกเข้ามารวมตัวทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะเหลวในบ่อหลอมละลาย ซึ่งแก๊สที่ใช้ในการปกคลุม ได้แก่ แก๊สเฉื่อย (Inert gas) แก๊สแอคทีฟ (Active gas) แก๊สอัมโนรีแอคทีฟ (Unreactive gas) และแก๊สผสม (Mixture gas) เป็นต้น จากหลักของการเชื่อมดังกล่าวข้างต้นสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.14 ถ้าใช้แก๊สเฉื่อยทำหน้าที่ปกคลุมบ่อหลอมละลายจะเรียกขบวนการเชื่อมนี้ว่าการเชื่อมมิก (MIG) ซึ่งมาจากคำย่อของ “Metal Inert Gas” แต่ถ้าใช้แก๊สแอคทีฟทำหน้าที่ปกคลุมบ่อหลอมละลายจะเรียกขบวนการเชื่อมนี้ว่าการเชื่อมแม็ก (MAG) ซึ่งมาจากคำย่อของ “Metal Active Gas” บางครั้งจึงมักจะเรียกชื่อรวมของขบวนการเชื่อมนี้ว่า MIG/MAG



รูปที่ 3.14 หลักการของ
การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊ส
ปกคลุม (GMAW)

ที่มา : AWS, American
Welding Society, 2011

3.2.1 วงจรการเชื่อมและกระแสไฟเชื่อม (Welding circuit and welding current)

กรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม มีองค์ประกอบของอุปกรณ์และระบบการทำงานที่เกี่ยวข้องและสัมพันธ์กัน ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.15 โดยหลักการเชื่อมของระบบการเชื่อมที่สามารถสรุปเป็นข้อ ๆ ดังนี้ อ้างอิงจากข้อมูลผู้ผลิตเครื่องเชื่อม Lincoln Electric (2015)

1. กรรมวิธีการเชื่อมนี้จะใช้กับไฟกระแสตรง ส่วนกระแสสลับใช้ไม่ได้ และกระแสตรงที่ให้ประสิทธิภาพการเชื่อมดีที่สุดคือไฟเชื่อมแบบกระแสไฟตรงกลับขั้ว (Direct Current Reverse Polarity : DCRP) โดยลวดเชื่อมจะเป็นขั้วบวก (Direct Current Electrode Positive : DCEP) ความร้อนจากการอาร์กจะมากที่บ่อหลอมละลาย การถ่ายโอนโลหะเป็นแบบละอองเล็ก ๆ เกิดการซึมลึกมาก ผิวงาน

สะอาดเหมาะกับการเชื่อมงานที่มีออกไซด์บนผิวงานหนา ๆ (Heavy surface oxides) เช่นจำพวก โลหะอลูมิเนียมหรือแมกนีเซียม ดังแสดงระบบของการต่อหัวเชื่อมแบบ DCRP ในรูปที่ 3.16 (ก) ที่เป็น รายงานในงานวิจัยของ Kailash Chaudhary (2017)

ส่วนการเชื่อมแบบกระแสตรงไม่กลับขั้ว (Straight polarity : DCSP) ลวดเชื่อมจะเป็นขั้วลบ (Direct Current Electrode Negative : DCEN) จะไม่นิยมใช้กับการเชื่อมแบบอาร์กโลหะปกคลุม ด้วยเหตุเพราะระยะซึมลึกตื้น แนวเชื่อมกว้าง และมีประกายไฟเม็ดโลหะกระเด็นออกมามากเกินไป ผิวงานไม่สะอาด และต้องใช้ลวดเชื่อมชนิดพิเศษ คือ ผิวลวดเชื่อมต้องเคลือบด้วยสาร Emissive power เพื่อให้การปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ดี ไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้กันเพราะสารเคลือบลวดมีราคาแพง และการถ่ายโอนโลหะจากปลายลวดสู่บ่อหลอมละลายไม่ค่อยจะมีประสิทธิภาพ ด้วยเพราะเป็นหยดขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงระบบของการต่อหัวเชื่อมแบบ DCSP ในรูปที่ 3.16 (ข)

ส่วนกระแสไฟฟ้ากระแสสลับจะไม่นำมาใช้ในการเชื่อมเพราะมีอัตราการสิ้นเปลือง (Burn off rate) ไม่เท่ากันในแต่ละครึ่งวัฏจักร (Half cycle)

สำหรับการถ่ายโอนแบบพัลส์ต้องใช้เครื่องเชื่อมแบบพิเศษ ที่สามารถทำการพัลส์กระแสจากระดับต่ำไปสู่ระดับสูงที่มีความถี่เท่ากับ หรือเป็นสองเท่าของเส้นความถี่ (Line frequency) ซึ่งปกติจะเท่ากับ 50/60 Hz และ 100/120 Hz โดยกระแสเชื่อมจะแปรผันจากค่าต่ำสุด 20 A ที่ แรงดันอาร์ก 17 V ถึง สูงสุด 70 A ที่แรงดันอาร์ก 50 V ซึ่งพัลส์ของกระแสและแรงดันระดับนี้จะเกิดขึ้นทุกจังหวะที่มีการถ่ายโอนโลหะของการเชื่อมด้วยกระแสพัลส์

2. กรรมวิธีการเชื่อมนี้จะเป็นระบบแบบแรงดันคงที่ (Constant voltage) นั่นคือขณะเชื่อมจะควบคุมด้วยแรงดันให้คงที่ตลอดเวลา และก็จะถูกควบคุมด้วยกระแสอาร์ก (Arc amperage) อีกด้วย

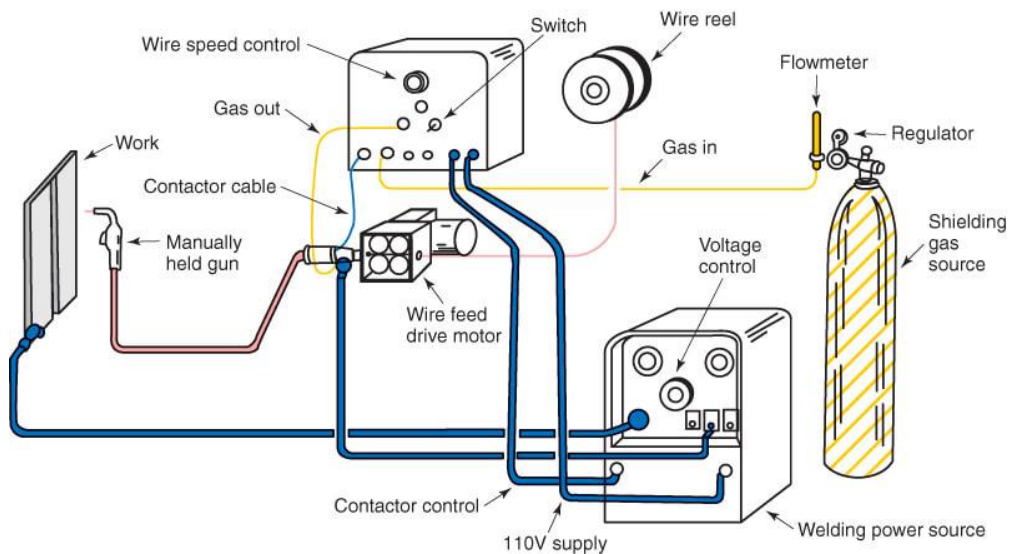
3. กระแสอาร์ก (Arc amperage) ในขณะทำการเชื่อมจะถูกควบคุมด้วยอัตราการป้อนลวดเชื่อม (Electrode wire) ผ่านชุดป้อนลวด (Wire feed drive motor) และสายเชื่อม โดยอัตราการป้อนลวดวัดหน่วยเป็นเมตร/วินาที ซึ่งถ้าอัตราการป้อนลวดสูง กระแสไฟอาร์กก็จะสูงตามโดยอัตโนมัติ

4. แรงดัน (Voltage) จะถูกควบคุมโดยระบบไดอัล (Dial system) ที่อยู่ภายในชุดส่วนประกอบของเครื่องเชื่อม (Welding machine)

5. ขณะทำการเชื่อมบ่อหลอมละลายจะได้รับการปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อยที่ไหลผ่านออกมาจากถังบรรจุผ่านหัวฉีดแก๊ส (Gas nozzle)

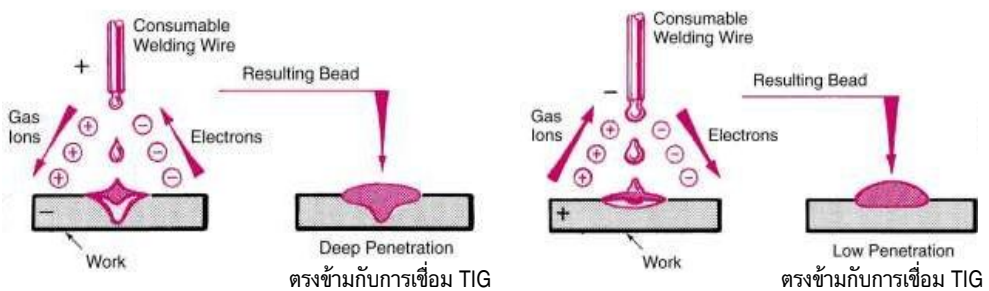
6. การควบคุมหรือการเคลื่อนของหัวเชื่อมจะสามารถใช้มือคนหรือใช้ระบบกลไก ขึ้นอยู่กับว่าเป็นวิธีการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ/อัตโนมัติ

7. การเลือกขนาดของเส้นลวดเชื่อมกับชนิดของแก๊สปกคลุมจะมีผลต่อการถ่ายโอนโลหะ (Metal transfer)



รูปที่ 3.15 อุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW)

ที่มา : The Lincoln Electric Company, 2015



(ก) การต่อหัวเชื่อมแบบ DCRP

(ข) การต่อหัวเชื่อมแบบ DCSP

รูปที่ 3.16 การโอนถ่ายโลหะที่ต่อหัวเชื่อมต่างกันของการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม

ที่มา : Kailash Chaudhary, A Study on Effect of Various Process Variables in GMAW, 2017

KOBELCO Welding Today (2008) ได้อธิบายเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของขนาดเส้นลวดเชื่อมกับชนิดของแก๊สปกคลุมจะมีผลต่อลักษณะการถ่ายโอนโลหะ (Metal transfer) กล่าวคือ ถ้าช่างเชื่อมเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีขนาดเล็กอยู่ระหว่าง 0.8 – 1.2 มิลลิเมตร คู่กับแก๊สปกคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) การถ่ายโอนโลหะจะเป็นแบบ Short circuiting หรือเรียกอีกอย่างว่า Fine wire welding ซึ่งเชื่อมได้ทุกตำแหน่งทำเชื่อม แต่ถ้าเลือกใช้ขนาดลวดเชื่อมที่โตขึ้นมากกว่า 1.2 มิลลิเมตร กับแก๊สปกคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ตัวเดิม การถ่ายโอนโลหะจะเป็นแบบหยดขนาดใหญ่ทรงกลมที่เรียกว่า Globular จะมีปริมาณความร้อนจากการอาร์กสูง และขณะเชื่อมการอาร์กค่อนข้างจะรุนแรง เม็ดโลหะกระเด็นออกมามาก ยากต่อการควบคุมหัวเชื่อม ซึ่งต้องเคลื่อนหัวเชื่อมด้วยความเร็วสูง ขึ้นงานเชื่อมมีโอกาสเกิดการบิดงอมาก จึงเหมาะสำหรับการเชื่อมในตำแหน่งทำราบเท่านั้น ในกรณีที่ต้องเชื่อมในตำแหน่งทำตั้งหรือทำเหนือศีรษะต้องใช้ลวดเชื่อมที่มีขนาดเล็ก

ถ้าช่างเชื่อมพิจารณาเลือกใช้แก๊สปกคลุมแบบผสม (Mixture gas) เช่น ผสมกันระหว่าง แก๊สอาร์กอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ($\text{Ar} + \text{CO}_2$) หรือ แก๊สผสมอาร์กอนกับออกซิเจน ($95\%\text{Ar} + 5\%\text{O}_2$)/($98\%\text{Ar} + 2\%\text{O}_2$)/($99\%\text{Ar} + 1\%\text{O}_2$) บทบาทของแก๊สแบบผสมจะทำให้กลไกการถ่ายโอนโลหะเปลี่ยนไปเป็นแบบละออง ที่สามารถใช้เชื่อมได้กับลวดเชื่อมที่มีขนาดโต ๆ ได้มากขึ้น ซึ่งช่วยให้การควบคุมการอาร์กและการเคลื่อนหัวเชื่อมง่ายขึ้นสม่ำเสมอมากขึ้น ส่งผลทำให้ได้แนวเชื่อมสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ส่วนการถ่ายโอนโลหะแบบ Pulsed transfer จะเป็นแบบวัฏจักร กล่าวคือ เป็นกระบวนการพัลส์ กระแสจากระดับต่ำสุดของการถ่ายโอนโลหะแบบหยดขนาดใหญ่ไปถึงระดับสูงสุดเพื่อทำให้เกิดการถ่ายโอนโลหะแบบละอองผ่านการอาร์กสลับหลอมละลาย

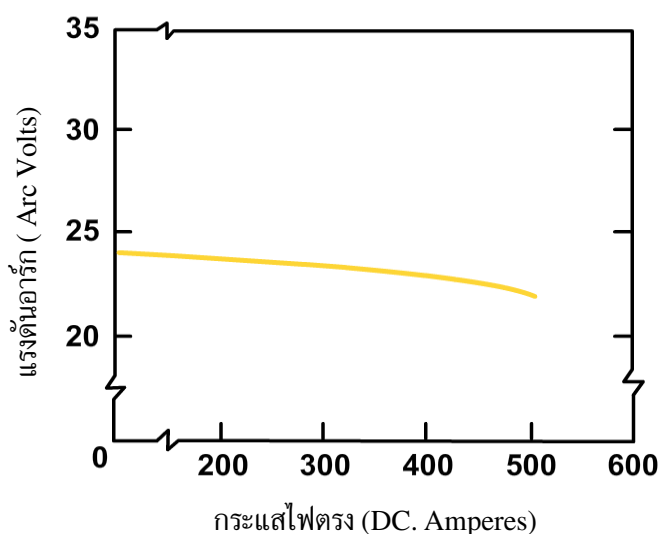
3.2.2 ระบบการอาร์ก (Welding equipment)

B.J. Moniz & R.T. Miller (2004) ได้แสดงหลักของการเชื่อมอาร์กด้วยแก๊สปกคลุมไว้ว่า สามารถสร้างการอาร์กได้ทั้งเครื่องเชื่อมชนิดกระแสคงที่ (CC) และชนิดแรงดันหรือแรงเคลื่อนคงที่ (CV) หรือกับเครื่องเชื่อมบางรุ่นที่มีทั้งสองชนิดในเครื่องเดียวกัน โดยจะเรียก กระแสคงที่ว่า Variable voltage และเรียก แรงดันคงที่ว่า Constant potential ช่างเชื่อมจะนิยมเลือกใช้ชนิดแรงดันคงที่มากกว่า เพราะเมื่อแรงดันที่เครื่องเชื่อมจ่ายออกมาคงที่ จะทำให้ระบบการอาร์กสม่ำเสมอตลอดการเชื่อม เห็นได้จาก **รูปที่ 3.17** อ้างอิงจาก Welding Theory and Application (1976) ที่แสดงเส้นโค้งระดับของแรงดันเกือบจะคงที่ถึงแม้กระแสเชื่อมจะเพิ่มสูงขึ้นก็ตาม และยังเป็นที่ยอมรับกันว่าเครื่องเชื่อมแบบแรงดันคงที่ เหมาะกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมเปลือย (Filler wire) และ ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux core) เพราะเป็นการป้องกันลวดเชื่อมอย่างต่อเนื่อง ระยะอาร์กหรือบางครั้งเรียกความยาวอาร์ก (Arc length) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งของการเชื่อมอาร์กแบบเติมลวด เช่นเดียวกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแบบหุ้มฟลักซ์ การเชื่อมด้วยระบบการป้องกันลวดด้วยชุดป้อนลวดเชื่อม (Wire feeder) ของเครื่องเชื่อม ที่ป้อนลวดออกมาด้วยอัตราเร็วคงที่ ก็จะสามารถควบคุมระยะอาร์กได้คงที่ แต่อาจเกิดการคลาดเคลื่อนได้บ้างในบางครั้ง ที่อาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของผิวชิ้นงาน หรือความผิดพลาดจากการควบคุมด้วยมือของช่างเชื่อม ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยเลือกใช้วิธีการเชื่อมแบบอัตโนมัติ

เส้นโค้งระดับแรงดันอาร์ก-กระแส ยังสามารถบอกถึงอัตราของการเติมลวดเชื่อม โดยจะสัมพันธ์กับปริมาณกระแสเชื่อม ดังข้อมูลของ Lincoln electric (2017) ที่ได้กล่าวไว้ว่า ถ้ากระแสเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นอัตราการหลอมละลายก็จะเพิ่มขึ้นตาม และในทางตรงกันข้ามถ้ากระแสเชื่อมต่ำลงอัตราการหลอมละลายก็จะลดต่ำลง ดังแสดงใน **รูปที่ 3.18** จุดตำแหน่งหมายเลข 2 เป็นตำแหน่งที่มีระยะอาร์กและแรงดันอาร์กกับกระแสเชื่อมที่เหมาะสม เมื่อเทียบกับจุดตำแหน่งหมายเลข 1 และ 3 ความหมายคือตำแหน่งหมายเลข 1 แสดงให้เห็นว่ากรณีมีระยะอาร์กมากขึ้น แรงดันอาร์กจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่กระแสเชื่อมกลับลดลงอย่างมาก ซึ่งทำให้อัตราการหลอมเหลวของลวดเชื่อมลดลง ในกรณีนี้จะเกิดการป้อนลวดที่เร็วกว่าความสามารถในหลอมละลาย ส่วนตำแหน่งหมายเลข 3 แสดงให้เห็นว่าถ้าในกรณีที่

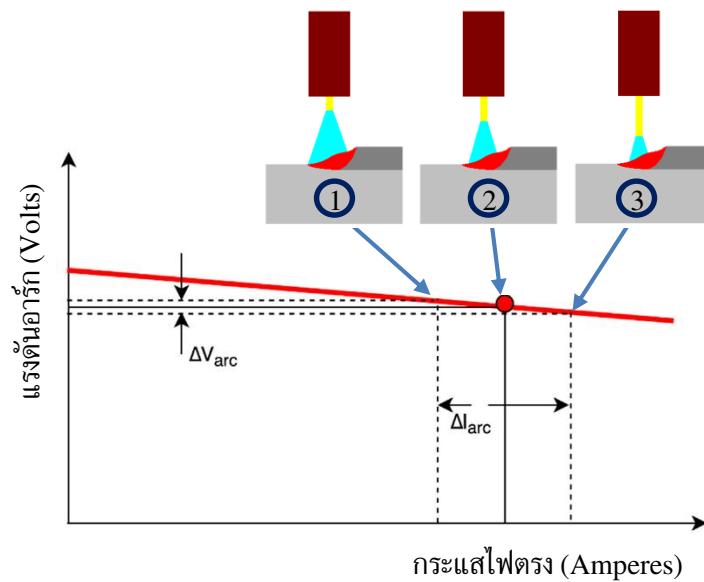
ระยะอาร์กน้อยหรือสั้น แรงดันอาร์กจะลดลงเพียงเล็กน้อย แต่กระแสเชื่อมกลับเพิ่มสูงขึ้นค่อนข้างมาก ส่งผลให้อัตราการหลอมของลวดเชื่อมสูงขึ้นตาม ในกรณีนี้จะเกิดปรากฏการณ์ลวดเชื่อมหลอมได้เร็วกว่าอัตราการป้อนของลวด อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติระบบการทำงานของเครื่องเชื่อมจะปรับสมดุลความสัมพันธ์ของระยะอาร์ก แรงดันอาร์ก กระแสเชื่อม และอัตราความเร็วป้อนลวดให้มีความเหมาะสมเองโดยอัตโนมัติในเวลาเพียงเศษส่วนวินาที โดยไม่ต้องปรับที่มือของช่างเชื่อมแต่ประการใด

ผู้ผลิตเครื่องเชื่อมอาร์กด้วยแก๊สปกคลุมส่วนใหญ่จะสร้างเครื่องเชื่อมให้มีความชันของกระแสอาร์กคงที่ เพื่อให้สามารถปรับระดับความชันของเส้นโค้งแรงดันอาร์ก-กระแสได้ตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ความชันของเส้นโค้งจะส่งผลต่อจำนวนกระแสลัดวงจรที่เครื่องเชื่อมจ่ายออกมา ซึ่งเป็นกระแสลัดวงจรระหว่างขึ้นงานกับลวดเชื่อม กระแสลัดวงจรนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงจำนวนแรงกับลวดที่ปลายลวดเชื่อม (Pinch force) โดยแรงกับลวดจะเป็นตัวบีบให้ปลายของลวดเชื่อมที่กำลังหลอมเกิดการคอดกั๊วลงกลายเป็นหยดน้ำโลหะแล้วหลุดออกจากปลายของลวดเชื่อมที่ยังไม่หลอม ซึ่งพบว่าถ้าความชันของเส้นโค้งแรงดันอาร์ก-กระแสต่ำ ๆ กระแสลัดวงจรและแรงกับลวดจะสูงกว่าที่ระดับความชันมาก ๆ จะเกิดการอาร์กแบบรุนแรงและมีสะเก็ดโลหะออกมามาก แต่ถ้าความชันของเส้นโค้งมาก กระแสลัดวงจรและแรงกับลวดจะต่ำ มักเกิดปัญหาลวดเชื่อมแข็งตัวติดอยู่กับบ่อหลอมละลาย ดังนั้นช่างเชื่อมจึงต้องเลือกระดับของเส้นโค้งแรงดันอาร์ก-กระแสให้เหมาะสม เพราะจะช่วยให้การอาร์กจะราบเรียบหรือเสถียรภาพการอาร์ก (Arc stability) และได้แนวเชื่อมที่ปราศจากข้อบกพร่องใด ๆ อ้างอิงข้อมูลจาก TC 9-237 Military Welding Textbook (1993)



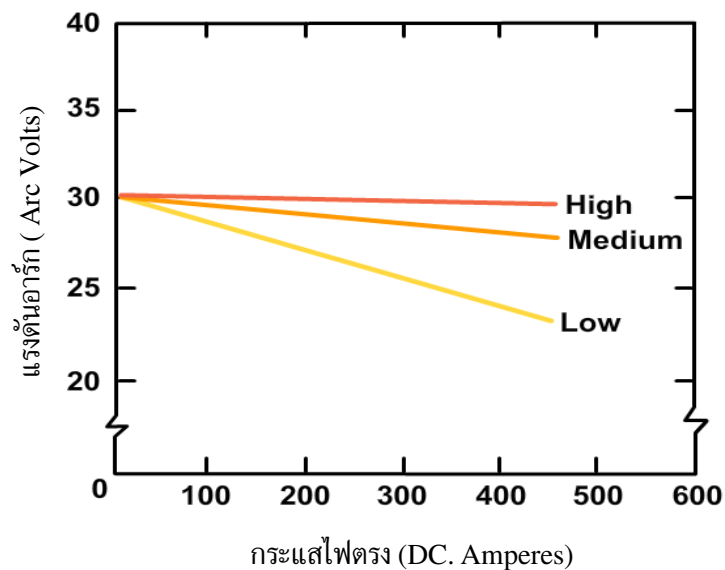
รูปที่ 3.17 เส้นโค้งแรงดันและกระแสของเครื่องเชื่อมชนิดแรงดันคงที่กระแสตรงของการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW)

ที่มา : Welding Theory and Application, TC 9-237, 1993



รูปที่ 3.18 เปรียบเทียบระยะอาร์คที่ต่างกันบนเส้นโค้งแรงดัน-กระแสของเครื่องเชื่อมชนิด CV

ที่มา : LINCOLN ELECTRIC, Process and Theory, 2017



รูปที่ 3.19 ระดับความชันของเส้นโค้งแรงดันและกระแสของเครื่องเชื่อมชนิดแรงดันคงที่

กระแสตรงที่ 500 แอมแปร์ของการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW)

ที่มา : Welding Theory and Application, TC 9-237, 1993

3.2.3 การถ่ายโอนน้ำโลหะ (Weld metal transfer methods)

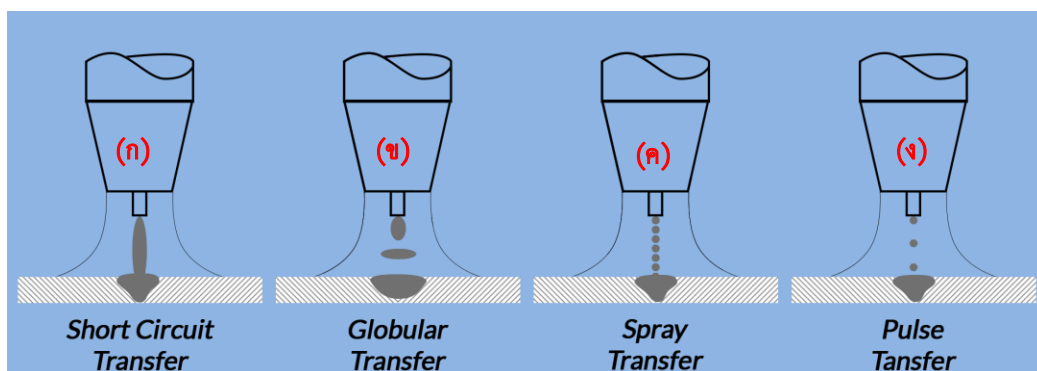
การถ่ายโอนน้ำโลหะของกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กด้วยแก๊สปกคลุม ถือว่าเป็นกลไกและขั้นตอนที่สำคัญในการที่จะนำน้ำโลหะจากการอาร์กที่ปลายของเส้นลวดเชื่อมเป็นหยดหลุดออกไปสู่บ่อหลอมละลายบนผิวชิ้นงาน เพื่อให้เนื้อโลหะติดกันเป็นแนวเชื่อม ซึ่งการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะที่หลุดออกมานี้จะอาศัยปัจจัยของแรงที่มาช่วยกระทำต่อหยดน้ำโลหะที่ปลายของเส้นลวดเชื่อม โดยแรงที่มากระทำดังกล่าว ได้แก่

1. แรงจากความดันพลาสมา (ได้จากความเสียดทานของพลาสมาเจ็ท)
2. แรงกัศที่ปลายเส้นลวดเชื่อม (การทำให้หยดโลหะหลอมเหลวคอดกิ่วลง)
3. แรงจากความดันแก๊สที่ปลายลวดเชื่อม
4. แรงดันจากการที่วัสดุกลายเป็นไอ
5. แรงแม่เหล็กไฟฟ้า
6. แรงโน้มถ่วงของโลก
7. แรงตึงผิว

ซึ่งแรงเหล่านี้จะเป็นปฏิกิริยาสัมพันธ์ร่วมกันกับองค์ประกอบของ ส่วนผสมทางเคมี ชนิดของแก๊สปกคลุม กระแสเชื่อม และรวมถึงขนาดของลวดเชื่อม ซึ่งแสดงไว้ใน BOC. Section 4 (2007)

Zach Guzman (2017) ได้เผยแพร่ข้อมูลรูปแบบวิธีการถ่ายโอนน้ำโลหะของขบวนการเชื่อม GMAW ว่ามีรูปแบบที่แตกต่างกัน 4 แบบ ดังที่กล่าวไว้ข้างล่างนี้ และแสดงรูปแบบกลไกการถ่ายโอนในรูปที่ 3.20 ซึ่งแต่ละรูปแบบจะทำการอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อถัดไป

- ก. การถ่ายโอนแบบลัดวงจร (Short circuit transfer)
- ข. การถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่ (Globular transfer)
- ค. การถ่ายโอนแบบละออง (Spray transfer)
- ง. การถ่ายโอนแบบพัลส์ (Pulsed transfer)

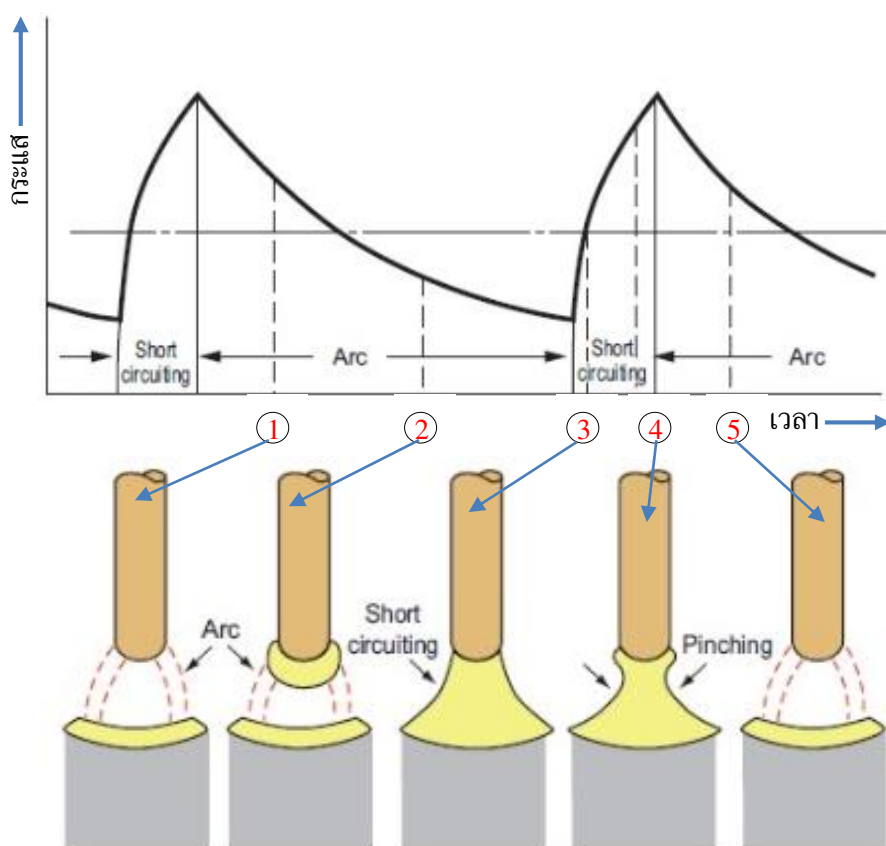


รูปที่ 3.20 ลักษณะรูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

ที่มา : Zach Guzman, MIG Welding Transfer Method, 2017

ก. การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร (Short circuit transfer)

KOBELCO STEEL (2018) ได้นำเสนอถึงแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะที่ช่างเชื่อมนิยมเลือกใช้กัน โดยอาศัยหลักการของการลัดวงจรไฟฟ้า (Short circuit) ซึ่งวัฏจักรการถ่ายโอนจะเริ่มต้นเมื่อปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงานเกิดการอาร์กและมีอุณหภูมิที่สูงมากพอที่ทำให้เกิดหยดน้ำโลหะขนาดเล็กที่ปลายลวด ซึ่งเป็นขณะเดียวกันที่ลวดเชื่อมถูกป้อนวิ่งเข้าสู่บ่อหลอมละลายด้วยอัตราความเร็วสูง ส่งผลให้หยดน้ำโลหะที่ปลายของลวดเชื่อมสัมผัสกับบ่อหลอมละลายก่อนที่จะแยกออกจากปลายของลวดเชื่อม ซึ่งเป็นต้นเหตุของการลัดวงจรไฟฟ้า ทำให้การอาร์กดับไปชั่วขณะ และในจังหวะที่ลัดวงจรอยู่นั้นจะเกิดกระแสที่เพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ปลายของลวดเชื่อมที่กำลังหลอมเป็นหยดน้ำอยู่จะถูกกัดออกแล้วก็ถ่ายโอนหยดโลหะลงสู่บ่อหลอมละลายด้วยอาศัยแรงโน้มถ่วง (Gravity falls) กับแรงตึงผิว (Surface tension) จากกลไกที่เกิดขึ้นดังกล่าว หยดน้ำโลหะที่ปลายของลวดเชื่อมจึงเปรียบเสมือนกับสะพานที่เชื่อมระหว่างช่องว่างของปลายลวดเชื่อมกับบ่อหลอมละลายบนชิ้นงาน เมื่อหยดน้ำโลหะหยดแรกหลุดออกไปจากปลายของลวดเชื่อมแล้ว ก็จะเริ่มต้นอาร์กใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยจังหวะกลไกการถ่ายโอนที่กล่าวมา ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 กลไกการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร

ที่มา : KOBELCO, *Fundamental of MAG Welding (CO₂ Arc Welding)*, 2018

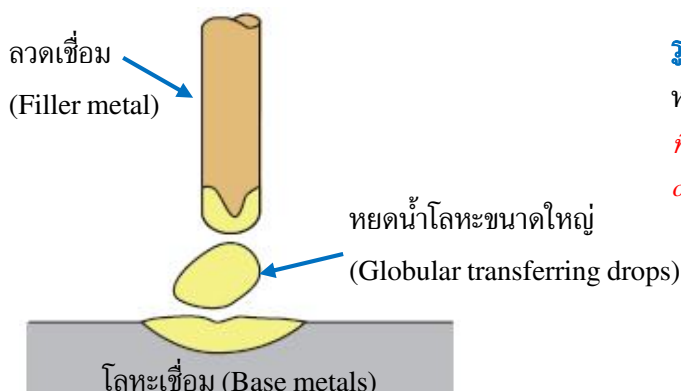
ในขณะที่ปลายของลวดเชื่อมสัมผัสกับบ่อหลอมละลายจะทำหน้าที่เสมือนฟิวส์ไฟฟ้าและเกิดการระเบิดเรียงต่อกันไปด้วยเหตุเพราะกระแสที่เพิ่มสูงขึ้น ผลของการระเบิดก่อให้เกิดช่องว่างอาร์ก (Arc gap) ขึ้นระหว่างปลายของลวดเชื่อมกับผิวของชิ้นงานเพื่อเริ่มต้นการอาร์กใหม่ สภาพการลัดวงจรแบบนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วมาก ซึ่งมีความถี่สูงถึง 20–200 ครั้ง/วินาที ที่ใช้งานกันจริงอยู่ที่ 10–100 ครั้ง/วินาที โดยวัฏจักรการถ่ายโอนในลักษณะดังที่กล่าวมาจะเกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันอย่างต่อเนื่องจนกว่าจะสิ้นสุดการเชื่อม การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจรนี้สามารถเชื่อมงานได้หลายขนาดความหนา โดยเฉพาะถ้าใช้กระแสตรงกลับขั้ว (DCRP) และมีผลกระทบกับชนิดของแก๊สปกคลุมน้อยมาก ส่วนใหญ่นิยมใช้กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 100% และแก๊สผสมอาร์กอน 75% + แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 25% แต่สำหรับกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิม แนะนำให้ใช้แก๊สผสมระหว่าง ฮีเลียม 90% + อาร์กอน 7.5% + คาร์บอนไดออกไซด์ 2.5% ซึ่งคงคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนได้ดีและให้เสถียรภาพของการอาร์กที่ดีกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเดียว

ข. การถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่ (Globular transfer)

เป็นรูปแบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะขนาดใหญ่หรือมีขนาดใหญ่กว่าทุก ๆ แบบ โดยมีวัฏจักรเริ่มต้นที่เมื่อปลายของลวดเชื่อมถูกหลอมจนเป็นหยดน้ำโลหะ และหยดน้ำโลหะที่เริ่มนี้จะก่อดำกันจนมีขนาดโตขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งจะโตกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมประมาณ 1.5 ถึง 2 เท่า ก่อนที่จะหลุดออกไปจากปลายของลวดเชื่อม แล้วถ่ายโอนไปยังบ่อหลอมละลายที่อาศัยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว ซึ่งเป็นอัตราการเติมเนื้อโลหะในแนวเชื่อมที่สูงมากบนระดับของความร้อนค่อนข้างสูงเช่นกัน (สูงกว่าการถ่ายโอนแบบลัดวงจร) การถ่ายโอนแบบนี้จะใช้กระแสและแรงดันเชื่อมค่อนข้างต่ำแต่สูงกว่าแบบลัดวงจร คือ กระแสจะไม่เกินระดับของช่วงกระแสเปลี่ยน (Transition current) ซึ่งพิกัดของกระแสช่วงเปลี่ยนจะเพิ่มจากค่ากระแสต่ำสุดที่ขณะปลายของลวดเชื่อมกำลังหลอมไปถึงจุดที่ค่ากระแสสูงสุด โดยอัตราการถ่ายโอนน้ำโลหะที่กระแสต่ำ ๆ หยดน้ำโลหะก็จะใหญ่ ๆ จะมีเพียงประมาณ 2 ถึง 3 หยดต่อวินาทีเท่านั้น ถ้ากระแสเพิ่มสูงขึ้นขนาดหยดน้ำโลหะก็จะมีขนาดที่เล็กลง

การถ่ายโอนน้ำโลหะสู่บ่อหลอมละลายผ่านการอาร์ก รูปร่างของของหยดน้ำโลหะจะมีรูปทรงไม่สม่ำเสมอของแต่ละหยดและจะหยดแบบเคลื่อนที่หมุนรอบตัวเอง เพราะด้วยอิทธิพลของแรงผลักจากการอาร์ก ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ด้วยสาเหตุจากการที่หยดโลหะกลมไม่เท่ากันจะพบว่า หยดที่มีขนาดใหญ่มากจะไปสัมผัสกับบ่อหลอมละลายก่อนทำให้ไม่เกิดการลัดวงจร การอาร์กจะดับไปชั่วขณะส่งผลให้เสถียรภาพการอาร์กต่ำ ไม่สม่ำเสมอ เกิดการอาร์กผิดพลาดในบางจังหวะและเกิดคลื่นการอาร์ก (Arc wave) ที่รอบ ๆ หยดน้ำโลหะที่ปลายลวดเชื่อมซึ่งเป็นเหตุทำให้เกิดประกายไฟกระเด็นออกมามาก การถ่ายโอนหยดน้ำโลหะขนาดใหญ่จะอาศัยแรงโน้มถ่วงมากกว่าแรงที่เกิดจากการอาร์ก จึงเหมาะกับงานเชื่อมไม่ต้องการคุณภาพแนวเชื่อมที่สูงมาก และเชื่อมได้ดีกับงานเชื่อมที่อยู่ในแนวราบและแนวระดับ ไม่แนะนำในทำเชื่อมเหนือศีรษะ สำหรับกระแสและแรงดันเชื่อมจะใช้ในระดับที่สูงกว่า

รูปแบบการถ่านไอออนแบบลัดวงจร การถ่ายโอนหยดน้ำโลหะขนาดใหญ่จะนิยมใช้เชื่อมโลหะจำพวก เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ คาร์บอนปานกลาง และเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High strength low alloy) โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือผสมกับแก๊สอาร์กอน เป็นผลงานการวิจัยของ Wesley Scott Hunko. Ph.D. (2018)



รูปที่ 3.22 กลไกการถ่ายโอน
หยดน้ำโลหะแบบขนาดใหญ่
ที่มา : KOBELCO, *Fundamental
of MAG Welding, 2018*

ค. การถ่ายโอนแบบละออง (Spray transfer)

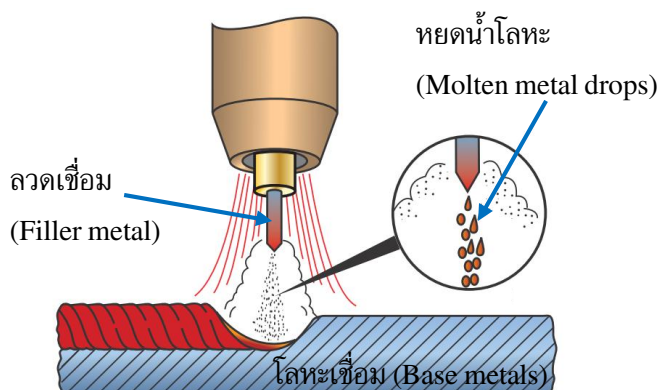
Larry Jeffus (2012) อธิบายไว้ว่ารูปแบบการถ่ายโอนน้ำโลหะที่เป็นหยดโลหะขนาดเล็ก โดยวัฏจักรของการถ่ายโอนจะเริ่มขึ้น เมื่อปลายของลวดเชื่อมถูกหลอมเหลวแล้วเกิดเป็นหยดน้ำเล็ก ๆ ที่เราเรียกว่า ละออง ซึ่งมีขนาดที่เล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อม มีลักษณะ เรียวเล็กตรงบริเวณส่วนที่ต่ออยู่ระหว่างของปลายลวดเชื่อม จากนั้นหยดโลหะนี้ก็จะถูกกดให้หลุด ออก (Pinched-off) จากปลายของลวดเชื่อมด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic forces) อย่าง รวดเร็วผ่านพลาสมาอาร์กสู่บ่อหลอมละลายอย่างคงที่และต่อเนื่องตลอดเวลาที่กระแสไฟเชื่อมยังไหล ผ่านลวดเชื่อมอยู่ ดังแสดงกลไกการถ่ายโอนในรูปที่ 3.23

การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละอองนี้จะอาศัยความหนาแน่นของกระแสไฟเชื่อมที่สูง ที่เจตนา ต้องการให้เกิดการหลอมของลวดเชื่อมที่รวดเร็วและมีขนาดหยดที่เล็ก ๆ ซึ่งส่งผลดีต่อความสม่ำเสมอ ของการอาร์ก (แตกต่างจากการถ่ายโอนแบบหยดขนาดใหญ่) ทิศทางการหยดของน้ำโลหะก็มุ่งตรง ศูนย์กลางของบ่อหลอมละลาย ควบคุมทิศทางได้ง่ายตามต้องการ ถึงแม้จะเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีขนาด ใหญ่ก็สามารถหลอมเป็นหยดเล็ก ๆ ได้ทันทีและรวดเร็ว เพราะปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่งาน ค่อนข้างสูง (High heat input) ทำให้การถ่ายโอนแบบนี้เชื่อมแนวซึมลึกได้ดี

แก๊สปกคลุมสำหรับการถ่ายโอนแบบละอองนี้จะนิยมเลือกใช้แก๊สผสมระหว่างแก๊สอาร์กอนกับ แก๊สออกซิเจน เช่น 95% Ar + 5%O หรือ 98% Ar + 2%O หรือ 99% Ar + 1%O โดยแก๊สอาร์กอนมี ข้อดีช่วยให้หยดน้ำโลหะเกิดเป็นเม็ดกลมและมีขนาดเล็ก ๆ แบบละออง พร้อมกับช่วยเสริมแรงกักหยด น้ำโลหะให้หลุดออกจากปลายลวดเชื่อมได้ง่ายขึ้น ส่วนแก๊สออกซิเจนส่งเสริมให้การอาร์กเสถียรมาก ยิ่งขึ้น และลดการเกิดประกายไฟที่กระเด็นออกมา สร้างการซึมลึกได้เป็นวงกว้างพร้อมกับลด

ข้อบกพร่องแบบรอยกัดแหงนได้ดี (Undercutting) แต่ถ้าผสมในปริมาณที่มากเกินไป (เกิน 5%) จะสร้างปัญหาเกิดรูพรุนในแนวเชื่อมได้

การถ่ายโอนแบบละอองนี้สามารถใช้กับการเชื่อมโลหะทุกชนิดไม่ว่าจะเป็น เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสม เหล็กกล้าไร้สนิม รวมถึงโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียม ไทเทเนียม เป็นต้น แต่ไม่เหมาะกับโลหะแผ่นบางเพราะอาจเกิดการหลอมทะลุได้ง่าย (Burn-through) ต้องหนา มากกว่า 3.2 มิลลิเมตร และนอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมได้กับทุกชนิดของรอยต่อ สำหรับกรณีที่มี รอยต่อที่มี ช่องทางของฐานรอยต่อ (Root opening) ที่กว้างมากต้องใช้แผ่นรองเชื่อมด้านหลังช่วยไม่ให้หยดน้ำ โลหะไหลทะลุผ่านรอยต่อลงไปที่ด้านล่าง



รูปที่ 3.23 กลไกการถ่ายโอน

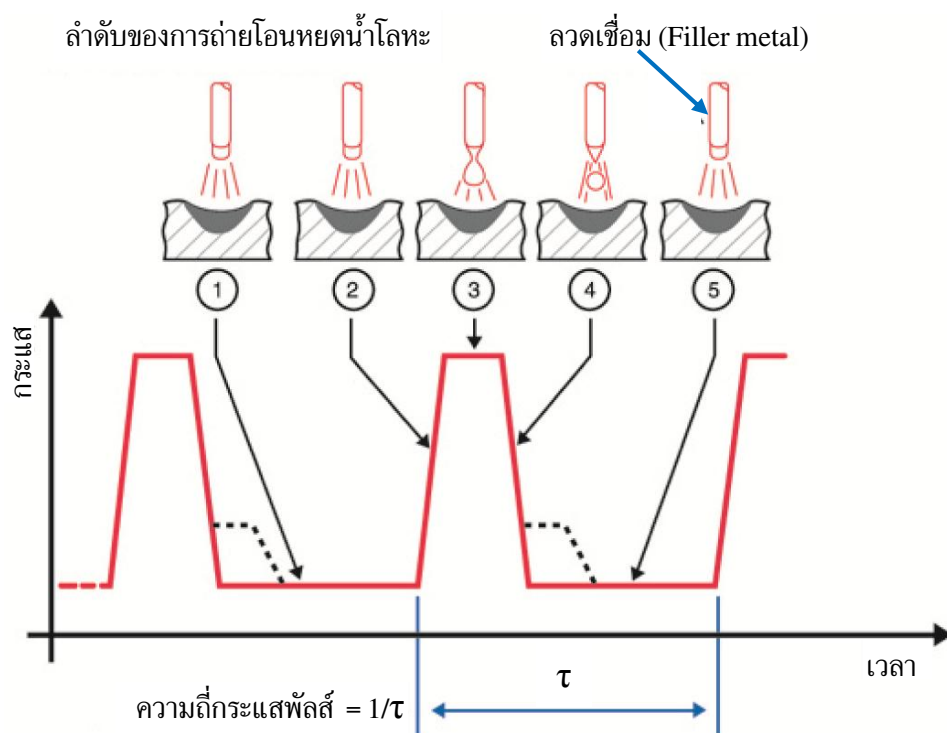
หยดน้ำโลหะแบบละออง

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metal Fabrication*, 2012

ง. การถ่ายโอนแบบพัลส์ (Pulsed transfer)

Ramesh Singh (2015) อธิบายถึงหลักของการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบพัลส์นี้ว่าเป็นแบบที่พัฒนาขึ้นมาจากรูปแบบการถ่ายโอนแบบละออง โดยนำเอากระบวนการเชื่อมแบบพัลส์กระแสเชื่อมมาใช้ร่วมกัน ดังแสดงกลไกการถ่ายโอนในรูปที่ 3.24 เนื่องจากขีดจำกัดของการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบละอองจะไม่สามารถเชื่อมโลหะแบบบางได้ ซึ่งการพัลส์ของกระแสเชื่อมจากระดับต่ำสุดถึงระดับสูงสุดที่ 60 รอบ/วินาที จังหวะการพัลส์แต่ละครั้งจะทำให้ปลายของลวดเชื่อมหลอมละลายเป็นหยดโลหะได้หนึ่งหยด แล้วถ่ายโอนผ่านการอาร์กสู่บ่อหลอมละลายด้วยความถี่ที่สม่ำเสมออย่างต่อเนื่อง โดยการตั้งระบบพัลส์กระแสเชื่อมที่ระดับกระแสต่ำสุดให้อยู่ในช่วงของการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบละออง ส่วนการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดจะตั้งไว้ที่ระดับกระแสสูงสุด หลังจากถ่ายโอนแบบหยดแล้ว กระแสก็จะลดต่ำลงสุดถึงระดับที่ตั้งไว้ ซึ่งกระแสต่ำนี้จะช่วยให้การอาร์กยังคงเกิดอยู่ตลอดเวลา ช่วงจังหวะนี้จะไม่มีการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะ ผลของการพัลส์กระแสที่สูงแล้วต่ำลงจะมีผลต่อการควบคุมปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อม ด้วยการเฉลี่ยความร้อนให้ต่ำกว่าการถ่ายโอนแบบละออง จึงสามารถนำไปใช้กับการเชื่อมโลหะแผ่นบางที่เชื่อมแล้วไม่ทะลุ เชื่อมรอยต่อที่มีระยะห่างมาก ๆ ได้ และลดการบิดตัวของชิ้นงานเชื่อม สามารถใช้เชื่อมลวดที่มีขนาดใหญ่ที่มีการถ่ายโอนผ่านอาร์กที่เป็นหยดโลหะขนาดเล็กได้ ซึ่งเป็นการประหยัดลวดเชื่อม

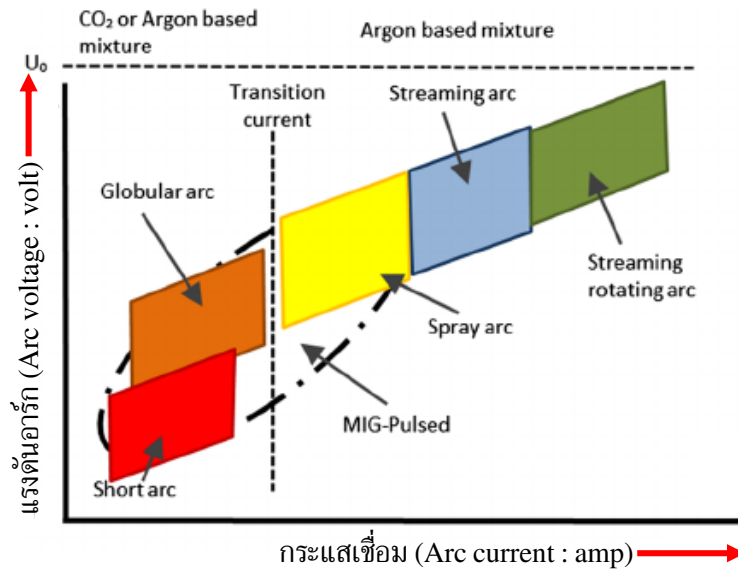
การเชื่อมด้วยกระแสพัลส์ด้วยการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบพัลส์สามารถเชื่อมได้กับโลหะทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็น โลหะจำพวกเหล็กหรือนอกกลุ่มเหล็ก เพราะสามารถควบคุมปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานได้ เชื่อมได้กับทุกชนิดรอยต่อ บ่อหลอมละลายแข็งตัวเร็วเหมาะกับการเชื่อมที่เสี่ยงต่อการทะลุ ส่วนแก๊ส สำหรับปกคลุมใช้ได้เฉพาะแก๊สเฉื่อยหรือแก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับฮีเลียม ไม่แนะนำให้ใช้แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์เพราะจะไปทำให้แรงที่จะกักหยดโลหะให้หลุดออกจากปลายลวดเชื่อมลดน้อยลง แรงดึงผิวจะสูงขึ้นและมีประกายไฟกระเด็นออกมามาก



รูปที่ 3.24 กลไกการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบพัลส์

ที่มา : TELWIN, *Easy Welding with Excellent Results*, 2018

จากลักษณะรูปแบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะทั้ง 4 แบบ ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะเห็นได้ชัดเจนว่าจะ มีความสัมพันธ์กับปัจจัยของกระแสเชื่อม แรงดันเชื่อม ขนาดของลวดเชื่อม และชนิดของแก๊สปกคลุม ซึ่งผู้เขียนได้พยายามสรุปเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบการถ่ายโอนหยดน้ำ โลหะทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับบทความที่รวบรวมโดย Paul Kah et al. (2014) ดังแสดงในรูปที่ 3.25 ที่ ได้ทำการสืบค้นและจัดทำเป็นผลสรุปที่สามารถเห็นภาพโดยรวมว่ากลไกการถ่ายโอนน้ำโลหะจากการ หลอมละลายของลวดเชื่อมไปยังบ่อหลอมละลายแต่ละแบบเป็นอย่างไรเมื่อเปรียบเทียบกัน และทำให้ ทราบว่าปัจจัยการเชื่อมตัวใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อการชนิดของการถ่ายโอนน้ำโลหะ



รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ของรูปแบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะกับปัจจัยการเชื่อม

ที่มา : Paul Kah et.al., Usability of arc types in industrial welding, 2014

3.2.4 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเชื่อม (Welding equipment)

กรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW) เป็นกระบวนการเชื่อมที่พัฒนาขึ้นมาจากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) โดยได้สร้างชิ้นส่วนและอุปกรณ์ขึ้นมาควบคุมการเชื่อมจำนวนหลายชิ้น เพื่อให้สามารถเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น เชื่อมได้รวดเร็วและต่อเนื่องไม่ต้องหยุดเปลี่ยนลวดเชื่อม ลดปัญหาที่เกิดจากแสง สามารถเชื่อมด้วยระบบอัตโนมัติได้ ลดต้นทุนการใช้แรงงานช่างเชื่อม ด้วยขีดความสามารถของการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นของกรรมวิธีการเชื่อมวิธีนี้จึงประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญ ๆ ที่จำเป็น ดังต่อไปนี้

ก. เครื่องเชื่อม (Welding machine)

ข. ชุดอุปกรณ์ป้อนลวด (Wire feeder equipment)

ค. หัวเชื่อมและสายเชื่อม (Welding gun and welding cables)

ง. อุปกรณ์ควบคุมแก๊สปกคลุมและอุปกรณ์อื่น ๆ (Shielding gas equipment and other)

โดยอุปกรณ์แต่ละส่วนจะมีระบบหน้าที่การทำงานที่สัมพันธ์ ซึ่งจะได้อธิบายถึงส่วนประกอบและบทบาทหน้าที่ของอุปกรณ์แต่ละส่วน รวมถึงส่วนประกอบย่อยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

ก. เครื่องเชื่อม (Welding machine)

เป็นอุปกรณ์หลักที่สำคัญ ทำหน้าที่เป็นแหล่งต้นกำลัง (Power source) ของการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ในการอาร์กเชื่อม ซึ่งมีทั้งรองรับกับระบบไฟฟ้า 200 และ 380 โวลต์ และมีทั้งแบบไฟฟ้าเฟสเดียว และ สามเฟส ที่ความถี่ 50 หรือ 60 เฮิร์ตซ์ โดยที่ตัวของเครื่องเชื่อมจะมีหน้าปัดชุด

ควบคุมที่ช่างเชื่อมสามารถป้อนข้อมูลปัจจัยการเชื่อมสั่งการผ่านปุ่มต่าง ๆ หรืออาจมีชุดระบบสั่งการผ่านรีโมทควบคุม ขึ้นอยู่กับรุ่นและยี่ห้อของเครื่องเชื่อม เป็นที่ทราบกันดีว่าความสามารถของเครื่องเชื่อมวัดได้จากวัฏจักรทำงาน (Duty cycle) โดยทั่วไปเครื่องเชื่อมแบบกระแสคงที่ (Constant current) จะมีวัฏจักรทำงานทำงานค่อนข้างต่ำ เป็นเครื่องเชื่อมที่ใช้กับการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) และการเชื่อมอาร์กด้วยลวดทังสเตน (GTAW) ส่วนเครื่องเชื่อมสำหรับการเชื่อมแบบบออาร์ก โลหะแก๊สปกคลุมนี้จะเป็นเครื่องเชื่อมแบบแรงดันคงที่ (Constant voltage) ซึ่งมีวัฏจักรทำงานที่สูงถึง 100 % นั่นหมายความว่า เครื่องเชื่อมสามารถทำการเชื่อมได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องมีเวลาหยุดพัก จะเหมาะกับการนำไปใช้ในระบบการเชื่อมแบบอัตโนมัติ และสามารถเชื่อมกับทุกรูปแบบของการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะ เพราะมีความชันของกระแสต่ำ นอกจากนี้เครื่องเชื่อมแบบแรงดันคงที่ยังสามารถทำให้เกิดกระแสสั่นไหวสูง และเป็นไปอย่างสม่ำเสมอเมื่อลวดเชื่อมสัมผัสกับโลหะงาน พร้อมทั้งช่วยขจัด การหลอมย้อน (Burn back) ของลวดเชื่อมที่จะเกิดการหลอมติดกับปลายท่อนำกระแสในกรณีที่ยาระยะอาร์กมากเกินไป

Lincoln Electric (2021) นำเสนอข้อมูลผลิตภัณฑ์เครื่องเชื่อมไว้ว่า เครื่องเชื่อมชนิดแรงดันคงที่สำหรับการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมนี้ จะมีความสามารถที่จะปรับระยะอาร์ก ปริมาณกระแส และ อัตราเร็วของการป้อนลวด ให้เหมาะสมได้เองโดยอัตโนมัติ ที่เรียกกันว่า เครื่องสามารถช่วยเหลือตัวเองได้ กล่าวคือ ถ้าขณะทำการเชื่อมระยะอาร์กน้อยเกินไป กระแสจะเพิ่มขึ้นอัตโนมัติ ลวดเชื่อมจะมีอัตราการสิ้นเปลืองที่มากกว่า อัตราการป้อนลวดเชื่อม ซึ่งเครื่องเชื่อมจะปรับพารามิเตอร์เองจนเหมาะสม หรือในทางกลับกันถ้าระยะอาร์กมากเกินไป กระแสไฟจะลดลงเองอย่างอัตโนมัติ อัตราการเร็วป้อนลวดเชื่อมก็จะเร็วกว่าอัตราการสิ้นเปลืองของลวดเชื่อม เครื่องเชื่อมก็จะปรับเองโดยอัตโนมัติ เช่นกัน ผู้ผลิตเครื่องเชื่อมได้ออกแบบระบบของเครื่องให้สามารถเลือกกระแสไฟเชื่อมได้ทั้ง ชนิด กระแสตรงชั่วลบต่อกับลวดเชื่อม (DCEN) ชนิดกระแสตรงชั่วบวกต่อกับลวดเชื่อม (DCEP) ไม่แนะนำให้เลือกใช้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับเหตุผลเพราะลักษณะการเป็นวัฏจักรของกระแสต่ำ ทำให้อัตราการสิ้นเปลืองของลวดเชื่อมไม่สม่ำเสมอขณะทำการเชื่อม แต่แนะนำให้ใช้ระบบกระแสไฟตรงแบบพัลส์ (Pulsed direct current) ซึ่งปกติเครื่องเชื่อมรุ่นใหม่ออกแบบให้มีระบบพัลส์อยู่แล้วภายในเครื่องเชื่อมเพียงเครื่องเดียว เครื่องเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมจะใช้ชนิดกระแสไฟตรง แบบแรงดันคงที่ โดยจะได้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่ง คือ

1. แหล่งพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องปั่นไฟที่เรียกกันว่า เครื่องเชื่อมแบบมอเตอร์-เจนเนอเรเตอร์ (Motor-Generator welding machine) เป็นเครื่องเชื่อมที่ได้รับไฟฟ้ากระแสตรงจากการปั่นของมอเตอร์ไฟฟ้า หรือกรณีกับงานภาคสนามในสถานที่ปฏิบัติงานไม่มีระบบไฟฟ้ารองรับ จะได้รับจากเครื่องยนต์ปั่นกระแสไฟตรงที่ติดตั้งไว้ในตัวของเครื่องเชื่อม นิยมและจำเป็นอย่างมากกับงานในงานภาคสนาม แต่มีข้อด้อยที่เครื่องมีเสียงดัง ราคาค่อนข้างแพง ใช้กำลังไฟฟ้ามาก ค่าบำรุงรักษาสูง สามารถเป็นได้ทั้งเครื่องเชื่อมแบบแรงดันคงที่ (Constant- voltage welding machine) และเครื่องเชื่อมแบบ

กระแสคงที่ (Constant– current welding machine) ดังแสดงลักษณะรูปแบบตัวอย่างของเครื่องในรูปที่ 3.26 (ก)

2. แหล่งพลังงานระบบของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่าเครื่องเชื่อมหม้อแปลง (Transformer welding machine) มีทั้งชนิดหนึ่งเฟสและสามเฟส เป็นเครื่องเชื่อมที่นิยมเลือกใช้ในการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม โดยกระแสจะถูกจ่ายตรงเข้าสู่ขบวนการอาร์ก ไม่นิยมเลือกใช้ระบบหนึ่งเฟส เพราะมีวัฏจักรทำงานได้เพียง 60% เท่านั้น และไม่สามารถสร้างรูปแบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบลัดวงจรได้ ดังนั้นจึงมักพบเห็นช่างเชื่อมนิยมเลือกใช้งานเครื่องเชื่อมหม้อแปลงระบบสามเฟส ที่มีการป้อนกระแสไฟตรงเข้าสู่การอาร์กอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งระบบหม้อแปลงนี้สามารถเป็นได้ทั้งเครื่องเชื่อมแบบแรงดันคงที่ (Constant– voltage welding machine) และเครื่องเชื่อมแบบกระแสคงที่ (Constant– current welding machine) อยู่ในเครื่องเดียวกัน จึงสามารถใช้เชื่อมกับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ได้ เพียงแค่เปลี่ยนหัวของสายเชื่อมเท่านั้น การที่มีระบบไฟฟ้าสามเฟสจะมีช่วยส่งเสริมเสถียรภาพการอาร์กสูงกว่าหนึ่งเฟสและสามารถช่วยให้ชุดป้อนลวดมีอัตราการป้อนลวดที่คงที่ เพราะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสเชื่อม น้อยมาก ดังแสดงลักษณะรูปแบบตัวอย่างของเครื่องในรูปที่ 3.26 (ข)



(ก) เครื่องเชื่อมแบบมอเตอร์-เจนเนอเรเตอร์

ที่มา : Lincoln Electric, Welding Machine, 2018



(ข) เครื่องเชื่อมแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

ที่มา : Laston, Welding Machine, 2019

รูปที่ 3.26 ชนิดเครื่องเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW)

การควบคุมระบบการทำงานของเครื่องเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมจะมีปุ่มปรับต่าง ๆ ที่ตำแหน่งตัวเครื่อง บนหัวเชื่อม และบนชุดป้อนลวดเชื่อมหรือกล่องควบคุม (Control box) หรือบางรุ่นของเครื่องสามารถควบคุมด้วยรีโมท (Remote control) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเครื่องเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติที่ช่างเชื่อมอยู่ในระยะใกล้ การควบคุมผ่านระบบสั่งการเพื่อต้องการควบคุมปัจจัยการเชื่อมที่สำคัญได้แก่

– การควบคุมแรงดัน สามารถหมุนปรับเป็นขั้น ๆ (Tapped) ส่วนมาก มีประมาณ 7 ขั้นตอน ความละเอียดของการปรับจึงไม่ค่อยละเอียด หรือต่อเนื่องได้จากชุดแผงควบคุมที่อยู่หน้าตัวเครื่องเชื่อม ซึ่งจะ

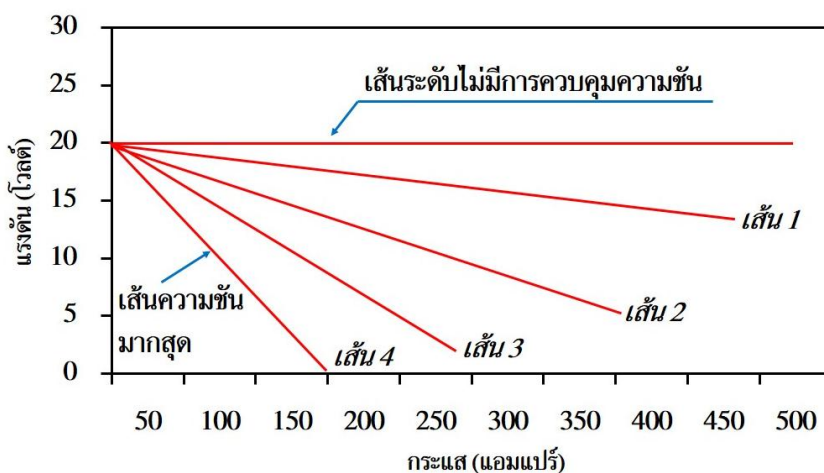
สามารถปรับได้ค่อนข้างละเอียดมากกว่า

– *การควบคุมกระแส* เครื่องเชื่อมแบบแรงดันคงที่ไม่สามารถตั้งปรับกระแสได้โดยตรง แต่จะได้จากการตั้งอัตราความเร็วป้อนลวดเชื่อมจากชุดอุปกรณ์ป้อนลวดได้

– *การควบคุมความชัน* สามารถควบคุมได้จากปุ่มปรับที่หน้าตัวเครื่องเชื่อมจะใช้ควบคุมความชันของเส้นโค้งแรงดัน-กระแส โดยทั่วไปเครื่องเชื่อมมีการควบคุมความชันอยู่ 2 ชนิด คือ

1. เครื่องเชื่อมชนิดที่มีความชันคงที่ (Fixed – slope welding machines) เป็นเครื่องเชื่อมที่จะใช้กับการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม ที่มีการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบละออง นิยมใช้เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งความชันจะถูกออกแบบไว้คงที่แน่นอนแล้วในตัวเครื่องไม่ต้องปรับแต่งใด ๆ

2. เครื่องเชื่อมชนิดที่มีความชันแปรผัน (Variable – slope welding machines) เป็นเครื่องเชื่อมที่สามารถปรับระดับความชันของเส้นโค้งแรงดัน-กระแสได้ตามต้องการ ทำให้เครื่องเชื่อมชนิดนี้สามารถเชื่อมได้หลากหลายทั้งชนิดของโลหะเชื่อม (Material metals) และขนาดของลวดเชื่อม (Wire electrode diameter) ดังรูปแบบการปรับแสดงในรูปที่ 3.27 โดยมีความหมายดังนี้ ถ้าปรับจากแนวระดับลงมาเป็นขึ้น ๆ จะทำให้เกิดการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบลัดวงจรที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นและเสถียรมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อลดต่ำลงมามากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ช่างช่วยลดความรุนแรงของการอาร์ก เม็ดโลหะกระเด็นรอบข้าง แนวเชื่อมน้อยลง เหมาะสมอย่างยิ่งกับการเชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งได้แสดงไว้ในผลการวิจัยของผู้เขียน วารสาร Advance joining processes : Vol.1, (2020)

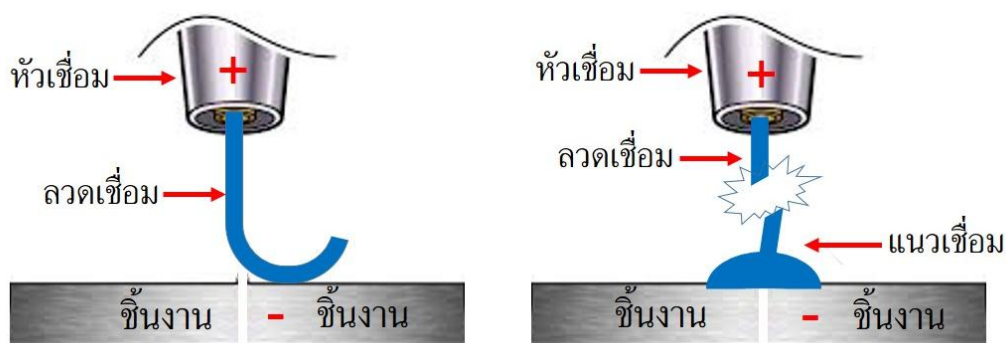


รูปที่ 3.27 รูปแบบการปรับเส้นความชันแรงดัน-กระแสของเครื่องเชื่อมชนิดความชันแปรผัน

ที่มา : Larry Jeffus and Lawrence Bower, 2010 (เขียนใหม่)

จากรูปแบบของการปรับเส้นความชันในรูปที่ 3.27 Larry Jeffus et al. (2010) ได้อธิบายความหมายไว้ว่า เส้นระดับที่ไม่มีความชันเมื่อทำการเชื่อมจะเกิดการอาร์กที่รุนแรง เนื่องจากเกิดการหลอมที่รวดเร็วโดยเฉพาะการเชื่อมด้วยลวดขนาดเล็ก ๆ ซึ่งเครื่องเชื่อมก็จะเพิ่มกระแสสูงขึ้นอย่าง

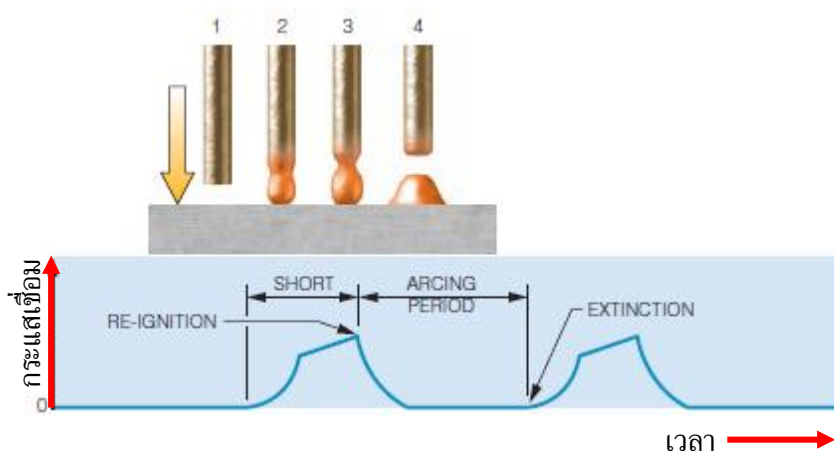
อัตราเร็วส่งผลให้เกิดการระเบิดขึ้นที่ปลายของลวดเชื่อมทำให้เกิดมีเม็ดโลหะกระเด็นออกมาข้างแนวเชื่อม แต่เมื่อทำการปรับเส้นความชันลดลงมาตำแหน่ง เส้น 2 และ 3 จะสามารถช่วยลดปริมาณกระแสไฟเชื่อมลง ประสิทธิภาพของการเชื่อมก็จะดีขึ้นตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามถ้าปรับลดมากเกินไปจนถึง เส้น 4 ที่ความชันมากที่สุด (Steep slope) ก็ไม่เป็นผลดี เหตุเพราะกระแสไฟเชื่อมจะต่ำมากเกินไปจนไม่มากพอที่จะสร้างหยดน้ำโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการถ่ายโอนแบบลัดวงจรปลายลวดเชื่อมจะติดแข็งกับผิวชิ้นงานเชื่อม โดยปลายของลวดเชื่อมก็เกิดการโค้งงอขณะป้อนออกมาจากชนกับผิวโลหะชิ้นงาน ก่อนที่จะหลอมแล้วขาดออกไปที่ซึ่งยังส่วนที่ยังไม่หลอมละลายติดอยู่กับบ่อหลอมละลายบนชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.28



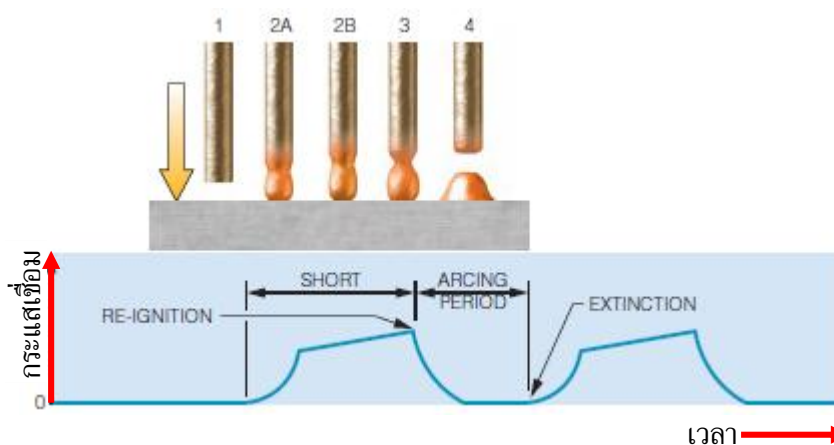
รูปที่ 3.28 ลักษณะพฤติกรรมของลวดเชื่อมที่เกิดจากการปรับเส้นโค้งความชันมากเกินไป

ที่มา : Lincoln Electric , Modes of metal transfer 2015 (เขียนใหม่)

– การควบคุมความเหนี่ยวนำ เครื่องเชื่อมมีระบบความเหนี่ยวนำ (Inductance) หรือบางครั้งเรียกว่า การหน่วงกระแส เพื่อใช้ควบคุมอัตราของกระแสที่เพิ่มขึ้น (Rate of current rise) ไม่ให้เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันในขณะลัดวงจร ซึ่งความเหนี่ยวนำนี้จะมีผลสำคัญต่อการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะแบบลัดวงจร เพราะจะเป็นตัวเพิ่มเวลาของการอาร์กส่งผลให้การลัดวงจรต่อวินาทีลดลง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ช่วยให้ระบบการอาร์กขณะเชื่อมนิ่ง หรือเสถียรมากมากขึ้น (Soft arc) และสามารถสร้างบ่อหลอมละลาย (Weld pool) ได้ง่ายขึ้น การซึมลึกก็ดีขึ้น (Penetration) เม็ดโลหะกระเด็นออกมาน้อย โดยได้แสดงกลไกความเหนี่ยวนำโดยเฉลี่ยดังในรูปที่ 3.29 (ก) ส่วนรูป (ข) เป็นการแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในกรณีที่มีความเหนี่ยวนำที่เพิ่มสูงขึ้น (Increased inductance) ความเหนี่ยวนำของเครื่องเชื่อมที่กล่าวถึงนี้จะควบคุมชนิดกระแสไฟตรง จึงไม่มีผลต่อการตั้งค่าแรงดันหรือการควบคุมความชันของเครื่องเชื่อมแต่อย่างใด อ้างอิงข้อมูลจาก Michael A. Reeser (2017)



(ก) รูปแบบกลไกความเหนี่ยวนำโดยเฉลี่ย (Average inductance)



(ข) รูปแบบกลไกความเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้น (Increased inductance)

รูปที่ 3.29 รูปแบบกลไกความเหนี่ยวนำ (Inductance) ของเครื่องเชื่อม

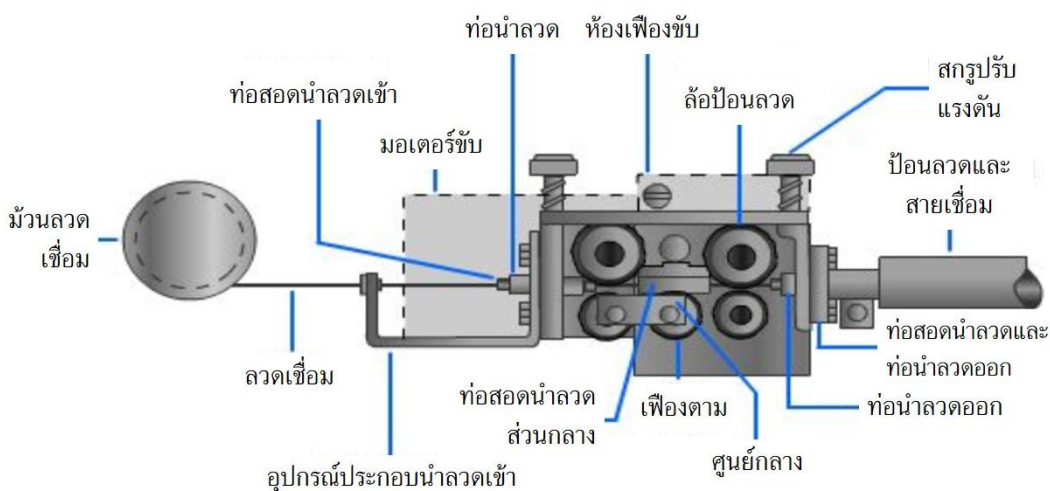
ที่มา : Weld knowledge, 2015

ข. ชุดอุปกรณ์ป้อนลวด (Wire feeder equipment)

กรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมจำเป็นต้องมีชุดอุปกรณ์ป้อนลวดเชื่อม โดยลวดเชื่อมจะมีลักษณะเป็นเส้นลวดกลมที่มีม้วนบรรจุอยู่ในชุดของล้อม้วนลวดเชื่อม (Wire roll) การดึงเส้นลวดเชื่อมออกจากม้วนลวดอาศัยกำลังจากมอเตอร์ เพื่อขับเคลื่อนผ่านท่อนำลวดและหัวเชื่อม ออกมาอาร์กกับชิ้นงาน ซึ่งระบบของชุดอุปกรณ์การป้อนลวด ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของระบบควบคุมการป้อนลวดเชื่อม กับส่วนของชุดล้อขับเคลื่อนลวดเชื่อม ซึ่งส่วนประกอบของทั้งสองส่วนดังแสดงในรูปที่ 3.30 ระบบป้อนลวดส่วนใหญ่ที่ใช้กับการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม มักเป็นชนิดอัตราเร็วคงที่ (Constant speed) ซึ่งใช้กับเครื่องเชื่อมแบบแรงดันคงที่ นั่นหมายถึงว่าอัตราความเร็ว

ป้อนลวดเชื่อมจะถูกกำหนดก่อนทำการเชื่อม อัตราเร็วป้อนลวดเชื่อมจะเป็นตัวควบคุมจำนวนกระแสเชื่อม และกระแสเชื่อมจะเป็นตัวกำหนดปริมาณความร้อนที่เกิดจากการอาร์ก

อัตราเร็วของการป้อนลวดเชื่อมที่ดีต้องสม่ำเสมอ ถ้าไม่สม่ำเสมอจะมีผลกระทบต่อการซึมลึก และขนาดของแนวเชื่อม ดังนั้นการออกแบบมอเตอร์จึงต้องให้สามารถควบคุมอัตราความเร็วให้เท่ากันตลอด ถึงแม้จะมีการไหลตมากระทำต่อมอเตอร์หรือมีแรงดันกระแสเพื่อเข้าสู่มอเตอร์ก็ตาม สำหรับกรณีเลือกใช้เครื่องเชื่อมกระแสคงที่ อัตราเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างอัตโนมัติตามการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอัตราเร็วป้อนลวดเชื่อม ขณะที่ความยาวอาร์กเปลี่ยนไปแต่แรงดันยังคงที่ตลอดเวลา

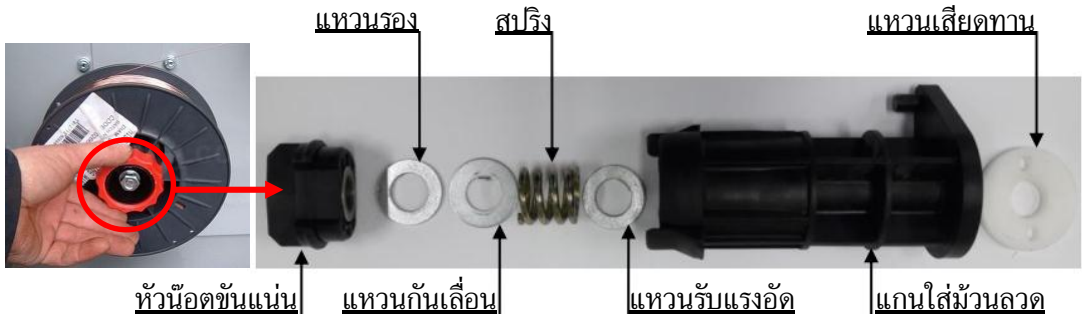


รูปที่ 3.30 ชุดอุปกรณ์ป้อนลวด (Wire feeder equipment)

ที่มา : *Welding Theory and Application, TC 9-237, 2013*

ชุดอุปกรณ์ป้อนลวด มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่

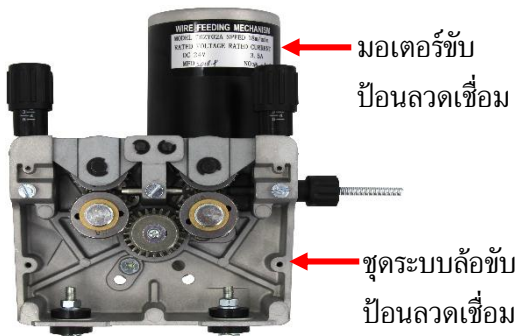
1. **ม้วนลวดเชื่อม** เป็นส่วนบรรจุเส้นลวดเชื่อมไว้ในล้อม้วนซึ่งมีน้ำหนักในตัวเอง ดังนั้นขณะทำการหมุนเอาปลายลวดเข้าสู่ท่อนำลวดจะเกิดแรงเฉื่อยขึ้น ต้องระวังให้จังหวะการหยุดของม้วนลวดเชื่อมสัมพันธ์กันกับล้อขับเคลื่อนลวดเชื่อม เพื่อป้องกันลวดเชื่อมคุดออกจากม้วน หรือป้องกันลวดเชื่อมจะยังป้อนต่อไปอีกไม่หยุด จึงจำเป็นต้องมีระบบเบรคไว้สำหรับเบรคแรงเฉื่อยของม้วนลวดเชื่อม ซึ่งระบบเบรคสามารถปรับความฝืดได้โดยอาศัยแรงกดจากสปริงที่ไปดันแฉกเสียดทาน ก็จะเกิดสภาพความฝืดขึ้นที่ผิวของเส้นลวดเชื่อม ซึ่งเครื่องเชื่อมทุกเครื่องจะมีชุดอุปกรณ์เบรคนี้อยู่ภายในชุดอุปกรณ์ป้อนลวด ส่วนประกอบของม้วนลวดเชื่อมและระบบเบรคลวดเชื่อมประกอบด้วยชิ้นส่วนเล็ก ๆ หลายชิ้นที่สามารถถอดเปลี่ยนประกอบได้ไม่ยาก ช่างเชื่อมสามารถทำได้เองและไม่เกิดอันตรายใด ๆ ดังแสดงจำนวนชิ้นส่วนและลำดับตำแหน่งของการประกอบชิ้นส่วน ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 ม้วนลวดเชื่อมและระบบเบรก

ที่มา : *Welding equipment and application, 2013*

2. **มอเตอร์ป้อนลวดเชื่อม** เป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับการควบคุมอัตราเร็วป้อนลวดเชื่อม โดยจะควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งติดตั้งอยู่กับชุดระบบล้อขับป้อนลวดเชื่อม ดังแสดงใน **รูปที่ 3.32** เพื่อที่จะทำให้อัตราการป้อนลวดคงที่ เพราะถ้าไม่คงที่ จะส่งผลให้กระแสไฟเชื่อมไม่คงที่ ภายในระบบของมอเตอร์จะมีอุปกรณ์เบรกไม่ให้ป้อนลวดเชื่อมออกมาโดยไม่จำเป็นขณะสิ้นสุดการเชื่อม และยังมีระบบชุดวงจรลอมย้อน (Burn back) เพื่อให้กระแสเชื่อมยังคงที่ พร้อมกับช่วยให้ปลายลวดเชื่อมเมื่อหยุดป้อนแล้วมีปริมาณการลอมย้อนที่แน่นอนปริมาณหนึ่ง ทำให้ง่ายต่อการเริ่มต้นเชื่อม



รูปที่ 3.32 มอเตอร์ขับป้อนลวดเชื่อม

ที่มา : *Lincoln Electric, Welding Machine, 2016*

3. **ลวดตัดลวดเชื่อม** เป็นส่วนที่ใช้ทำการตัดลวดเชื่อมให้ตรงพร้อมที่จะป้อนเข้าสู่หัวเชื่อม (สำหรับลวดเชื่อมที่อ่อนอาจไม่จำเป็นต้องใช้) ซึ่งอาจเป็นชุดเดียวกันกับล้อขับป้อนลวด ส่วนใหญ่เป็นแบบ 3 ล้อ มีร่องเป็นแบบครึ่งวงกลมตัวยู โดย 2 ล้อจะทำการติดตั้งตายตัว ส่วนอีก 1 จะสามารถปรับขึ้นลงได้ระหว่างล้อทั้งสอง เหมาะสำหรับเส้นลวดเชื่อมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่โตกว่า 1.2 มิลลิเมตร และความฝืดของท่อนำลวดและท่อนำกระแสต้องไม่มากเกินไป

4. **ล้อป้อนลวดเชื่อม** เป็นส่วนอุปกรณ์ทำหน้าที่ขับเคลื่อนลวดเชื่อมออกจากม้วนลวดแล้วผลักดันผ่านท่อนำลวดเข้าสู่หัวเชื่อม ล้อป้อนลวดจะติดอยู่กับมอเตอร์เพื่อหมุนลวดเชื่อม ซึ่งล้อป้อนลวด

เชื่อมนี้จะต้องเปลี่ยนตามขนาดความโตของลวดและชนิดของวัสดุลวดเชื่อม โดยล้อป้อนลวดจะวางเรียงกันเป็นคู่ ซึ่งมีทั้งแบบชนิด 2 ล้อ (1 คู่) และแบบชนิด 4 ล้อ (2 คู่) จะขึ้นอยู่กับแต่ละรุ่นของเครื่องที่ได้ออกแบบใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 3.33 (ก) และ (ข) ตามลำดับ และล้อขับลวดมีหลายรูปแบบจะมีทั้งแบบลักษณะเป็นร่องรูปตัว U) รูปตัววี (V) รูปคางหมูหรือรูปครึ่งวงกลม ซึ่งอาจเป็นร่องผิวเรียบหรือผิวพิมพ์ลายดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.34



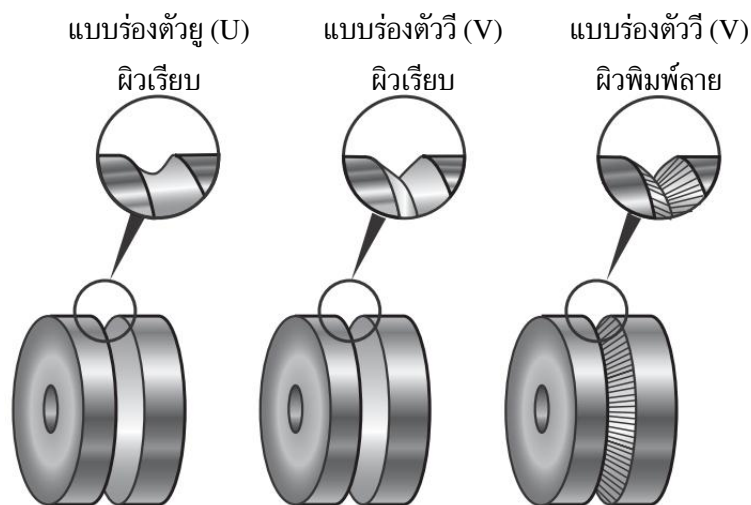
(ก) ชุดระบบล้อขับป้อนลวดเชื่อม
แบบชนิด 2 ล้อ (1 คู่)



(ข) ชุดระบบล้อขับป้อนลวดเชื่อม
แบบชนิด 4 ล้อ (2 คู่)

รูปที่ 3.33 ชุดระบบล้อขับป้อนลวดเชื่อม

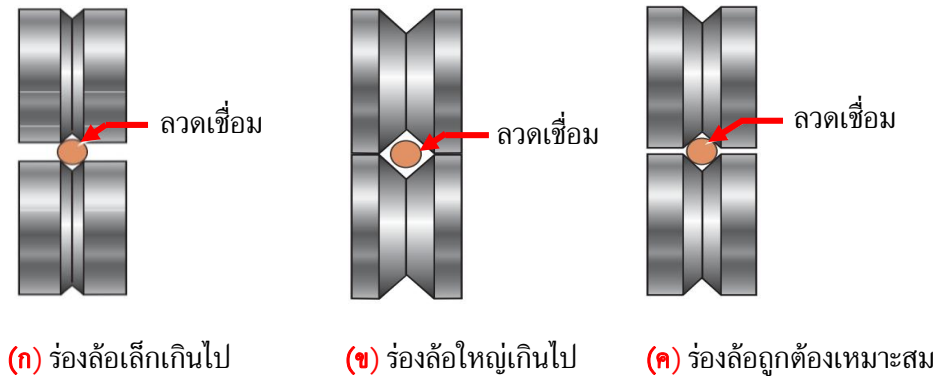
ที่มา : Lincoln Electric, Welding Machine, 2016



รูปที่ 3.34 ตัวอย่างลักษณะรูปแบบของร่องล้อขับป้อนลวดเชื่อม

ที่มา : Larry Jeffus, Welding and Metal Fabrication, 2012

นอกจากจะพิจารณาเลือกใช้ชนิดของร่องล้อย่แล้วนั้น การเลือกขนาดของร่องล้อย่ป้อนลวดก็ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับขนาดและชนิดของวัสดุลวดเชื่อมด้วย ต้องไม่คับหรือหลวมมากเกินไปดังแสดงเปรียบเทียบความเหมาะสมในรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 การพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะของร่องล้อย่ป้อนลวดเชื่อมที่ถูกต้องเหมาะสม

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and Metal Fabrication*, 2012

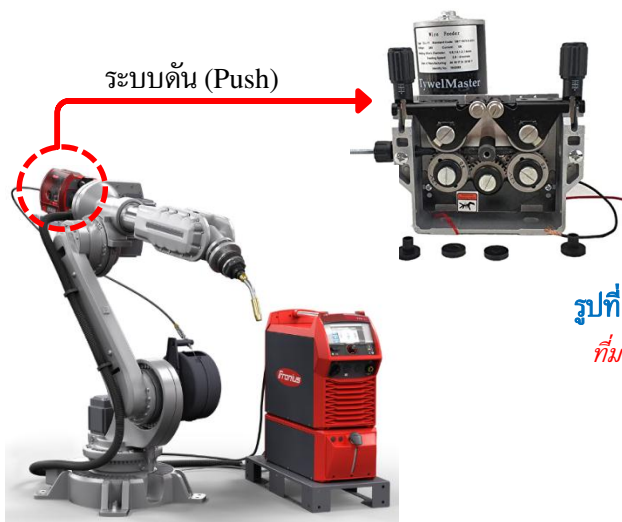
ระบบการป้อนลวดเชื่อมจากม้วนลวดเชื่อมเข้าสู่หัวเชื่อม (Wire feed system)

ระบบการป้อนลวดเชื่อมของกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม ถือว่าเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของแนวเชื่อม โดยช่างเชื่อมต้องพิจารณาเลือกใช้ระบบให้เหมาะสมด้วยอาศัยการพิจารณาจากปัจจัยของชนิดวัสดุลวดเชื่อม ขนาดของลวดเชื่อม และระยะห่างระหว่างหัวเชื่อมกับม้วนลวดเชื่อม ซึ่งระบบของการป้อนลวดเชื่อมมี 3 วิธีการ อ้างอิงจากการอธิบายไว้หนังสือ Modern Welding โดย Andrew D. Althouse et al. (2018) ได้แก่

1. **วิธีการดันลวดเชื่อม (Push-type wire feed system)** เป็นระบบการป้อนลวดเชื่อมด้วยการใช้ชุดเฟืองขับที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ซึ่งอาจเป็นแบบชนิด 2 ล้อ (1 คู่) หรือ แบบชนิด 4 ล้อ (2 คู่) ทำหน้าที่ดันลวดจากม้วนลวดผ่านสายเชื่อมออกไปสู่หัวเชื่อม โดยที่ความยาวของสายเชื่อมสำหรับลวดเชื่อมประเภทเหล็กจะต้องยาวไม่เกิน 10 ฟุตหรือ 3.05 เมตร และสำหรับลวดเชื่อมประเภทอลูมิเนียมสายเชื่อมจะต้องยาวไม่เกิน 6 ฟุต ชุดระบบของวิธีการป้อนลวดแบบนี้มีทั้งแบบที่ติดตั้งไว้ภายในตัวของเครื่องเชื่อม และแบบที่แยกออกจากตัวเครื่องเชื่อม ที่รู้จักกันว่า ยูนิเวอร์แซล (Universal unit) ดังแสดงกลไกของระบบในรูปที่ 3.36

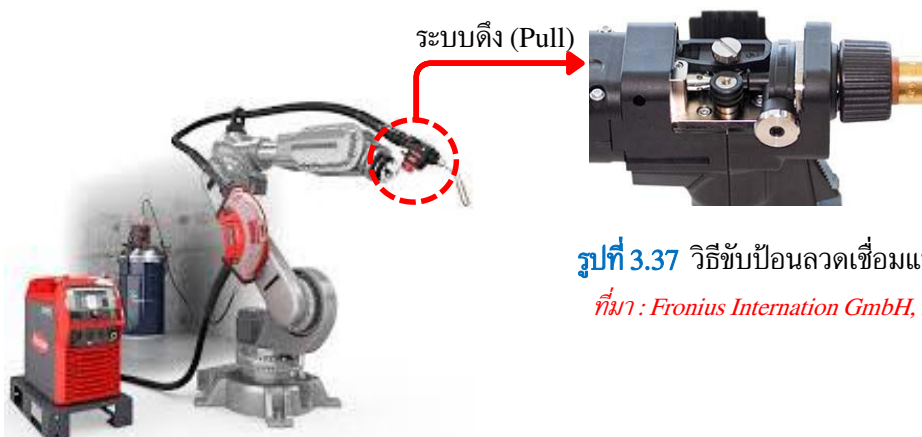
2. **วิธีการดึงลวดเชื่อม (Pull-type wire feed system)** เป็นระบบการป้อนลวดเชื่อมที่มีชุดระบบการดึงลวดเชื่อมจากม้วนลวดเชื่อม ด้วยกำลังของมอเตอร์ซึ่งประกอบติดตั้งไว้รวมกันอยู่ภายในหัวเชื่อม ใช้งานได้ดีกับการป้อนลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 0.045 นิ้วหรือ 1.14 มิลลิเมตร เหมาะกับการถือหัวเชื่อมด้วยมือ และเหมาะกับการเชื่อมวัสดุประเภทอลูมิเนียม หรืองานที่เติมลวดเชื่อมน้อย งานบาง ดังแสดงกลไกของระบบในรูปที่ 3.37

3. วิธีการดันและดึงลวดเชื่อม (Push and pull-type wire feed system) เป็นระบบการป้อนลวดเชื่อมที่อาศัยทั้งการดัน (Push) และการดึง (Pull) นิยมใช้กับลวดเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่ำ และสายเชื่อมที่มีความยาวมาก ๆ ซึ่งหัวเชื่อมจะประกอบติดไว้ด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนแบบซิงโครนัส และกลไกการป้อนลวดที่ทำหน้าที่เป็นหน่วยควบคุมความเร็วในการป้อนลวดพร้อมทั้งเป็นตัวป้อนลวดที่ผ่านออกมาทางท่อ (Conduit) ในลักษณะของการดันให้ลวดออกจากหัวเชื่อม โดยระบบป้อนลวดแบบดันนี้จะมีผลต่อไปถึงการควบคุมความเร็วของตัวป้อนลวดแบบดึง ที่ติดตั้งอยู่อีกด้านหนึ่งที่ใกล้กับลวดเชื่อม ความเร็วของตัวป้อนลวดทั้งสองนี้ต้องสัมพันธ์กันโดยใช้หลักการของแรงดึงในเส้นลวด แม้แต่ลวดเชื่อมอลูมิเนียมผสมขนาดเล็ก ๆ ก็สามารถป้อนผ่านสายเชื่อมได้ยาวกว่า 50 ฟุต หรือ 15.24 เมตร โดยในบางครั้งระบบการป้อนวิธีนี้จะมิกล่องดึงลวดแยกออกต่างหาก เพื่อทำหน้าที่ขับลวดจากระบบดันลวดอีกที่หนึ่ง ดังแสดงกลไกของระบบในรูปที่ 3.38



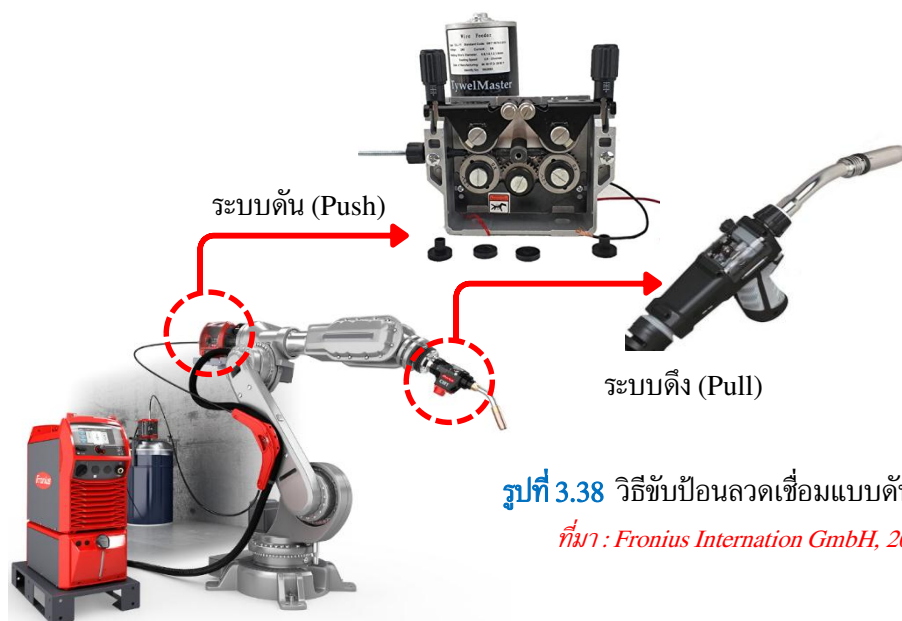
รูปที่ 3.36 วิธีขับป้อนลวดเชื่อมแบบดัน

ที่มา : Fronius International GmbH, 2016



รูปที่ 3.37 วิธีขับป้อนลวดเชื่อมแบบดึง

ที่มา : Fronius International GmbH, 2016



รูปที่ 3.38 วิธีขับป้อนลวดเชื่อมแบบดันและดึง

ที่มา : Fronius International GmbH, 2016

วิธีการป้อนลวดเชื่อมของชุดล่อขับลวดแต่ละวิธีที่กล่าวมาข้างต้นนั้น จะไม่สามารถใช้ขับป้อนลวดได้กับทุกระยะของความห่างระหว่างชุดป้อนลวดถึงหัวเชื่อม โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของลวดเชื่อมและชนิดของวัสดุลวดเชื่อม ดังนั้น ข้างเชื่อมต้องมีทักษะในการเลือกวิธีการป้อนลวดที่ถูกต้องและเหมาะสม เช่น สำหรับลวดเชื่อมที่เป็นโลหะอ่อนจำพวกอลูมิเนียมหรือทองแดงที่มีขนาดเล็ก ถ้าเลือกวิธีป้อนแบบดัน-ดึงจะต้องใช้สายเชื่อมที่สั้น ซึ่งผู้ผลิตอุปกรณ์เครื่องเชื่อมได้มีข้อแนะนำไว้ดังแสดงตารางที่ 3.3 ที่แนะนำโดย Fronius International (2016) ผู้ผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์การเชื่อม และการไหลตัวของลวดเชื่อมต้องไม่คับหรือแน่นเกินไป เพราะขณะดึงหรือดันลวดอาจเกิดการยืดออกและเกิดการขาดขึ้นภายในของสายเชื่อมได้

ตารางที่ 3.3 ข้อแนะนำสำหรับการเลือกวิธีขับป้อนลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับความยาวของสายเชื่อม

ที่มา : Fronius International GmbH, 2016

ความยาวของสายเชื่อม (Welding cable)	วิธีการขับป้อนลวดเชื่อม (Wire feed system)
ความยาว 3 – 4 เมตร	เลือกป้อนลวดวิธี ดันลวดเชื่อม (Push)
ความยาว 5 – 7 เมตร	เลือกป้อนลวดวิธี ดึงลวดเชื่อม (Pull)
ความยาว 8 – 12 เมตร	เลือกป้อนลวดวิธี ดันและดึงลวดเชื่อม (Push – Pull)

ค. หัวเชื่อมและสายเชื่อม (Welding gun and Welding cables)

อุปกรณ์ชุดนี้มีหน้าที่นำส่งลวดเชื่อม กระแสไฟเชื่อม และแก๊สปกคลุม เข้าสู่ท่อนำลวดไปยังตำแหน่งที่ต้องการเชื่อม โดยทั้งหมดจะเคลื่อนไปพร้อมกันเมื่อเกิดการอาร์กเชื่อม ซึ่งขณะทำการเชื่อมผลของการอาร์กจะทำให้หัวเชื่อมเกิดความร้อนสะสมมากขึ้นเรื่อย ๆ จึงจำเป็นต้องมีระบบการหล่อเย็น

เพื่อระบายความร้อนสำหรับป้องกันความร้อนเกินกับหัวเชื่อม ซึ่งปกติจะนิยมใช้เป็นระบบที่ระบายด้วยอากาศ และระบบที่ระบายด้วยน้ำ หรือใช้ทั้งสองระบบร่วมกัน ดังนั้น จึงได้มีการจัดแบ่งชนิดของหัวเชื่อมตามชนิดของการระบายความร้อนได้ 2 ชนิด คือ

1. หัวเชื่อมชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air cooling gun)
2. หัวเชื่อมชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water cooling gun)

การเลือกใช้งานของทั้งชนิดหัวเชื่อมนี้พิจารณาจากระดับของปริมาณกระแสไฟเชื่อมที่ใช้และชนิดของแก๊สปกคลุม กล่าวคือ หัวเชื่อมชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ จะเลือกใช้กับการเชื่อมที่กระแสต่ำกว่า 200 แอมแปร์ด้วยแก๊สอาร์กอนปกคลุม และที่กระแสเชื่อมที่ไม่เกิน 300 แอมแปร์ ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปกคลุม ด้วยเหตุเพราะแก๊สปกคลุมนี้มีส่วนช่วยในการหล่อเย็นหัวเชื่อม สำหรับหัวเชื่อมชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ จะเหมาะกับการเชื่อมที่กระแสไฟเชื่อมที่สูงกว่า 300 แอมแปร์ แต่ไม่เกิน 700 แอมแปร์ หรือเป็นงานที่ต้องการเชื่อมอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน

นอกจากนี้ยังเป็นที่พบเห็นกันทั่วไปว่า หัวเชื่อมที่ระบายด้วยความร้อนทั้งสองระบบนั้น จะออกแบบลักษณะรูปทรงและลักษณะการใช้งานของหัวเชื่อมที่แตกต่างกันตามความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยจะแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะของหัวเชื่อม ตาม Miller Electric Categories (2016) ดังนี้

1. หัวเชื่อมแบบคอห่าน (Goose neck type) ลักษณะของหัวเชื่อมมีรูปทรงคล้ายกับคอของห่าน เป็นที่นิยมใช้งานกันมาก สามารถเชื่อมได้ดีกับทุกลักษณะรอยต่อ เพราะเข้าถึงส่วนที่โค้ง หรือมุมแคบ ๆ ได้สะดวกเป็นหัวเชื่อมที่ใช้กับระบบการป้อนลวดเชื่อมด้วยวิธีดันลวด ซึ่งสามารถใช้กับสายเชื่อมยาวได้ประมาณ 3–3.6 เมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดที่ 0.6–1.2 มิลลิเมตร คู่กับระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ แต่ถ้าใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำจะสามารถเชื่อมลวดได้ขนาดโตขึ้นถึงเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร ดังแสดงลักษณะรูปทรงของหัวเชื่อมแบบคอห่านในรูปที่ 3. 39 (ก)

2. หัวเชื่อมแบบปืน (Pistol type) ลักษณะของหัวเชื่อมมีรูปทรงคล้ายกับปืน ระบบการขับป้อนลวดเป็นแบบดันลวดเชื่อมเหมือนกับแบบคอห่าน จุดประสงค์หลักออกแบบไว้สำหรับเชื่อมการเชื่อมงานเป็นจุดหรือเชื่อมงานแนวสั้น ๆ ไม่เหมาะกับงานเชื่อมที่แคบ ๆ หรือชิ้นงานที่มีพื้นที่เข้าเชื่อมยาก ดังแสดงลักษณะรูปทรงของหัวเชื่อมแบบปืนในรูปที่ 3. 39 (ข)

3. หัวเชื่อมแบบมีระบบป้อนลวดในตัว (Spool type) ลักษณะของหัวเชื่อมมีด้ามจับและที่ด้ามจับมีมอเตอร์ขับลวดพร้อมล้อป้อนลวดประกอประกกันกันอยู่ โดยมีม้วนลวดเชื่อมขนาดน้ำหนัก 1–2 ปอนด์ หรือประมาณ 453–907 กรัม ประกอบติดกับหัวเชื่อม ระบบการขับลวดใช้วิธีการดึงลวด ซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องใช้สายเชื่อมยาว ๆ อัตราเร็วป้อนลวดถูกควบคุมด้วยหัวเชื่อม โดยทั่วไปนิยมใช้กับลวดวัสดุประเภทโลหะอลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 มิลลิเมตร แต่ก็สามารถใช้กับการป้อนลวดเหล็ก หรือลวดโลหะแข็งอื่น ๆ ได้เช่นกัน ดังแสดงลักษณะรูปทรงของหัวเชื่อมแบบที่มีระบบป้อนลวดในตัวในรูปที่ 3. 39 (ค)

4. หัวเชื่อมแบบดึงลวดเชื่อม (Pull type) ลักษณะของหัวเชื่อมจะมีด้ามจับและมีมอเตอร์ไฟฟ้าหรืออาจเป็นระบบแรงดันลม (Pneumatic) ประกอบอยู่ซึ่งต่อเข้ากับระบบกลไกของการป้อนลวด โดยม้วนลวดเชื่อมจะอยู่แยกต่างหาก ทำให้สามารถใช้กับสายเชื่อมงานที่ไกล ๆ ได้ถึง 15 เมตร ดังแสดงลักษณะรูปทรงของหัวเชื่อมแบบดึงลวดเชื่อมในรูปที่ 3.39 (ง)



(ก) หัวเชื่อมแบบคอห่าน



(ข) หัวเชื่อมแบบปืน



(ค) หัวเชื่อมแบบมีระบบป้อนลวดในตัว



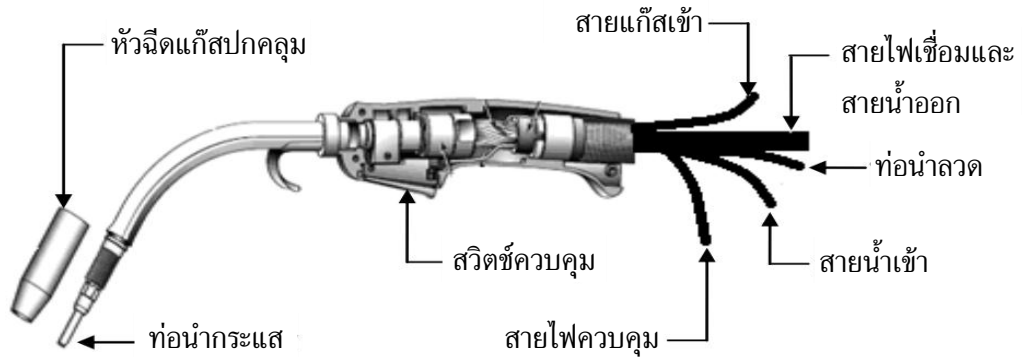
(ง) หัวเชื่อมแบบดึง

รูปที่ 3.39 ชนิดของหัวเชื่อมที่นิยมใช้งานของกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม

ที่มา : Miller Electric Mfg., Guns & Torches, 2016

ส่วนประกอบของหัวเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (Component of torches)

ถึงแม้ว่ารูปแบบหรือหลักการทำงานของหัวเชื่อม ของกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW) จะมีความแตกต่างกัน แต่จะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ๆ ในการทำหน้าที่ต่าง ๆ ของหัวเชื่อมที่มีเหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.40 ซึ่งอาจจะมีลักษณะรูปร่างหรือรูปทรงของบางชิ้นส่วนที่อาจแตกต่างกันจากผู้ผลิตที่ออกแบบให้มีความสะดวกและเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยส่วนประกอบหลักของหัวเชื่อมประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 3.40 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของหัวเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม

ที่มา : Miller Electric Mfg., Guns & Torches, 2016

- สวิตช์ควบคุม (Torch switch) ทำหน้าที่เป็นตัวปิด-เปิดกระแสไฟเชื่อมเพื่อการอาร์ก พร้อมกับเริ่มหรือหยุดการป้อนลวดเชื่อม ซึ่งตัวของสวิตช์จะติดอยู่กับหัวเชื่อม เมื่อต้องการใช้งานก็ทำการกดสวิตช์

- ท่อนำกระแส (Contact tube) เป็นส่วนประกอบที่อยู่ส่วนปลายสุดของหัวเชื่อม มักจะทำจากวัสดุทองแดงหรือทองแดงผสม เหตุผลเพราะต้องทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟเชื่อมให้ไหลผ่านเข้าไปสู่ลวดเชื่อม ในขณะที่ลวดเชื่อมกำลังเคลื่อนที่ออกไปยังบ่อหลอมละลายในรูปแบบของการไหลแบบมีแรงเสียดทาน (Friction) โดยที่แรงเสียดทานต้องไม่มากหรือน้อยจนเกินไป ดังนั้นระยะของช่องว่างระหว่างท่อนำกระแสดกับเส้นลวดเชื่อมก็ต้องไม่มากหรือน้อยจนเกินไป ซึ่งผู้ผลิตได้แนะนำความเหมาะสมในการเลือกใช้ดังใน **ตารางที่ 3.4** เมื่อใช้งานไปนาน ๆ รูของท่อนำกระแสจะเกิดการสึกหรอ ซึ่งบางครั้งสึกหรอมากจนรูมีลักษณะเป็นวงรี ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการนำกระแสระหว่างท่อนำกระแสดกับลวดเชื่อมลดลง การอาร์กไม่สม่ำเสมอจึงควรต้องเปลี่ยนท่อนำกระแสอันใหม่ ลักษณะของชิ้นส่วนท่อนำกระแสแสดงใน **รูปที่ 3.41**

ตารางที่ 3.4 ข้อแนะนำการเลือกขนาดลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับขนาดของรูท่อนำกระแส

ที่มา : Fronius Internation GmbH, 2016

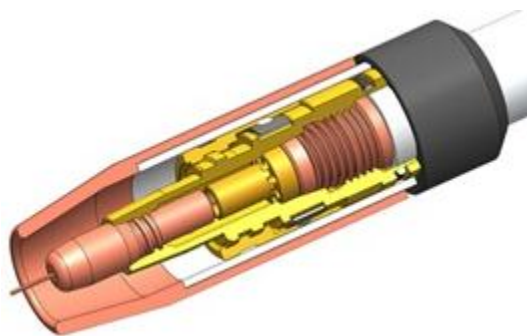
ขนาดเส้นลวดเชื่อม (มม.)	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
ขนาดรูของท่อนำกระแส (มม.)	0.65	0.90	1.10	1.35	1.75

- หัวฉีดแก๊ส (Nozzle) เป็นส่วนประกอบที่ทำหน้าที่บังคับทิศทางของแก๊สให้ไหลพุ่งออกไปสู่บ่อหลอมละลาย มักทำด้วยวัสดุทองแดงหรือนิกโครม โดยหัวฉีดขนาดเล็กใช้กับการเชื่อมกระแสไฟต่ำ ส่วนหัวฉีดขนาดใหญ่จะใช้กับการเชื่อมกระแสไฟที่สูง บ่อหลอมละลายกว้าง ปริมาณแก๊สไหลออกมามาก ลักษณะของหัวฉีดแก๊สดังแสดงใน **รูปที่ 3.42 (ก)** ในสภาพปกติหัวฉีดแก๊สจะไม่มีกระแสไฟไหลผ่าน

เพราะมีฉนวนกันไว้ แต่บางครั้งอาจมีกระแสไฟผ่านซึ่งเกิดจากสะเก็ดโลหะกระเด็นไปเกาะติดกับท่อนำกระแสดังแสดงในรูปที่ 3.42 (ข) ดังนั้น ช่างเชื่อมจะต้องหมั่นตรวจเช็คและทำความสะอาดอยู่เสมอ ๆ เพื่อป้องกันการสร้างสะพานไฟมาสู่หัวฉีดแก๊ส และทำการฉีดสเปรย์เพื่อช่วยลดการเกาะติดของสะเก็ดโลหะเป็นอย่างดี



(ก) ลักษณะของท่อนำกระแส



(ข) ส่วนประกอบภายในของท่อนำกระแส

รูปที่ 3.41 ลักษณะของท่อนำกระแสและส่วนประกอบภายใน

ที่มา : Miller Electric Mfg., Guns & Torches, 2019



(ก) ลักษณะของหัวฉีดแก๊ส



(ข) ลักษณะสะเก็ดโลหะเกาะรูหัวฉีดแก๊ส

รูปที่ 3.42 ลักษณะของหัวฉีดแก๊สและสะเก็ดโลหะเกาะรูหัวฉีดแก๊ส

ที่มา : Miller Electric Mfg., Guns & Torches, 2019

- สายไฟเชื่อมและสายน้ำ (Welding cable and water hoses) เป็นส่วนประกอบที่มักประกอบไว้ติดกัน โดยสายไฟเชื่อมจะทำด้วยวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดี ส่วนใหญ่เป็นโลหะทองแดงหรือโลหะอลูมิเนียม และหุ้มด้วยฉนวน ดังแสดงลักษณะของสายไฟเชื่อมในรูปที่ 3.43 (ก) ซึ่งสายเชื่อมต้องแข็งแรงและมีความอ่อนตัวโค้งงอได้ดี เพราะจะช่วยให้ลวดเชื่อมไหลผ่านง่ายไม่ติดขัดเมื่อขณะสายเชื่อมไม่อยู่ในแนวเส้นตรง แต่ก็ไม่ได้งอมากจนเกิดปัญหาต่ออัตราเร็วในการป้อนลวดที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลกระทบ

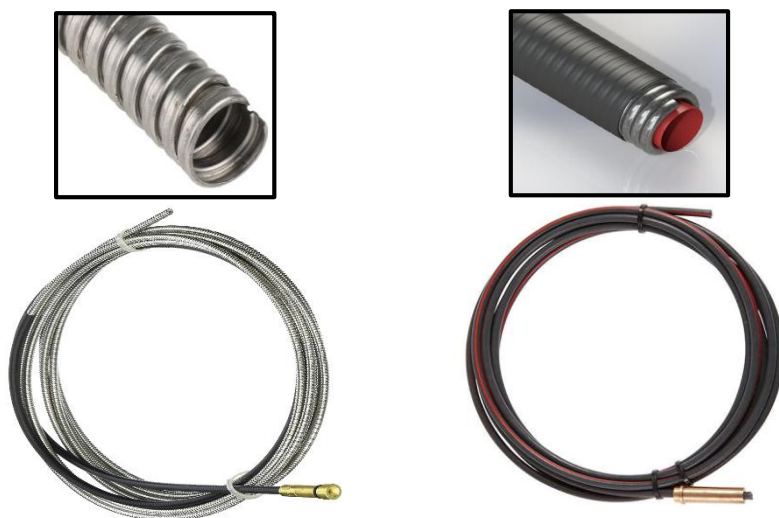
โดยตรงต่อประสิทธิภาพในการเติมลวดเชื่อมในแนวเชื่อมได้ ส่วนสายน้ำหล่อเย็นหรือบางครั้งผู้ผลิตอาจใช้เป็นระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ ทำหน้าที่ระบายความร้อนสายเชื่อมและหัวเชื่อมที่เกิดจากการอาร์ก แบบระบายด้วยอากาศจะเหมาะกับหัวเชื่อมขนาดเล็กที่ใช้กระแสไฟเชื่อมอยู่ระหว่าง 80–350 แอมแปร์ ส่วนแบบระบายด้วยน้ำจะเหมาะกับหัวเชื่อมขนาดใหญ่ที่ใช้กระแสไฟเชื่อมระหว่าง 80–500 แอมแปร์ ดังแสดงลักษณะของหัวเชื่อมทั้งสองแบบในรูปที่ 3.43 (ข) และ (ค) ตามลำดับ



รูปที่ 3.43 ลักษณะของสายไฟเชื่อม และหัวเชื่อมที่ระบายความร้อนด้วยระบบน้ำและระบบอากาศ

ที่มา : Bernard Welding Equipment., Guns & Torches, 2017

- ท่อนำลวด (Wire conduit) เป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นช่องทางเดินของลวดเชื่อมจากชุดล้อขับเคลื่อนไปยังหัวเชื่อม โดยมีลักษณะเป็นลวดสปริงขดเป็นท่อนอยู่ภายในตลอดความยาวของสายเชื่อม ซึ่งผิวภายในของท่อมักทั้งแบบเคลือบผิวและแบบไม่เคลือบผิว ท่อนำลวดมีความอ่อนตัวแต่ไม่บีบรัดลวดเชื่อมที่เคลื่อนที่ผ่านอยู่ภายใน ขณะปฏิบัติงานท่อนำลวดจึงสามารถโค้งงอได้ แต่ต้องไม่มากจนเกิดผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการไหลตัวของลวดเชื่อม สำหรับลวดเชื่อมประเภทโลหะเหล็ก แนะนำให้ใช้ท่อนำลวดที่ทำด้วยเหล็กสปริง แต่สำหรับลวดเชื่อมประเภทวัสดุอ่อน เช่น อลูมิเนียม หรือ ทองแดง แนะนำให้ใช้ท่อนำลวดที่เคลือบผิวภายในด้วยพลาสติกไนลอนหรือเทปลอน ดังแสดงลักษณะของท่อนำลวดทั้งสองแบบในรูปที่ 3.44 ตามลำดับ



(ก) ท่อนำลวดแบบโลหะสปริง

(ข) ท่อนำลวดแบบพลาสติก

รูปที่ 3.44 ลักษณะของท่อนำลวดเชื่อมแบบโลหะสปริงและแบบพลาสติกที่มา : *Welding Direction, Miller & Hobart Replacement MIG Conduit Liners, 2019*

● ท่อนำแก๊สปกคลุม (Shielding gas hose) เป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ในการลำเลียงหรือส่งแก๊สปกคลุมไปสู่บ่อหลอมละลายโดยผ่านช่องทางหัวฉีดแก๊ส ถ้าเป็นหัวเชื่อมที่มีขนาดเล็ก ๆ หรือเชื่อมงานที่กระแสไฟต่ำ ๆ มักจะใช้ระบบท่อนำแก๊สร่วมกันกับท่อนำลวด เช่น หัวเชื่อมแบบคอห่านขนาดเล็ก แต่ถ้าเป็นหัวเชื่อมขนาดใหญ่ที่ต้องใช้ปริมาณแก๊สปกคลุมในปริมาณมาก เช่น การเชื่อมที่กระแสไฟสูงถึง 500 แอมแปร์ ต้องใช้ท่อนำแก๊สแยกออกจากหากที่จะต่อท่อแก๊สจากชุดป้อนลวดไปยังหัวเชื่อมโดยตรง หรืออาจจะต่อจากท่อรวมแก๊สในกรณีที่ เป็นระบบศูนย์เชื่อมขนาดใหญ่ที่ใช้แก๊สร่วมกัน (Manifold supply) ซึ่งต้องมีชุดอุปกรณ์ควบคุมความดันและอัตราการไหลของแก๊ส ดังแสดงท่อนำแก๊สทั้งสองระบบใน **รูปที่ 3.45 (ก) และ (ข)** ตามลำดับ



(ก) ท่อนำแก๊สแบบใช้ร่วมกับท่อนำลวด (ข) ท่อนำแก๊สแบบแยกจากสายเชื่อม

รูปที่ 3.45 ลักษณะของท่อนำแก๊สปกคลุม (Shielding gas hose)ที่มา : *Welding Direction, Miller & Hobart Replacement MIG Conduit Liners, 2019*

ง. อุปกรณ์ควบคุมแก๊สปกคลุมและอุปกรณ์อื่น ๆ (Shielding gas equipment and other)

กรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม เมื่อเริ่มปฏิบัติการเชื่อมก็จะต้องมีแก๊สไหลออกมาปกคลุมบ่อหลอมละลายตลอดเวลา ระบบการทำงานของแก๊สปกคลุมจะต้องมีองค์ประกอบของถังบรรจุแก๊สปกคลุม (Shielding gas cylinder) อุปกรณ์วัดปริมาณความดันแก๊ส (Gas regulator) วาล์วควบคุมการไหลของแก๊ส (Control valves) และมาตรวัดอัตราการไหลของแก๊ส (Flow meter) โดยอุปกรณ์ดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 3.46

- ถังบรรจุแก๊สปกคลุม (Shielding gas cylinder) เป็นถังความดันที่บรรจุแก๊สภายใน มีแรงอัดสูงจนมีสถานะเป็นของเหลว ซึ่งสีของถังและตัวอักษรข้างถังเป็นตัวบ่งชี้ชนิดของแก๊สที่บรรจุอยู่ภายใน ระดับความดันภายในถังตรวจสอบวัดได้จากวาล์วหัวถังหรือวาล์ววัดความดันถังแก๊ส เมื่อเปิดวาล์วปล่อยแรงดันออกแก๊สเหลวภายในถังก็จะมี ความดันลดลงเปลี่ยนสถานะกลายเป็นแก๊สไหลผ่านวาล์วควบคุมออกมาใช้งาน

- อุปกรณ์วัดปริมาณความดันแก๊ส (Gas regulator) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการตรวจสอบปริมาณความดันทั้งภายในถังและความดันที่ไหลออกมา ซึ่งมักจะติดตั้งคู่กันอยู่ที่หัวถังแก๊ส

- วาล์วควบคุมการไหลของแก๊ส (Control valves) เป็นส่วนหนึ่งของชุดอุปกรณ์วัดความดันปริมาณแก๊ส จะสามารถเปิดและปรับปริมาณแก๊สให้ไหลออกมาใช้งานในปริมาณที่ต้องการ เพื่อที่จะลดความดันจากถังบรรจุลงให้พอเหมาะกับการใช้งานและมีการไหลออกของแก๊สคงที่สม่ำเสมอ

- มาตรวัดอัตราการไหลของแก๊ส (Flow meter) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดปริมาณหรืออัตราการไหลของแก๊สจากวาล์วควบคุมการไหลของแก๊สไปยังหัวเชื่อม ซึ่งมาตรวัดจะอ่านได้จากการลอยตัวของลูกบอลในมาตรวัด ที่มีวาล์วที่สามารถปรับปริมาณแก๊สตามความต้องการใช้งาน ส่วนจังหวะของการปิด-เปิดแก๊สขณะทำการเชื่อมจะมีระบบของโซลินอยด์วาล์ว (Solenoid valve) ในชุดป้อนลวดเชื่อม ซึ่งแก๊สจะถูกเปิดออกเมื่ออาร์กและปิดทันทีเมื่อหยุดอาร์ก

นอกจากนี้ในขบวนการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมยังมีอุปกรณ์เสริมอื่น ๆ ที่ต้องใช้ร่วมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเชื่อม ได้แก่

- อุปกรณ์ผสมแก๊ส (Gas mixer equipment) ที่ใช้สำหรับกรณีต้องการผสมแก๊สปกคลุมที่ยังแยกกันอยู่คนละถัง เช่น ผสมแก๊สอาร์กอนกับแก๊สฮีเลียม (Ar + He) หรือผสมแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไนโตรเจน (Ar + N₂) หรือ ผสมแก๊สอาร์กอนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Ar + CO₂) เป็นต้น ซึ่งที่นิยมนำมาใช้กันจะมีทั้งเป็นแบบชุดอุปกรณ์ที่นำเข้ามาต่อเข้ากับระบบ และเป็นแบบเครื่องผสมแก๊สสำเร็จรูป ดังแสดงในรูปที่ 3.47 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

- อุปกรณ์หมุนเวียนน้ำหล่อเย็น (Water circulator) เป็นอุปกรณ์ใช้ทำหน้าที่หมุนเวียนน้ำหล่อเย็นในระบบของการเชื่อม โดยการนำน้ำที่ผ่านหล่อเย็นมาแล้วกลับมาระบายความร้อนออกแล้ววนกลับเข้าไปใช้งานหล่อเย็นอีกครั้ง ลักษณะของอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.48



(ก) ถังบรรจุแก๊สปกคลุม

(ข) ชุดอุปกรณ์ควบคุมแก๊สปกคลุม

รูปที่ 3.46 ถังแก๊สปกคลุมและอุปกรณ์ควบคุม

ที่มา : Bernard Welding Equipment., Guns & Torches, 2017



(ก) แบบชุดอุปกรณ์ผสมแก๊สปกคลุม



(ข) แบบเครื่องผสมแก๊สปกคลุม

รูปที่ 3.47 แบบชุดอุปกรณ์ผสมและแบบเครื่องผสมสำหรับแก๊สปกคลุมการเชื่อม

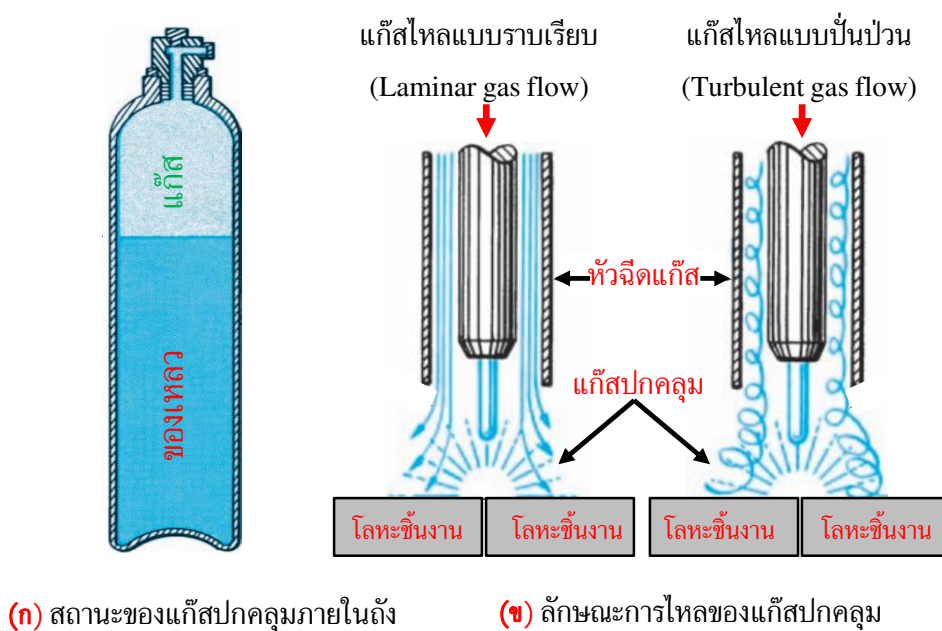
ที่มา : Miller Electric Mfg., Welding Equipment, 2018

รูปที่ 3.48 อุปกรณ์หมุนเวียนน้ำหล่อเย็น
(Water circulator)

ที่มา : Airgas, TEC Welding Products, Inc. 2016

3.2.5 แก๊สปกคลุม (Shielding gases)

กรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม เป็นขบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) จึงจำเป็นต้องใช้แก๊สเพื่อช่วยในการปกคลุมบ่อหลอมละลายเพื่อป้องกันไม่ให้แก๊สจากบรรยากาศบริเวณรอบ ๆ ที่มีส่วนประกอบของ แก๊สไนโตรเจน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไอน้ำความชื้น เข้ามารวมตัวกับเนื้อโลหะในแนวเชื่อมขณะแข็งตัว ที่ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดข้อบกพร่องของแนวเชื่อม โดยเฉพาะข้อบกพร่องแบบรูพรุน (Porosity defect) และการแตกร้าวขณะเย็น (Cold crack) นอกจากนี้แก๊สปกคลุมนยังมีส่วนต่อพฤติกรรมการเชื่อมอาร์ก เช่น การเกิดสะเก็ดโลหะมากน้อย ขนาดบ่อหลอมละลาย ระยะการซึมลึก รวมถึงประสิทธิภาพของการถ่ายโอนความร้อน โลหะของลวดเชื่อมไปยังบ่อหลอมละลาย แก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายจะถูกบรรจุไว้ภายในถังความดัน ที่มีระดับความดันสูงมาก จนสถานะจากที่เป็นแก๊สกลายเป็นสถานะของเหลว โดยภายในถังบรรจุแก๊สที่บริเวณก้นถังจะเป็นของเหลว และบริเวณหัวถังจะเป็นแก๊สเพราะมีความดันต่ำกว่า ซึ่งพร้อมที่ไหลออกมาใช้งาน ดังแสดงสัดส่วนของสถานะแก๊สภายในถังในรูปที่ 3.49 (ก) และพบว่าการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สมีความสำคัญอย่างยิ่ง กล่าวคือ ถ้าอัตราการไหลที่ถูกต้องแก๊สจะไหลออกมาในรูปแบบที่ราบเรียบ (Laminar gas flow) แต่ถ้าอัตราการไหลมากเกินไปแก๊สจะไหลออกมาแบบปั่นป่วน (Turbulent gas flow) ซึ่งส่งผลกระทบต่อบ่อหลอมละลายและแนวเชื่อมที่สมบูรณ์หลังการแข็งตัว โดยได้แสดงลักษณะการไหลของแก๊สทั้งสองแบบในรูปที่ 3.49 (ข) อ้างอิงจาก Edward R. Bohbart (2017)



(ก) สถานะของแก๊สปกคลุมภายในถัง

(ข) ลักษณะการไหลของแก๊สปกคลุม

รูปที่ 3.49 สถานะของแก๊สปกคลุมภายในถังและลักษณะการไหลของแก๊สปกคลุม

ที่มา : Edward R. Bohbart, *Welding Principles and Practices*, 2017

ในทางปฏิบัติช่างเชื่อมจะเลือกใช้แก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายที่ใช้กันปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ซึ่งได้สรุปไว้ในหนังสือของ Edward R. Bohbart (2017) ดังนี้

1. ประเภทแก๊สเฉื่อย (Inert gases) เป็นกลุ่มแก๊สที่มีอะตอมเสถียรภาพในตัวเอง ไม่ทำปฏิกิริยากับอะตอมของธาตุอื่น จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นแก๊สปกคลุมบ่อโลหะหลอมเหลวขณะเชื่อม โดยแก๊สเฉื่อยที่นำมาใช้กัน คือแก๊สอาร์กอน (Argon inert gas : Ar) กับแก๊สฮีเลียม (Helium inert gas : He) โดยช่างเชื่อมจะเรียกขบวนการเชื่อมที่ใช้แก๊สประเภทนี้ว่า การเชื่อมมิก (MIG)

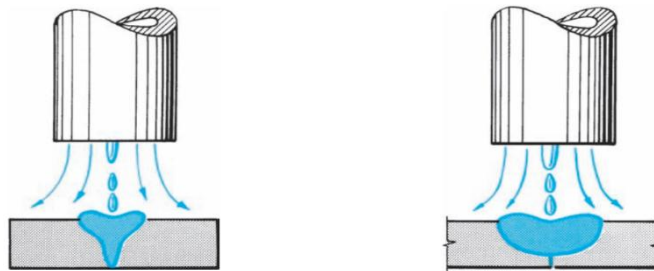
● แก๊สอาร์กอน (Ar) เป็นแก๊สเฉื่อยชนิดที่นิยมเลือกใช้งานกันมาก ด้วยเพราะเป็นแก๊สที่หนักกว่าอากาศถึง 1.4 เท่า ปกคลุมได้ดีใช้ในปริมาณที่น้อยในการปกคลุมบ่อหลอม มีความสำคัญของการเกิดไอออนต่ำ (Low ionization potential) จึงมีความเสถียรในการอาร์กสูง ปฏิกริยาสะอาดเหมาะสำหรับการเชื่อมโลหะที่มีผิวเป็นออกไซด์ จำพวกอลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม นอกจากนี้ยังช่วยให้การเริ่มต้นอาร์กง่ายและคงที่ พร้อมยังมีข้อดีที่มีการนำความร้อนต่ำ เปลวขณะอาร์กแคบแต่มีความร้อนสูง ทำให้ชิ้นงานหลอมง่ายและลึกลงแสดงในรูปที่ 3.50 (ก) แต่ราคาค่อนข้างแพงเมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สชนิดอื่น ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับเกรดความบริสุทธิ์ของแก๊ส ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นเกรด ได้ 3 เกรด คือ

- เกรดสำหรับงานเชื่อมทั่ว ๆ ไป (Welding grade) มีอาร์กอน 99.99%
- เกรดความบริสุทธิ์สูง (High purity grade) มีอาร์กอน 99.993%
- เกรดพิเศษ (Ultra purity grade) มีอาร์กอน 99.999%

อย่างไรก็ตามการใช้แก๊สอาร์กอนปกคลุมเพียงชนิดเดียวก็เกิดปัญหาความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อมได้เช่นกัน เพราะบ่อหลอมละลายที่แคบ น้ำโลหะเหลวจะแข็งตัวเร็ว การหลอมเข้าด้วยกันของเนื้อโลหะเชื่อมกับขอบแนวเชื่อมไม่ค่อยดีทำให้เกิดรอยกัดแหว่ง (Undercut) ที่ขอบแนวเชื่อมโดยเฉพาะกับการเชื่อมโลหะจำพวกนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous) เช่น อลูมิเนียม ทองแดง ทองเหลือง นิกเกิล และไทเทเนียม เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการใช้แก๊สอื่นเข้ามาผสมได้เป็นแก๊สปกคลุมแบบผสมขึ้นที่ออกแบบการผสมให้เหมาะกับวัสดุโลหะเชื่อมแต่ละชนิดซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

● แก๊สฮีเลียม (He) เป็นแก๊สเฉื่อยอีกชนิดที่นิยมใช้ปกคลุมบ่อหลอมละลาย มีความสำคัญของการเกิดไอออนค่อนข้างสูง ที่ 24.5 eV จึงมีความโดดเด่นเรื่องการนำความร้อนได้ดี จึงเหมาะกับการเชื่อมงานที่หนามากกว่า 4.8 มิลลิเมตร และโลหะที่ทนต่อความร้อนสูง ขณะอาร์กเปลวของการอาร์กแผ่กระจายเป็นวงกว้าง การถ่ายโอนความร้อนสู่ชิ้นงานสูง แต่เมื่อใช้แก๊สฮีเลียมปกคลุม ขณะเชื่อมแรงดันอาร์กจะค่อย ๆ ลดลง (Voltage gradient) แต่ระยะอาร์กจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนทำให้พลังอาร์ก (Arc energy) จำนวนมากสูญเสียไปกับการอาร์กตัวมันเอง ซึ่งไม่มีการถ่ายโอนความร้อนสู่ชิ้นงาน ดังนั้น ความเข้มข้นของการอาร์กจึงลดลง ส่งผลทำให้ได้แนวเชื่อมที่กว้างและตื้นกว่าการใช้แก๊สอาร์กอนปกคลุมแสดงในรูปที่ 3.50 (ข) ด้วยเหตุนี้เองการเลือกใช้แก๊สฮีเลียมปกคลุมช่างเชื่อมจะต้องใช้แรงดันอาร์กที่สูงกว่าแก๊สอาร์กอน ทั้ง ๆ ที่ระยะอาร์กเท่ากัน กรณีที่ต้องการเชื่อมวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูง หรือวัสดุที่นำความร้อน

สูง มีข้อแนะนำให้ใช้แก๊สฮีเลียมที่ผสมกับแก๊สอื่น เพื่อลดขั้นตอนที่ต้องอุ่นงานก่อนเชื่อม (Preheating) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมโลหะทองแดง เป็นต้น อย่างไรก็ตามสมบัติของแก๊สฮีเลียมมีน้ำหนักประมาณ 1/7 เท่าของอากาศ จึงมีโอกาสลอยตัวออกจากบริเวณปกคลุมได้รวดเร็ว จึงเกิดความสิ้นเปลืองปริมาณแก๊สมากขณะเชื่อม



(ก) บ่อหลอมละลายของแก๊สอาร์กอน

(ข) บ่อหลอมละลายของแก๊สฮีเลียม

รูปที่ 3.50 เปรียบเทียบพฤติกรรมของการหลอมละลายที่ใช้แก๊สอาร์กอนและฮีเลียมปกคลุม

ที่มา : Edward R. Bohbart, *Welding Principles and Practices*, 2017

2. ประเภทแก๊สทำปฏิกิริยา (Active gas) แก๊สประเภทนี้ด้วยหลักการทางเคมีสามารถทำปฏิกิริยากับธาตุอื่นได้ ซึ่งต่างจากประเภทแก๊สเฉื่อย แต่ด้วยการเกิดปฏิกิริยาข้ามกคุณสมบัติจึงเสมือนแก๊สเฉื่อยจึงนำไปใช้เป็นแก๊สปกคลุมได้ ที่รู้จักกันดีคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือที่เรียกกันในหมู่นักเชื่อมว่า แก๊ส CO₂ ราคาค่อนข้างถูกหาซื้อได้ง่าย มีสภาพเป็นของเหลวอยู่ภายในถังที่ความดัน 7.53 MPa และเมื่อความดันลดลงจะไหลออกมาเป็นแก๊สจะไม่ทำปฏิกิริยาใด ๆ แต่เมื่อได้รับความร้อนจากการอาร์กจะเกิดการแตกตัวเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กับออกซิเจน (O) โดยที่ระยะอาร์กสั้นจะเกิดแตกตัวน้อยกว่าระยะอาร์กยาว ดังนั้น จึงมีข้อแนะนำว่าการเชื่อมด้วยแก๊สปกคลุม CO₂ ควรเชื่อมด้วยระยะอาร์กสั้น ๆ ซึ่งจะให้ความร้อนออกมามากเป็นการช่วยเพิ่มพลังการอาร์ก (Arc energy) โดยสามารถเทียบได้กับประเภทแก๊สเฉื่อย 91%Ar + 9%O แต่ราคาถูกกว่ามาก โดยช่างเชื่อมจะเรียกขบวนการเชื่อมที่ใช้แก๊สประเภทนี้ว่า การเชื่อมแม็ก (MAG)

แก๊สปกคลุมคาร์บอนไดออกไซด์จะให้ปฏิกิริยาการอาร์กที่รุนแรงจึงมักเกิดสะเก็ดโลหะออกมา มาก และการออกซิเดชันของแก๊สกับออกไซด์ของโลหะที่ผิวทำให้เกิดเป็นควัน (Fumes) จึงมักพบเห็นเสมอว่าการใช้แก๊สปกคลุมคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดควันปริมาณมากมองเห็นบ่อหลอมละลายยากขึ้น ซึ่งพบว่าควันที่เกิดจากการออกซิไดซ์นี้จะมีปริมาณของออกซิเจนปะปนอยู่ประมาณ 20–30% ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกไปจากบ่อหลอมละลาย ด้วยวิธีการใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของธาตุที่รวมตัวกับออกซิเจนแล้วกลายเป็นสแลกออกไซด์ได้ดีแล้วลอยอยู่ผิวน้ำโลหะไม่เกิดขอบพ่วงกับแนวเชื่อม ธาตุเหล่านั้นได้แก่ ธาตุซิลิกอน (Si) แมงกานีส (Mn) อลูมิเนียม (Al) ไทเทเนียม (Ti) และ วาเนเดียม (V)

เป็นต้น ดังตัวอย่างสมการไดออกไซด์เซอร์ของซิลิกอน $\text{Si} + 2\text{FeO} \leftrightarrow \text{SiO}_2 + \text{Fe}$ ซึ่งเมื่อซิลิกอนรวมตัวกับออกซิเจนจะกลายเป็นสนิมเหล็กในรูปของซิลิกอนออกไซด์ลอยอยู่บนผิวน้ำโลหะในบ่อหลอมและกลายเป็นสแลกที่โดนกำจัดออกไปเมื่อเย็นตัวลง อย่างไรก็ตามธาตุที่เป็นตัวออกไซด์เซอร์ก็ต้องมีในปริมาณที่ไม่มากเกินไปเพราะอาจเกิดปัญหาอื่น เช่น เกิดการแตกร้าวขณะร้อน (Hot crack) ถ้ามีแมงกานีสและซิลิกอนมากเกินไป เป็นต้น

ถึงบรรจุแก๊สปกคลุมคาร์บอนไดออกไซด์เป็นของเหลวอยู่ประมาณ 2 ใน 3 ของท่อ นับจากกันท่อขึ้นมาถึงช่องว่างด้านบนจะเป็นแก๊ส มักเกิดปัญหาขณะปล่อยไหลออกมาจะเกิดความเย็นเป็นน้ำแข็งเกาะที่ชุดอุปกรณ์ควบคุมการไหล อาจทำให้เกิดรูุดตันหรือเล็กลง จึงต้องมีการติดตั้งชุดอุปกรณ์ลดอุณหภูมิความร้อนคู่ไว้เพื่ออุ่นแก๊สก่อนไหลไปหัวเชื่อม ไม่เช่นนั้นแก๊สปกคลุมก็จะมีทั้งที่เป็นแก๊สและเป็นของเหลว ซึ่งส่งผลต่อการนำความร้อนที่ลดลงโดยเฉพาะที่มีสถานะเป็นของเหลว การใช้แก๊สปกคลุมชนิดคาร์บอนไดออกไซด์จะช่วยให้ได้กับการถ่ายโอนความร้อนโลหะแบบลัดวงจร ไม่สามารถใช้ได้กับการถ่ายโอนแบบละออง นอกจากจะผสมกับแก๊สอาร์กอนในสัดส่วนของ CO_2 ไม่เกิน 15%

3. ประเภทแก๊สผสม (Mixing gas) การใช้แก๊สปกคลุมเพียงชนิดเดียวไม่สามารถที่จะรองรับการทุกแบบการถ่ายโอนความร้อนโลหะ ทุกชนิดของโลหะเชื่อมและทุกชนิดของการเชื่อมต่อ ดังนั้นจึงได้มีการค้นคว้าวิจัยเพื่อที่เพิ่มประสิทธิภาพของการเชื่อมด้วยการผลิตแก๊สปกคลุมแบบแก๊สผสมขึ้น ซึ่งการผสมนั้นมีวัตถุประสงค์การนำไปใช้งานค่อนข้างเฉพาะเจาะจง จึงทำให้เกิดชนิดของแก๊สผสมมากมายหลายชนิด โดยจะไดกล่าวถึงเป็นตัวอย่างบางชนิดที่นิยมใช้งานกัน ดังต่อไปนี้

- ชนิดแก๊สผสมฮีเลียม + อาร์กอน ($\text{He} + \text{Ar}$) เป็นการผสมที่เป็นแก๊สเฉื่อยทั้งคู่ โดยแก๊สฮีเลียมช่วยเพิ่มความร้อนในการอาร์ก ส่วนแก๊สอาร์กอนช่วยให้การถ่ายโอนแบบละอองและการอาร์กมีความนิ่งหรือเสถียรใกล้เคียงกับการใช้แก๊สอาร์กอนอย่างเดียว อย่างไรก็ตามสัดส่วนการผสมก็มีหลากหลายเกรดขึ้นอยู่กัชนิดของโลหะเชื่อม เช่น 80% $\text{He} + 20\% \text{Ar}$ และปรับส่วนผสมไปจนถึง 50% $\text{He} + 50\% \text{Ar}$ ซึ่งโดยทั่วไปแก๊สผสมฮีเลียมกับอาร์กอน จะนิยมใช้กับการเชื่อมโลหะอลูมิเนียม ทองแดง แมงกานีส รวมถึงโลหะผสมอื่น ๆ ถ้าเชื่อมโลหะที่มีความหนาจะมีสัดส่วนแก๊สฮีเลียมที่เพิ่มขึ้น

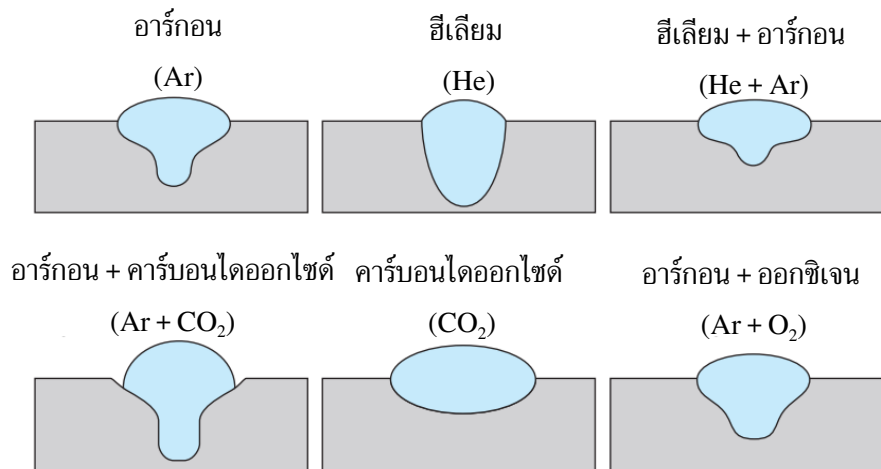
- ชนิดแก๊สผสมอาร์กอน + ออกซิเจน ($\text{Ar} + \text{O}$) เป็นแก๊สผสมที่ต้องการบทบาทของแก๊สออกซิเจน โดยเฉพาะในการเชื่อมโลหะเหล็ก ถ้าเชื่อมด้วยแก๊สอาร์กอนอย่างเดียวประสิทธิภาพของการอาร์กจะต่ำ ลวดเชื่อมที่หลอมเหลวจะมีการไหลพุ่งที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่เมื่อผสมแก๊สออกซิเจนในปริมาณเพียง 1–5% ก็จะช่วยให้การอาร์กเสถียรมากขึ้น สะเก็ดโลหะน้อยลง แนวเชื่อมซึ่มลึกได้มากขึ้น และไม่เกิดรอยกัดแหว่งบริเวณขอบแนวเชื่อม สำหรับเหล็กกล้าผสมสูงและเหล็กกล้าไร้สนิม จะนิยมใช้แก๊สผสมที่สัดส่วนแก๊ส $\text{Ar} + 1\text{--}2\% \text{O}$ ส่วนจำพวกเหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กกล้าผสมต่ำจะใช้แก๊สผสมสัดส่วน $\text{Ar} + 5\% \text{O}$ อย่างไรก็ตามการใช้แก๊สออกซิเจนร่วมผสมเป็นแก๊สปกคลุมจะต้องเลือกลวดเชื่อมที่ธาตุไดออกไซด์เซอร์ เพื่อขจัดออกซิเจนออกจากบ่อหลอมละลาย เลี่ยงความพรุนที่จะเกิดกับเนื้อเชื่อม เช่น โลหะทองแดง เป็นต้น

● ชนิดแก๊สผสมอาร์กอน + คาร์บอนไดออกไซด์ ($\text{Ar} + \text{CO}_2$) เป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สเฉื่อยกับแอคทีฟแก๊ส (Active gas) โดยต้องการบทบาทของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อช่วยให้การอาร์กเสถียร การถ่ายโอนหยดน้ำโลหะจากลวดเชื่อมไปยังชิ้นงานดี และช่วยลดสะเก็ดโลหะที่กระเด็นออกมา โดยเฉพาะกับการเชื่อมวัสดุจำพวกโลหะเหล็ก ช่างยังช่วยลดการเกิดรอยกัดลึกที่ขอบของแนวเชื่อม เพราะขณะเชื่อมบ่อหลอมละลายจะขยายออกไปถึงขอบรอยต่อ คุณสมบัติของแก๊สปกคลุมดังกล่าวจะเป็นเกรตส่วนผสมที่ $\text{Ar} + 3-10\% \text{CO}_2$ และเป็นระบบการถ่ายโอนแบบบดลอง ถ้าเป็นเกรตส่วนผสม $\text{Ar} + 20-30\% \text{CO}_2$ แก๊สผสมเกรตนี้จะใช้เชื่อมเหล็กกล้าโดยจะเกิดระบบการถ่ายโอนเป็นแบบลัดวงจร แต่ถ้าเชื่อมชิ้นงานที่หนาด้วยกระแสเชื่อมสูงการถ่ายโอนจะเป็นแบบหยดขนาดใหญ่ทันที สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่แนะนำให้ใช้แก๊สผสมเกรตที่มีคาร์บอนไดออกไซด์มากเกินไป เพราะคาร์บอนจะไปเพิ่มในเนื้อเชื่อมส่งผลให้ไปรวมตัวกับโครเมียมทำให้ปริมาณโครเมียมลดลง ซึ่งมีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนที่ต่ำลง นอกจากนี้ยังไม่แนะนำให้ใช้กับการเชื่อมโลหะที่ไม่ใช่เหล็กเพราะคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นสาเหตุของการปนเปื้อนของเนื้อโลหะเชื่อม

● ชนิดแก๊สผสมฮีเลียม + อาร์กอน + คาร์บอนไดออกไซด์ ($\text{He} + \text{Ar} + \text{CO}_2$) เป็นแก๊สผสมที่อาศัยบทบาทความโดดเด่นของแก๊สแต่ละตัว เกรตผสม $90\% \text{He} + 7.5\% \text{Ar} + 2.5\% \text{CO}_2$ นิยมใช้เชื่อมโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ส่วนเกรต $60-70\% \text{He} + 25-35\% \text{Ar} + 5\% \text{CO}_2$ นิยมใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำ โดยจะเป็นระบบการถ่ายโอนแบบลัดวงจร แต่ถ้าต้องการความเหนียวของเนื้อเชื่อมสูงแนะนำให้ลดคาร์บอนไดออกไซด์ แนวเชื่อมมักจะไม่นูนเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการเจียรเนตตกแต่งผิวงาน เช่น จำพวกงานเชื่อมท่อ เป็นต้น

● ชนิดแก๊สผสม อาร์กอน + ไนโตรเจน ($\text{Ar} + \text{N}_2$) เป็นแก๊สผสมที่อาศัยบทบาทความโดดเด่นของแก๊สไนโตรเจนที่ให้ความร้อนสู่ชิ้นงานเชื่อมที่สูงจึงเหมาะกับการเชื่อมโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีจุดหลอมเหลวสูง เช่น ทองแดง หรือทองแดงผสม ซึ่งให้ความร้อนคล้ายกับฮีเลียม แต่การซึมลึกคล้ายกับแก๊สอาร์กอน และมีระบบการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะเป็นแบบหยดขนาดใหญ่ เกรตผสมที่นิยมกันคือ $70\% \text{Ar} + 30\% \text{N}_2$ การอาร์กเสถียรสูงราบเรียบ ไม่เกิดการปั่นป่วนในบ่อหลอมละลายขณะทำการเชื่อม เกรตผสมนี้ยังสามารถใช้เชื่อมโลหะอลูมิเนียมผสมได้เช่นกัน

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นเกี่ยวกับแก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายสำหรับกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมนั้น จะเห็นได้ว่าการคัดค้นแก๊สประเภทต่าง ๆ นั้นเกิดจากการวิจัยเพื่อแก้ปัญหาขบวนการเชื่อมที่ประสบปัญหา รวมไปถึงการสร้างคุณภาพของแนวเชื่อมที่ดีขึ้น ดังนั้น แก๊สปกคลุมแต่ละชนิดอาจจะเหมาะสม หรือไม่เหมาะสมกับวัสดุโลหะบางชนิด บางขนาด บางชนิดรอยต่อ หรือบางท่าเชื่อม นั่นหมายถึงว่าช่างเชื่อมต้องมีความรู้ความเข้าใจในการเลือกใช้ให้เหมาะสมและถูกต้อง ไม่เช่นนั้นอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดและเสียหายต่อการเชื่อมงานที่ตนเองรับผิดชอบได้ ดังแสดงเปรียบเทียบลักษณะและรูปร่างของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยแก๊สปกคลุมต่างชนิดกันในรูปที่ 3.51 และในตารางที่ 3.5 เป็นคำแนะนำการเลือกใช้แก๊สที่เหมาะสมกับชนิดของโลหะของผู้ผลิต Lincoln Electric



รูปที่ 3.51 เปรียบเทียบลักษณะและรูปร่างของแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยแก๊สปกคลุมต่างชนิด

ที่มา : Edward R. Bohbart, *Welding Principles and Practices*, 2017

ตารางที่ 3.5 คำแนะนำในการเลือกใช้แก๊สปกคลุมที่เหมาะสมกับชนิดของโลหะงานของผู้ผลิต

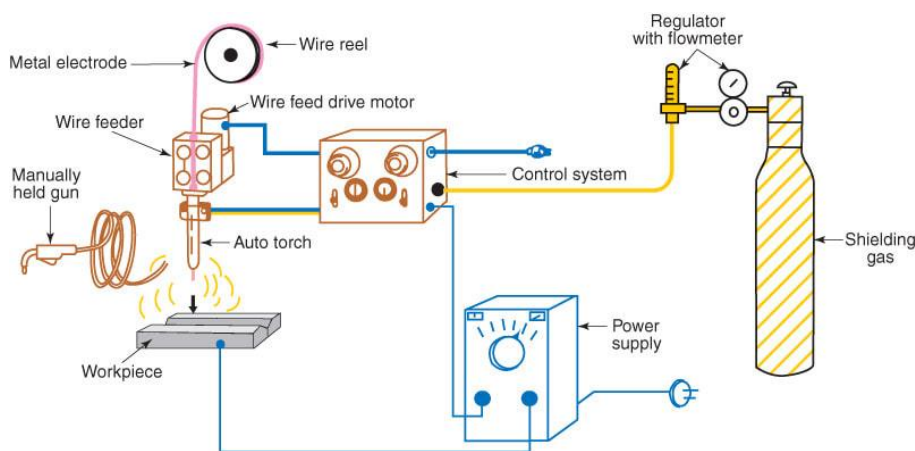
ที่มา : Lincoln Electric, *Gas Metal Arc Welding Guidelines*, 2014

ชนิดของแก๊สปกคลุม (Shielding gases)	ชนิดโลหะงาน (Metals)							
	อลูมิเนียม และผสม	ทองแดง และผสม	เหล็กกล้า ไร้สนิม	เหล็กกล้า คาร์บอน	แมกนีเซียม และผสม	นิกเกิล และผสม	ไทเทเนียม และผสม	ทองเหลือง และผสม
Ar	✓	✓			✓	✓		
He	✓				✓			
CO ₂			✓	✓				
Ar + 1% O ₂			✓	✓				
Ar + 2% O ₂			✓	✓				
Ar + 5% O ₂			✓	✓				
Ar + 5% CO ₂				✓				
Ar + 10% CO ₂				✓				
Ar + 25% CO ₂			✓	✓	✓			
Ar + 25% He	✓	✓		✓	✓	✓		
Ar + 50% He	✓	✓			✓	✓		
Ar + 75% He	✓	✓	✓		✓	✓		
Ar + CO ₂ + O ₂			✓	✓				
Ar + CO ₂ + N			✓					
Ar + CO ₂ + He	✓		✓					

ข้อมูลที่ผู้เขียนได้นำมาเสนอไว้ข้างต้นนั้น บางส่วนได้จากการค้นคว้าและรวบรวมมาจากงานวิจัยต่าง ๆ แต่ส่วนใหญ่เป็นข้อมูลของการศึกษาวิจัยของผู้เขียนเองที่ได้ทำการวิจัยมาตั้งแต่ต้น ในเรื่องของการใช้แก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติก (นิกเกิลต่ำ) Series 200 Wichan chuaiphan et al. (2020) และ Wichan Chuaiphan et al. (2014)

3.3 การเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux Cored Arc Welding : FCAW)

เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่ใช้หลักการเชื่อมแบบการอาร์ก ซึ่งมีระบบกลไกของการเชื่อมที่เหมือนกับการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (MIG/MAG) โดยต่างกันที่ลักษณะของลวดเชื่อมเท่านั้น กล่าวคือลวดเชื่อมจะมีลักษณะเป็นรูท่อนซึ่งบรรจุผงฟลักซ์ไว้ภายใน ดังนั้น จึงเรียกระบบวิธีนี้ว่า การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ หรืออีกชื่อที่นิยมเรียกกันคือ การเชื่อมฟลักซ์คอร์ เป็นการเชื่อมอาร์กที่ได้รับความร้อนจากการอาร์กกระหว่างปลายลวดเชื่อมกับผิวชิ้นงาน โดยลวดเชื่อมจะถูกส่งออกไปจากล้อม้วนลวดไปยังหัวเชื่อมด้วยระบบกลไกการป้อนลวด ขณะอาร์กลวดเชื่อมโลหะก็จะหลอมละลายพร้อมกับฟลักซ์ภายใน แล้วฟลักซ์ก็จะลอยตัวขึ้นไปทำหน้าที่เป็นแก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายทันที ดังแสดงถึงอุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ในรูปที่ 3.52 ระบบการป้อนลวดเชื่อมเป็นระบบอัตโนมัติ ซึ่งช่างเชื่อมสามารถเลือกใช้ได้ทั้งวิธีการเชื่อมด้วยระบบอัตโนมัติ (Full Automatic operation) และวิธีการเชื่อมด้วยระบบกึ่งเครื่องอัตโนมัติ (Semi Automatic operation)



รูปที่ 3.52 อุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW)

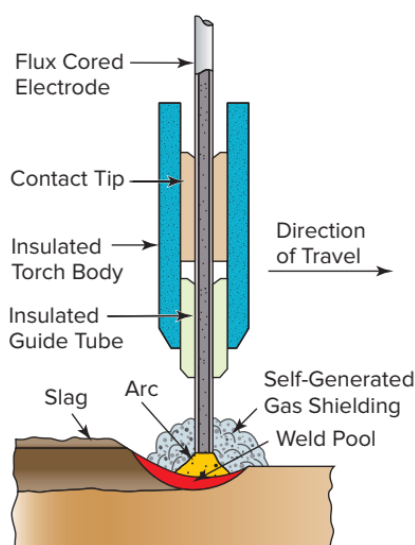
ที่มา : The Lincoln Electric Company, 2015

ก. วิธีการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์หรือฟลักซ์คอร์นี้ มี 2 แบบตามชนิดของลวดเชื่อม คือ

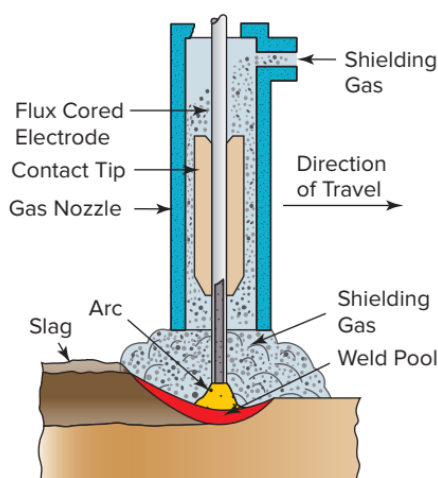
1. การเชื่อมแบบชนิดใช้แก๊สปกคลุมที่เกิดจากฟลักซ์ภายในท่อนลวดเชื่อม (Self-shielding gas flux cored arc welding) หรือที่รู้จักกันในชื่อย่อว่า FCAW-S การเชื่อมแบบนี้ไม่ต้องใช้แก๊สปกคลุมจากถังบรรจุ แต่จะอาศัยแก๊สปกคลุมที่เกิดจากการหลอมละลายของผงฟลักซ์ที่สำเร็จรูปอยู่ภายในกับ

ลวดเชื่อมมาเรียบร้อยแล้ว และไม่ต้องมีอุปกรณ์หัวฉีดแก๊ส (Gas Nozzle) ดังแสดงระบบกลไกของการอาร์กในรูปที่ 3.53 (ก)

2. การเชื่อมแบบชนิดใช้แก๊สปกคลุมที่เกิดจากฟลักซ์ภายในท่อลวดเชื่อมและแก๊สปกคลุมร่วมภายนอกจากถังบรรจุ (Gas-shielding gas flux cored arc welding) หรือที่รู้จักกันในชื่อย่อว่า FCAW-G การเชื่อมแบบนี้จะได้แก๊สปกคลุมจากสองแหล่งบางที่เรียกว่า Dual – shielding gas flux cored arc welding กล่าวคือ ได้แก๊สปกคลุมจากผงฟลักซ์ในไส้ของลวดเชื่อมเหมือนกับแบบแรก และที่เพิ่มเติมได้จากการป้อนเข้าไปจากถังบรรจุ ซึ่งต้องมีชุดอุปกรณ์หัวฉีดแก๊สร่วมด้วย ดังแสดงระบบกลไกของการอาร์กในรูปที่ 3.53 (ข) ซึ่งได้กล่าวไว้โดย Edward R. Bohbart (2017)



(ก) การเชื่อมแบบ FCAW-S



(ข) การเชื่อมแบบ FCAW-G

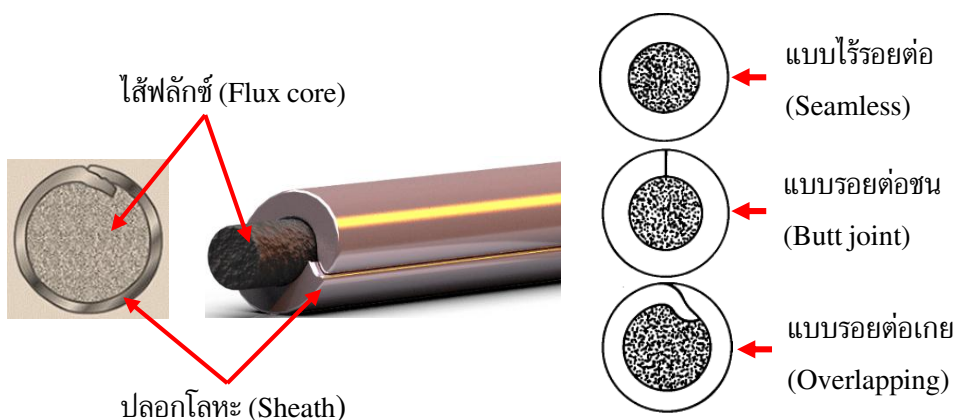
รูปที่ 3.53 ระบบของการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แบบ FCAW-S และแบบ FCAW-G

ที่มา : Edward R. Bohbart, *Welding Principles and Practices*, 2017

ข. ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux cored electrode)

ลวดเชื่อมแบบไส้ฟลักซ์หรือลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์แตกต่างจากลวดเชื่อมชนิดอื่นที่ส่วนใหญ่เป็นโลหะเส้นลวดตัน (Solid wire) เปลือย หรือไม่มีฟลักซ์หุ้ม แต่ลวดเชื่อมแบบไส้ฟลักซ์นี้เป็นลวดเชื่อมที่มีลักษณะเป็นโลหะท่อหรือที่เรียกว่าปลอก (Sheath) แล้วบรรจุผงฟลักซ์ไว้ภายใน ซึ่งประกอบไปด้วยผงโลหะและอโลหะ (Metallic & Non-metallic powers) และผงฟลักซ์ (Fluxes power) ที่ผสมกันอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.54 (ก) ซึ่งวิธีการสร้างปลอกโลหะที่ใช้หุ้มฟลักซ์มีทั้งแบบท่อไม่มีตะเข็บ (Seamless cored wire) แบบมีตะเข็บต่อชน (Butt joint cored wire) และแบบมีตะเข็บต่อเกย (Overlapping

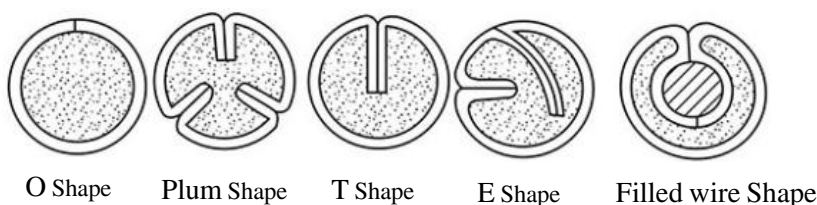
cored wire) ดังแสดงรูปที่ 3.54 (ข) โดยมีรูปทรงหน้าตัดของปลอกที่หลากหลายที่บีบอัดผงฟลักซ์ไว้ภายใน เช่น รูปทรงหน้าตัดแบบอักษรตัวโอ (O) ตัวที (T) หรือ ตัวอี (E) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.55



(ก) ส่วนประกอบของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (ข) วิธีการสร้างปลอกโลหะที่ใช้หุ้มฟลักซ์

รูปที่ 3.54 ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux core electrode)

ที่มา : Weld Notes. FCA Welding 2018



รูปที่ 3.55 ลักษณะรูปทรงหน้าตัดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

ที่มา : KOBELCO, Flux cored wires. 2015

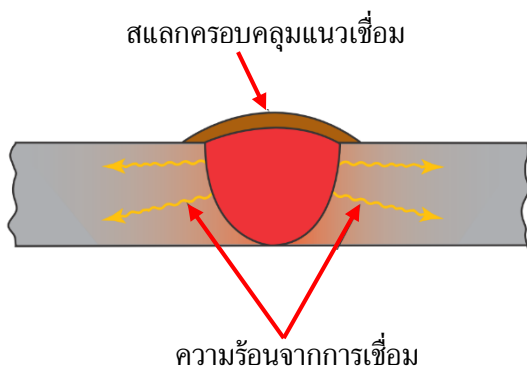
บทบาทหน้าที่ของผงฟลักซ์ที่บรรจุอยู่ในลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ต่อการเชื่อม พอจะสรุปได้ดังนี้

1. เป็นตัวกำหนดสมบัติของแนวเชื่อม เช่น สมบัติทางกล ทางเคมี ทางโลหะวิทยา และสมบัติด้านอื่น ๆ ที่มีต่อแนวเชื่อมต่อไป
2. เป็นตัวการสร้างแก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายขณะเชื่อมจากแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนในสภาพแวดล้อมที่จะเข้ามารวมตัวในเนื้อโลหะเชื่อม
3. เป็นตัวทำปฏิกิริยากับสารมลทินที่มีอยู่ในบ่อหลอมละลายที่ขณะหลอมเหลวเพื่อให้แยกออกมาเป็นสแลกลอยขึ้นสู่ผิวของแนวเชื่อม
4. เป็นตัวผลิตสแลกเพื่อปกคลุมแนวเชื่อมขณะแข็งตัว และช่วยในการควบคุมขนาดและกำหนดรูปร่างของแนวเชื่อม

5. เป็นตัวช่วยในการควบคุมเปลวอาร์กให้เกิดความเสถียร ซึ่งช่วยลดการเกิดสะเก็ดโลหะ และช่วยให้อัตราการเติมลวดคงที่สม่ำเสมอ ทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีขนาดและรูปร่างตามต้องการ

3.3.1 ระบบการอาร์กของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux core electrode arc system)

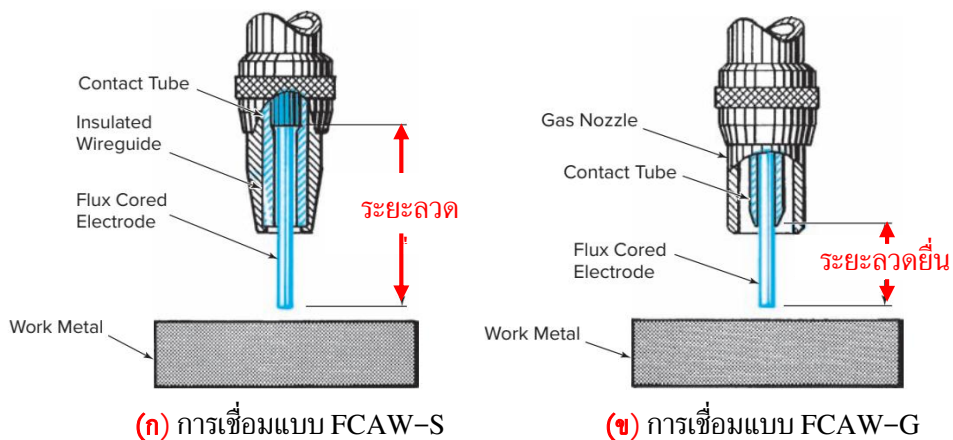
Larry Jeffus (2012) ได้อธิบายถึงระบบการอาร์กของขบวนการเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ไว้ว่าเป็นการเชื่อมที่อาศัยแหล่งพลังงานจากเครื่องเชื่อมที่จะทำให้เกิดการอาร์กขึ้นระหว่างปลายลวดกับชิ้นงานเหมือนกันกับการเชื่อมอาร์กของกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยเนื้อโลหะเชื่อมจะได้รับการหลอมละลายของลวดที่เป็นท่อโลหะที่มีผงฟลักซ์บรรจุอยู่ภายใน ซึ่งผงฟลักซ์นั้นนอกจากจะทำหน้าที่เป็นแก๊สปกคลุมในหน้าที่หลักแล้วนั้นยังเป็นตัวช่วยกำจัดออกซิเจน (Deoxidizer) ที่ปะปนอยู่ในบ่อหลอมละลายได้ดี อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมด้วยลวดแบบ FCAW-S หรือ ด้วยลวดแบบ FCAW-G หลังจากที่ย่อหลอมละลายแข็งตัวก็จะเกิดสแลกแข็งตัวอยู่บนแนวเชื่อม ต้องทำการเคาะหรือกำจัดออกซึ่งต่างจากการเชื่อมแบบ GMAW ดังแสดงในรูปที่ 3.56 นอกจากนี้สแลกที่ครอบคลุมบ่อหลอมละลายอยู่นั้นยังส่งผลทำให้อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมช้าลง เพราะความร้อนระบายออกไปได้ไม่ทุกทิศทาง



รูปที่ 3.56 ลักษณะแนวเชื่อมของการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and metal fabrication*, 2012.

การเลือกใช้ชนิดของลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ต้องการเชื่อม ซึ่งลวดเชื่อมทั้งสองแบบจะมีการตั้งระยะยื่นของลวดเชื่อม (Electrode extension or Stick out) แตกต่างกัน ดังแสดงเปรียบเทียบความแตกต่างในรูปที่ 3.57 โดยลวดเชื่อมแบบ FCAW-S ในรูปที่ 3.57 (ก) เป็นชนิดที่สร้างแก๊สปกคลุมได้ด้วยตัวเอง จะมีความพิเศษที่สามารถปล่อยระยะลวดยื่นออกมาได้มากกว่าปกติ ซึ่งปลายของลวดเชื่อมยื่นเลยปลายท่อนำกระแส (Contact tube) ได้มากถึง 15–25 มม. โดยเหมาะกับการเชื่อมโลหะที่บาง เนื่องจากปลายลวดที่ห่างจะเกิดความร้อนสูง เพราะเกิดความต้านทานกระแสที่ปลายลวด กระแสก็จะลดลงส่งผลทำให้การสร้างบ่อหลอมละลายเล็กและตื้น วิธีนี้มักนิยมใช้ในการอุ่นลวดให้ร้อนก่อนอาร์ก นอกจากนี้ยังพบว่าลวดแบบสร้างแก๊สปกคลุมได้เองควรเลือกขั้วเชื่อมแบบ DCEN ซึ่งก็มีผลที่จะทำให้บ่อหลอมละลายตื้น และควรเลือกขนาดลวดที่เล็ก เช่น ขนาด 0.8 – 1.2 มม. สำหรับโลหะแผ่นบางในอุตสาหกรรมผลิตตัวถังรถยนต์



รูปที่ 3.57 ระยะลวดยื่นของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แบบ FCAW-S และแบบ FCAW-G

ที่มา : Edward R. Bohbart, *Welding Principles and Practices*. 2017

สำหรับลวดเชื่อมแบบอาศัยแก๊สปกคลุมจากถังบรรจุร่วมด้วยจะต้องตั้งระยะลวดยื่นที่น้อยกว่า ดังใน **รูปที่ 3.57 (ข)** จะไม่เกิดแรงดันตกคร่อมที่เปลวอาร์กทำให้เกิดกระแสที่สูงขึ้น จึงเป็นลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับการเชื่อมโลหะหนา ที่มีรอยขีดลึกมาก สามารถใช้ได้กับขนาดลวดที่ใหญ่ ๆ ได้ดี

ระยะยื่นของลวด Edward R. Bohbart (2017) ได้ระบุไว้ว่า มีผลกระทบต่อค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง จึงมีความจำเป็นที่ช่างเชื่อมต้องพิจารณาปรับค่าต่าง ๆ ให้เหมาะสม ตัวอย่างเช่น การหลอมของลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ทั้งในบล็อกโลหะและสารผสมของฟลักซ์ที่อัดอยู่ภายใน ซึ่งขณะอาร์กต้องไม่เกิดการสูญเสียหรือสูญเสียน้อยที่สุดของธาตุผสมอยู่จึงต้องตั้งระยะยื่นลวดให้เหมาะสม เป็นต้น ถ้ากรณีที่ช่างเชื่อมตั้งระยะลวดยื่นยาวออกมามากเกินไป (Too long extension) ก็จะทำให้เกิดสะเก็ดโลหะกระเด็นออกมามาก เปลวอาร์กไม่คงที่ส่งผลต่อขนาดของบ่อหลอมละลายที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ผิวและขนาดของแนวเชื่อมจึงมีขนาดไม่แน่นอน ในทางกลับกันถ้ากรณีปรับตั้งระยะยื่นลวดสั้นเกินไป (Too short extension) ขณะอาร์กจะเกิดระยะอาร์กที่สูงมากเกินไป ซึ่งส่งผลกระทบต่อแรงดันเชื่อม ยิ่งถ้าเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแบบ FCAW-G ที่ต้องใช้แก๊สจากถังบรรจุก็จะยิ่งทำให้เกิดสะเก็ดโลหะมากยิ่งขึ้น และมักจะไปเกาะติดอยู่ที่ปากของปลายของหัวฉีดแก๊ส ดังแสดงใน **รูปที่ 3.58** ถ้าเกาะติดมากขึ้นก็จะอุดรูฉีดแก๊สทำให้แก๊สไหลออกมาปกคลุมบ่อหลอมละลายได้ไม่เพียงพอ และทั่วถึง ก็จะส่งผลต่อแนวเชื่อมเมื่อแข็งตัวจะเกิดรูพรุนหรือเกิดปฏิกิริยาออกไซด์อยู่ภายในเนื้อโลหะเชื่อม ดังนั้น ผู้ผลิตลวดเชื่อมมักมีข้อแนะนำต่อช่างเชื่อมถึงระยะยื่นของปลายลวดเชื่อมที่เหมาะสมไว้คู่กับลวดเชื่อม โดยทั่วไปจะกำหนดค่าระยะยื่นลวดอยู่ในพิสัย 20 ถึง 40 มม. สำหรับลวดเชื่อมแบบ FCAW-G และพิสัย 20 ถึง 40 มม. สำหรับลวดเชื่อมแบบ FCAW-S แต่ทั้งนี้ก็ต้องพิจารณาร่วมกับปัจจัยการเชื่อมด้านอื่น ๆ ประกอบการตัดสินใจกำหนดระยะยื่นลวด โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสูงของหัวฉีดแก๊สต้องมีความสูงจากปลายลวดเชื่อมให้น้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถปฏิบัติการได้ เพราะมีผลกระทบต่อกรณีหรือส่งแก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลาย ซึ่งได้มีการรวบรวมข้อมูลจากการทดลองของ

ผู้ผลิตลวดเชื่อมได้เสนอแนะถึงความเหมาะสมของระยะยื่นลวด(Electrode extension) กับความสูงของหัวฉีดแก๊ส (Gas nozzle height) ดังแสดงในตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.58 ลักษณะของสะเก็ดโลหะ (Spatter)

เกาะที่หัวฉีดแก๊สและท่อนำกระแส

ที่มา : Edward R. Bohbart, *Welding Principles and Practices*, 2017

ตารางที่ 3.6 การเลือกระยะยื่นลวดกับความสูงของหัวฉีดแก๊สและขนาดลวดเชื่อมที่เหมาะสม

ที่มา : KOBELCO, *Welding Handbook*, 2008

ขนาดลวด (Wire size) มม.	กระแสไฟเชื่อม (Welding current) แอมแปร์	ระยะยื่นลวด (Electrode extension) มม.	ความสูงหัวฉีดแก๊ส (Nozzle gas height) มม.
1.2	100–200	10–15	10–15
	200–300	16–25	15–20
1.6	200–300	15–25	15–20
	300–450	20–25	20–25

หมายเหตุ

- ความสูงของหัวฉีดแก๊สควรจะเท่ากับหรือน้อยกว่าระยะยื่นลวด
- ความโตของหัวฉีดแก๊สถ้าเล็กลง ก็ต้องลดระยะยื่นลวดและลดความสูงของหัวฉีดแก๊สลงอย่างเป็นสัดส่วน

The diagram illustrates the components of a gas welding torch. At the top is the Electrode Guide Tube, which leads into the Insulated Nozzle. Inside the nozzle is the Contact Tube. The Insulated Guide Tube surrounds the electrode. The Flux Cored Electrode is shown extending from the nozzle. The Visible Extension is the part of the electrode visible outside the nozzle. The Electrode Extension is the total length of the electrode from the nozzle to the work. The Work is the metal being welded.

จากที่ผู้เขียนได้กล่าวมาข้างต้นถึงเหตุผลของการเลือกชนิดของลวดเชื่อมที่เหมาะสมนั้น ก็เพื่อต้องการให้ช่างเชื่อมลดข้อบกพร่องที่จะเกิดขึ้นกับแนวเชื่อม และลดปัญหาในการแก้ไขงานเชื่อม พร้อมกับการบ่งชี้ถึงข้อจำกัดของการเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ที่ช่างเชื่อมควรทราบและทำความเข้าใจ

3.3.2 กระแสไฟ แรงดันอาร์ก และ อัตราการป้อนลวด (Current, Voltage and Deposition rate)

กระแสไฟเชื่อม (Welding current) สำหรับการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะใช้เครื่องเชื่อมที่ผลิตกระแสไฟตรงชนิดแรงดันคงที่ (Constant Voltage : CV) โดยส่วนใหญ่จะเป็นระบบการต่อขั้วเชื่อมแบบลวดเชื่อมเป็นขั้วบวก (Direct Current Electrode Positive : DCEP) และสำหรับลวด

เชื่อมไส้ฟลักซ์บางเกรดก็มีการใช้ระบบ การต่อหัวเชื่อมแบบลวดเชื่อมเป็นขั้วลบ (Direct Current Electrode Negative : DCEN) ดังแสดงใน **ตารางที่ 3.7** โดยข้อมูลจากการทดลองของผู้ผลิตลวดเชื่อม KOBELCO Welding Handbook (2008) แต่มีในบางครั้งสำหรับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ชนิดพิเศษ จะใช้เครื่องเชื่อมที่ผลิตกระแสไฟสลับชนิดกระแสคงที่ (Constant Current : CC) ซึ่งลวดเชื่อมจะมีสมบัติที่ไวต่อแรงดัน โดยใช้กระแสอยู่ในช่วง 50 ถึง 750 แอมแปร์

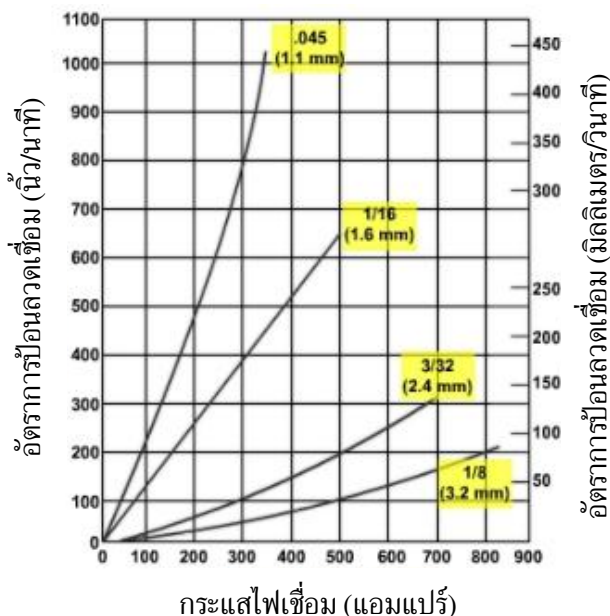
การปรับตั้งค่ากระแสไฟเชื่อมจะต้องสัมพันธ์กับอัตราการป้อนลวด ขนาดของลวด ตำแหน่งท่าเชื่อมและระยะยื่นลวด ซึ่งจะมีผลต่อความสม่ำเสมอของการอาร์ก การซึมลึก รวมไปถึงเกล็ดและรูปร่างของแนวเชื่อม ซึ่งถ้าวัดเชื่อมมีขนาดเล็กอัตราเร็วของการป้อนลวดจะสูงกระแสจะต้องต่ำ เมื่อขนาดของลวดโตมากขึ้นอัตราเร็วการป้อนลวดก็จะลดลงกระแสไฟเชื่อมจะเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ที่กล่าวมาผู้เขียนได้อ้างอิงจากข้อมูลของการทดลองเชื่อมลวดไส้ฟลักซ์ชนิด E 70T-1 ใน **รูปที่ 3.59** และได้แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของขนาดลวดเชื่อม ท่าเชื่อม กับกระแสเชื่อมและแรงดันอาร์กที่เหมาะสมของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนใน **ตารางที่ 3.8**

ตารางที่ 3.7 การเลือกกระแสไฟเชื่อมที่สัมพันธ์กับชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์เหล็กกล้าคาร์บอน

ที่มา : KOBELCO, Welding Handbook, 2008

ชนิดลวดเชื่อม (Electrode):AWS	กระแสไฟเชื่อม (Welding Current)	แก๊สปกคลุม (Shielding Gas)	แนวเชื่อม (Single or Multiple Pass)
EXXT-1	DCEP	Ar-CO ₂	Multiple Pass
EXXT-2	DCEP	Ar-CO ₂	Single Pass
EXXT-3	DCEP	None	Single Pass
EXXT-4	DCEP	None	Multiple Pass
EXXT-5	DCEP หรือ DCEN	Ar-CO ₂	Multiple Pass
EXXT-6	DCEP	None	Multiple Pass
EXXT-7	DCEN	None	Multiple Pass
EXXT-8	DCEN	None	Multiple Pass
EXXT-10	DCEN	None	Single Pass
EXXT-11	DCEN	None	Multiple Pass
EXXT-G	DCEP หรือ DCEN	Ar-CO ₂ or None	Multiple Pass
EXXT-GS	DCEP หรือ DCEN	Ar-CO ₂ or None	Single Pass

หมายเหตุ – การใช้แก๊สปกคลุม Ar-CO₂ หมายถึง เชื่อมด้วยลวดเชื่อมแบบ FCAW-G
– การใช้แก๊สปกคลุม None หมายถึง เชื่อมด้วยลวดเชื่อมแบบ FCAW-S



รูปที่ 3.59 ความสัมพันธ์ของ
กระแสไฟเชื่อมกับอัตราเร็ว
การป้อนลวดชนิด FCAW-G
ที่มา : *Welding Theory and
Application, TC 9-237, 2017*

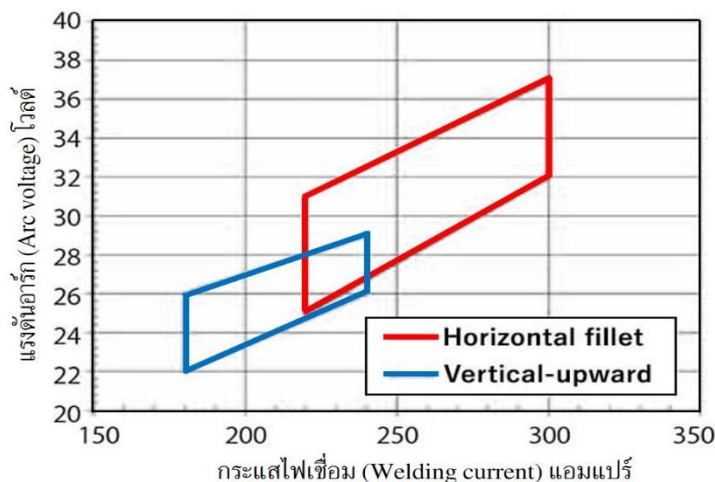
ตารางที่ 3.8 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งท่าเชื่อมกับกระแสเชื่อมและแรงดันเชื่อม

ที่มา : *KOBELCO, Welding Handbook, 2008*

ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้า (Flux cored electrode)						
ขนาดลวดเชื่อม (Electrode size) (mm)	ตำแหน่งท่าเชื่อม (Welding position)					
	ท่าราบ		ท่าขนานนอน		ท่าตั้ง	
	(Flat position)		(Horizontal position)		(Vertical position)	
	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)
1.143	150-225	22-27	150-225	22-26	125-200	22-25
1.587	175-300	24-29	175-275	25-28	150-200	24-27
1.727	175-325	24-26	175-325	24-26	-	-
1.828	200-400	25-30	200-375	26-30	175-225	25-29
1.984	225-350	23-25	175-315	22-24	175-225	23-25
2.381	300-500	25-32	300-450	25-30	-	-
2.778	400-525	26-33	-	-	-	-
3.175	450-650	28-34	-	-	-	-

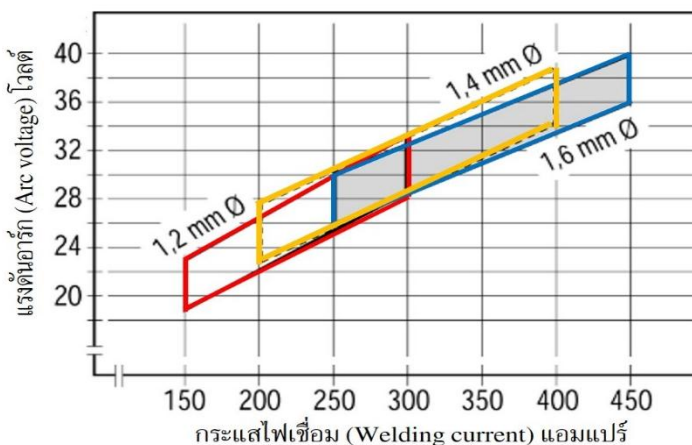
แรงดันอาร์ก (Arc voltage) เป็นค่าที่ใช้บอกระยะห่างระหว่างปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ซึ่งก็คือระยะอาร์ก (Arc length) สามารถอ่านได้จากหน้าปัดชุดแผงควบคุมของเครื่องเชื่อม สำหรับขบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ แรงดันอาร์กจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพของแนวเชื่อมสูงมาก กล่าวคือ ถ้าแรงดันอาร์กมีค่าที่สูงมากเกินไป จะพบว่าระยะห่างของเปลวอาร์กก็จะสูงขึ้น เกิดสะเก็ดโลหะกระเด็น

ออกมามากและเป็นวงกว้าง ขนาดแนวเชื่อมที่ได้ก็ไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการเชื่อมด้วยลวดชนิดที่สร้างแก๊สปกคลุมขึ้นเอง (FCAW-S) จะเปิดโอกาสให้แก๊สจากสภาพแวดล้อมภายนอกเข้ามา รวมตัวกับน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้แนวเชื่อมเกิดรูพูนมากขึ้น หรือถ้าเป็นชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมก็จะเกิดการลดลงของเฟสเฟอร์ไรต์ และเกิดแตกร้าวได้ง่าย แต่ถ้ามีการปรับค่าแรงดันอาร์กให้ลดต่ำลงระยะห่างของเพลวอาร์กก็จะชิดกับชิ้นงานมากขึ้น จะทำให้บ่อหลอมละลายเล็กลงและก็จะได้แนวเชื่อมที่นูนและแคบระยะการซึมลึกก็จะน้อย สอดคล้องกับผลการวิจัย Wichan Chuaiphan et al. (2012) อย่างไรก็ตามการปรับค่าแรงดันอาร์กก็ต้องพิจารณาร่วมกันกับปัจจัยการเชื่อมด้านอื่น ๆ เช่น ตำแหน่งท่าเชื่อมแนวขนานนอนจะต้องตั้งค่าระยะอาร์กที่สูงกว่าตำแหน่งท่าตั้งแบบเชื่อมขึ้น ดังแสดงใน **รูปที่ 3.60 (ก)** นอกจากนี้ระยะอาร์กก็ยังขึ้นอยู่กับขนาดของลวดที่เชื่อม ซึ่งโดยปกติลวดเชื่อมที่มีขนาดโต จะต้องตั้งระยะอาร์กที่สูง ดังแสดงใน **รูปที่ 3.60 (ข)**



รูปที่ 3.60 ความสัมพันธ์ของแรงดันอาร์กที่มีต่อตำแหน่งท่าเชื่อมและขนาดของลวดเชื่อมของการเชื่อม FCAW
ที่มา : Elgacore MXA 100, FCAW, 2013

(ก) ความสัมพันธ์ของแรงดันอาร์กกับตำแหน่งท่าเชื่อม

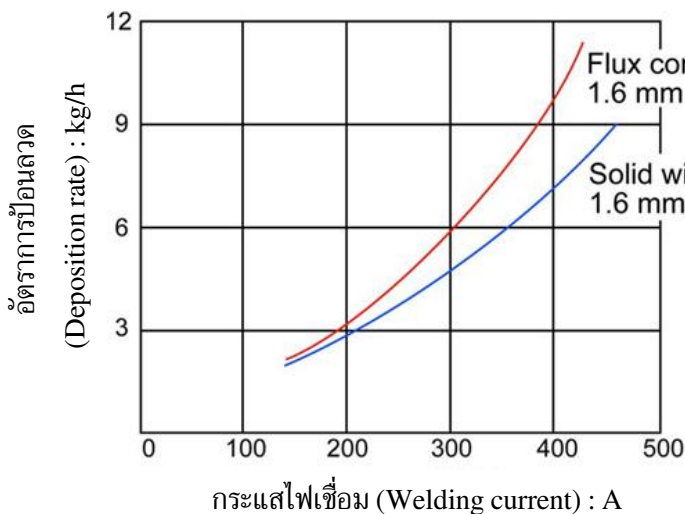


(ข) ความสัมพันธ์ของแรงดันอาร์กกับขนาดลวดเชื่อม

อัตราการป้อนลวด (Deposition rate) เป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ถึงปริมาณการเติมของเนื้อโลหะลวดเชื่อมลงในบ่อหลอมละลายในหนึ่งเวลา ซึ่งส่วนใหญ่จะบอกหน่วยวัดเป็น กิโลกรัม/ชั่วโมง (kg/h) อัตราการป้อนลวดเชื่อมจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อกระแสไฟเชื่อมสูงขึ้นโดยมีแนวโน้มที่เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน ดังแสดงใน **รูปที่ 3.61** และยังแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นด้วยว่าอัตราการป้อนลวดเชื่อมของลวดเชื่อมแบบไส้ฟลักซ์ (Flux cored wire) จะมีอัตราป้อนที่สูงกว่าลวดเชื่อมแบบเส้นลวดตัน (Solid wire) ที่ขนาดลวดเชื่อมเท่ากันและค่ากระแสไฟเชื่อมเท่ากันกล่าวโดย Moniz B.J. & Miller R.J. (2004)

อัตราการป้อนลวดถูกควบคุมด้วยชุดป้อนลวด โดยมีข้อควรระวัง ดังต่อไปนี้

- ชุดล่อขับป้อนลวดต้องปรับตั้งให้ถูกต้องและเหมาะสม โดยต้องไม่ใช่แรงกดบนลวดที่มากเกินไป เพราะจะทำให้ลวดเสียรูปทรง และเกิดการเคลื่อนที่ไปแบบไม่สม่ำเสมอ
- เลือกใช้ขนาดความโตของร่อนนำลวดที่เหมาะสมกับขนาดความโตของลวดเชื่อม
- ท่อนำลวด (Conduit tube) จะต้องไม่อยู่ในลักษณะที่โค้งงอมากเกินไป เพราะจะทำให้เกิดการเสียดสีกับผิวของลวดเชื่อม ทำให้อัตราการป้อนลวดต่ำลง และขนาดของท่อนำลวดต้องมีขนาดรูที่เหมาะสมกับขนาดของลวดเชื่อม
- ขนาดความโตของท่อนำกระแส (Contact tip) จะต้องมีความเหมาะสมและต้องสัมพันธ์กับขนาดความโตของลวดเชื่อม เพราะส่งผลกระทบต่อความราบเรียบของการป้อนลวดขณะเชื่อม



รูปที่ 3.61

ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนลวดกับกระแสไฟเชื่อมของการเชื่อม FCAW

ที่มา : TWI. World Center for materials joining technology. 2005

3.3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การเชื่อม (Welding equipment)

เครื่องเชื่อม (Welding machine) ที่ใช้สำหรับเป็นแหล่งของพลังงานการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ทั้งชนิดลวดเชื่อมแบบ FCAW-S และชนิดแบบ FCAW-G เป็นเครื่องเชื่อมชุดเดียวกันหรือเหมือนกันซึ่งก็คือ เครื่องเชื่อมที่ใช้กับกรรมวิธีการเชื่อมแบบ MIG/MAG โดยส่วนใหญ่เป็นเครื่องเชื่อมชนิดกระแสไฟตรง ค่าแรงดันคงที่ (DC-Constant Voltage) แต่ก็ยังมีการเลือกใช้เครื่องเชื่อมชนิด

กระแสตรง ค่ากระแสคงที่ (DC-Constant Current) สำหรับลวดเชื่อมชนิดพิเศษ จะมีชุดป้อนลวดที่พิเศษเพิ่มเติม ซึ่งเครื่องเชื่อมกระแสไฟตรงมีทั้งที่เป็นแบบหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformers) และแบบมอเตอร์-เจนเนอเรเตอร์ (Motor-Generators) อ้างอิงตามผู้ผลิตเครื่องเชื่อม Miller Electric (2013) ดังแสดงในรูปที่ 3.62 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองแบบช่างเชื่อมสามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสม เช่น การเชื่อมภาคสนามที่ไม่มีกระแสไฟฟ้ารองรับก็จะใช้แบบมอเตอร์-เจนเนอเรเตอร์ ซึ่งปัจจุบันมีทั้งประเภทที่ใช้พลังงานน้ำมันและแก๊สเป็นเชื้อเพลิง บางรุ่นออกแบบให้มีล้อเซ็นเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย เป็นต้น



(ก) เครื่องเชื่อมแบบหม้อแปลงไฟฟ้า



(ข) เครื่องเชื่อมแบบมอเตอร์-เจนเนอเรเตอร์

รูปที่ 3.62 เครื่องเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

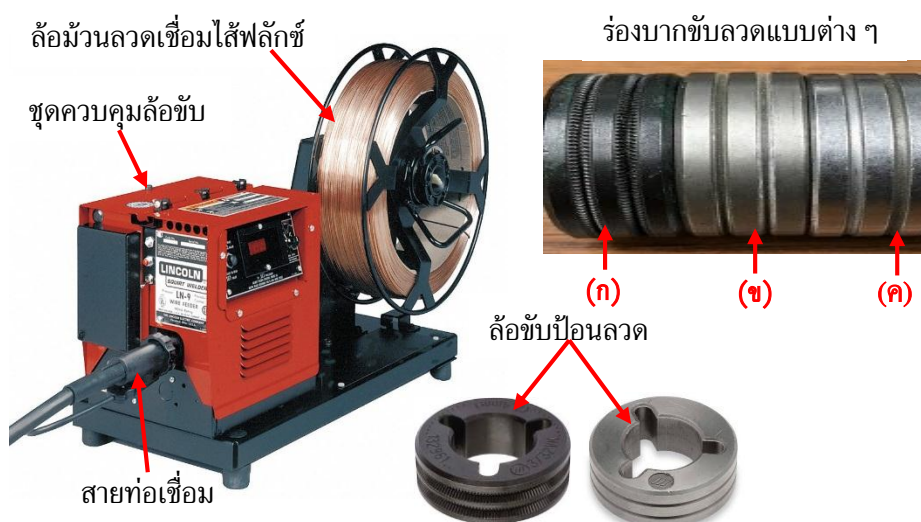
ที่มา : Miller Electric Mfg., Welding Machine, 2013

ชุดป้อนลวด (Wire feed units) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญซึ่งทำหน้าที่ป้อนส่งลวดเชื่อมเพื่อไปอาร์กกับผิวชิ้นงานตลอดเวลาในขณะทำการเชื่อม โดยมีระบบของล้อขับเคลื่อนลวดหรือดึงลวดออกจากล้อม้วนลวด (Wire reel) ที่ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ แล้วส่งผ่านชุดสายเชื่อมไปยังหัวเชื่อม ดังแสดงระบบกลไกการป้อนลวดในรูปที่ 3.63 สำหรับในกรณีการเชื่อมแบบระบบอัตโนมัติ (Automatic welding process) ระบบการป้อนลวดจะมีชุดขับเคลื่อนเพิ่มเติมอีกตำแหน่ง ที่ติดตั้งไว้ก่อนที่ลวดจะเข้าถึงหัวนำลวด (Guide nozzle) จะเรียกตำแหน่งขับเคลื่อนนี้ว่า Intermediate relay unit ทำหน้าที่ปรับตั้งความตรงของลวดเชื่อมที่อาจเกิดการหักงอจากการม้วนลวดเข้าล้อ

ระบบการขับเคลื่อนลวดที่นิยมใช้กันมี 3 วิธี ซึ่งจะมีกลไกการป้อนลวดที่เหมือนกันกับระบบการป้อนลวดเชื่อมของการเชื่อม MIG/MAG ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อชุดอุปกรณ์การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW) แต่มีข้อที่พึงระมัดระวังในการเลือกซื้อชุดป้อนลวด (Wire feed roller) เพราะลวดเชื่อมมีลักษณะเป็นท่อนางที่มีฟลักซ์บรรจุอยู่ภายในถ้าบีบอัดแน่นมากเกินไปจะทำให้ลวดเสียรูปทรงซึ่งจะมีผลต่ออัตราการป้อนลวดสู่การอาร์ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งลวดไส้ฟลักซ์ประเภทโลหะอ่อน ๆ จึงมิได้มีข้อแนะนำจากผู้ผลิตลวดเชื่อมให้เลือกใช้ล้อขับเคลื่อนแบบร่องตัววี (V) สำหรับลวดเชื่อมประเภทโลหะ

เหล็ก และลัดขั้วลวดแบบร่องครึ่งวงกลมหรืออาจมีผิวร่องที่มีผิวหยาบ ๆ สำหรับลวดเชื่อมมอลูมิเนียม ดังตัวอย่างร่องบากของลัดขั้วลวดในรูปที่ 3.63 แบบ (ก) เป็นร่องบากแบบตัววีมีร่องฟัน แบบ (ข) เป็นแบบร่องตัววี (V) และ แบบ (ค) เป็นแบบร่องโค้งครึ่งวงกลมอ้างอิง Miller Electric (2013)

การป้อนแรงบีบกดลวดผ่านชุดลัดขั้วไม่ว่าจะเป็นแบบชุดลัดขั้ว 2 ล้อ หรือ 4 ล้อ ก็ตามจะต้องใช้แรงบีบที่ไม่มากหรือน้อยจนเกินไป หมายถึง แรงมากเกินไปจนลวดเสียรูปทรง (Deformation) หรือแรงน้อยเกินไปจนเกิดการลื่น (Slipping) ของลวด ทั้งนี้ก็ต้องเลือกชนิดของร่องบากลัดขั้วให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะลวดและขนาดของลวด เป็นต้น



รูปที่ 3.63 ชุดระบบป้อนลวดและลัดขั้วของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

ที่มา : Tools Working, Welding Machine, 2013

ชุดสายเชื่อมและหัวเชื่อม (Welding cable units and welding torch)

ชุดสายเชื่อม (Welding cable units) เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบกันอยู่เป็นชุดเดียวกันหัวเชื่อม โดยปลายของสายเชื่อมจะต่อเข้ากับเครื่องเชื่อม ส่วนปลายสายอีกข้างต่อเข้ากับหัวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.64 โดยส่วนของสายเชื่อมหรือบางครั้งเรียกว่า ชุดสายท่อเชื่อม (Tube package) ภายในประกอบไปด้วย สายท่อแก๊สปกคลุม (Shielding gas tube) ท่อนำป้อนลวด (Wire feed tube) ชุดสายควบคุม (Control lead) รวมถึง ท่อระบายความร้อนจากการเชื่อม และชุดสายไฟเชื่อม ระบบระบายความร้อนถ้ากรณีใช้น้ำระบาย จะต้องมียูนิทน้ำไป-กลับอยู่ภายใน ดังนั้น สายเชื่อมชนิดนี้จะมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ มีน้ำหนักมากช่างเชื่อมจะไม่นิยมใช้ แต่ถ้าเครื่องเชื่อมใช้ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศสายเชื่อมจะเบากว่าเคลื่อนไหวสะดวกไม่ยุ่งยากเหมือนระบบใช้น้ำ

สายเชื่อมที่ดีต้องคล่องตัวในการใช้งาน โค้งงอได้ไม่เสียรูป (Flexible) ท่อนำลวดภายในจะทำจากเหล็กกล้าที่ขดเป็นม้วนเกลียว (Spiral) เพื่อที่จะบิดตัวโค้งงอได้มากไม่เป็นอุปสรรคต่อการไหลของลวด

เชื่อม และบางครั้งก็ทำจากพลาสติกชนิดเทฟลอน ใช้สำหรับลวดเชื่อมบางชนิด ซึ่งท่อนำแบบพลาสติกจะทนต่อการสึกหรอได้ดี ส่วนชุดสายควบคุม จะเป็นตัวนำสัญญาณที่ส่งมาจากตัวสวิตช์ควบคุมที่หัวเชื่อม สายส่งสัญญาณจะต้องมีประสิทธิภาพสูงเพราะจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความละเอียดและแม่นยำในการควบคุมระบบการเชื่อมข้อมูลจาก Miller Electric (2013)



รูปที่ 3.64 ชุดสายเชื่อมของขบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

ที่มา : TWI. World Center for materials joining technology. 2005

หัวเชื่อม (Welding torch) หรือบางครั้งก็นิยมเรียกกันว่า ปืนเชื่อม (Welding gun) ซึ่ง Lincoln Electric (2018) ได้ให้คำอธิบายไว้ว่าขบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะมีทั้งหัวเชื่อมที่ออกแบบเพื่อรองรับกับการเชื่อมด้วยระบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi-automatic welding) และการเชื่อมด้วยระบบอัตโนมัติ (Automatic welding) โดยหัวเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ นั้นจะมี 2 แบบ ที่แบ่งตามลักษณะชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ดังแสดงใน **รูปที่ 3.65 (ก) และ (ข)** หัวเชื่อมจะมีด้ามมือจับ (Gun handle) การ์ดป้องกันความร้อน (Guard shield) และสวิตช์ควบคุม (Gun trigger) โดย **รูป (ก)** เป็นหัวเชื่อมที่ใช้สำหรับการเชื่อมด้วยลวดชนิดที่สามารถสร้างแก๊สปกคลุมขึ้นมาจากฟลักซ์ของตัวลวดเอง (FCAW-S) ซึ่งสังเกตที่ปลายของหัวเชื่อมจะไม่จำเป็นต้องมีหัวฉีดแก๊ส (Gas nozzle) ส่วน **รูป (ข)** เป็นหัวเชื่อมที่ใช้สำหรับการเชื่อมด้วยลวดชนิดที่ต้องใช้แก๊สปกคลุมจากถังบรรจุ (FCAW-G) ซึ่งสังเกตที่ปลายของหัวเชื่อมจำเป็นต้องมีหัวฉีดแก๊ส (Gas nozzle) ที่ทำหน้าที่ส่งป้อนแก๊สปกคลุมที่จ่ายผ่านท่อนำแก๊สไปสู่บ่อหลอมละลาย ซึ่งจะมีลักษณะที่เหมือนกันกับหัวเชื่อมของขบวนการเชื่อม MIG/MAG สำหรับ **รูป (ค) และ (ง)** เป็นหัวเชื่อมสำหรับการเชื่อมอัตโนมัติ จะไม่มีด้ามมือจับและการ์ดป้องกันความร้อน แต่จะมีส่วนของหัวเชื่อมที่ต่อเข้ากับระบบแขนกล (Robotic arm) และมีระบบการควบคุมสั่งการด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หรือระบบควบคุมแบบไร้สาย (Remote control) โดย **รูป (ค)** ใช้กับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ชนิด FCAW-S และ **รูป (ข)** ใช้กับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ชนิด FCAW-G มีความแตกต่างกันที่มีหัวฉีดแก๊สกับไม่มีหัวฉีดแก๊สที่ปลายของท่อนำกระแส (Contact tip) ดังแสดงความแตกต่างของปลายท่อนำกระแสในวงกลมเส้นประของ **รูปที่ 3.65**



(ก) หัวเชื่อมสำหรับลวดเชื่อมแบบ FCAW-S

รูปที่ 3.65 หัวเชื่อมสำหรับ
ขบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวด
เชื่อมไส้ฟลักซ์

ที่มา : Lincoln Electric, *Welding
guns and Torches. 2018*



(ข) หัวเชื่อมสำหรับลวดเชื่อมแบบ FCAW-G



(ค) หัวเชื่อมสำหรับการเชื่อมอัตโนมัติ สำหรับลวด FCAW-S



(ง) หัวเชื่อมสำหรับการเชื่อมอัตโนมัติ สำหรับลวด FCAW-G

ระบบการระบายความร้อนของหัวเชื่อมทุกชนิดจะมี 2 แบบ คือ แบบที่มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water cooling) กับระบบที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ (Gas cooling) โดยแบบแรกจะเป็นแบบที่ระบายความร้อนได้ดี สามารถเชื่อมได้ที่กระแสสูง ๆ และนานอย่างต่อเนื่อง การบำรุงรักษาก็ง่ายและคงทนแต่น้ำหนักค่อนข้างมาก เพราะจะต้องมีระบบของท่อน้ำเข้า (Water In) และท่อน้ำออก (Water Out) ส่วนแบบหลังจะนิยมใช้กันมากเพราะน้ำหนักเบาเคลื่อนตัวสะดวกไม่ยุ่งยาก แต่จะทำการ

เชื่อมที่กระแสดูสูง ๆ และเป็นเวลานานต่อเนื่องได้ไม่ดี เพราะประสิทธิภาพของการระบายความร้อนด้วยอากาศด้อยกว่าน้ำ

อุปกรณ์สำหรับระบบแก๊สปกคลุม (Gas shield equipment) แก๊สปกคลุมบ่อหลอมละลายสำหรับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แบบ FCAW-G ซึ่งต้องอาศัยแก๊สปกคลุมจากแหล่งถังภายนอก (Shielding gas cylinder) ดังนั้น จึงต้องชุดอุปกรณ์ควบคุมระบบแก๊สปกคลุม ซึ่งประกอบไปด้วยชุดควบคุมอัตราการไหล ชุดเกจความดัน ชุดผสมแก๊ส รวมไปถึงท่อส่งแก๊สและอุปกรณ์อื่น ๆ ซึ่งคล้ายกับชุดอุปกรณ์ของระบบแก๊สปกคลุมในขบวนการเชื่อม MIG/MAG ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น แต่มีชุดอุปกรณ์ที่ต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษสำหรับการเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ คือ ชุดกำจัดควัน (Fume extractors) ด้วยเหตุที่การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์จะเกิดควันในปริมาณที่มากจากการถูกเผาไหม้ของฟลักซ์ในไส้ลวด ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ อ้างอิงผลการวิจัยของ Jerome E. Spear (2011) จึงต้องมีรูปแบบระบบการกำจัดควันที่ดีและมีประสิทธิภาพ ซึ่งที่นิยมใช้กันมี 2 แบบ คือ

1. แบบชุดระบบเครื่องดูดควัน (Fume extractors welding) เป็นเครื่องดูดควันที่มีหัวดูดอยู่ที่ตำแหน่งเหนือหัวเชื่อมขึ้นไปดังแสดงในรูปที่ 3.66 (ก) ซึ่งสามารถปรับสูงต่ำตามต้องการ ถ้าสูงมากเกินไปอาจดูดควันได้ไม่หมด แต่ถ้าต่ำมากเกินไปก็จะดูดเอาแก๊สปกคลุมบ่อหลอมปะปนเข้าไปด้วย จึงต้องมีระดับความสูงที่เหมาะสม ดังนั้น จึงได้มีการทดลองหาปริมาณลมดูดที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 3.9 ปกติชุดดูดควันแบบนี้มีทั้งที่เป็นระบบที่ต่อกันหลาย ๆ หัวดูด ส่วนใหญ่เป็นระบบในโรงงานอุตสาหกรรมและแบบเดี่ยวสำหรับงานเชื่อมทั่ว ๆ ไป ที่เรียกกันว่า ชุดดูดควันเอนกประสงค์

2. แบบชุดดูดควันที่หัวเชื่อม (Fume extraction gun) เป็นระบบการดูดควันที่ประกอบติดตั้งไว้เป็นชุดเดียวกันกับหัวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 3.66 (ข) จะสะดวกในการกำจัดควันเพราะดูดได้ทันทีเมื่อเกิดการอาร์ก เป็นที่นิยมใช้กันในงานภาคสนามแต่หัวเชื่อมจะมีน้ำหนักค่อนข้างมาก และต้องปรับแรงดูดที่เหมาะสมเพราะมีโอกาสที่จะสูญเสียแก๊สปกคลุมที่จำเป็นไปกับแรงดูดค่อนข้างง่าย เหตุด้วยเพราะหัวดูดอยู่ติดกับหัวเชื่อม เป็นเหตุให้มีปริมาณแก๊สปกคลุมไม่เพียงพอที่จะปกป้องบ่อหลอมละลาย จะมีผลต่อคุณภาพของแนวเชื่อม

ตารางที่ 3.9 ความสัมพันธ์ของระยะห่างหัวดูดควันต่อบริเวณเชื่อมกับอัตราการไหลของลมดูด

ที่มา : ยุคคล จุลอุทัย หนังสือเทคโนโลยีขบวนการเชื่อมฟลักซ์คอร์ เล่ม 2, 2554

ระยะห่างระหว่างหัวดูดควัน กับบริเวณอาร์กเชื่อม	อัตราไหลของลมดูดต่ำสุด	
	ลูกบาศก์เมตร/นาที	ลูกบาศก์ฟุต/นาที
15 ซม. (6 นิ้ว)	7	250
23 ซม. (9 นิ้ว)	11.3	400
30 ซม. (12 นิ้ว)	28.3	1000
หมายเหตุ ถ้าระยะห่างระหว่างหัวยิ่งมาก อัตราการไหลของลมดูดจะยิ่งลดต่ำลง		



รูปที่ 3.66 ระบบการดูดควันที่เกิดจากการเผาไหม้ของฟลักซ์ในการเชื่อมลวดไส้ฟลักซ์

ที่มา : Forster Welding Systems. 2013

3.3.4 แก๊สปกคลุมสำหรับการเชื่อมลวดไส้ฟลักซ์ (Shielding gas)

LINCOLN ELECTRIC (2016) ได้กล่าวถึงการเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ว่าจะอาศัยแก๊สเฉื่อยเพื่อปกคลุมบ่อหลอมละลายจากการเผาไหม้ของผงฟลักซ์ที่อัดบรรจุอยู่ในตัวของลวดเชื่อมเองเป็นสำคัญ ซึ่งเป็นจุดเด่นของกระบวนการเชื่อมนี้ ที่ไม่ต้องยุ่งยากหาแก๊สปกคลุมจากภายนอกเข้าไปปกคลุม เราจึงเรียกลวดเชื่อมที่สามารถสร้างแก๊สปกคลุมขึ้นได้ด้วยตัวเองนี้ว่า “Self-shielded flux cored wire” ซึ่งพบว่าเป็นที่นิยมกันมาก ได้มีการนำไปใช้เชื่อมโลหะงานที่หลากหลายชนิด หลากหลายเกรดวัสดุ โดยโลหะเชื่อมบางชนิดหรือบางเกรดมีความจำเป็นที่จะต้องใช้แก๊สปกคลุมมากกว่าที่มีอยู่ในไส้ฟลักซ์ จึงมีการนำแก๊สปกคลุมจากภายนอกเข้าช่วยปกคลุม จึงเกิดเป็นลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ที่ใช้ร่วมกับแก๊สปกคลุมจากถังบรรจุที่เรียกกันว่า “Gas-shielded flux cored wire” โดยแก๊สที่นำมาใช้ร่วมกันนี้จะ เป็นแก๊สกลุ่มเดียวกันกับการเชื่อมแบบ MIG/MAG ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า การเชื่อมแบบลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์นี้จะคล้าย ๆ กัน ซึ่งมีทั้งชนิดที่เป็นแก๊สเฉื่อย (Inert gas) แอคทีฟแก๊ส (Active gas) และแก๊สผสม (Mixing gas) โดยผู้เขียนได้นำเสนอในรายละเอียดของแก๊สแต่ละชนิดไว้แล้วในหัวข้อของการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW) จากการค้นคว้า พบว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่กล่าวถึงการเชื่อมด้วยเชื่อมไส้ฟลักซ์ที่ใช้แก๊สปกคลุมจากภายนอกเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon

dioxide) ที่มักเรียกกันว่าแก๊ส CO₂ ซึ่งเป็นแก๊สที่นิยมใช้กันมากในการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ เป็นแก๊สที่มีราคาถูก ให้ความร้อนแก่บ่อหลอมละลายสูงถึงแม้จะเป็นการถ่ายโอนความร้อนโลหะแบบ หายขนาดใหญ่มากก็ตาม แต่ก็มีผงไส้ฟลักซ์พิเศษบางตัวที่สามารถช่วยให้การถ่ายโอนความร้อนโลหะมี ลักษณะคล้าย ๆ แบบสเปร์อาร์ก ส่วนที่เป็นแก๊สกลุ่มแก๊สเฉื่อยชนิดอาร์กอน (Ar) กับฮีเลียม (He) ก็มีการเลือกใช้ตามชนิดของโลหะที่เป็นลวดเชื่อม

แก๊สปกคลุมชนิดแก๊สผสม (Mixing gas) เป็นกลุ่มแก๊สปกคลุมที่นิยมเลือกใช้สำหรับการเชื่อม ลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ โดยจะใช้แก๊สเฉื่อยเป็นแก๊สตัวหลัก ซึ่งปกติที่ใช้ก็คือ แก๊สอาร์กอนและก็จะใช้แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์มาผสม หรือบางกรณีก็มีแก๊สออกซิเจนผสม โดยออกแบบแก๊สผสมแต่ละชนิด ออกมาเพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะลวดไส้ฟลักซ์ กรณีของแก๊สผสมที่ช่างเชื่อมนิยมใช้กันมาก คือ 75% Ar + 25% CO₂ คุณภาพของแนวเชื่อมจะดีกว่าการใช้แก๊ส CO₂ 100% ยิ่งโดยเฉพาะการนำไปใช้ กับขบวนการเชื่อมที่ถ่ายโอนน้ำโลหะแบบสเปร์แนวเชื่อมจะมีคุณสมบัติทางกลที่สูงขึ้น และยังเป็น แก๊สปกคลุมที่ใช้ได้กับทุกตำแหน่งท่าเชื่อม ที่สำคัญที่สุดคือนอกจากการอาร์กมีความเป็นพิษอันตรายต่อ สุขภาพช่างเชื่อมน้อยมากเมื่อเทียบกับแก๊สปกคลุมชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตามแก๊สผสมที่มีแก๊สอาร์กอน ผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่แนะนำให้ไปใช้กับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ชนิดที่ผลิตมาสำหรับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์อย่างเดียว เพราะจะเป็นการเพิ่มธาตุแมงกานีส (Mn) ซิลิกอน (Si) และออกไซด์ ของธาตุอื่น ๆ ในเนื้อโลหะเชื่อม จากค่ากล่าวข้างต้นถึงความเหมาะสมของแก๊สปกคลุมกับชนิดของลวด ดังแสดงเป็นตัวอย่างในตารางที่ 3.10 เป็นข้อมูลทางเทคนิคของบริษัท Lincin Electric Company

ตารางที่ 3.10 ความเหมาะสมของแก๊สปกคลุมกับชนิดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ต่อสมบัติแนวเชื่อม

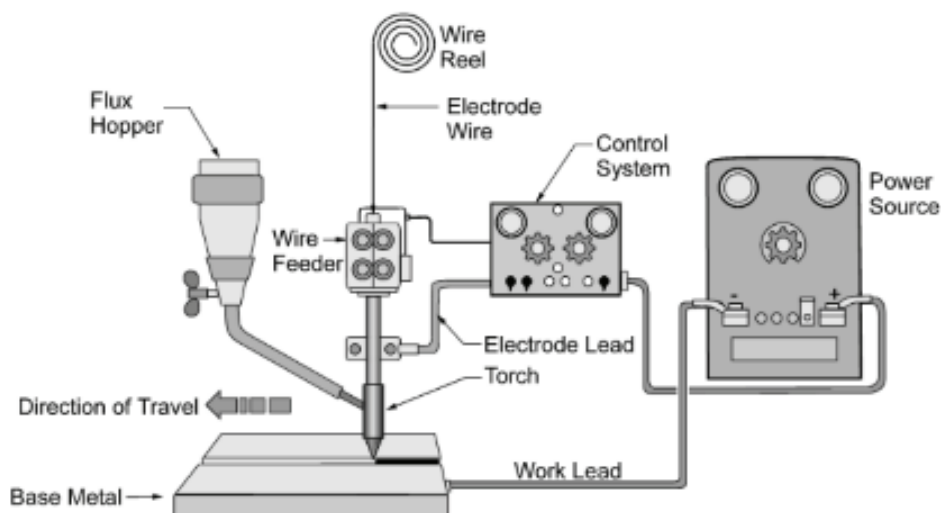
ที่มา : Lincoln Electric. *Choosing a Shielding Gas for Flux Cored Welding*. 2016

MECHANICAL PROPERTIES ⁽¹⁾ – As Required per AWS A5.20/A5.20M: 2005						
	Yield Strength ⁽²⁾ MPa (ksi)	Tensile Strength MPa (ksi)	Elongation %	Charpy V-Notch J (ft-lbf)		
				@ -18°C (0°F)	@ -29°C (-20°F)	
Requirements⁽³⁾ AWS E71T-1C H8, E71T-1M H8 AWS E71T-9C H8, E71T-9M H8	400 (58) min.	480 - 655 (70 - 95)	22 min.	27 (20) min. Not Specified	Not Specified 27 (20) min.	
Typical Performance⁽²⁾ As-Welded with: 100% CO ₂ 75% Ar/25% CO ₂	510 - 550 (73 - 79) 570 - 610 (82 - 88)	570 - 600 (82 - 87) 620 - 660 (89 - 95)	26 - 28 24 - 26	38 - 95 (28 - 70) 62 - 111 (46 - 82)	27 - 65 (20 - 48) 39 - 85 (29 - 63)	

DEPOSIT COMPOSITION ⁽¹⁾ – As Required per AWS A5.20/A5.20M: 2005						
	%C	%Mn	%Si	%S	%P	Diffusible Hydrogen (mL/100g weld deposit)
Requirements⁽³⁾ AWS E71T-1C H8, E71T-1M H8 AWS E71T-9C H8, E71T-9M H8	0.12 max.	1.75 max.	0.90 max.	0.03 max.	0.03 max.	8 max.
Typical Performance⁽²⁾ As-Welded with: 100% CO ₂ 75% Ar/25% CO ₂	0.03 - 0.04 0.03 - 0.04	1.28 - 1.41 1.45 - 1.60	0.42 - 0.49 0.54 - 0.62	0.01 0.01	0.01 - 0.02 0.01 - 0.02	3 - 8 4 - 8

3.4 การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding : SAW)

การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ หรือที่เรียกกันว่า “การเชื่อมซับเมอร์จ” เป็นการเชื่อมแบบอาร์กอีกชนิดหนึ่ง ที่นิยมใช้งานกัน อุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กนี้มีระบบคล้าย ๆ กับขบวนการเชื่อมอาร์กด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ ต่างกันที่มีระบบการป้อนผงฟลักซ์แยกออกจากลวดเชื่อมเปลือยตัน (Wire rod) การเชื่อมอาศัยความร้อนจากการอาร์กระหว่างปลายของลวดเชื่อมที่เปลี่ยนกับชิ้นงานโลหะ โดยลวดเชื่อมจะถูกดึงออกจากล้อม้วนลวด (Wire reel) มาป้อนเพื่อการอาร์กอย่างต่อเนื่องด้วยชุดอุปกรณ์ป้อนลวด (Wire feeder) ซึ่งในขณะอาร์กนั้นก็มีผงฟลักซ์ที่บรรจุอยู่ในถังฟลักซ์ (Flux hopper) ไหลลงมากลุมบริเวณอาร์กอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาในขณะที่กำลังทำการอาร์ก โดยที่มีเครื่องเชื่อมเป็นแหล่งพลังงาน (Power source) และควบคุมปัจจัยการเชื่อมด้วยชุดควบคุมระบบ (Control system) ดังแสดงอุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมในรูปที่ 3.67



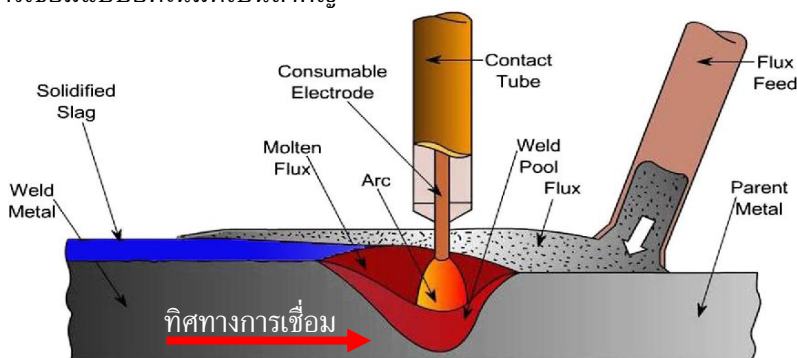
รูปที่ 3.67 อุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (SAW)

ที่มา : BMT Eleet Technology Limited, 2006

ระบบการอาร์ก (Arc system) Mohit Sharma et al. (2019) ได้อธิบายไว้ว่าการอาร์กของขบวนการเชื่อมนี้เป็นการอาร์กที่เกิดขึ้นใต้ผงฟลักซ์ซึ่งจะมีทั้งผงฟลักซ์แบบ Agglomerated powdered flux และผงฟลักซ์แบบ Fused powdered flux ขณะทำการอาร์กจะมองไม่เห็นแสงของการอาร์ก ไม่เห็นบ่อหลอมละลาย และจะไม่มีสะเก็ดโลหะกระเด็นออกจากบริเวณการอาร์ก โดยความร้อนจากการอาร์กจะหลอมละลายผงฟลักซ์จนกลายเป็นแก๊สเฉื่อยที่ช่วยปกคลุมแนวเชื่อมจากบรรยากาศภายนอก เมื่อแนวเชื่อมเย็นตัวลงฟลักซ์ก็จะกลายเป็นสแลกของแข็งบนแนวเชื่อมที่ต้องทำการเคาะออกไป ผงฟลักซ์อาร์กบางส่วนที่ไม่ได้รับความร้อนจะไม่หลอมละลายจึงสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก ดังแสดงรายละเอียดของระบบการอาร์กในรูปที่ 3.68 ระบบการป้อนของผงฟลักซ์จะอาศัยหลักการแรงโน้มถ่วงและน้ำหนักของเม็ดผง จึงเป็นการเชื่อมที่เหมาะสมกับการเชื่อมในตำแหน่งท่าราบเป็นสำคัญ การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ โดยส่วน

ใหญ่จะใช้กับการเชื่อมโลหะงานที่มีความหนาตั้งแต่ 5 มิลลิเมตรขึ้นไป ประเภทงาน ภาชนะรับแรงดัน ท่อ เรือ โครงเหล็กใหญ่ หรืองานที่มีแนวเชื่อมยาวมาก ๆ เป็นต้น ซึ่งจะเหมาะสำหรับวัสดุโลหะจำพวก เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steels) เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloy steels) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steels) เหล็กกล้าผสมนิกเกิล (Nickel alloy steels) รวมไปถึงงานเชื่อมพอก (Cladding) ที่ต้องการผิวทนการสึกหรอหรือทนการกัดกร่อน

ระบบการเชื่อมสามารถเชื่อมได้ทั้งแบบระบบเชื่อมกึ่งอัตโนมัติ (Semi-Automatic Welding) และแบบระบบเชื่อมอัตโนมัติ (Automatic Welding) แบบระบบกึ่งอัตโนมัติจะเหมาะกับการเชื่อมด้วยลวดขนาดเล็กความเร็วในการเชื่อมปานกลาง เพราะการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมและการเปิด-ปิดระบบอาจควบคุมด้วยมือคนเชื่อมหรือมอเตอร์ ส่วนแบบอัตโนมัติจะเป็นการเชื่อมที่ใช้เครื่องจักรควบคุมทั้งหมด ซึ่งส่วนใหญ่เน้นงานเชื่อมที่มีความหนามาก ๆ และมีแนวเชื่อมที่ยาว การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์นี้จะนิยมใช้กับระบบการเชื่อมแบบอัตโนมัติเป็นสำคัญ



รูปที่ 3.68 หลักการของการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding : SAW)

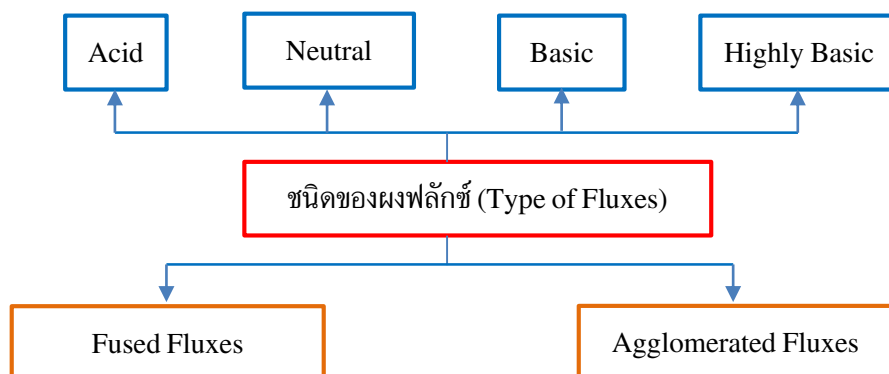
ที่มา : M.R. Nezamdost et. al., Submerged arc welding 2016

3.4.1 ผงฟลักซ์เชื่อมและลวดเชื่อม (Welding flux powder and Solid wire)

ผงฟลักซ์เชื่อม (Welding flux powder) ฟลักซ์สำหรับการปกคลุมในการเชื่อมแบบอาร์กใต้ฟลักซ์มีลักษณะเป็นผง (Powder) ที่บรรจุอยู่ในถังฟลักซ์ (Flux hopper) แบ่งเป็นชนิดดังในรูปที่ 3.69 โดยสามารถแบ่งตามความเป็นกรด-ด่างของผงฟลักซ์ได้ 4 ชนิด แต่ถ้าแบ่งตามวิธีการผลิตผงสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ในที่นี้จะขอลำถึงชนิดของผงฟลักซ์ตามวิธีการผลิต โดยอ้างอิงตามข้อมูลของ LINCOLN ELECTRIC- Modern SAW (2019) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ก. ผงฟลักซ์ชนิดหลอม “Fused powdered fluxes” เป็นผงฟลักซ์ที่ผลิตโดยการนำส่วนผสมของสารทางเคมีทั้งหมด เข้ามารวมรวมเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิประมาณ 1500 – 1700 °C จากนั้นก็นำออกมาปล่อยให้เย็นตัวในน้ำหรือแผ่นรองเพื่อให้เย็นตัวทันทีแล้วนำมาบดให้เป็นผง คัดแยกขนาดตามต้องการ อบไล่ความชื้น ก็จะได้ผงฟลักซ์ที่มีลักษณะคล้ายกับผงแก้วพร้อมบรรจุลง ดังแสดงลักษณะของถุงบรรจุผงฟลักซ์และขนาดรูปทรงผงฟลักซ์ในรูปที่ 3.70 (ก) ผงฟลักซ์ชนิดหลอมนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสีย ดังแสดงในตารางที่ 3.11

ข. ผงฟลักซ์ชนิดตัวประสาน “Agglomerated powdered fluxes” เป็นผงฟลักซ์ที่ผลิตโดยการนำเอาสารทางเคมีที่มีคุณสมบัติทั้งหมดมีคลุกเคล้ากับตัวประสาน ได้แก่ ไทเทเนียม เพอร์โรซิลิกอน เพอร์โรแมงกานีส โพแตสเซียม หรือโซเดียมซิลิเกต จากนั้นก็นำไปอบที่อุณหภูมิ 800 – 1000 °C จนเกิดการเกาะติดกันเป็นก้อน ๆ ต่อด้วยการบดและคัดแยกขนาดก็จะได้ผงฟลักซ์พร้อมบรรจุถุง ดังแสดงลักษณะของถุงบรรจุผงฟลักซ์และขนาดผงฟลักซ์ในรูปที่ 3.70 (ข) ผงฟลักซ์ชนิดหลอมนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสีย ดังแสดงในตารางที่ 3.11



รูปที่ 3.69 การแบ่งชนิดของผงฟลักซ์ปฏิกูลมแนวเชื่อมสำหรับการเชื่อม SAW

ที่มา : CSWIP 3.1 Welding inspector WISS Training and Examination Services Granta Park 2011

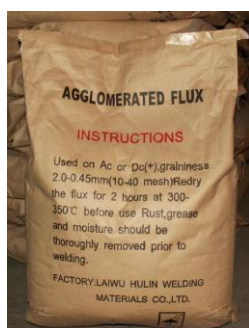


(ก) ผงฟลักซ์ชนิดหลอม “Fused powdered fluxes”



รูปที่ 3.70 ตัวอย่างผงฟลักซ์ปฏิกูลมแนวเชื่อมสำหรับการเชื่อม SAW

ที่มา : รูป (ก) ESAB, Welding Flux 2014. รูป (ข) Laiwu Hulin Welding Materials CO.,LTD. 2016



(ข) ผงฟลักซ์ชนิดตัวประสาน “Agglomerated powdered fluxes”



ตารางที่ 3.11 ข้อดี-ข้อเสียและการเก็บรักษาผงฟลักซ์สำหรับการเชื่อมใต้ฟลักซ์

ที่มา : Welding & NDT, Submerged arc welding, 2019

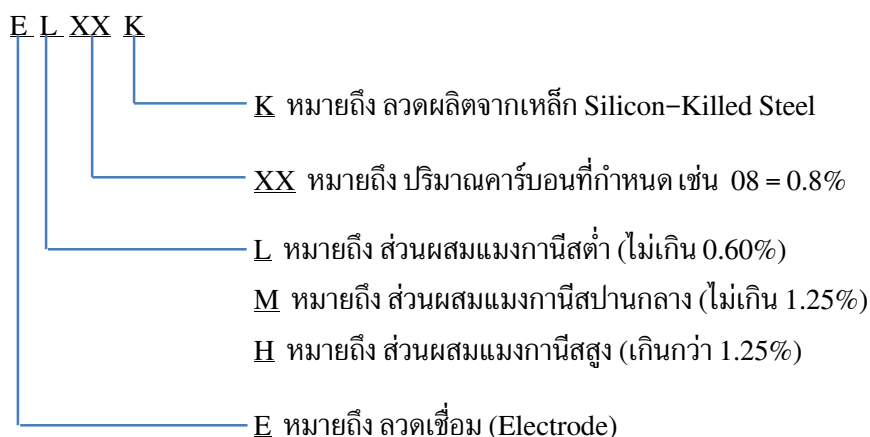
ชนิดของผงฟลักซ์	ข้อดี (Advantage)	ข้อเสีย (Disadvantage)
ชนิดหลอม (Fused fluxes)	<ul style="list-style-type: none"> ● ส่วนผสมของฟลักซ์มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน ● ฟลักซ์ไม่ดูดความชื้น ● ฟลักซ์ที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมาบดใช้ใหม่ได้ ● เหมาะกับการเชื่อมด้วยความเร็วสูง 	<ul style="list-style-type: none"> ● ไม่สามารถเติม Deoxidizer และ Ferro alloys ลงในฟลักซ์ได้เนื่องจากการผลิตฟลักซ์ใช้อุณหภูมิที่สูง ซึ่งจะทำให้ธาตุที่ผสมดังกล่าวเกิดการสูญเสียและแยกตัวในระหว่างการผลิตฟลักซ์
ชนิดตัวประสาน (Agglomerated fluxes)	<ul style="list-style-type: none"> ● ฟลักซ์ชนิดนี้ผลิตด้วยอุณหภูมิต่ำ จึงสามารถเติมตัวลดออกซิเจนและธาตุผสมลงในฟลักซ์ได้ ● ฟลักซ์มีความหนาแน่นต่ำจึงสามารถใช้ปกคลุมรอยเชื่อมใต้หนากว่า ● ฟลักซ์ที่หลอมเหลวเป็นสแลกสามารถเคาะออกได้ง่าย 	<ul style="list-style-type: none"> ● ฟลักซ์เมื่อใช้แล้วไม่สามารถนำกลับมาบดใช้ใหม่เพราะส่วนผสมทางเคมีเปลี่ยนไป ● ฟลักซ์ดูดเก็บความชื้นได้ง่าย ต้องระมัดระวังในการจัดเก็บ

การเก็บรักษาฟลักซ์

- ฟลักซ์ต้องเก็บไว้ในที่มีความชื้นต่ำถ้าฟลักซ์เปียกชื้น จะต้องนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 400 °C
- ถ้านำฟลักซ์ที่มีความชื้นไปใช้ จะทำให้แนวเชื่อมเกิดรูพรุนหรือเกิดการแตกร้าวได้
- การเก็บฟลักซ์ที่ใช้แล้วมาใช้ใหม่ ต้องระวังสารมลทินที่เจือปนมากับฟลักซ์ เช่น สนิมเหล็กหรือคราบน้ำมัน

ลวดเชื่อม (Solid wire) HOBART Filler Metals (2018) ได้กล่าวถึงการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์นิยมใช้เชื่อมโลหะที่มีความหนา และต้องการอัตราการเติมเนื้อเชื่อมที่มาก โดยลวดเชื่อมมีทั้งที่เป็นลักษณะเส้นตัน (Solid wire) และเป็นลวดไส้ผงโลหะ (Metal-cored wire) และค่อนข้างจะมีขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 3.71 ซึ่งจัดเก็บบรรจุไว้ในรูปแบบที่สะดวกในการที่จะใช้กับอุปกรณ์ป้อนลวดโดยมีทั้งที่เป็นแบบม้วน (Coil) และแบบถัง (Drum) ดังแสดงในรูปที่ 3.72 (ก) และ (ข) ตามลำดับ มีขนาดเล็กและใหญ่วัดได้จากน้ำหนักของลวด มีตั้งแต่ 11–454 กิโลกรัม และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 1.6–6.4 มิลลิเมตร โลหะลวดเชื่อมส่วนใหญ่จะเป็นชนิดโลหะเหล็ก (Ferrous electrodes) มักจะทำการเคลือบผิวด้วยทองแดงเพื่อเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า ป้องกันการเกิดสนิม และลดอัตราการเสียตทานกับท่อนำกระแส และชนิดโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel electrodes) ซึ่งการที่ช่างเชื่อมจะเลือกใช้ต้องทำความเข้าใจถึงรหัส (Code) ตามมาตรฐาน เช่น ตัวอย่างดังต่อไปนี้

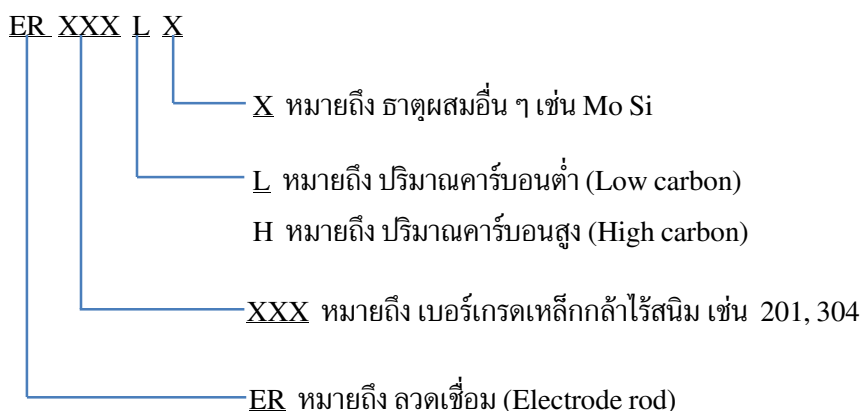
มาตรฐาน AWS (American Welding Society) ได้กำหนดมาตรฐานของลวดเชื่อมได้ฟลักซ์ สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน ตามรหัส AWS A 5.17-89



แบ่งได้ มี 3 กลุ่ม คือ

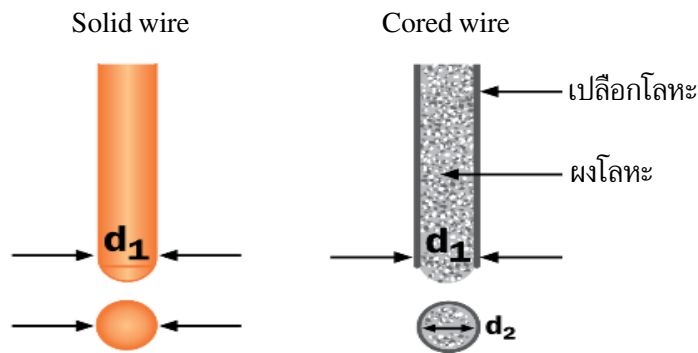
- กลุ่มส่วนผสมแมงกานีสต่ำ (Low Manganese) ได้แก่ EL8 EL8K และ EL12
- กลุ่มส่วนผสมแมงกานีสปานกลาง (Medium Manganese) ได้แก่ EM12 EM12K EM13K EM14K และ EM15K
- กลุ่มส่วนผสมแมงกานีสสูง (High Manganese) ได้แก่ EH11K EH12K และ EH14

สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม ตามรหัส AWS A 5.9-92



แบ่งได้เป็นกลุ่มหลัก คือ

- กลุ่ม E 2XX ได้แก่ E 201 E 202 E 204 E 216 และ E 209
- กลุ่ม E 3XX ได้แก่ E 304 E 306L E 309L และ E 316Mo
- กลุ่ม E 4XX ได้แก่ E 409 E 410NiMo E 420 และ E 430
- กลุ่ม E 5XX ได้แก่ E 500 E 501 E 505 E 520 และ E 550
- กลุ่ม E 6XX ได้แก่ E 600 E 601 E 620 E 625 และ E 660



รูปที่ 3.71 ลวดเชื่อมได้ฟลักซ์ชนิดเส้นตัน (Solid wire) และชนิดลวดไส้ผงโลหะ (Cored wire)

ที่มา : ITW Welding, HOBART Filler Metals, 2018



(ก) ลวดเชื่อมได้ฟลักซ์แบบม้วน (Coil)

(ข) ลวดเชื่อมได้ฟลักซ์แบบถัง (Drum)

รูปที่ 3.72 ลวดเชื่อมได้ฟลักซ์แบบม้วน (Coil) และแบบถัง (Drum)

ที่มา : LINCOLN ELECTRIC, Submerged Arc Welding Wire, 2019

3.4.2 องค์ประกอบการเชื่อม (Welding parameter)

1. เครื่องเชื่อมและกระแสไฟเชื่อม (Welding machine and welding current) เครื่องเชื่อมหรือแหล่งจากพลังงานในการอาร์กสามารถใช้ได้ทั้งเครื่องเชื่อมระบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC) ซึ่งเป็นเครื่องเชื่อมแบบเดียวกันกับการเชื่อมแบบ GMAW หรือการเชื่อมแบบ MMAW ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยจะมีส่วนของชุดป้อนลวดที่แตกต่างกันที่การเชื่อมแบบอาร์กได้ฟลักซ์มีถังป้อนผงฟลักซ์ปกคลุม (Flux hopper) และบางรุ่นของเครื่องมีระบบดูดฟลักซ์ที่

ยังไม่หลอมละลายกลับไปเก็บในถังฟลักซ์เพื่อสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ ดังแสดงชุดเครื่องเชื่อมและอุปกรณ์ป้อนลวดกับฟลักซ์ในรูปที่ 3.73



รูปที่ 3.73 เครื่องเชื่อมและชุดป้อนลวดกับป้อนฟลักซ์

ที่มา : Miller Electric Mfg. LLC. Welding equipment, 2019

สำหรับกระแสไฟเชื่อม (Welding current) สามารถใช้ได้ทั้งระบบไฟฟ้ากระแสตรงและระบบไฟฟ้ากระแสสลับ คือ อ้างอิงตาม HOBART Filler Metals (2018)

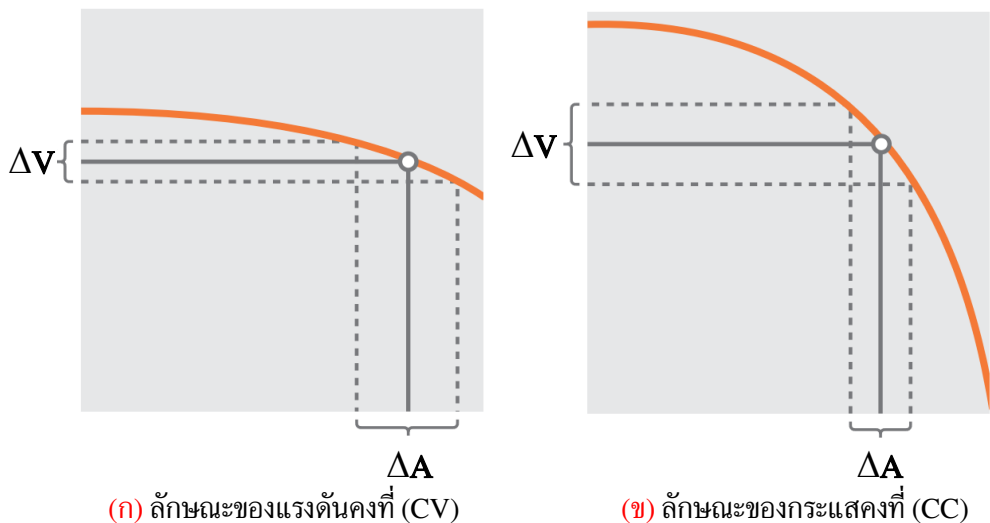
- ระบบไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current : DC) มี 2 แบบ ดังนี้

- ระบบการเชื่อมแบบแรงดันคงที่ (Constant Voltage : CV) เป็นการเชื่อมที่ปรับปัจจัยของการเชื่อมที่กระแสดังแสดงในรูปที่ 3.74 (ก) ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ชัดว่า ΔA จะกว้างกว่า ΔV เหมาะสำหรับการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติในช่วงของกระแสไฟประมาณ 300–600 แอมแปร์ ด้วยลวดเชื่อมขนาด 1.6–2.4 มิลลิเมตร และสำหรับการเชื่อมแบบอัตโนมัติ จะเหมาะที่กระแสไฟประมาณ 300–1000 แอมแปร์ด้วยลวดเชื่อมขนาด 2.4–6.4 มิลลิเมตร เหตุผลที่ระบุไว้ไม่ควรเชื่อมที่กระแสสูงเกินกว่า 1000 แอมแปร์ เพราะจะเกิดสภาพของการอาร์กที่รุนแรงหรือเบี่ยงเบน (Arc blow) โดยทั่วไปการเชื่อมแบบแรงดันอาร์กคงที่นี้จะเหมาะสมกับการเชื่อมโลหะงานที่บางและต้องการความเร็วในการเชื่อมที่สูง

- ระบบการเชื่อมแบบกระแสคงที่ (Constant Current : CC) เป็นการเชื่อมที่ปรับปัจจัยของการเชื่อมที่แรงดันอาร์กดังแสดงในรูปที่ 3.74 (ข) ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ชัดว่า ΔV จะกว้างกว่า ΔA การปรับแรงดันเป็นการควบคุมอัตราเร็วของการป้อนลวดในขณะอาร์ก ซึ่งจะเป็นตัวช่วยควบคุมให้ระยะอาร์กคงที่ แต่อย่างไรก็ตามระบบการเชื่อมกระแสคงที่ (CC) จะมีการอาร์กที่ไม่เสถียรเท่ากับการเชื่อมแบบแรงดันคงที่ (CV)

โดยได้แสดงข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะที่สำคัญระหว่างระบบการเชื่อมแบบแรงดันคงที่ กับระบบการเชื่อมแบบกระแสคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 3.12

● ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current : AC) เป็นระบบการเชื่อมที่สามารถเชื่อมได้กับลวดเชื่อมหลายชนิด ระบบการอาร์กจะไม่รุนแรงมาก เพราะระยะอาร์กชิดกับชิ้นงาน มีสะเก็ดโลหะกระเด็นออกมาน้อยและการหักเหของแนวอาร์กก็น้อย (Arc blow) ซึ่งก็จะได้แนวเชื่อมที่รูปร่างการซึมลึกต่ำ การควบคุมสัดส่วนกระแสที่สลับกันจะมีผลต่อแนวเชื่อม ดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 3.75 (ก) และเปรียบเทียบกับสภาพข้อที่เหมือนกันของการเชื่อมด้วยกระแสไฟตรงในรูปที่ 3.75 (ข)



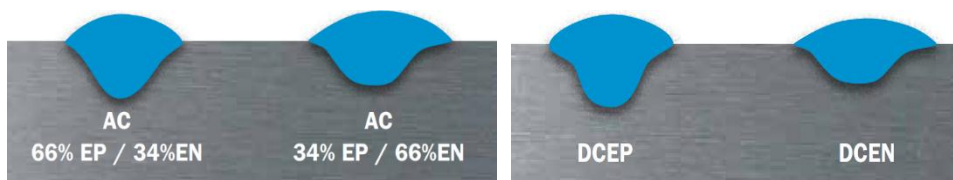
รูปที่ 3.74 เปรียบเทียบความแตกต่างของระบบ CV และ CC ของไฟฟ้ากระแสตรง

ที่มา : ITW Welding, HOBART Filler Metals, 2018

ตารางที่ 3.12 เปรียบเทียบลักษณะของการเชื่อมแบบ CV กับแบบ CC ของการเชื่อมได้ฟลักซ์

ที่มา : ITW Welding, HOBART Filler Metals, 2018

ลักษณะเฉพาะ (Feature)	การเชื่อมแบบแรงดันคงที่ (CV)	การเชื่อมแบบกระแสคงที่ (CC)
Open circuit voltage	25–55 V	60–80 V
Parameter setting	กำหนดด้วยแรงดันอาร์ก	กำหนดด้วยกระแสเชื่อม
Polarity	AC/DC	AC/DC
Arc stability	การอาร์กเสถียร	การอาร์กไม่เสถียร
Arc regulation	ควบคุมด้วยคนเชื่อม	ควบคุมด้วยความเร็วป้อนลวด
Application	เหมาะทั้งลวดขนาดเล็กและใหญ่	เหมาะสำหรับลวดขนาดใหญ่



(ก) แนวเชื่อมด้วยกระแสไฟสลับ

(ข) แนวเชื่อมด้วยกระแสไฟตรง

รูปที่ 3.75 ลักษณะของแนวเชื่อมด้วยระบบไฟฟ้ากระแสตรงกับกระแสสลับที่ต่างสภาพชั่ว

ที่มา : *Welding & NDT, Submerged arc welding, 2019*

2. องค์ประกอบการเชื่อมอื่น ๆ (Other welding parameters) นอกจากองค์ประกอบหลักของเครื่องเชื่อมและชนิดของกระแสไฟเชื่อมแล้วนั้น ยังมีปัจจัยการเชื่อมอื่นที่จะเกิดการปรับเปลี่ยนไปตามความเหมาะสมของการเชื่อม ซึ่งอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ขึ้นอยู่กับควบคุมของช่างเชื่อม โดยการเชื่อมได้ผลลัพธ์จะมีองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อแนวเชื่อมซึ่งอ้างอิงตามข้อมูลของ HOBART Filler Metals (2018) ที่ได้กล่าวไว้ในคู่มือการเชื่อม ได้แก่

- การเพิ่มขึ้นของปริมาณกระแสไฟเชื่อม (Increased welding current)
- การเพิ่มขึ้นของแรงดันอาร์ก (Increased arc voltage)
- การเพิ่มขึ้นของความเร็วเชื่อม (Increased welding speed)
- การเพิ่มขึ้นของระยะปลายลวดกับหัวเชื่อม (Increased stick-out)
- การเพิ่มขึ้นของขนาดลวดเชื่อม (Increased wire diameter)

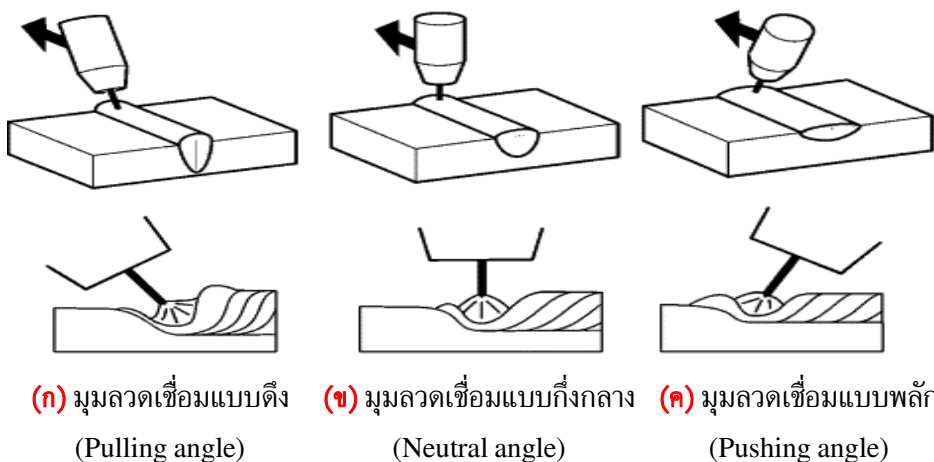
โดยผลกระทบที่มีต่อแนวเชื่อมขององค์ประกอบการเชื่อมต่าง ๆ ข้างต้นได้ดังแสดงไว้ใน **ตารางที่ 3.13** นอกจากนี้พบว่าการเชื่อมได้ฟลักซ์ (SAW) ยังมีองค์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างคือ มุมของลวดเชื่อม (Electrode angle) ซึ่งมีทั้งมุมลวดเชื่อมแบบดึง (Pulling angle) มุมลวดเชื่อมแบบกึ่งกลาง (Neutral angle) และมุมลวดเชื่อมแบบผลัก (Pushing angle) ซึ่งแต่ละแบบของมุมลวดจะให้ขนาดและการซึมลึกที่แตกต่างกันดังแสดงใน **รูปที่ 3.76**

การเชื่อมได้ฟลักซ์เป็นที่ทราบกันว่านิยมนำเชื่อมโลหะที่มีความหนา เหตุผลเพราะขบวนการเชื่อมมีอัตราการป้อนเติมลวดในปริมาณที่มาก ที่ซึ่งหลายคนเข้าใจว่าเกิดจากการใช้ลวดเชื่อมที่มีขนาดใหญ่ อาจถูกต้องในยุคสมัยก่อนหน้านี้ แต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาสร้างหัวเชื่อมแบบพิเศษมาใช้งานที่มีมากกว่าหนึ่งหัว ดังแสดงใน **รูปที่ 3.77** ซึ่งแต่ละแบบจะมีความสามารถในการป้อนลวดในอัตราที่แตกต่างกัน นอกจากการออกแบบของหัวเชื่อมป้อนลวดแล้ว พบว่าระดับปริมาณกระแสไฟเชื่อมก็มีผลต่ออัตราการเติมเนื้อโลหะ กล่าวคือ กระแสไฟเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการเติมเนื้อโลหะได้มากขึ้นที่ขนาดของลวดเชื่อมเท่ากัน ดังแสดงใน **รูปที่ 3.78** แต่ถ้าลวดเชื่อมขนาดต่างกัน ลวดเชื่อมที่มีขนาดเล็กจะมีความหนาแน่นของกระแสและอัตราการเติมเนื้อโลหะที่สูงกว่าลวดเชื่อมที่มีขนาดใหญ่ แต่ลวดเชื่อมขนาดใหญ่จะสามารถเพิ่มกระแสได้มากกว่า ดังนั้น จึงพบว่าลวดเชื่อมขนาดใหญ่จะมีอัตราการเติมเนื้อโลหะให้แก่บ่อหลอมละลายของแนวเชื่อมได้มากกว่าลวดเชื่อมขนาดเล็ก โดยมีข้อแนะนำปริมาณกระแสไฟเชื่อมที่เหมาะสมกับขนาดของลวดเชื่อมของการเชื่อมได้ฟลักซ์ดังใน **ตารางที่ 3.14**

ตารางที่ 3.13 องค์ประกอบการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อลักษณะของแนวเชื่อมเชื่อมใต้ฟลักซ์

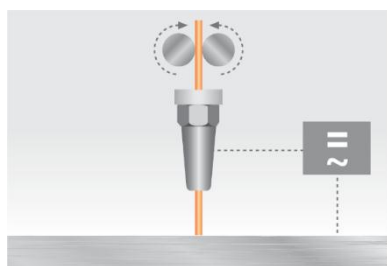
ที่มา : ITW Welding, HOBART Fillr Metals, 2018

องค์ประกอบการเชื่อม	อิทธิพลต่อลักษณะของแนวเชื่อมใต้ฟลักซ์		
การเพิ่มขึ้นของกระแส (Increased welding current)	350 A	500 A	650 A
การเพิ่มขึ้นของแรงดันอาร์ก (Increased arc voltage)	24 V	27 V	31 V
การเพิ่มขึ้นของความเร็วเชื่อม (Increased travel speed)	38 cm/min 15"/min	76 cm/min 30"/min	100 cm/min 40"/min
การเพิ่มขึ้นของระยะปลายลวด กับหัวเชื่อม (Increased stick-out)	15 mm - 0.6"	25 mm - 1"	35 mm - 1.6"
การเพิ่มขึ้นของขนาดลวดเชื่อม (Increased wire diameter)	3.2 mm - 1/8" electrode	4 mm - 5/32" electrode	5 mm - 3/16" electrode

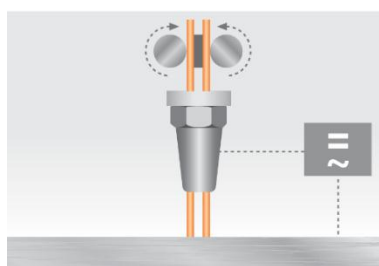


รูปที่ 3.76 องค์ประกอบของมุมลวดเชื่อมของการเชื่อมใต้ฟลักซ์

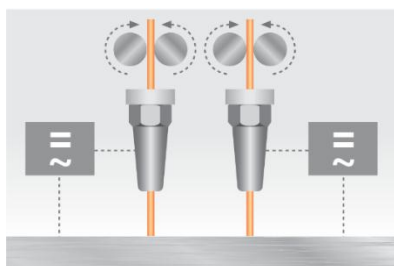
ที่มา : CRUXWELD, Submerged Arc Welding (SAW) 2020



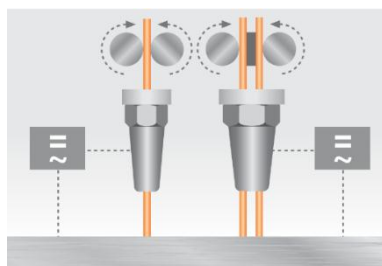
แบบ Single wire



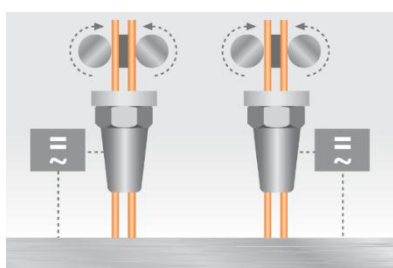
แบบ Twin wire



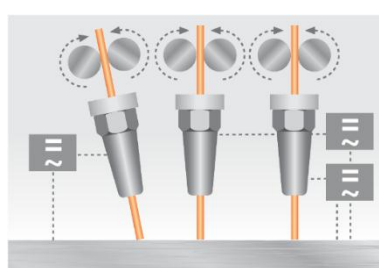
แบบ Tandem wire



แบบ Tandem Single-Twin wire



แบบ Tandem Twin wire

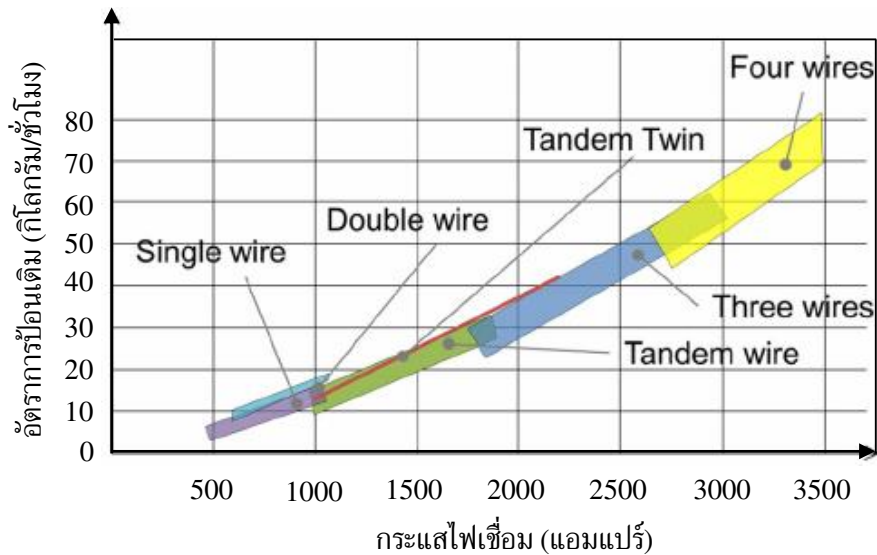


แบบ Multi wire

รูปที่ 3.77 รูปแบบการป้อนลวดเชื่อมของการเชื่อมได้ฟลักซ์

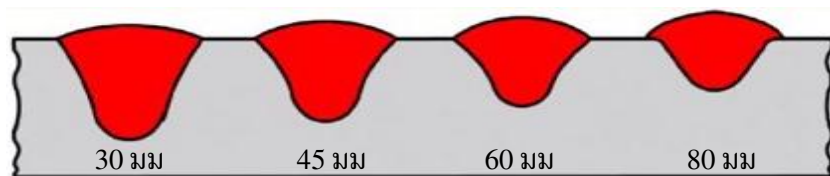
ที่มา : ITW Welding, HOBART Fillr Metals. 2018

นอกจากองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการเชื่อมได้ฟลักซ์ที่กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้น ยังมีองค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อรูปทรงและขนาดของแนวเชื่อมที่ช่างเชื่อมต้องปรับตัวเอง ที่ Klas Weman (2012) ได้กล่าวไว้ก็คือ ระยะความยาวของลวดเชื่อมจากปลายท่อนำกระแส (Contact tip) ถึงปลายของลวดเชื่อม (End of electrode) ซึ่งจะเรียกระยะความยาวนี้ว่า “Electrode extension” โดยที่ถ้าระยะความยาวน้อยความร้อนจากการอาร์กจะหลอมลึก บ่อหลอมละลายไม่กว้างแนวเชื่อมที่ได้จะแคบ แต่ถ้าเมื่อระยะความยาวเพิ่มขึ้น ความร้อนจากการอาร์กก็จะเพิ่มสูงขึ้นบ่อหลอมละลายกว้างขึ้น การหลอมลึกกลับลดลง แนวเชื่อมที่ได้จึงเป็นแนวเชื่อมแบบที่ซึมลึกน้อยแต่ขนาดแนวเชื่อมกว้าง ดังแสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของขนาดแนวเชื่อมที่ระยะความยาวของปลายลวดเชื่อมที่ต่างกัน **ในรูปที่ 3.79**



รูปที่ 3.78 อัตราการป้อนเติมเนื้อโลหะที่กระแสไฟเชื่อมต่างกันของการเชื่อมได้ฟลักซ์

ที่มา : Pavel Layus et.al., Multi-wire SAW of 640 MPa Arctic shipbuilding steel plates, 2014



รูปที่ 3.79 ความแตกต่างของแนวเชื่อมที่ระยะความยาวของปลายลวดเชื่อมต่างกัน

ที่มา : CSWIP 3.1 Welding inspector WISS Training and Examination, 2015

ตารางที่ 3.14 ความสัมพันธ์ของขนาดลวดเชื่อมกับปริมาณกระแสไฟของการเชื่อมได้ฟลักซ์

ที่มา : ANSI/AWS A5.17, 2019

ขนาดของลวดเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน		ปริมาณช่วงกระแสไฟเชื่อม (A)
มิลลิเมตร (mm)	นิ้ว (in)	
2.3	5/64	200–500
2.4	3/32	300–600
3.2	1/8	300–800
4.0	5/32	400–900
4.8	3/16	500–1200
5.6	7/32	600–1300
6.4	1/4	600–1600

3.5 การเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม (Electro Slag Welding : ESW)

การเชื่อมอาร์กด้วยไฟฟ้าที่อาศัยสแลกปกคลุมนี้มีชื่อเรียกทับศัพท์ภาษาอังกฤษอีกชื่อว่า การเชื่อมอิเล็กทรอนิกส์สแลก ซึ่ง Klas Weman (2012) ได้อธิบายไว้ว่าเป็นหลักของขบวนการเชื่อมที่เกิดจากการที่สแลกหลอมละลายแล้วแผ่ความร้อนไปทำให้ลวดเชื่อม (Electrode) และผิวของโลหะชิ้นงาน (Base metals) เกิดการหลอมละลายติดกัน ถูกนำมาใช้ในการเชื่อมต่อชิ้นงานที่มีความหนาหนา ๆ วิธีการเชื่อมจะกระทำเฉพาะการเชื่อมในตำแหน่งทำตั้งหรือใกล้เคียงทำตั้ง และมีทิศทางของการเชื่อมเริ่มจากล่างขึ้นสู่ด้านบนเสมอ ดังแสดงถึงรายละเอียดของอุปกรณ์พร้อมวงจรและระบบของการเชื่อมหลอมละลายในรูปที่ 3.79 โดยมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ๆ ได้แก่

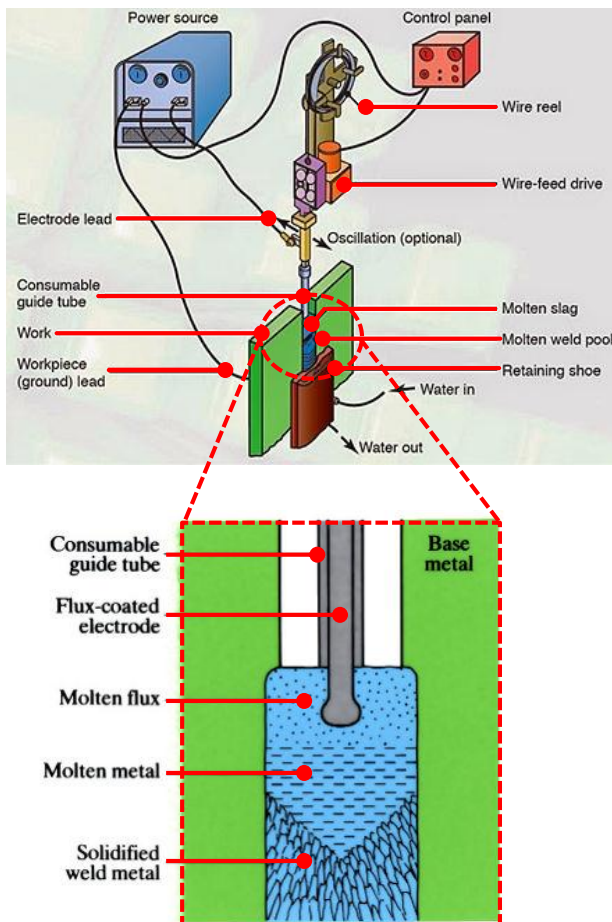
1. เครื่องเชื่อม (Power source) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในการเชื่อม
2. ชุดควบคุม (Control panel) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการป้อนลวดเชื่อมและปัจจัยในการเชื่อม (Welding parameter) บนเครื่องเชื่อม
3. ชุดแผ่นทองแดงประกบ (Retaining shoe) พร้อมระบบน้ำหล่อเย็น (Water-in and Water-out) ทำหน้าที่เป็นเสมือนแบบหล่อที่ประกบปิดช่องว่างด้านข้างเพื่อป้องกันการไหลทะลักของฟลักซ์และน้ำโลหะเหลวขณะเชื่อม โดยภายในแผ่นทองแดงต้องมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเพื่อที่จะป้องกันแผ่นประกบหลอมละลายไปกับน้ำโลหะเหลว ซึ่งแผ่นประกบนี้ต้องติดตั้งอยู่กับอุปกรณ์ที่สามารถปรับเลื่อนขึ้นตามความสูงของแนวเชื่อมที่สูงขึ้นได้ อาจเป็นชุดอุปกรณ์เสริมที่ควบคุมการเคลื่อนด้วยระบบนิวเมติก/ไฮดรอลิก

4. ชุดควบคุมการป้อนลวด (Wire feed drive) ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วของการป้อนลวดเชื่อมเข้าสู่การหลอมละลายภายในบ่อหลอมละลาย

ขั้นตอนการเชื่อม เริ่มต้นด้วยการบรรจุฟลักซ์ที่มีสมบัตินำกระแสไฟฟ้าลงในช่องว่างที่ต้องการเชื่อมต่อระหว่างชิ้นงานทั้งสอง จากนั้นก็เคลื่อนลวดเชื่อมเข้าหาฟลักซ์แล้วทำการอาร์ก ความร้อนจากการอาร์กจะทำให้ผงฟลักซ์หลอมละลายกลายเป็นของเหลวที่ท่วมปลายลวดเชื่อม ต่อจากนั้นการอาร์กก็จะดับลงโดยขณะที่ยังมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านฟลักซ์เหลวอยู่อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ซึ่งสมบัติฟลักซ์เหลวจะมีความต้านทานกระแสสูงมากจนเกิดเป็นความร้อนขึ้น และความร้อนที่เกิดขึ้นเองเป็นตัวช่วยทำให้ลวดเชื่อมและผิวชิ้นงานเกิดการหลอมละลายอย่างต่อเนื่อง จนสามารถเติมเนื้อโลหะเต็มช่องว่างของรอยต่อให้ติดกันได้อย่างสมบูรณ์ โดยแนวเชื่อมจะสูงขึ้นในแนวตั้ง ดังแสดงตัวอย่างการเชื่อมการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุมในรูปที่ 3.80

การเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุมนี้ การเตรียมรอยต่อจะไม่ต้องบากหน้างาน แต่จะเป็นเพียงการเตรียมผิวหน้าเรียบต่อชน (Square groove) แล้วนำมาประกอบเข้ากับแผ่นประกบแล้วเริ่มต้นการอาร์ก ซึ่งจะมีการอาร์กเพียงเริ่มต้นครั้งเดียวจากนั้นก็ดำเนินการเชื่อมไปอย่างต่อเนื่องจนเสร็จสมบูรณ์ ขณะเชื่อมจะไม่มีเสียงดังเหมือนการเชื่อมอาร์กแบบอื่น ๆ ไม่มีสะเก็ดเชื่อมกระเด็นออกมา โดยทั่วไปมักนิยมใช้กับการเชื่อมต่อโลหะแท่งหนาขึ้นเดียว มีอัตราการป้อนเติมลวดสูงมาก อุณหภูมิของน้ำโลหะเหลวที่

ผสมอยู่กับฟลักซ์เหลว ประมาณ $1,925^{\circ}\text{C}$ ส่วนที่ผิวชิ้นงาน (Base metals) ประมาณ $1,650^{\circ}\text{C}$ แนวเชื่อมจะเริ่มแข็งตัวจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน โดยด้านล่างสุดจะมีแผ่นรองเชื่อมที่เรียกว่า Run-off tabs ทำหน้าที่รองรับไม่ให้สแลกหลอมเหลวและเนื้อโลหะเชื่อมไหลออกด้านล่าง



รูปที่ 3.79 อุปกรณ์พร้อมวงจรและ

ระบบการหลอมละลายของการเชื่อมอิเล็กโทรสแลก (ESW)

ที่มา : *Electroslag welding ESW.*

Accessed, 2017

วิธีเติมเนื้อโลหะของการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม มี 2 แบบ อ้างอิงจาก W.G. Bacon et al. (2013) ดังนี้

1. การเชื่อมแบบที่ท่อนำลวดเชื่อมไม่เกิดการหลอมละลาย (Non-consumable guide tube method) หรือ (Conventional method) นั้นหมายถึง จะอาศัยการเติมเนื้อโลหะในแนวเชื่อมด้วยการหลอมละลายของลวดเชื่อม โดยลวดเชื่อมอาจมีมากกว่าหนึ่งเส้นป้อนสู่การหลอมละลายพร้อมกัน (ตัวอย่างลวดป้อน 3 เส้นในรูปที่ 3.80)

2. การเชื่อมแบบที่ท่อนำลวดเชื่อมและลวดเชื่อมเกิดการหลอมละลาย (Consumable guide tube method) วิธีแบบนี้จะได้เนื้อเชื่อมจากการที่เกิดการหลอมละลายพร้อมกันทั้งคู่ โดยที่ลวดเชื่อมได้ถูกป้อนลงไปถึงด้านล่างสุดของบ่อหลอมละลาย และท่อนำลวดเชื่อมจะมีความยาวตลอดความสูงของลวดเชื่อม เมื่อน้ำฟลักซ์เหลวสูงขึ้นจนสัมผัสกับท่อนำลวดก็จะเกิดการหลอมละลายรวมไปกับลวดเชื่อม



(ก) องค์ประกอบของระบบของการเชื่อม



(ค) ระบบการประคองน้ำโลหะเหลว



(ข) ระบบขณะทำการเชื่อม



(ง) ระบบการเชื่อมสิ้นสุดสมบูรณ์

รูปที่ 3.80 ตัวอย่างของขบวนการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุ่ม (ESW)

ที่มา : Steel mec sald Welding Equipments, 2012

3.5.1 องค์ประกอบที่สำคัญของการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุ่ม (ESW)

กรรมวิธีการเชื่อมนี้มีองค์ประกอบที่เหมือนกันกับการเชื่อมอาร์กไฟฟ้า คือ มีเครื่องเชื่อมที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อการอาร์ก มีลวดเชื่อมสำหรับป้อนเติมเนื้อโลหะและมีฟลักซ์ที่คอยปกคลุมบ่อหลอมละลายจากแก๊สในบรรยากาศภายนอก แต่จะมีความแตกต่างของขบวนการเชื่อมที่ไม่จำเป็นต้องอาร์กตลอดการเชื่อม อาร์กครั้งเดียวตอนเริ่มต้นและดับไป การเชื่อมเติมลวดก็ดำเนินการต่อไปเรื่อย ๆ จนเสร็จสิ้น ดังนั้น การพิจารณาเลือกใช้ฟลักซ์และลวดเชื่อมจึงต้องมีความเหมาะสมกัน ซึ่งรวมไปถึงปัจจัยการเชื่อมอื่น ๆ ที่อ้างอิงจาก UTP Maintenance (2019) ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้

1. ลวดเชื่อม (Electrodes) สำหรับการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุมหรืออิเล็กโทรสแลกนั้น โดยทั่วไปจะใช้ลวดเชื่อม 2 ประเภท ได้แก่ ลวดเชื่อมเส้นลวดตัน (Solid wire) กับลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux core wire) ดังแสดงในรูปที่ 3.81 (ก) และ (ข) ตามลำดับ มักนิยมใช้ลวดเชื่อมแบบเส้นลวดตันมากกว่าเพราะมีอัตราการเติมเนื้อโลหะได้สูงกว่า เชื่อมได้เร็วกว่า แต่ถ้าเป็นงานเชื่อมที่ต้องการควบคุมส่วนผสมทางเคมีในเนื้อเชื่อมของจำพวกกลุ่มเหล็กกล้าผสม (Alloy steels) จะนิยมเลือกใช้ลวดเชื่อมแบบไส้ฟลักซ์ เพราะสามารถเติมธาตุผสมจากไส้ฟลักซ์ได้ เช่น เฟอร์โรแมงกานีส เฟอร์โรซิลิกอน เป็นต้น และยังเป็น การช่วยเติมฟลักซ์ในบ่อหลอมละลายได้อีกด้วย

สำหรับลวดเชื่อมประเภทเส้นลวดตันที่เป็นลวดเหล็กกล้าคาร์บอน กับเหล็กกล้าผสมต่ำความ แข็งแรง (HSLA) จะแบ่งเกรดลวดเชื่อมตามปริมาณแมงกานีสผสม ได้ 3 ระดับ ได้แก่ 1. ผสมแมงกานีส ปานกลาง (ประมาณ 1 % Mn) 2. ผสมแมงกานีสสูง (ประมาณ 2 % Mn) และ 3. ผสมแมงกานีสพิเศษ (ประมาณมากกว่า 2 % Mn) โดยจะสัมพันธ์กับฟลักซ์ที่เลือกใช้

สำหรับการเชื่อมชิ้นงานโลหะกลุ่มของเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) และเหล็กกล้าผสม ต่ำความแข็งแรงสูง (HSLA) ลวดเชื่อมต้องมีคาร์บอนผสมที่ต่ำกว่าคาร์บอนในโลหะชิ้นงาน เพื่อเป็น การป้องกันการแตกร้าวของแนวเชื่อม แต่สำหรับโลหะชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าผสมสูงจะต้องเลือกลวด เชื่อมที่มีส่วนผสมที่เหมือนกันหรือใกล้เคียงที่สุด และโดยทั่วไปพบว่าแนวเชื่อมจะต้องทำการอบด้วย ความร้อนเพื่อให้ปรับคุณสมบัติของแนวเชื่อมให้ทัดเทียมกับโลหะพื้นฐาน (Base metals) นอกจากนี้ยัง พบข้อดีของแนวเชื่อมของขบวนการเชื่อมนี้ว่า มีอัตราการเจือจาง (Dilution ranging) ที่สูงตั้งแต่ 25 – 50 % ก็ด้วยเหตุเพราะกลไกการหลอมละลายของลวดเชื่อมกับโลหะงานที่อยู่ภายใต้ฟลักซ์หลอมเหลวมี่ ขนาดใหญ่และจะผสมผสานกันอย่างทั่วถึง



(ก) ลวดเชื่อมชนิดเส้นลวดตัน (Solid wire) (ข) ลวดเชื่อมชนิดไส้ฟลักซ์ (Core wire)

รูปที่ 3.81 ตัวอย่างลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม (ESW)

ที่มา : CAI-WESTWARD Electrode product, 2020

ลวดเชื่อมอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 1.6 ถึง 4.0 มิลลิเมตร แต่ที่นิยมใช้งานกันมีขนาดอยู่ที่ 2.4 ถึง 3.2 มิลลิเมตร โดยมีลักษณะเป็นลวดที่มีน้ำหนักแตกต่างกัน ซึ่งน้ำหนักมากที่สุด 350 กิโลกรัม แต่ที่นิยมกันจะหนักประมาณ 25 กิโลกรัม

2. ฟลักซ์เชื่อม (Flux welding) เป็นวัสดุสิ้นเปลืองที่สำคัญที่สุดที่ได้ของกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลูม (ESW) ในสภาพหลอมเหลวฟลักซ์จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนซึ่งช่วยในการหลอมเหลวลวดเชื่อมและชิ้นงานโลหะเชื่อมเพื่อสร้างแนวเชื่อม นอกจากนี้ฟลักซ์ยังต้องทำหน้าที่ปกป้องน้ำโลหะเหลวในบ่อหลอมละลายจากสภาพบรรยากาศ สมบัติที่ดีของฟลักซ์ในสภาพหลอมเหลวต้องนำไฟฟ้า และต้องมีความต้านทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าที่มากเพียงพอที่จะสร้างความร้อนในการหลอมละลาย หากความต้านทานต่ำจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการสร้างบ่อหลอมละลายและจะเกิดประกายไฟ และค่าความหนืดไหลตัวของฟลักซ์เหลวก็ต้องเหมาะสมไม่หนืดหรือเหลวเกินไป เช่น ถ้าหนืดมากหรือหนามากเกินไปจะขัดขวางการไหลเวียนของโลหะเหลว จะทำให้เกิดตะกอนรวมตัวขึ้น ส่วนถ้ากรณีที่เหลวมากหรือบางมากเกินไปจะเกิดการรั่วไหลของน้ำโลหะเหลว

อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของฟลักซ์ที่ดีต้องต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะชิ้นงานเชื่อม และจุดเดือดต้องสูงกว่าอุณหภูมิของบ่อหลอมละลาย เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียที่ไม่จำเป็น ซึ่งอาจส่งผลต่อความควบคุมคุณสมบัติของการหลอมละลาย ปกติอุณหภูมิการเชื่อมเหล็กกล้าจะอยู่ที่ประมาณ $1,650^{\circ}\text{C}$ ฟลักซ์หลอมเหลวที่ดีต้องมีความหนืดหรือเจือยที่เหมาะสมกับโลหะชิ้นงานและควรมีความเสถียรที่กว้างเพื่อรองรับกับปัจจัยการเชื่อมที่หลากหลาย

องค์ประกอบของฟลักซ์สำหรับการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลูม จะเป็นออกไซด์เชิงซ้อน (Complex oxides) ของซิลิกอน (Si) แมงกานีส (Mn) ไทเทเนียม (Ti) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) อลูมิเนียม (Al) และ อาจเพิ่มเติมแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) โดยออกแบบส่วนผสมตามคุณสมบัติของแนวเชื่อมที่ต้องการ ซึ่งจะเป็นไปตามมาตรฐานต่าง ๆ เช่น ตามมาตรฐาน ISO 14174 (2019) ได้กำหนดมาตรฐานส่วนผสมทางเคมีของฟลักซ์และสัญลักษณ์สำหรับการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลูม (ESW) ดังแสดงในตารางที่ 3.15

ฟลักซ์ที่ใช้งานสำหรับขบวนการเชื่อมนี้จะมี 2 ประเภท ประเภทที่ 1. ฟลักซ์เริ่มต้น (Starting flux) เป็นฟลักซ์ประเภทที่ใช้สำหรับการเริ่มต้นอาร์ก ซึ่งมีสมบัติที่อาร์กง่าย จุดหลอมเหลวต่ำและมีความหนืดสูง ส่วนประเภทที่ 2. ฟลักซ์เชื่อมต่อเนื่อง (Running flux) หรือที่เรียกกันว่า ฟลักซ์ทำงาน จะเป็นฟลักซ์ที่รับหน้าที่ต่อหลังจากฟลักซ์เริ่มต้น ทำหน้าที่ให้ความร้อนหลอมละลายลวดเชื่อมที่สูงและรวดเร็ว พร้อมกับการควบคุมบ่อหลอมละลายตลอดการเชื่อม ปกติจะใช้ในปริมาณฟลักซ์ไม่มาก ฟลักซ์ทำงานที่ดีจะต้องมีสมบัติที่สามารถรองรับกับการปรับเปลี่ยนปัจจัยการเชื่อมที่หลากหลาย ซึ่งผู้ผลิตจะบรรจุไว้ทั้งแบบเป็นถุงและแบบถังดังแสดงตัวอย่างบรรจุภัณฑ์ของผงฟลักซ์ในรูปที่ 3.82

ตารางที่ 3.15 สัญลักษณ์และส่วนผสมทางเคมีของฟลักซ์สำหรับเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม

ที่มา : International Standard ISO 14174 . 2019

สัญลักษณ์ (ความหมาย)	ส่วนผสมทางเคมี	ปริมาณส่วนผสม (%)
MS (Manganese-Silicate)	MnO + SiO ₂	≥ 50
	CaO	≤ 15
CS (Calcium-Silicate)	CaO + MgO + SiO ₂	≥ 55
	CaO + MgO	≥ 15
CG (Calcium-Magnesium)	CaO + MgO	5 ถึง 50
	CO ₂	≥ 2
	Fe	≤ 10
CB (Calcium- Magnesium basic)	CaO + MgO	30 ถึง 80
	CO ₂	≥ 2
	Fe	≤ 10
CG-I (Calcium- Magnesium with Iron)	CaO + MgO	5 ถึง 45
	CO ₂	≥ 2
	Fe	15 ถึง 60
CB-I (Calcium- Magnesium basic with Iron)	CaO + MgO	10 ถึง 70
	CO ₂	≥ 2
	Fe	15 ถึง 60
GS (Magnesium -Silicate)	MgO + SiO ₂	≥ 42
	Al ₂ O ₃	≤ 20
	CaO + CaF ₂	≤ 14
ZS (Zirconium-Silicate)	ZrO ₂ + SiO ₂ + MnO	≥ 45
	ZrO ₂	≥ 15
RS (Rutile-Silicate)	TiO ₂ + SiO ₂	≥ 50
	TiO ₂	≥ 20
AR (Aluminate-Rutile)	Al ₂ O ₃ + TiO ₂	≥ 50
BA (Basic-Aluminium)	Al ₂ O ₃ + CaF ₂ + SiO ₂	≥ 55
	CaO	≥ 8
	SiO ₂	≤ 20
AAS (Acid-Aluminium-Silicate)	Al ₂ O ₃ + SiO ₂	≥ 50
	Ca F ₂ + MgO	≥ 20

ตารางที่ 3.15 (ต่อ) สัญลักษณ์และส่วนผสมทางเคมีของฟลักซ์สำหรับเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม

ที่มา : International Standard ISO 14174 . 2019

สัญลักษณ์ (ความหมาย)	ส่วนผสมทางเคมี	ปริมาณส่วนผสม (%)
AB (Aluminate-Basic)	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}$	≥ 40
	Al_2O_3	≥ 20
	CaF_2	≤ 22
AS (Aluminate-Silicate)	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{ZrO}_2$	≥ 40
	$\text{CaF}_2 + \text{MgO}$	≥ 30
	ZrO_2	≥ 5
AF (Aluminate-Fluoride-Basic)	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaF}_2$	≥ 70
FB (Fluoride-Basic)	$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{CaF}_2 + \text{MnO}$	≥ 50
	SiO_2	≤ 20
	CaF_2	≥ 55

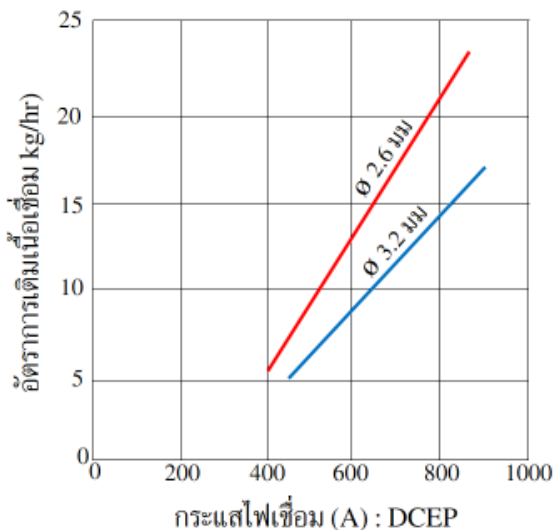


รูปที่ 3.82 บรรจุภัณฑ์ผงฟลักซ์สำหรับการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม (ESW)

ที่มา Voestalpine BOhler Welding, 2020

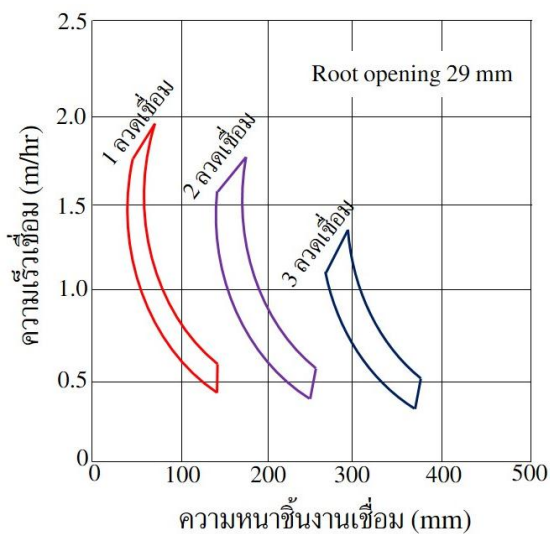
3. อัตราการป้อนเติมเนื้อเชื่อม (Deposition rates) การเชื่อมอาร์กไฟฟ้าสแลกคลุมหรือที่เรียกว่า การเชื่อมอิเล็กโทรสแลก เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่ได้ชื่อว่า มีอัตราการเติมเนื้อเชื่อมในระดับที่สูงมากวิธีหนึ่ง ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับระดับของกระแสไฟเชื่อม โดยกระแสที่เพิ่มขึ้นก็จะสามารถเติมเนื้อโลหะในแนวเชื่อมได้มากขึ้น และลวดเชื่อมขนาดเล็กจะมีอัตราการเติมเนื้อโลหะได้สูงกว่าลวดเชื่อมขนาดใหญ่ ดังแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเติมเนื้อเชื่อมกับกระแสไฟเชื่อมในรูปที่ 3.83 ซึ่งอ้างอิงข้อมูลจาก G. Shrijit (2017) นอกจากนี้อัตราการป้อนเติมเนื้อเชื่อมยังขึ้นอยู่กับจำนวนของหัวเชื่อม ซึ่งกรรมวิธีการเชื่อมวิธีนี้สามารถเชื่อมได้มากกว่าหนึ่งลวดเชื่อมพร้อม ๆ กัน โดยหัวเชื่อมที่มากขึ้นจะมีอัตราการเติมเนื้อเชื่อมที่สูงขึ้นแต่ต้องควบคุมความเร็วของแต่ละหัวเชื่อม และต้องพิจารณาความสัมพันธ์กับความ

หนาของชิ้นงานเชื่อม ซึ่งจำนวนของหัวเชื่อม ความหนาของโลหะงานและความเร็วในการเชื่อม ต้องสัมพันธ์กัน ดังแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.84



รูปที่ 3.83 ความสัมพันธ์ของกระแสเชื่อมต่ออัตราการเติมเนื้อโลหะที่ขนาดของลวดแตกต่างกัน

ที่มา : G. Shrijit. ESW : Introduction, Setup and Applications / Metallurgy, 2017 (เขียนใหม่)



รูปที่ 3.84 ความสัมพันธ์ของความหนาชิ้นงานต่ออัตราความเร็วในการเชื่อมที่จำนวนลวดเชื่อมต่างกัน

ที่มา : G. Shrijit. ESW : Introduction, Setup and Applications / Metallurgy, 2017 (เขียนใหม่)

คุณภาพของแนวเชื่อมอาร์กไฟฟ้าสแลกคลุมนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- สัดส่วนความกว้างและความลึกของบ่อหลอมละลาย
- กระแสไฟเชื่อมและแรงดันอาร์กเชื่อม
- ระดับความลึกของสแลก
- จำนวนของลวดเชื่อมและระยะห่างของรอยต่อ

โดยจะขอยกตัวอย่างข้อมูลจากการทดลองหาปัจจัยการเชื่อมที่ต้องสัมพันธ์กันเมื่อความหนาของชิ้นงานเชื่อมเปลี่ยนแปลงของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กไฟฟ้าสแลกคลุมที่ช่างเชื่อมต้องศึกษาและทำความเข้าใจ ดังแสดงใน **ตารางที่ 3.16**

ตารางที่ 3.16 ปัจจัยการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุม

ที่มา : G. Shrijit. *ESW : Introduction, Setup and Applications / Metallurgy, 2017*

ความหนา ชิ้นงาน (mm)	ปัจจัยการเชื่อม (Welding variables)							
	ระยะห่าง ชิ้นงาน (mm)	ขนาด Ø ลวด เชื่อม (mm)	จำนวน ลวด เชื่อม	กระแสแต่ ลวด เชื่อม (A)	แรงดัน อาร์ก (V)	อัตรา ป้อนลวด (m/hr)	ความเร็ว เชื่อม (m/hr)	อัตราการ ส่ายลวด เชื่อม (mm/sec)
30	30	2.4	1	325–350	32–34	3	0.1	–
70	26–30	3.2	1	650–700	46–48	6–7	1.0	8.5
90	24–27	3.2	2	625–650	42–46	5	1.5– 1.75	7.9
150	25–28	3.2	2	475–525	45–50	3.75– 4.25	0.9–1.0	7–8.5

จากข้อมูลรายละเอียดที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะมีความชัดเจนว่า การเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุมเหมาะกับการเชื่อมโลหะงานที่หนาและต้องเชื่อมในตำแหน่งทำตั้งเชื่อมขึ้นที่สามารถเอียงได้ 45 องศาจากแนวตั้ง จะเชื่อมแบบแนวเดียว (Single pass) เป็นการเชื่อมที่ต้นทุนการเชื่อมต่ำ พร้อมกันนี้ยังมีข้อดีและข้อจำกัดอีกหลายประเด็นพอจะสรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

ข้อดี (Advantages)	ข้อเสีย (Disadvantage)
– อัตราการเติมเนื้อเชื่อมสูง	– ไม่สามารถเชื่อมได้กับโลหะทุกชนิด
– เชื่อมโลหะหนาทุก ๆ ด้วยแนวเชื่อมเดียว	– เชื่อมได้เฉพาะทำตั้งหรือใกล้เคียงทำตั้ง
– ไม่ต้องอุ่นงานก่อนเชื่อม	– การเชื่อมเริ่มต้นแนวเชื่อมต้องสมบูรณ์
– เนื้อเชื่อมมีคุณภาพสูง	– ไม่เหมาะกับงานที่บางน้อยกว่า 19 มม.
– ไม่ต้องเตรียมรอยบากหน้างานก่อนเชื่อม	– การเชื่อมที่ไม่เหมาะกับรูปร่างที่ซับซ้อน
– การเชื่อมเป็นแบบอัตโนมัติต่อเนื่อง	– การเชื่อมที่มีปริมาณความร้อนสะสมสูง
– การเชื่อมไม่มีสะเก็ดโลหะกระเด็นออกมา	– เนื้อเชื่อมจะมีขนาดเกรนที่ค่อนข้างโต
– การเชื่อมไม่เกิดการบิดงอ	

ดัชนีคำศัพท์บทที่ 3

Air cooling gun – หัวเชื่อมที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ

Agglomerated powdered fluxes – ผงฟลักซ์ชนิดตัวประสานของการเชื่อมได้ฟลักซ์

Alternative current welding – การเชื่อมด้วยระบบกระแสไฟสลับ

Arc stability – การอาร์กเชื่อมที่ราบเรียบและสม่ำเสมอ

Arc welding – การเชื่อมที่อาศัยการอาร์กด้วยไฟฟ้า

AWG (American wire gauge) – เกจวัดขนาดสายไฟเชื่อมมาตรฐานอเมริกา

Butt joint cored wire – ท่อลวดไส้ฟลักซ์แบบตะเข็บต่อชน

Capillary attraction – การไหลแทรกซึมของน้ำโลหะไปยังบ่อหลอมละลาย

Consumable guide tube method – การเชื่อม ESW ที่ท่อนำลวดเกิดการหลอมละลาย

Contact tube – ท่อนำกระแสที่ประกอบอยู่ปลายหัวเชื่อม

Content current : CC – เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบกระแสคงที่

Content voltage : CV – เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบแรงดันคงที่

Conventional method – การเชื่อม ESW ที่ท่อนำลวดไม่เกิดการหลอมละลาย

Deposition rates – อัตราการป้อนเติมเนื้อเชื่อม

Direct current electrode negative : DCEN – การต่อกระแสไฟตรงลวดเชื่อมเป็นขั้วลบ

Direct current electrode positive : DCEP – การต่อกระแสไฟตรงลวดเชื่อมเป็นขั้วบวก

Direct current reverse polarity : DCRP – การเชื่อมแบบกระแสไฟตรงกลับขั้ว

Direct current straight polarity : DCSP – การเชื่อมแบบกระแสไฟตรงขั้วตรง

Dum core wire – ลวดเชื่อมม้วนแบบบรรจุถัง

Duty cycle – ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องเชื่อม

Electric arc welding – การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์

Electro slag welding : ESW – การเชื่อมไฟฟ้าสแลกคลุมบ่อหลอม

Electrode extension – ระยะยื่นของปลายลวดเชื่อม

Engine driven generators – เครื่องเชื่อมที่ใช้เครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า

Flux hopper – ถังบรรจุผงฟลักซ์สำหรับเชื่อมได้ฟลักซ์

Fume extractors welding – ชุดดูดควันเชื่อม

Fused powdered fluxes – ผงฟลักซ์ชนิดหลอมของการเชื่อมได้ฟลักซ์

Fusion welding processes – การเชื่อมแบบหลอมละลายเนื้อโลหะ

Gas welding – การเชื่อมที่อาศัยความร้อนจากแก๊สที่ติดไฟ

Globular metal transfer – การถ่ายโอนน้ำโลหะเป็นหยดขนาดใหญ่

Gun trigger – สวิตช์ควบคุมที่หัวเชื่อม

Heavy surface oxide – โลหะชิ้นงานที่มีออกไซด์บนพื้นผิว

Intense energy welding – การเชื่อมที่อาศัยแหล่งพลังงานสูง

Intermediate relay unit – อุปกรณ์ปรับตัดความตรงของเส้นลวดเชื่อม

International Institute of Welding : IIW – สถาบันการเชื่อมที่อ้างอิงมาตรฐานยุโรป (BS EN ISO)

Inverter welding machine – เครื่องเชื่อมที่มีทั้งระบบไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ

Ionization potential – ความต่างศักย์ของแก๊สปกคลุม

Laminar gas flow – การไหลของแก๊สปกคลุมที่เหมาะสม

Metal active gas : MIG – การเชื่อมใช้แก๊สแอคทีฟปกคลุม

Metal inert gas : MIG – การเชื่อมใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุม

Metal transfer – การถ่ายโอนน้ำโลหะไปยังบ่อหลอมละลาย

Molten drops – น้ำโลหะที่หยดลงในบ่อหลอมละลาย

Overlapping cored wire – ท่อลวดไส้ฟลักซ์แบบตะเข็บต่อกัน

Pinch force – แรงกััดลวดที่ตำแหน่งปลายลวดเชื่อม

Pressure welding processes – การเชื่อมแบบใช้แรงอัดให้โลหะติดกัน

Pull wire feed – วิธีการป้อนลวดแบบดึงเส้นลวด

Pulsed transfer – การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพัลส์จากหยดถึงระดับละออง

Push wire feed – วิธีการป้อนลวดแบบดันเส้นลวด

Push-Pull wire feed – วิธีการป้อนลวดแบบดันและดึงเส้นลวด

Resistance welding – การเชื่อมที่อาศัยความต้านของไฟฟ้า

Retaining shoe – ชุดแผ่นทองแดงประกบของการเชื่อม ESW

Robotic arm – แขนกลที่ต่อเป็นหัวเชื่อม

Running flux – ฟลักซ์ป้อนตลอดของการเชื่อม ESW

Seamless cored wire – ท่อลวดไส้ฟลักซ์แบบไม่มีตะเข็บ

Sheath – โลหะท่อที่ใช้ผลิตลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์

Short circuit transfer – การถ่ายโอนน้ำโลหะในรูปแบบลัดวงจร

Slag – ฟลักซ์หลอมเหลวแล้วแข็งตัวหลังการเชื่อมบนแนวเชื่อม

Slipping wire – การลื่นของลวดเชื่อมขณะขับป้อน

Solid state welding – การเชื่อมที่โลหะอยู่ในสถานะของแข็ง

Spool gun – หัวเชื่อมที่มีระบบป้อนลวดในตัวเอง

Spray transfer – การถ่ายโอนน้ำโลหะที่มีลักษณะเป็นละออง

Starting flux – ฟลักซ์เริ่มต้นเชื่อมของการเชื่อม ESW

Thermo-chemical welding – การเชื่อมที่อาศัยความร้อนจากปฏิกิริยาของสารเคมี

Transformer welding machine – เครื่องเชื่อมหม้อแปลงกระแสไฟสลับ

Turbulent gas flow – การไหลของแก๊สปกคลุมที่ออกมามากเกินไป

Voltage gradient – พฤติกรรมการค่อย ๆ ลดลงของแรงดันอาร์กขณะเชื่อม

Water cooling gun – หัวเชื่อมที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ

Weld pool – บ่อหลอมละลายของการเชื่อม

Welding gun/Torch – หัวเชื่อม

Welding machine – เครื่องจ่ายพลังงานสำหรับการเชื่อม

Wire conduit – ท่อสำหรับนำลวดเชื่อมภายในชุดหัวเชื่อม

Wire feed drive motor – อุปกรณ์ชุดป้อนลวดม้วน

Wire feed roller – ล้อขับป้อนลวด

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 3

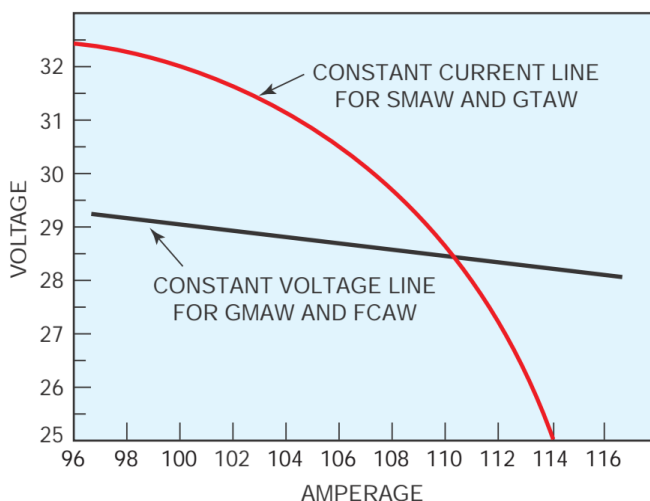
ข้อที่ 1. จงอธิบายความหมายของการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding processes) กับการเชื่อมแบบใช้แรงอัด (Pressure welding processes) พร้อมยกตัวอย่างกรรมวิธีการเชื่อมของแต่ละแบบมาอย่างน้อย 5 กรรมวิธี

ข้อที่ 2. สมาคมการเชื่อมแห่งสหรัฐอเมริกา (American Welding Society : AWS) ได้มีมาตรฐานการแบ่งกลุ่มกรรมวิธีการเชื่อมไว้กี่กลุ่ม อะไรบ้าง จงเขียนเป็นแผนผังกรรมวิธีการเชื่อม

ข้อที่ 3. จงสเก็ทภาพวงจรการเชื่อมอาร์กสวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) มาให้เข้าใจ

ข้อที่ 4. จงอธิบายความแตกต่างของการต่อขั้วเชื่อมแบบ DCEP กับ DCEN พร้อมบอกประโยชน์ของการนำไปใช้งานของทั้งสองแบบ (วาดภาพประกอบการอธิบาย)

ข้อที่ 5. จากรูปข้างล่างนี้ จงอธิบายหลักการจ่ายพลังงานเชื่อมแบบ Constant Current : CC กับแบบ Constant Voltage : CV

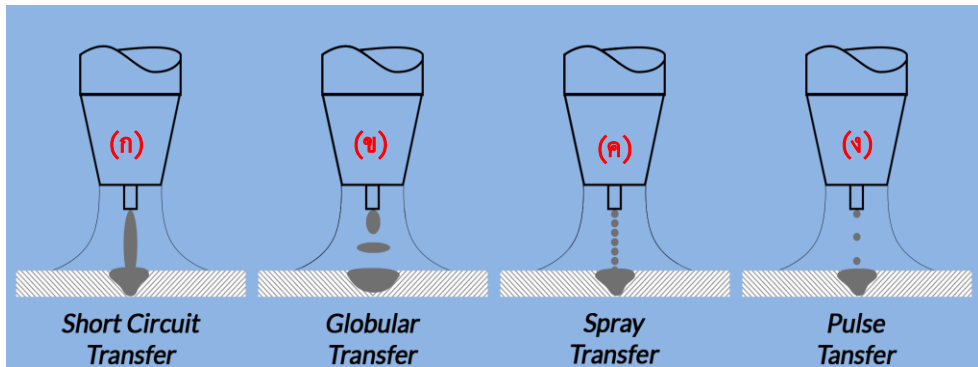


ที่มา : Larry Jeffus, *Welding and metal fabrication*, 2012.

ข้อที่ 6. จงบอกความแตกต่างของเครื่องแต่ละชนิดดังต่อไปนี้

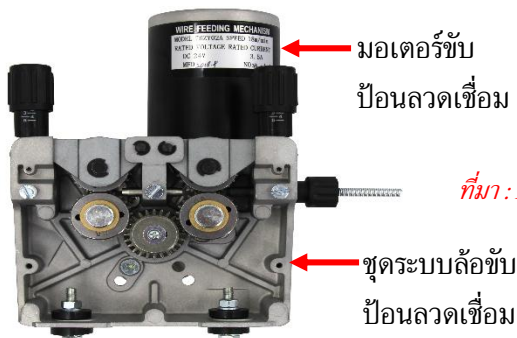
- เครื่องเชื่อมชนิดผลิตกระแสไฟตรง (Motor generator welding machine)
- เครื่องเชื่อมชนิดหม้อแปลงกระแสไฟสลับ (Transformer welding machine)
- เครื่องเชื่อมชนิดหม้อแปลงและเรียงกระแสไฟฟ้า (Transformer – rectifiers welding machine)
- เครื่องเชื่อมชนิดอินเวอร์เตอร์ (Inverter welding machine)

ข้อที่ 7. จงอธิบายความแตกต่างของการถ่ายโอนน้ำโลหะในแต่ละแบบมาพอเป็นสังเขป



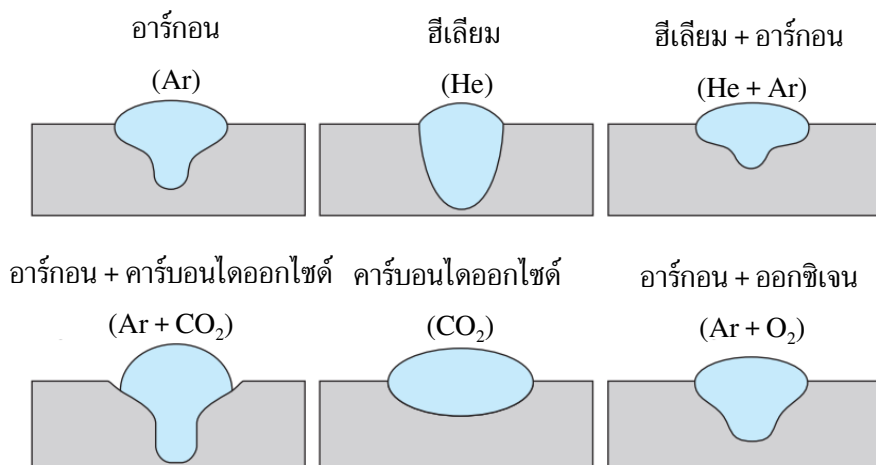
ที่มา : Zach Guzman, MIG Welding Transfer Method, 2017

ข้อที่ 8. จากรูปข้างล่างนี้ จงบอกหน้าที่และหลักการทำงานของชุดอุปกรณ์ป้อนลวดเชื่อมของกรรมวิธีการเชื่อมแบบ GMAW



ที่มา : Lincoln Electric, Welding Machine, 2016

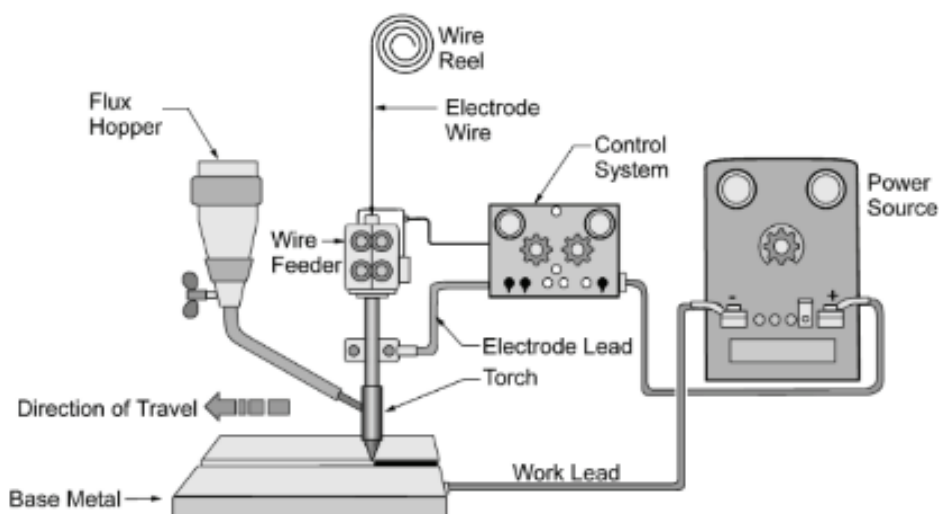
ข้อที่ 9. จากรูปข้างล่างนี้ จงอธิบายถึงพฤติกรรมของแก๊สปกคลุมแต่ละชนิดที่มีต่อการหลอมละลาย



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

ข้อที่ 10. จงอธิบายหลักการผลิตลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ พร้อมกับการบอกถึงความแตกต่างของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์แบบชนิด Self-shielding gas flux cored arc welding กับแบบชนิด Gas-shielding gas flux cored arc welding

ข้อที่ 11. จงอธิบายหลักและวิธีการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) มาพอสังเขป โดยใช้ภาพข้างนี้อ้างอิงเพื่อประกอบการอธิบาย



อุปกรณ์และระบบวงจรการทำงานของการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (SAW)

ที่มา : BMT Eleet Technology Limited, 2006

ข้อที่ 12. จงบอกข้อดี-ข้อเสียและการเก็บรักษาผงฟลักซ์ของการเชื่อมใต้ฟลักซ์ มาโดยละเอียด

ข้อที่ 13. รูปข้างล่างแสดงถึงกรรมวิธีการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคูลูม (Electro slag welding : ESW) จงบอกหลักการเชื่อมและบอกถึงลักษณะงานที่เหมาะสมกับขบวนการเชื่อมชนิดนี้



ขบวนการเชื่อมไฟฟ้าสแลกคูลูม (ESW)

ที่มา : Steel mec sald Welding Equipments, 2012

บรรณานุกรมบทที่ 3

- Andrew D. Althouse, Carl H. Turnquist, Willian A. Bowditch, Kevin E. Bowditch and Mark A. Bowditch, *Modern Welding*. 11th Edition, Goodheart–Willcox Co. Publisher, 2018.
- American Welding Society (AWS). *Welding Handbook– Welding Science and Technology*. Vol. 1, 9th Edition. By American Welding Society, 2001.
- American Welding Society (AWS). *Welding Journal–Electroslag Welding of Bridges*. May, 2012.
- American Welding Society (AWS). *Welding Inspection Handbook*. Third Edition May, 2000.
- ASM Handbook. *Welding, Brazing and Soldering. Electroslag and Electrogas Welding* Vol. 6, 1993.
- B.J. Moniz and R.T. Miller. *Welding Skills*. 3rd Edition, American Technical Publishers, Inc.(AIP), 2004.
- BOC. Section 4 : *Welding Processes–GMAW(MIG)/FCAW/MCAW*. Au–IPRM, 2007.
- Edward R Bohnart. *Welding –Principles and Practices*. 5th Edition, McGraw Hil Education, 2017.
- G. Shrijit. ESW. *Introduction, Step and Applications– Metallurgy*. Accessed July 2017.
- HOBART Filler Metals. *Submerged Arc Welding Consumables*. HobartBrothers Company, 4th Edition, 2018.
- Internation Welding Engineering (IWE). *Welding Processes and Equipment. GSI SLV. The Welding Engineering’s Knowledge*. SLV Duisburg–Branch of GSI mbH. Edition, 2015.
- International Standard (ISO). *Welding Consumables–Fluxes for Submerged Arc Welding and Electroslag Welding– Classification, ISO 14174*. Third Edition, 04–2019.
- Jerome E. Spear. *Welding Fume Exposure tends to be highly variable due to several exposure Factors*. Issue of Occupational Health & Safety. 2011.
- Kailash Chaudhary and Teena Choudhary. *A Study on Effect of Various Process Variables in Gas Metal Arc Welding*. International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering Vol. 3 Issue 11, 147–154, 2017.
- Klas Weman. *Welding Processes Handbook. A Volume in Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies*. Second Edition, 2012.
- KOBELCO STEEL. *Kobelco Welding Today*. International Operations Department–Welding Company, Kobe Steel, Ltd. Vol. 11 No. 1, 2008.

- KOBELCO STEEL. *Fundamentals of MAG Welding (CO₂ Arc Welding)*. Education Center. 2018.
- KOBE STEEL. *Welding Handbook– Welding Consumables and Processes*. Kobe Steel, LTD. Welding Company. 2008.
- 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 –Principles and Applications*. 7th Edition, Delmar, Cengage Learning Publisher, 2012.
- LINCOLN ELECTRIC. *Process and Theory–Constant Current vs. Constant Voltage Output*. 2017.
- LINCOLN ELECTRIC. *Welding & Cutting Equipment. Product Catalogue*, 2021.
- LINCOLN ELECTRIC. *Gas Metal Arc Welding–Product and Procedure Selection*. Issue Date 08/2014.
- LINCOLN ELECTRIC. *Welding Guns and Torches– Products for MIG, TIG, FCAW, SAW and Robotic Welding*. Lincoln Electric Company, 2018.
- LINCOLN ELECTRIC. *Choosing a Shielding Gas for Flux–Cored Welding*. Process and Theory. 2016.
- LINCOLN ELECTRIC. *Modern SAW–Mild Steel and Low Alloy Submerged Arc Welding Guide*. The Lincoln Electric Co., Issue Date 11/2019.
- M. R. Nezamdoost, M. N. Esfahani, S. A. Mirbozorgi. *Investigation of Temperature and Residual Stresses Field of Submerged Arc Welding by Finite Element Method and Experiments*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87:615–624, 2016.
- Michael A. Reeser. *Welding Complete : Techniques, Project plants and Instructions*. 2nd Edition, Cool Springs Press Publisher, United States, 2017.
- Moniz B.J. and Miller R.J. *Welding Skills*. 3rd Edition. American Technical Publisher, Inc., USA, 2004.
- Mohit Sharma, Manmohan and Neeraj Kumar. *A Survey on Submerged Arc Welding (SAW) –Review*. International Journal for Scientific Research & Development Vol.7, 2019.
- Paul Kah, Hamidreza Latifi, Raimo Suranta, Jukka Martikainen and Markku Pirinen. *Unsatibility of Arc Types in Industrial Welding*, International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 9:15, 2014.

- Ramesh Singh. *Applied Welding Engineering : Processes, Codes and Standards*. 2nd Edition. Elsevier–Health Sciences Division Publisher, Woburn United States, 2015.
- US Army. *Welding Theory and Application TC 9–237 A US Military Welding Textbook*. Ocotillo Press. May, 1993.
- UTP Maintenance. *Strips and Fluxes for Electroslag and Submerged Arc Welding*. Tailor–Made Protectivity. Voestalpine, 2019.
- Wesley Scott Hunko. *Gold Metal Transfer – Gas Metal Arc Welding (CMT – GMAW) Wire+Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process Control Implementation*. Doctor of Philosophy, Auburn University, May 5, 2018.
- W.G. Bacon, M. Fraser and A. Mitchell. *The Application of Electroslag Melting and Welding to the Manufacture of Large Steel Components*. The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science. Vol. 14, 1975–Issue 2, 2013.
- 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, 100016, 2020.
- Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Effect of Welding Speed on Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of GTA Weld AISI 201 Stainless Steel Sheet*. Journal of Material Processing Technology. Vol. 214 pp.402–408, 2014.
- Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Heat Input and Shielding Gas Effects on the Microstructure, Mechanical Properties and Pitting Corrosion of Alternative Low Cost Stainless Steel Grade 202*. Journal of Results in Materials Vol. 7, 100111, 2020.
- Wichan Chuaiphan and Loeshpahn Srijaroenpramong. *Effect of filler alloy on microstructure, mechanical and corrosion behavior of dissimilar weldment between AISI 201 stainless steel and low carbon steel sheets produced by a gas tungsten arc welding*. Journal of Advance Materials Research. Vol. 581–582, pp 808–816, 2012.
- William L. Galvery, Jr. and Feank M. Marlow, PE. *Welding Essentials : Questions & Answers*. Second Edition, Industrial Press Inc. (IP), 2006.
- Willian A. Bowditch, Kevin E. Bowditch and Mark A. Bowditch, *Welding Technology Fundamentals*. 4th Edition, Goodheart–Willcox Co. Publisher, 2009.
- Zach Guzman. *MIG Welding Transfer Methods*. A.E.D. Metal Products & Supplies, 2017.

