

## บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภัทรชัย ขอบกิจ และคณะ [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของหัวอิเล็กโทรดที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมอลูมิเนียมเกรด 6063 ด้วยกระบวนการเชื่อมทิกแบบเดินแนวบนแผ่น (Bead-on-Plate) โดยใช้การเคลื่อนที่เป็นวงกลมของหัวอิเล็กโทรด ที่รัศมีแตกต่างกัน ดังนี้ 1 1.5 2 2.5 และ 3 ที่ความเร็วรอบ 45 60 75 90 105 120 135 150 165 180 195 และ 210 รอบต่อนาที ในการทดลองได้ทำการศึกษาลักษณะของรอยเชื่อมโดยการทดสอบความแข็ง วัดความกว้าง วัดการซึมลึก และวิเคราะห์โครงสร้างของรอยเชื่อมเพื่อศึกษาอิทธิพลของการหมุนวนอิเล็กโทรดที่มีผลต่อรอยเชื่อมอลูมิเนียมเกรด 6063 จากการทดลองพบว่าการหมุนวนอิเล็กโทรดส่งผลให้ ค่าความแข็ง ความกว้าง การซึมลึก และลักษณะของเม็ดเกรนมีความแตกต่างกัน โดยค่าความแข็งของรอยเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการหมุนวนอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ความกว้างและการซึมลึกลดน้อยลงเมื่อความเร็วรอบของการหมุนวนอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นและเม็ดเกรนมีความละเอียดมากขึ้นเมื่อรอยเชื่อมมีความแข็งเพิ่มขึ้น

อิสริยะ สภานันท์ [2] ได้ศึกษาผลกระทบของการสั่นสะเทือนทางกลที่มีต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อมอลูมิเนียมเกรด 6063 ด้วยกระบวนการเชื่อมทิก (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW) แบบเดินแนวบนแผ่น (Bead-on-plate) ได้ศึกษาผลขนาดเกรนและความแข็งของแนวเชื่อมรวมถึงบริเวณรอยต่อที่เป็นของแข็งและของเหลว (Solid/liquid interface) การสั่นสะเทือนทางกลตามแนวตั้งได้อาศัยการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดแม่เหล็ก (Magnetic coil) ซึ่งอยู่ภายใต้แผ่นเหล็กที่ถูกยึดติดกับแผ่นอลูมิเนียม ความถี่ในการสั่นสะเทือนเปลี่ยนแปลงได้ด้วยระบบอินเวอร์เตอร์ (Inverter) จากการทดลองพบว่าความกว้าง (Amplitude) จะลดต่ำลงเมื่อความถี่ (Frequency) เพิ่มมากขึ้น ผลของลักษณะโครงสร้างจุลภาคและความแข็งของรอยเชื่อมจากการทดลองพบว่าที่ความถี่ 15-30 Hz และแอมพลิจูด 0.07-0.09 มิลลิเมตร ทำให้ขนาดของเกรนละเอียดขึ้นและระยะของการแตกร้าวร้อน จะน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเชื่อมปกติ และหากว่าความถี่ต่ำหรือสูงกว่าช่วงนี้ไปเกรนของแนวเชื่อมก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้นและการแตกร้าวร้อนก็จะมากขึ้น

อนุชา ขวัญสุข [3] ได้ประยุกต์กระบวนการเชื่อมความเสียดทานหมุนวน (Friction stir welding : FSW) ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมที่ใช้ความร้อนแบบไม่หลอมละลาย โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีกันระหว่างผิวแกนหมุนกับเนื้อวัสดุทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาพพลาสติก ขณะเดียวกันสลักแกนหมุนจะทำการหมุนวนทำให้วัสดุเกิดการประสานติดกัน โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นอยู่ต่ำกว่าจุดหลอมละลายของวัสดุ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเชื่อมความเสียดทานหมุนวนอลูมิเนียมเจือ

AA6063-T1 ซึ่งมีค่าความความแข็งแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 177 MPa โดยเปรียบเทียบอิทธิพลของรูปร่างระหว่างสลักแกนหมุนทรงกระบอกผิวเรียบกับผิวเกลียว และพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพงานเชื่อมได้แก่ ความเร็วรอบแกนหมุน ความเร็วเดินเชื่อม และมุมเอียงแกนหมุน ผลการศึกษาพบการเชื่อมด้วยแกนหมุนทรงกระบอกผิวเรียบที่ความเร็วรอบแกนหมุน 1000 รอบต่อนาที ที่ความเร็วเดินเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที มุมเอียงแกนหมุน  $3^{\circ}$  ให้ความสมบูรณ์และให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดประมาณ 163 MPa ในขณะที่การเชื่อมด้วยแกนหมุนทรงกระบอกผิวเกลียว ที่ความเร็วรอบแกนหมุน 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาทีและมุมเอียงแกนหมุน  $3^{\circ}$  ให้ความสมบูรณ์และความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ประมาณ 169 MPa และค่าความแข็งแรงเชื่อมจะไม่ลดลงต่ำกว่าเนื้อวัสดุเดิมโดยแนวเชื่อมจะมีค่าความแข็งแรงประมาณ 69.4-76.3 HV 0.2/30

## 2.2 อลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม (Aluminum and Aluminum Alloys)

อลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสมเป็นวัสดุกลุ่มของโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าวัสดุในกลุ่มเหล็ก โดยที่อลูมิเนียมมีสมบัติที่ดีคือ มีน้ำหนักเบา มีค่าความแข็งแรงสูง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดี เนื่องจากมีการสร้างผิวออกไซด์มาปิดผิวไว้ตลอดเวลา มีค่าการนำกระแสไฟฟ้าได้ดี และสามารถขึ้นรูปด้วยวิธีต่างๆได้ง่าย จากสมบัติที่ดีหลายประการนี้ทำให้อลูมิเนียมเป็นที่นิยมใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ ในด้านความสามารถการเชื่อมวัสดุที่เป็นอลูมิเนียม นั้น ในระยะเริ่มแรกของการนำอลูมิเนียมมาใช้งานในการเชื่อมนี้ถือเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก เนื่องจากสมบัติที่มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำและอลูมิเนียมยังทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ที่ผิวซึ่งจะป้องกันการรวมตัวของน้ำโลหะจากลวดเชื่อมไปรวมกับเนื้องานที่บ่อหลอมละลายทำให้แนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ และการที่อลูมิเนียมมีการนำไฟฟ้าที่ดีทำให้ต้องใช้พลังงานความร้อน (Heat input) ที่สูงตามไปด้วย ซึ่งอาจทำให้เกิดการรวมตัวกับไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดไนไตรด์และเทคนิคการเชื่อมได้ก้าวหน้าขึ้นมาได้เกิดการเชื่อมแบบอาร์คไฟฟ้าโดยใช้แก๊สเฉื่อยคลุมผิวซึ่งทำให้คุณภาพของการเชื่อมอลูมิเนียมดีขึ้น ทำให้เกิดการใช้งานในอุตสาหกรรมแขนงต่างๆ กว้างมากขึ้น

### 2.2.1 การแบ่งประเภทของอลูมิเนียม [3]

การแบ่งประเภทของอลูมิเนียมสามารถทำการแบ่งได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับเกณฑ์ในการแบ่ง โดยในแง่ของกรรมวิธีการผลิตอลูมิเนียมสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภทใหญ่คือ อลูมิเนียมแปรรูปเย็น (Wrought aluminum alloys) และอลูมิเนียมหล่อหลอม (Cast aluminum alloys) และหากจะทำการแบ่งโดยใช้เกณฑ์ของส่วนผสมทางเคมี สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ อลูมิเนียมบริสุทธิ์ และอลูมิเนียมผสม โดยในการกำหนดแบ่งและเรียกชื่ออลูมิเนียมแปรรูปเย็นนั้น นิยมเรียกตามมาตรฐานของอเมริกาที่ทางสมาคมอลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา (Aluminum

association) เป็นผู้กำหนดโดยใช้หลักเกณฑ์แบ่งตามธาตุผสมซึ่งกำหนดเป็นตัวเลข 4 หลักโดยตัวเลขหลักที่หนึ่งเป็นการแบ่งกลุ่มของอลูมิเนียมซึ่งสามารถแบ่งได้ 9 กลุ่มดังที่แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งกลุ่มของอลูมิเนียมตามมาตรฐาน (Aluminum association) [3]

หมายเลขอนุกรม	กลุ่มธาตุที่ผสม
1XXX	อลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.0%
2XXX	อลูมิเนียมผสมทองแดง
3XXX	อลูมิเนียมผสมแมงกานีส
4XXX	อลูมิเนียมผสมซิลิกอน
5XXX	อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม
6XXX	อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม+ซิลิกอน
7XXX	อลูมิเนียมผสมสังกะสี
8XXX	ผสมธาตุอื่นนอกเหนือจากที่กล่าว
9XXX	ยังไม่มีข้อกำหนดใช้

1) อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (อนุกรม 1XXX) ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมมีความบริสุทธิ์ของอลูมิเนียมที่ 99.0% ถึง 99.9% อลูมิเนียมในกลุ่มนี้ยังจะมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และยังสามารถสะท้อนแสงได้ดีจึงนิยมใช้ในการทำแผงสะท้อนแสงในไฟหน้ารถยนต์ นอกจากนั้นยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายทั้งการตัดเฉือนและขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการต่างๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่อลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีข้อเสียคือในด้านของความแข็งแรง และสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น แต่ก็สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมธาตุผสมอื่นเพื่อให้สมบัติเปลี่ยนแปลงไป หรือการขึ้นรูปเย็นคือการทำให้แข็งได้ด้วยความเค้น (Stress hardening)

2) อลูมิเนียมผสมทองแดง (อนุกรม 2XXX) เป็นอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูง สมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยสามารถทำการปรับปรุงสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ด้วยการวิธีทางความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (Solution treatment) และชุบ(Quenching) ต่อจากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) เรียกกระบวนการนี้ว่า การอบบ่ม(Ageing hardening) ซึ่งภายหลังจากการอบบ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจะลดลงและ ความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดนี้จะต่ำกว่าชนิดอื่นๆ คือจะเชื่อมได้ยากโดยจะเกิดการอ่อนตัวที่แนวเชื่อม ดังนั้นจึงมักทำการเชื่อมต่อด้วยวิธีทางกลคือการย้ำหมุด

3) อลูมิเนียมผสมแมงกานีส (อนุกรม 3XXX) เป็นอลูมิเนียมที่มีสมบัติเหมือนกับ อลูมิเนียมบริสุทธิ์แต่มีความแข็งแรงและสมบัติทางกลที่ดีกว่า จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุง สมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้

4) อลูมิเนียมผสมซิลิกอน (อนุกรม 4XXX) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถ ปรับปรุงสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่เมื่ออยู่ในสภาพของเหลวจะไหลตัวได้ดีและขณะ แข็งตัวจะไม่เกิดการแตกร้าวทั้งในสภาพร้อนและเย็น ดังนั้นอลูมิเนียมชนิดนี้จึงนิยมใช้เป็นลวดเติม สำหรับเชื่อมอลูมิเนียมผสมและอลูมิเนียมหล่อ

5) อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (อนุกรม 5XXX) บางครั้งจะมีการเติม แมงกานีสลงไป ด้วย อลูมิเนียมผสมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน จึง นิยมนำไปทำลวดเติมสำหรับเชื่อมเหมือนกับอนุกรม 4XXX นอกจากนี้ยังนำไปทำเป็นถังหรือขวด บรรจุก๊าซ (Storage vessels)

6) อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม - ซิลิกอน (อนุกรม 6XXX) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็น กลุ่มที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและสมบัติทางกลที่ ดีพอสมควร ความต้านทานการกัดกร่อน ความสามารถในการแปรรูปและความสามารถในการเชื่อม อยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้

7) อลูมิเนียมผสมสังกะสี - แมกนีเซียม (อนุกรม 7XXX) อลูมิเนียมชนิดนี้มีการผสมธาตุ สังกะสีเป็นธาตุหลักและแมงกานีสเป็นธาตุรองนอกจากนั้นยังมีทองแดงและโครเมียมอีกเล็กน้อย อลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและสมบัติทางกลที่ดีมาก มีน้ำหนักเบา ความต้านทานการกัด กร่อนดีส่วนความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำเพราะจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณแนว เชื่อม อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตและพัฒนาอลูมิเนียมชนิดนี้โดยการผสมแมกนีเซียมลงไปและกำจัดทองแดง ออกไปทำให้ความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดนี้สูงขึ้น โดยจะไม่เกิดการอ่อนตัวบริเวณ แนวเชื่อมเพราะบริเวณดังกล่าวได้เกิดการแข็งตัวจากการตกตะกอนตามธรรมชาติ

2.2.2 อลูมิเนียมที่สามารถใช้กับกรรมวิธีทางความร้อน และอลูมิเนียมที่ไม่สามารถใช้กับ กรรมวิธีทางความร้อน [4]

1) อลูมิเนียมที่สามารถใช้กับกรรมวิธีทางความร้อน จะเป็นอลูมิเนียมผสมชนิดที่ความ แข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยการอบชุบ (Quenching) และอบปรับสภาพ (Tempering) กลไกในการที่ อลูมิเนียมผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากกรรมวิธีทางความร้อนนั้นแตกต่างไปจากกรณีของ เหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของออสเทนไนต์เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ความแข็งแรง ของอลูมิเนียมผสมเพิ่มขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการแข็งตัวเนื่องจากการตกตะกอน (Precipitation hardening) กล่าวคือ สารละลายของแข็งที่อิ่มตัวเกิดเป็นตะกอนละเอียดกระจายอยู่

ภายในผลึกเกรน ลักษณะของการแข็งตัวเนื่องจากการตกตะกอนเปลี่ยนแปลงไปตามธาตุโลหะที่ผสมอยู่

อลูมิเนียมผสมพวกที่สามารถใช้กรรมวิธีทางความร้อน ได้แก่ อลูมิเนียมผสม-ทองแดง อลูมิเนียมผสม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน และอลูมิเนียมผสม-สังกะสี-แมกนีเซียม อลูมิเนียมผสมเหล่านี้ยังสามารถจัดกลุ่มเป็นพวกที่เกิดการแข็งตัวเนื่องจากการตกตะกอนตามธรรมชาติ (Natural age hardening) กับพวกที่เร่งให้เกิดการตกตะกอนเร็วขึ้น (Artificial age hardening) อลูมิเนียมผสมซึ่งเกิดการตกตะกอนตามธรรมชาตินั้น ภายหลังจากอบชุบแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิปกติเพื่อให้เกิดตะกอนต้องใช้เวลาถึง 2-3 วัน สำหรับพวกที่มีการเร่งให้เกิดการตกตะกอนกินเวลาเพียง 6-20 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิ 160 ถึง 185 °C เป็นตัวเร่งให้เกิดการตกตะกอนของสารละลายอิมัตว์

ตัวอย่างของอลูมิเนียมผสมชนิดนี้ก็คือ อลูมิเนียมผสม-ทองแดง-แมกนีเซียม อลูมิเนียมผสม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน และอลูมิเนียมผสม-สังกะสี-แมกนีเซียม

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์ที่กำหนดกรรมวิธีทางความร้อนของอลูมิเนียม [3]

สัญลักษณ์	ความหมาย
F	สภาพเดิมไม่มีการใช้กรรมวิธีทางความร้อน
O	สภาพผ่านการอบอ่อน
W	สภาพผ่านการขึ้นรูปเย็น
H	สภาพอบละลาย
T1	สภาพผ่านการรีดร้อนและอบบ่มธรรมชาติ
T2	สภาพผ่านการรีดร้อน รีดเย็น และอบบ่มธรรมชาติ
T3	สภาพอบละลาย รีดเย็น และอบบ่มธรรมชาติ
T4	สภาพอบละลาย และอบบ่มธรรมชาติ
T5	สภาพรีดเย็น และอบบ่มธรรมชาติ
T6	สภาพอบละลาย และอบบ่มเทียม
T8	สภาพอบละลาย รีดเย็น และอบบ่มเทียม
T9	สภาพอบละลาย อบบ่มเทียม และรีดเย็น

2) อลูมิเนียมผสมที่ไม่สามารถใช้กรรมวิธีทางความร้อน จะเป็นอลูมิเนียมผสมชนิดที่ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยการแปรรูปเย็น (Cold working) ได้แก่ อลูมิเนียมบริสุทธิ์ อลูมิเนียมผสม-แมกนีสิ อลูมิเนียมผสม-ซิลิกอน และอลูมิเนียมผสม-แมกนีเซียม เป็นพวกที่จัดเป็นอลูมิเนียมผสมแปรรูปซึ่งทำให้แข็งแรงขึ้นด้วยการเกิดความเค้น

### 2.2.3 การเพิ่มความแข็งแรงให้อลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีทางความร้อน [3]

กรรมวิธีทางความร้อนที่ใช้กับอลูมิเนียมผสมนี้ เป็นการกระทำเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้อลูมิเนียมผสม โดยที่มีวิธีการให้ความร้อนที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับให้นำไปใช้งานและได้กำหนดสัญลักษณ์ตัวอักษรตามหลัง เพื่อที่จะเป็นการระบุถึงกรรมวิธีทางความร้อนมากระทำต่ออลูมิเนียมผสมชนิดนั้นๆ ซึ่งความหมายของสัญลักษณ์และการใช้งานดูได้ดังตารางที่ 2.2

### 2.2.4 สมบัติของอลูมิเนียมผสม 6063

1) ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมผสม 6063 อ้างอิงตามเอกสาร ASM Metals Handbook Volume 2 ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมผสม 6063 [3]

ธาตุผสม	Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Ti	Zn	Cr
(wt เปอร์เซ็นต์)	0.4-0.9	≤0.10	≤0.35	0.2-0.6	≤0.10	≤0.10	≤0.10	≤0.10

2) สมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสม 6063 อ้างอิงตามเอกสาร ASM Metals Handbook Volume 2 ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกลของอลูมิเนียมผสม 6063 [3]

Temper	Tensile strength		Yield strength		Elongation (เปอร์เซ็นต์)	Hardness (HB)
	MPa	ksi	MPa	ksi		
O	90	13	48	7	...	25
T1	152	22	90	13	20	42
T4	172	25	90	13	22	...
T5	186	27	145	21	12	60
T6	241	35	214	31	12	73
T83	255	37	241	35	9	82
T831	207	30	186	27	10	70

### 2.2.5 ความสามารถในการเชื่อม (Weld ability) [4]

อลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม แบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ตามความสามารถในการเชื่อมดังนี้

1) อลูมิเนียมบริสุทธิ์สำหรับใช้ในอุตสาหกรรม และอลูมิเนียมผสม-แมงกานีส

- 2) อลูมิเนียมผสม-แมงกานีส
- 3) อลูมิเนียมผสม-สังกะสี-แมกนีเซียม
- 4) อลูมิเนียมผสม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน
- 5) อลูมิเนียมผสม-ทองแดง และอลูมิเนียมผสม-สังกะสี

อลูมิเนียมผสมในกลุ่มที่ 1 และ 2 มีความสามารถในการเชื่อมดีกว่าในกลุ่มอื่นๆ อลูมิเนียมผสมในกลุ่มที่ 5 โดยทั่วไปจัดว่าเป็นอลูมิเนียมผสมที่ไม่สามารถเชื่อมได้ ความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมผสมในกลุ่มที่ 3 และ 4 อยู่ในขั้นไม่ต่ำมากจนเกินไป อย่างไรก็ตามอลูมิเนียมผสมใน 2 กลุ่มนี้เป็นพวกที่ใช้กับกรรมวิธีทางความร้อนได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้กรรมวิธีทางความร้อนปรับปรุงสมบัติของแนวเชื่อมได้ ในบรรดาอลูมิเนียมผสมทั้ง 5 กลุ่ม กลุ่มที่ 3 มีข้อดีเหนือกลุ่มอื่นๆ ตรงที่สามารถเกิดการแข็งตัวเนื่องจากการตกตะกอนตามธรรมชาติ ดังนั้นความแข็งแรงของแนวเชื่อมที่สูญเสียไปในบริเวณอ่อนจึงสามารถกลับคืนมาได้

เนื่องจากว่าอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสมมีสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไปจากเหล็กกล้า ข้อแตกต่างนี้จะเห็นได้ชัดเจนในเรื่องความสามารถในการเชื่อม (Weld ability) จุดอ่อนเกี่ยวกับความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมผสมมีดังนี้

- 1) เนื่องจากอลูมิเนียมผสมมีความร้อนจำเพาะ และความสามารถในการนำความร้อนสูง ดังนั้นการให้ความร้อนเพื่อให้บางส่วนของชิ้นงานหลอมเหลวนั้นทำได้ยาก
- 2) วัสดุชนิดนี้เกิดออกไซด์ได้ง่าย และออกไซด์อลูมิเนียม ( $Al_2O_3$ ) ที่เกิดขึ้นก็มีจุดหลอมเหลวสูง ออกไซด์เหล่านี้จะป้องกันไม่ให้น้ำโลหะที่เติมลงไปหล่อลอมรวมเข้ากับโลหะชิ้นงาน (Lack of fusion)
- 3) เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูง ดังนั้นชิ้นงานจะบิดตัวได้ง่าย นอกจากนี้ยังเกิดการแตกร้อน (Hot crack) ได้ง่ายด้วย
- 4) ความสามารถในการรวมตัวของแก๊สไฮโดรเจนในอลูมิเนียมผสมในสภาพของเหลวแตกต่างไปจากในสภาพของแข็งมาก ในขณะที่แข็งตัวจะเกิดควันลอยออกมา ดังนั้นถ้าหากอัตราการแข็งตัวสูง ๆ เกิดขึ้น ควันที่ลอยออกมาก็จะอยู่ภายในเนื้อวัสดุทำให้เกิดเป็นรูอากาศ (Blowholes) ขึ้น
- 5) อลูมิเนียมหรืออลูมิเนียมผสมมีความถ่วงจำเพาะ ดังนั้นพวกวัสดุแปลกปลอม ซึ่งอยู่ในช่องบ่อหลอมจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำโลหะได้ยาก นั่นคือวัสดุแปลกปลอมเหล่านี้จะคงอยู่ในโลหะแนวเชื่อม
- 6) เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ และน้ำโลหะที่หลอมมีความหนืด (Viscosity) จึงทำให้บริเวณที่ได้รับความร้อนหลอมตัวและหยุดได้ง่าย

ปัญหาของการเชื่อมอลูมิเนียมหรืออลูมิเนียมผสมเหล่านี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้วิธีการเชื่อมแบบแก๊สเฉื่อย (Inert gas welding) นอกจากนั้นการใช้อุปกรณ์การเชื่อมแบบใหม่ ตลอดจนการใช้

เทคนิคของการเชื่อมที่เหมาะสมก็สามารถลดปัญหาดังกล่าวได้มากซึ่งจะเป็นผลให้ความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมดีขึ้น

## 2.3 การเชื่อมอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม (Welding of aluminum and aluminum alloys)

### 2.3.1 การเชื่อมโดยทั่วไป [4]

การเชื่อมอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสมทำได้หลายวิธี เช่น การเชื่อมแก๊ส การเชื่อมแบบอาร์คไฟฟ้า และการเชื่อมแบบอิเล็กตรอนบีม (Electron beam) เป็นต้น ในปัจจุบันนี้มีการเชื่อมแก๊สเฉื่อยกับโลหะผสมชนิดนี้มากที่สุด

ปัญหาอย่างหนึ่งในการเชื่อมอลูมิเนียมผสมก็คือ แผ่นออกไซด์ (Oxide film) ซึ่งปกคลุมผิวของชิ้นงานจะป้องกันน้ำโลหะเหลวจากลวดเชื่อมรวมตัวกับน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายของแนวเชื่อม ซึ่งปัญหาอันนี้จะหมดไปเมื่อใช้วิธีการเชื่อมแบบแก๊สเฉื่อย ทั้งนี้แก๊สเฉื่อยที่ปกคลุมการอาร์คจะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนจากบรรยากาศเข้าไปรวมตัวกับโลหะเหลว และการอาร์คจะทำให้แผ่นออกไซด์ที่ลอยอยู่บนผิวหน้าของน้ำโลหะเหลวแยกจากกัน ทำให้น้ำโลหะซึ่งหลอมจากลวดเชื่อมรวมตัวกับน้ำโลหะในบ่อหลอมละลายของรอยเชื่อมได้ รอยเชื่อมที่ได้จากวิธีการเชื่อมนี้จะสวยและมีสมบัติดี

เมื่อเชื่อมอลูมิเนียมผสมด้วยการเชื่อมแบบอาร์คไฟฟ้า การเชื่อมแก๊สหรือการประสาน (Brazing) สิ่งสำคัญก็คือ ฟลักซ์ (Flux) ที่ใช้จะต้องมีส่วนผสมของคลอไรด์หรือฟลูออไรด์ เพื่อไปกำจัดแผ่นออกไซด์ออกไปจากผิวหน้าของบ่อหลอมละลายของรอยเชื่อม ข้อเสียของการเชื่อมแบบนี้คือ ภายหลังจากทำการเชื่อมจะต้องทำความสะอาดชิ้นงาน อย่าให้ฟลักซ์ที่ใช้เหลือติดกับผิวงาน เพราะฟลักซ์เหล่านี้สามารถกัดกร่อนผิวงานได้ นอกจากนี้ถ้าหากฟลักซ์ไปรวมอยู่กับโลหะแนวเชื่อมด้วยแล้ว จะเกิดจุดเสียขึ้นภายในแนวเชื่อม

### 2.3.2 การเตรียมการสำหรับเชื่อม (Preparation of welding) [4]

#### 1) การเตรียมชิ้นงาน (Preparation treatment of base metal)

แผ่นออกไซด์และสิ่งสกปรกที่ติดบนผิวของชิ้นงานมีผลต่อการเชื่อมโลหะผสมชนิดนี้อย่างมาก เพราะมันจะเป็นสาเหตุให้เกิดจุดเสียต่างๆ ในรอยเชื่อม เช่น การหลอมละลายไม่สมบูรณ์หรือเกิดรูพรุน เป็นต้น ด้วยเหตุนี้เอง การทำความสะอาดผิวงาน และกำจัดแผ่นออกไซด์ออกไปจากผิวงานจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งก่อนที่จะทำการเชื่อม

ตามปกติชิ้นงานอลูมิเนียมผสม เมื่ออยู่ในบรรยากาศเป็นเวลานานๆ แผ่นออกไซด์ที่ผิวจะหนาขึ้นเรื่อยๆ และมันจะดูดความชื้นจากบรรยากาศไว้ แผ่นออกไซด์นี้นอกจากจะมีความหนาแล้วยังแข็งอีกด้วย จึงยากที่จะขจัดออกไปจากผิวบ่อหลอมละลายของรอยเชื่อมด้วยแรงของการอาร์ค ในตารางที่ 2.5 แสดงวิธีการทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนที่จะเชื่อม สำหรับวิธีการทำความสะอาด

สะอาดทางเคมีนั้น มีสิ่งที่พึงระมัดระวังก็คือ ภายหลังจากทำความสะอาดแล้วต้องมีการล้างสารเคมีออกไป และทำให้ชิ้นงานแห้ง มิฉะนั้นจะมีผลเสียต่อแนวเชื่อม

ตารางที่ 2.5 การเตรียมผิวรอยต่อก่อนเชื่อม [4]

วิธีทำความสะอาด	การปฏิบัติขั้นต้น
ขจัดไขมันหรือน้ำมันที่ผิวด้วยสารละลายอินทรีย์	เช็ดผิวรอยต่อด้วยผ้าชุบแอลกอฮอล์หรือซีโคอน อย่าใช้สารละลายคาร์บอน-คลอรีน
วิธีทางกล	ใช้แปรงเหล็กขัดผิวรอยต่อก่อนเชื่อม
วิธีทางเคมี	จุ่มชิ้นงานในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีความเข้มข้น 5 - 10 % (ที่อุณหภูมิ 70° C) ประมาณ 30 - 60 วินาที แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดจากนั้นจุ่มในสารละลายไนเตรด 15 % (ที่อุณหภูมิห้อง) ประมาณ 2 นาที แล้วจึงล้างด้วยน้ำเย็นและน้ำร้อน แล้วปล่อยให้แห้งสนิท

การทำความสะอาดชิ้นงานควรจะทำก่อนที่จะทำการเชื่อมเล็กน้อย แต่ถ้าหากต้องการเชื่อมอลูมิเนียมผสมเป็นเวลานานๆ สิ่งที่จะต้องระวังคือต้องให้ขอบรอยต่อสะอาดอยู่เสมอ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้แปรงลวดขัดขอบและผิวรอยต่อ อีกครั้งหนึ่งก่อนที่จะเชื่อม

### 2) สภาพของบริเวณที่ทำการเชื่อม (Condition of welding site)

จากเหตุผลเกี่ยวกับความสะอาดของแนวเชื่อมที่กล่าวมาแล้ว บริเวณที่ทำการเชื่อมอลูมิเนียมผสมต้องสะอาด เพื่อป้องกันสิ่งสกปรกไปติดที่ผิวรอยต่อ ในกรณีของการเชื่อมแบบแก๊สเฉื่อย บริเวณที่ใช้เชื่อมควรมีการป้องกันลมด้วย เพราะลมแรงจะทำให้แก๊สที่ปกคลุมรอยเชื่อมขาดตอน เป็นผลให้เกิดรูพรุนในรอยเชื่อมได้

ถ้าหากบริเวณที่ทำการเชื่อมอยู่ใกล้กับกระบวนการแปรรูปเหล็กกล้า (Steel work) อื่น ๆ ก็ควรจะแยกสัดส่วนของบริเวณเชื่อมออกมาโดยทำผนังกัน ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันฝุ่นผงของเหล็กจากกระบวนการแปรรูปเหล่านั้นมาติดที่บริเวณแนวเชื่อม ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดจุดเสียขึ้นภายในโลหะรอยเชื่อมหรือเกิดการกัดกร่อนของรอยเชื่อม

### 3) การเลือกลวดเชื่อม (Selection of filler metal)

ตามธรรมชาติลวดเชื่อมควรเป็นชนิดเดียวกับโลหะชิ้นงาน ในขณะที่ลวดหลอมละลาย ธาตุโลหะผสมบางอย่างภายในลวดเชื่อมจะสูญเสียไป เนื่องจากรวมตัวกับออกซิเจนและเกิดเป็นขี้ตะกรัน และบางส่วนของธาตุเหล่านี้จะกลายเป็นไอไป ดังนั้นในการเลือกใช้ลวดเชื่อม จึงต้องพิจารณาถึงความสูญเสียของธาตุโลหะผสมดังกล่าวด้วย ตารางที่ 2.6 แสดงชนิดของลวดเชื่อมที่เหมาะสมกับ

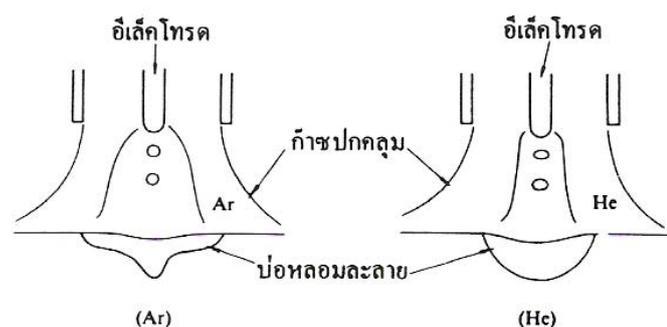
โลหะขึ้นงานแต่ละชนิด ลวดเชื่อมเหล่านี้บางชนิดสามารถปรับปรุงสมบัติของโลหะรอยเชื่อมให้ดีขึ้นด้วยการเพิ่มธาตุบางอย่างไปในโลหะรอยเชื่อม สิ่งที่สำคัญที่สุดในการเลือกใช้ลวดเชื่อมก็คือ เลือกลวดเชื่อมให้เกิดสมบัติของรอยเชื่อมตามที่ต้องการ และลวดเชื่อมนั้นต้องเหมาะกับวิธีการเชื่อมที่ใช้ ตลอดจนรอยต่อเชื่อมของขึ้นงาน

สำหรับในทางปฏิบัติงานเชื่อม การเลือกลวดเชื่อมไม่ควรที่จะคำนึงถึงส่วนผสมของลวดเชื่อมเพียงอย่างเดียว จะต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของรอยเชื่อม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเชื่อม และขนาดความเรียบของผิวรอยเชื่อม (Surface finish) ที่จะได้จากเครื่องเชื่อม (Welding machine) ที่ใช้

เพื่อป้องกันการเกิดแผ่นออกไซด์ที่ผิวลวดเชื่อม ตลอดจนการดูดความชื้นจากบรรยากาศของแผ่นออกไซด์ การเก็บลวดเชื่อมไม่ควรเก็บไว้นาน และในขณะที่เก็บควรจะมีการระมัดระวังรักษาอย่างดี

#### 4) การเลือกแก๊สสำหรับใช้ปกคลุมการอาร์ค (Selection of shielding gas)

แก๊สอาร์กอน (Argon) และแก๊สฮีเลียม (Helium) เป็นแก๊สที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมแก๊สเฉื่อย แก๊สอาร์กอนทำให้การหลอมละลายของรอยเชื่อมเป็นไปได้อลึก (Deep penetration) อีกทั้งความสามารถในการปกคลุมรอยเชื่อมของแก๊สอาร์กอนก็ดีกว่าแก๊สฮีเลียม ดังนั้นถ้าใช้แก๊สฮีเลียมอย่างเดียว อัตราการป้อนแก๊สฮีเลียมปกคลุมผิวรอยเชื่อมจะสูงกว่าแก๊สอาร์กอน และด้วยเหตุนี้เอง การใช้แก๊สฮีเลียมจึงมักผสมกับแก๊สอาร์กอน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการหลอมละลายของรอยเชื่อมเมื่อใช้ก๊าซปกคลุมต่างกัน [4]

แก๊สทั้ง 2 ชนิดนี้นำมาผสมกันจะต้องมีความบริสุทธิ์อย่างมาก เพราะว่าแก๊สทั้ง 2 ชนิดนี้จะต้องสัมผัสกับการอาร์ค และน้ำโลหะเหลวของรอยเชื่อม ท่อส่งแก๊สหรือสายยางจะต้องสะอาดมิฉะนั้นแล้วจะทำให้คุณภาพของแก๊สลดลง

### 2.3.3 การเชื่อมแบบแก๊สเฉื่อย [4]

การเชื่อมอาร์คด้วยทังสเตนปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อย (Tungsten Inert Gas : TIG) นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง สำหรับเชื่อมอลูมิเนียมแผ่นบาง ๆ นอกจากนั้นการเชื่อมแบบนี้ยังใช้สำหรับงานเชื่อมที่ต้องการให้เกิดความร้อนน้อย ๆ ตลอดงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง เช่น ต้องการให้เกิดรอยเชื่อมหลอมละลายลึกตลอดความหนาของชิ้นงาน เป็นต้น

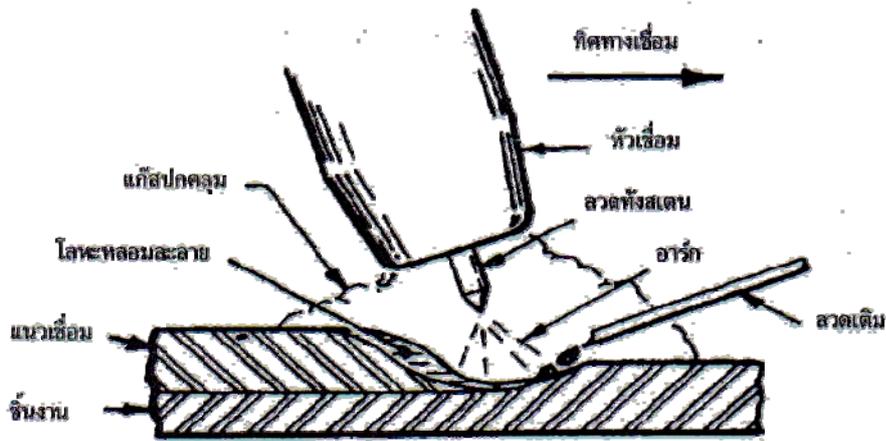
การเชื่อมอาร์คด้วยทังสเตนปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อย (TIG) นี้มีประสิทธิภาพดีต่อการเชื่อมแบบลวดเชื่อมหลอมละลาย (MIG) แต่การเชื่อมด้วยทังสเตนปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อยก็เหนือกว่าการเชื่อมแบบลวดเชื่อมหลอมละลายตรงที่การเชื่อมมีคุณภาพและความเที่ยงตรงสูงกว่า เมื่อใช้วิธีการเชื่อมอาร์คด้วยทังสเตนปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อยกับอลูมิเนียมหรืออลูมิเนียมผสม จะต้องพิจารณาถึงขนาดของชิ้นงานที่นำมาเชื่อมต่อกันด้วย ทั้งนี้เพราะว่าในการเชื่อมอาร์คด้วยทังสเตนปกคลุมด้วยแก๊สเฉื่อยใช้อิเล็กโทรดซึ่งไม่หลอมละลาย ความเข้มข้นของกระแสจะต่ำกว่าในการเชื่อมแบบลวดเชื่อมหลอมละลาย ผลก็คือรอยเชื่อมบนชิ้นงานหนาจะไม่เกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ตลอดความหนา ในกรณีเช่นนี้ชิ้นงานแผ่นหนากว่าควรจะได้รับความร้อน ก่อนที่จะเชื่อม หรือใช้แก๊สฮีเลียม (Helium) ผสมกับแก๊สปกคลุมเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการอาร์ค

## 2.4 การเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทังสเตน (TIG)

TIG ย่อมาจาก Tungsten Inert Gas สมาคมการเชื่อมของสหรัฐอเมริกา (American Welding Society หรือ AWS) เรียกกระบวนการนี้ว่า “Gas Tungsten-Arc Welding” โดยใช้คำย่อว่า GTAW ซึ่งก็คือวิธีการเชื่อมที่ใช้ลวดทังสเตนเป็นตัวอาร์ค และใช้แก๊สเฉื่อยปกคลุมบริเวณอาร์ค บางครั้งอาจเรียกกระบวนการเชื่อมนี้ว่า Heliweld ซึ่งเป็นชื่อดั้งเดิมของกระบวนการนี้โดยใช้แก๊สฮีเลียมปกคลุมแนวเชื่อม และกระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทังสเตนยังพัฒนาจนทำให้สามารถเชื่อมได้ทั้งชนิดที่ควบคุมการเชื่อมด้วยมือ ควบคุมด้วยระบบกึ่งอัตโนมัติและควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ

กระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทังสเตน (TIG) เป็นกระบวนการเชื่อมโลหะแบบหลอมละลาย ที่ได้รับความร้อนจากการอาร์คระหว่างลวดทังสเตน (Non-consumable electrode) กับชิ้นงานเชื่อม โดยที่แก๊สเฉื่อยหรือแก๊สผสมปกคลุมบริเวณเชื่อมและบ่อหลอมละลาย เพื่อป้องกันอากาศจากภายนอกทำปฏิกิริยากับบริเวณดังกล่าว การเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทังสเตนเป็นกระบวนการที่เชื่อมโลหะบาง ๆ ได้ดี คือมีความหนาตั้งแต่ 0.13-3.2 มิลลิเมตร โลหะและโลหะผสมที่นำมาใช้เชื่อม ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสม เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เชื่อมอลูมิเนียมผสม-แมกนีเซียมได้อีก สำหรับตะกั่วและสังกะสีไม่ควรเชื่อมด้วยกระบวนการนี้เนื่องจากวัสดุทั้งสอง มีจุดหลอมตัวต่ำซึ่งมีอุณหภูมิของจุดหลอมตัวที่แตกต่างกันกับอุณหภูมิของเปลวอาร์คมาก เมื่อหลอม

ละลายจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอ แต่ถ้าโลหะถูกเคลือบไว้ด้วยตะกั่ว สังกะสี หรือดีบุก อลูมิเนียม ผสมจะต้องใช้วิธีเชื่อมพิเศษ วิธีป้องกันควรกำจัดวัสดุเคลือบบนโลหะก่อนที่จะทำการเชื่อม



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบที่สำคัญในบริเวณอาร์คของการเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตน [1]

#### 2.4.1 ข้อดีของกระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตน [5]

1) ไม่ต้องใช้ฟลักซ์ (Flux) ดังนั้นแนวเชื่อมที่ได้จึงไม่ต้องเคาะสแลก (Slag) ออกและยังตัดปัญหาในเรื่องสแลกฝังในแนวเชื่อม เพราะสแลกที่ฝังอยู่ในแนวเชื่อมจะทำให้แนวเชื่อมที่ได้ไม่แข็งแรงและเกิดการกัดกร่อน ทั้งนี้โดยการใช้แก๊สเฉื่อยทำหน้าที่แทนฟลักซ์สำหรับปกคลุมแนวเชื่อมไม่ให้ออกซิเจนและไนโตรเจนจากบรรยากาศมาทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อมหรือโลหะงาน ขณะหลอมละลาย

2) ส่วนผสมเคมีของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นจะมีส่วนผสมเหมือนกับลวดเชื่อม จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เนื่องจากแก๊สเฉื่อยที่ปกคลุมแนวเชื่อมจะไม่รวมตัวหรือทำปฏิกิริยากับโลหะ ดังนั้นแนวเชื่อมที่ได้จากกระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตน จึงมีความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อนและเหนียวกว่าแนวเชื่อมที่ได้จากกระบวนการเชื่อมอื่น ๆ

3) สามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม

4) สามารถมองเห็นแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลายได้อย่างชัดเจน เนื่องจากอาร์คที่เกิดขึ้นสะอาด ไม่มีควันและสแลกปกคลุม

5) การเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตน ให้ความร้อนสูงและเป็นบริเวณแคบ จึงไม่ทำให้ความร้อนในงานเชื่อมแผ่กระจายกว้างเกินไป งานจึงมีโอกาสบิดตัวน้อย

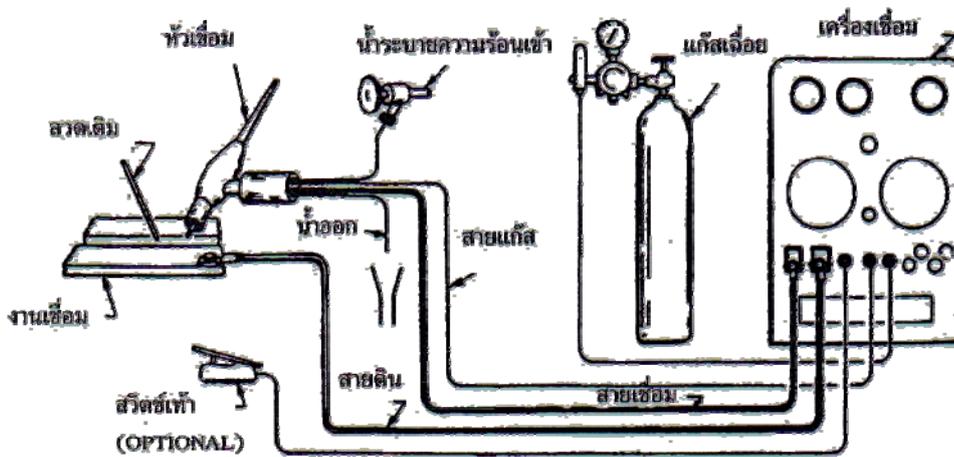
6) ไม่มีสะเก็ดเชื่อม (Spatter) เกิดขึ้นที่บริเวณแนวเชื่อม เนื่องจากการเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตนไม่มีการส่งผ่านน้ำโลหะลวดเชื่อมข้ามบริเวณอาร์คสู่บ่อหลอมละลาย

7) สามารถเชื่อมต่อโลหะที่มีความหนาแตกต่างกันได้

#### 2.4.2 ข้อเสียของกระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตน [5]

- 1) ความเร็วเชื่อมต่ำ
- 2) ลวดทั้งสแตนมีความสกปรกง่าย
- 3) ไม่เหมาะกับการเชื่อมโลหะหนามาก เนื่องจากอัตราการเติมลวดต่ำ
- 4) ต้องการที่กำบังในขณะที่เชื่อมเพราะลมจะพัดแก๊สคลุมหนีจากบริเวณอาร์ค

#### 2.4.3 อุปกรณ์การเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตนอิเล็กทรอนิกส์ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เครื่องเชื่อมและอุปกรณ์การเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตน [1]

#### 2.4.4 เครื่องเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตน [5]

การเชื่อมไฟฟ้าได้รับความร้อนที่เกิดจากการอาร์คระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงานสำหรับกระแสไฟฟ้า 220 โวลต์ ไม่สามารถนำมาใช้กับการเชื่อมได้ เนื่องจากขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงเกินไป อาจจะเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ ในการเชื่อมไม่ต้องการแรงดันไฟฟ้าสูงแต่ต้องการจำนวนกระแสสูง ดังนั้นเครื่องเชื่อมจะต้องมีลักษณะ ดังต่อไปนี้

1. ขนาดแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 50-80 โวลต์
2. กระแสเชื่อมสูง แต่แรงเคลื่อนต่ำ
3. สามารถควบคุมขนาดกระแสเชื่อมได้

ปัจจุบันเครื่องเชื่อมได้มีการพัฒนาไปอย่างมาก ทั้งแบบความสามารถในการทำงาน การประหยัดกระแสไฟและขนาด ซึ่งเครื่องแต่ละแบบนี้ราคาแตกต่างกันมาก ดังนั้นผู้ใช้จะต้องมีความรู้

ความเข้าใจทางเทคนิคของเครื่องเชื่อมแต่ละชนิดอย่างถ่องแท้ จึงจะสามารถเลือกเครื่องเชื่อมที่มีอยู่มากมายให้เหมาะสมกับงานที่จะเชื่อม

1) เครื่องเชื่อมแบบหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer welding machines)

เครื่องเชื่อมแบบหม้อแปลงเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป ราคาถูก น้ำหนักเบา และมีขนาดเล็กกว่าเครื่องเชื่อมแบบอื่นๆ ซึ่งเครื่องเชื่อมแบบนี้จะผลิตเฉพาะกระแสไฟสลับ เท่านั้น หลักการทำงานของเครื่องเชื่อมเหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการนำกระแสที่มีแรงดันสูงป้อนเข้าสู่ขดลวดปฐมภูมิ และจ่ายออกทางขดลวดทุติยภูมิ เป็นไฟแรงดันต่ำ กระแสสูง เพื่อให้เหมาะแก่การเชื่อมโลหะ ส่วนข้อดีของเครื่องเชื่อมแบบหม้อแปลงคือมีราคาถูก ต้องการเนื้อที่ติดตั้งน้อย เครื่องไม่มีเสียงดัง ในขณะที่เชื่อม และกระแสสลับไม่เกิดการหนีอาร์ค (Arc blow)

2) เครื่องเชื่อมแบบผสมหม้อแปลง-เครื่องเรียงกระแส (Transformer-rectifier welding machines)

เครื่องเชื่อมแบบหม้อแปลงจะผลิตเฉพาะกระแสสลับเท่านั้น ซึ่งให้ผลดีกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมบางชนิดเท่านั้น แต่ลวดเชื่อมอีกหลายชนิดจำเป็นต้องเชื่อมด้วยกระแสไฟตรงเท่านั้น เครื่องเชื่อมที่ผลิตกระแสไฟตรงนอกเหนือจากแบบเจเนอเรเตอร์แล้ว ยังมีหม้อแปลง-เครื่องเรียงกระแสอีกเมื่อต้องการใช้กระแสไฟตรงและกระแสสลับ ก็สามารถทำได้โดยมีสวิตช์เลือก และยังสามารถเปลี่ยนเป็นขั้วตรงหรือกลับขั้วก็ได้ เครื่องเชื่อมแบบนี้ยังต่อระบบความถี่สูงสามารถนำไปใช้กับการเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตนได้

3) เครื่องเชื่อมแบบอินเวอร์เตอร์ (Inverter power source)

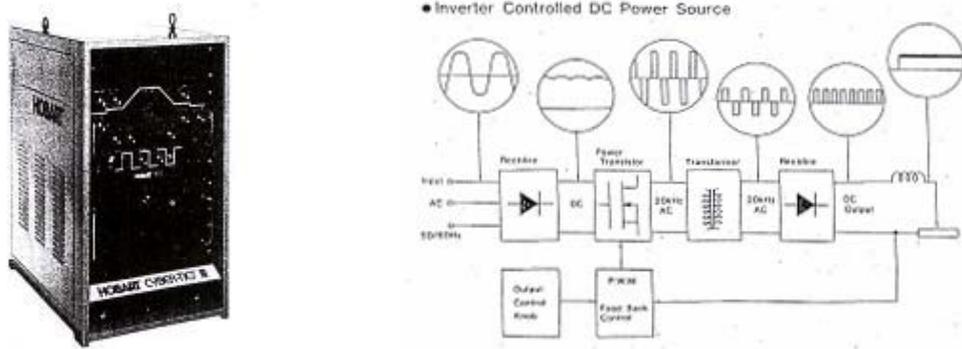
เครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์ มีน้ำหนักเบาเหมาะสำหรับการเคลื่อนย้ายบ่อยๆ ให้ประสิทธิภาพของพลังงานสูง เนื่องจากการสูญเสียพลังงานน้อยมาก และให้อาร์คสม่ำเสมอหลักการของเครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์ คือ แปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง แล้วเปลี่ยนความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ให้อยู่ระหว่าง 2-20 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นกระแสสลับ เมื่อกระแสสลับที่มีความถี่สูงผ่านหม้อแปลงแล้ว ต่อไปจึงเรียงกระแสให้เป็นกระแสตรง และทำให้เรียบด้วย เครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์มีทั้งชนิดไฟ DC และชนิดไฟ AC/DC

#### 2.4.5 หัวเชื่อม [1]

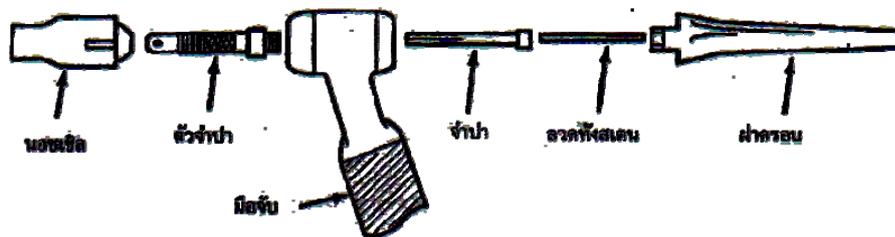
ในการเตรียมหัวเชื่อมประการแรกจะต้องเข้าใจหลักการทำงานและวิธีเลือกใช้ส่วนประกอบต่างๆ ของหัวเชื่อมได้ถูกต้อง ส่วนประกอบของหัวเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตน มีดังนี้

1) ตัวทอช (Torch body) เป็นส่วนลำตัวของหัวเชื่อม ภายในทำด้วยทองแดงผสม พร้อมทั้งเป็นทางเดินของแก๊สปกคลุม น้ำระบายความร้อนและกระแสเชื่อม ซึ่งหุ้มด้วยวัสดุฉนวนกันความร้อนและกระแสไฟที่ดี

2) ฝาครอบ (Cap) เป็นส่วนปลายสุดของหัวเชื่อม มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้แก๊สปกคลุมไหลออกและยังเป็นตัวป้องกันไม่ให้อากาศไหลเข้าไปปนกับแก๊สปกคลุมภายในหัวเชื่อม ขนาดของฝาครอบกำหนดตามความยาวของลวดทังสเตน เช่น ขนาด 2 นิ้ว 3 นิ้ว และ 7 นิ้ว เป็นต้น



รูปที่ 2.4 เครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์ [6]



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบภายในหัวเชื่อมทิก [1]

3) วงแหวนยาง (O-ring) เป็นวงแหวนยางกลมที่ประกอบอยู่ที่โคนเกลียวของฝาครอบ สำหรับป้องกันการรั่วของแก๊ส

4) จำปาจับลวดทังสเตน (Collet หรือ Electrode collet) เป็นตัวจับลวดเชื่อม ซึ่งกำหนดขนาดตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทังสเตน โดยทั่วไปทำด้วยทองแดงผสมที่เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี แต่ก็มีจำปาจับลวด (Collet) ที่ทำจากนิกเกิลโครเมียมผสม (80-20) ผิวภายในของจำปาจับลวดจะต้องเรียบสม่ำเสมอ ก่อนที่จะนำจำปาจับลวดไปใช้งานควรตรวจสอบครีบบurr ที่อาจเกิดขึ้นกับจำปาจับลวดเสียก่อน เนื่องจากจำปาจับลวดที่มีครีบบurr จะทำให้กระแสไฟเชื่อมไหลไม่สะดวก ซึ่งเกิดจากความต้านทานกระแสและเป็นเหตุให้เกิดความร้อนสูง

5) ตัวจับจำปา (Collet holder) ถูกยึดติดกับลำตัวหัวเชื่อมด้วยเกลียว (Collet holder) ทำด้วยทองแดงผสมทำหน้าที่ยึดจับตัวจำปาให้จับลวดทั้งสแตนด์ได้แน่น และยังมีรูเพื่อให้แก๊สปกคลุมไหลออกมาปกคลุมบ่อหลอมละลาย

6) นอชเซิลที่ใช้ในการเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตนด์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่หลายชนิด ได้แก่ ชนิดเซรามิก โลหะ แก้ว (Fused quartz) และชนิดมีทางออกแก๊สสองทาง (Dual-shield) นอชเซิลเซรามิก เป็นแบบที่นิยมใช้กันมากและราคาถูก สำหรับนอชเซิลโลหะชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ ใช้ได้กับกระแสสูงและมีอายุใช้งานยาวนานกว่านอชเซิลเซรามิก

นอชเซิลเซรามิก เมื่อใช้งานติดต่อกันเป็นเวลานานจะเปราะ ดังนั้นจะต้องเปลี่ยนนอชเซิลใหม่ เมื่อนอชเซิลที่ใช้มีขอบขรุขระและไม่เรียบ ซึ่งจะเป็นเหตุให้การไหลของแก๊สออกมาปกคลุมแนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอและสิ่งสกปรกภายในนอชเซิล อาจจะไปปนเข้าไปกับแนวเชื่อมได้อีกด้วย นอชเซิลชนิดนี้ใช้กับกระแสเชื่อมที่ต่ำกว่า 275 แอมแปร์

นอชเซิลโลหะชนิดที่เป็นปลอกสวม (Sleeve-type) ใช้ได้กับกระแสไฟเชื่อมขนาดต่ำกว่าชนิดเซรามิก การใช้นอชเซิลโลหะชนิดนี้จะต้องใช้ด้วยความระมัดระวังและถูกวิธี เพราะมีโอกาสสูญเสียได้มากกว่านอชเซิลโลหะชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ

นอชเซิลโลหะชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำใช้ได้กับกระแสเชื่อมสูงสุด 500 แอมแปร์ สำหรับการเชื่อมด้วยมือ (ระบบอัตโนมัติจะสามารถใช้ได้กับกระแสเชื่อมเกินกว่า 500 แอมแปร์)

นอชเซิลชนิดที่ทำด้วยแก้ว (Fused-quartz) สามารถมองเห็นบริเวณอาร์คได้อย่างชัดเจน เนื่องจากนอชเซิลใสและเกิดแสงสว่างขึ้นจากลวดเชื่อม แต่เมื่อใช้ไปนาน ๆ นอชเซิลจะขุ่นมัวเนื่องจากไอระเหยของโลหะเชื่อมเกาะติดนอชเซิล

ฝาครอบ 2 ทาง (Dual-shield) นอชเซิล มีทางแก๊สออก 2 ทาง คือ บริเวณกลางโดยรอบลวดเชื่อมจะถูกปกคลุมด้วยแก๊สอาร์กอนหรือฮีเลียมจำนวนเล็กน้อยและปกคลุมบ่อหลอมละลายโดยตรง สำหรับบริเวณวงแหวนรอบนอกภายในนอชเซิล จะปกคลุมด้วยแก๊สไนโตรเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นเกราะปกคลุมแก๊สเฉื่อยไว้ตรงกลาง

การเลือกขนาดของนอชเซิลมีหลักง่ายๆ คือ ให้เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในนอชเซิลเท่ากับ 4-6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อม ระวังอย่าใช้ขนาดนอชเซิลเล็กเกินไปเพราะจะทำให้นอชเซิลร้อนจัดและมีอายุการใช้งานสั้นลง ถ้าเลือกใช้นอชเซิลใหญ่เกินไปต้องใช้แก๊สปกคลุมมากขึ้น

ปลอกนำแก๊ส เป็นอุปกรณ์ที่ลดการเกิดแก๊สหมุนเวียนขึ้นที่ปลายนอชเซิล ทำให้แก๊สปุ่งเป็นลำยาวออกไปโดยสวมติดอยู่ภายในส่วนปลายนอชเซิล ซึ่งเป็นผลดีทำให้สามารถเชื่อมได้เมื่อนอชเซิลห่างจากชิ้นงานได้ถึง 1 นิ้ว จึงทำให้ช่างเชื่อมสามารถมองเห็นบ่อหลอมละลายได้อย่าง

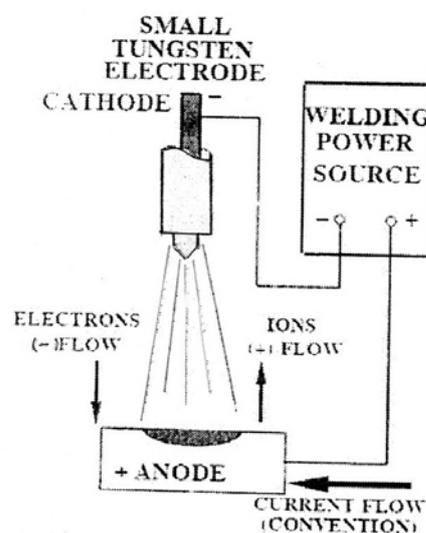
ชัดเจนในขณะที่เชื่อม และยังเหมาะกับการเชื่อมภายในซอกมุมได้ดีโดยไม่จำเป็นต้องใช้แรงดันแก๊สสูงขึ้นเพื่อให้เกิดฟุ้งได้ไกล

#### 2.4.6 ระบบกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม [5]

กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตนนั้นมี 3 ประเภทด้วยกัน คือ

##### 1) กระแสตรงขั้วตรง (DCEN)

กระแสตรงขั้ว หมายถึง หัวเชื่อมหรืออิเล็กโทรดเป็นกระแสเชื่อมขั้วลบ และกระแสไฟเชื่อมขั้วบวกเป็นตำแหน่งของชิ้นงาน



รูปที่ 2.6 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและวงจรการทำงานของ DCEN [5]

##### 2) กระแสตรงกลับขั้ว (DCEP)

กระแสตรงกลับขั้ว หมายถึง หัวเชื่อมหรืออิเล็กโทรดใช้กระแสไฟเชื่อมเป็นขั้วบวก และกระแสไฟเชื่อมลบเป็นตำแหน่งของชิ้นงาน ทั้งสแตนอิเล็กโทรดที่ใช้กับกระแสไฟเชื่อมแบบนี้ จะมีขนาดโตกว่าทั้งสแตนอิเล็กโทรดที่ใช้กับกระแสไฟเชื่อมแบบอื่นในปริมาณที่ใช้กระแสไฟเท่ากัน

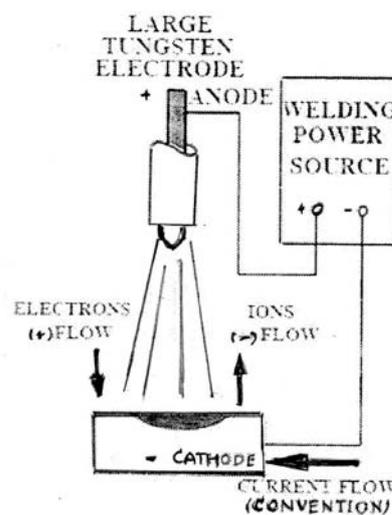
##### 3) กระแสไฟสลับและระบบความถี่สูง (AC)

กระแสไฟสลับเป็นสิ่งจำเป็นในการเชื่อมโลหะที่มีออกไซด์บริเวณผิวชิ้นงาน ถ้าพิจารณาวัฏจักรของกระแสไฟสลับ จะพบว่าในครึ่งหนึ่งของไซเคิลแรก ขณะที่ทั้งสแตนอิเล็กโทรดเป็นขั้วบวก ออกไซด์บริเวณผิวของชิ้นงานบริเวณอาร์คจะถูกขจัดออกไปจากบริเวณนั้น โดยประจุไฟฟ้าลบซึ่งวิ่งจากชิ้นงานไปสู่หัวเชื่อม ในครึ่งไซเคิลต่อมาทั้งสแตนอิเล็กโทรดเป็นขั้วลบ

#### 2.4.7 วัสดุที่ใช้ในการเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตน [5]

##### 1) แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม (Shielding gas)

การเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทังสเตนนั้น ไม่มีเปลวไฟและฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อมเกิดเป็น แก๊สปกคลุมบริเวณอาร์ค ดังนั้นจำเป็นต้องใช้แก๊สปกคลุมจากแหล่งภายนอก โดยทั่วไปแก๊สปกคลุมที่ใช้ในการเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทังสเตน ได้แก่ อาร์กอน ฮีเลียม ซึ่งแก๊สที่ใช้จะต้องมีความบริสุทธิ์ ประมาณ 99.99 % และไม่มี ความชื้นปนอยู่ บางครั้งอาจใช้แก๊สชนิดอื่นผสมกับแก๊สอาร์กอนเพื่อผลของการเชื่อม แต่จะต้องเป็นแก๊สเกรดเชื่อมเท่านั้น (Welding gas)



รูปที่ 2.7 ลักษณะของกระแสไฟฟ้าและวงจรการทำงานของ DCEP [5]

2) สมบัติของแก๊สปกคลุมอาร์กอน มีอยู่มากมาย ในการใช้แก๊สอาร์กอนเพื่อปกคลุมแนวเชื่อมจะทำให้การอาร์คสม่ำเสมอ (Stable) มากกว่าใช้แก๊สชนิดอื่น ด้วยสมบัติข้อนี้จึงทำให้มักใช้แก๊สอาร์กอนผสมกับแก๊สอื่น ๆ อาร์กอนจะทำให้การอาร์คไม่มีเสียงดัง

อาร์กอนมีค่านำความร้อนต่ำ (Thermal conductivity) ลำเปลวของไฟถูกจำกัดให้แคบ ดังนั้นจึงมีความหนาแน่นของเปลวไฟที่มีค่าสูง จากการที่ค่าความหนาแน่นของเปลวไฟมีค่าสูง ทำให้พลังงานจากเปลวไฟเชื่อมเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนถ่ายเทเข้าไปในชิ้นงานได้มาก แต่ในงานเชื่อมบางอย่าง อาร์กอนไม่ก่อให้เกิดการซึมลึกตามต้องการในการเชื่อมโลหะหนา

ข้อดีของการใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุม คือ การซึมลึกของรอยเชื่อมดี และมีเมตโลหะน้อย จึงทำให้การใช้แก๊สอาร์กอนเป็นสิ่งที่ต้องการใช้ในการเชื่อม ในการเชื่อมในท่าต่างๆ ที่ไม่ใช่ท่าแนวราบ (Flat position) การเชื่อมด้วยมือควรใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม

3) แก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับออกซิเจน การใช้แก๊สออกซิเจนในปริมาณที่น้อยๆ ผสมกับแก๊สอาร์กอน (ปกติเราจะใช้ปริมาณออกซิเจนประมาณ 1% ถึง 5% ของปริมาณแก๊สผสม) จะปรับปรุงคุณภาพแก๊สอาร์กอน และช่วยให้แก๊สอาร์กอนถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางขึ้น การเติม

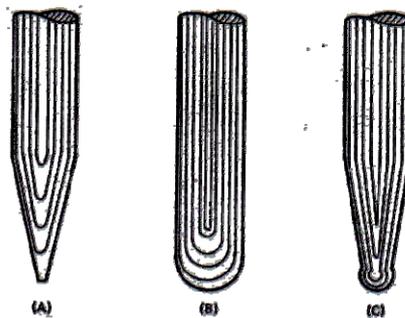
ออกซิเจนลงไปผสมกับอาร์กอน จะช่วยให้การเชื่อมของรอยเชื่อมที่ได้กินบริเวณผิวงานกว้างกว่าการใช้อาร์กอนอย่างเดียว จะช่วยให้แนวเชื่อมมีลักษณะดีขึ้น และช่วยให้ไม่เกิดการอันเดอร์คัท (Under cut) ที่ขอบของรอยเชื่อม

แก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับออกซิเจนนี้ ใช้กันมากสำหรับการเชื่อมโลหะผสมของอลูมิเนียม (Aluminum alloys) เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloys steel) เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) และเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

#### 2.4.8 ลวดเชื่อมทั้งสแตน [5]

ทั้งสแตนมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีและมีจุดหลอมตัวสูง จึงถูกใช้เป็นลวดเชื่อมแบบไม่หลอมละลาย (Non-consumable) อุณหภูมิอาร์คที่เกิดขึ้นประมาณ 10,600 องศาฟาเรนไฮต์ (5,871 องศาเซลเซียส) เนื่องจากบริเวณอาร์คมีอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิจุดเดือดของทั้งสแตนจึงทำลวดทั้งสแตนเกิดการเซาะร่อง ทำให้เกิดการถ่ายเทโลหะบางตัวจากทั้งสแตนผ่านอาร์คลงไปบนแนวเชื่อม จากที่กล่าวมาแล้ว ทั้งสแตนเป็นตัวนำความร้อนที่ดี จึงทำให้อุณหภูมิที่ผิวทั้งสแตนไม่สูงมากนัก เนื่องจากความร้อนได้ถูกถ่ายเทไปสู่ที่อื่นได้เร็ว

ปลายลวดทั้งสแตนมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนจากปลายลวดสู่ชิ้นงาน จะเห็นว่าจากลักษณะปลายลวดแบบปลายมีจุดแหลม ปลายแหลมจะมีพื้นที่ตั้งจุดความร้อนที่ปลายลวดน้อย จึงทำให้ปลายลวดเชื่อมมีอุณหภูมิสูง ปลายลวดที่มีลักษณะปลายแบบกลม ปลายลวดกลมมนจะมีพื้นที่ตั้งจุดความร้อนมาก ปลายลวดเชื่อมจึงมีอุณหภูมิที่ต่ำ ส่วนลักษณะปลายลวดที่เป็นแบบปลายเรียวและกลมเล็ก ปลายลวดลักษณะแบบนี้จะมีพื้นที่ตั้งจุดความร้อนมากกว่าชนิดปลายจุดแหลม จึงมีอุณหภูมิที่ปลายลวดทั้งสแตนน้อยกว่า



รูปที่ 2.8 ลักษณะปลายลวดทั้งสแตน : (A) ปลายจุดแหลม (B) ปลายกลม (C) ปลายลวดเรียวและกลมเล็ก [1]

1) ชนิดของลวดทังสเทน [5]

การแบ่งลวดทังสเทนตาม AWS ประกอบด้วยรหัสอักษรและเลขดังนี้

E หมายถึง Electrode หรือลวดเชื่อมไฟฟ้า

W หมายถึง ทังสเทน

P หมายถึง ลวดทังสเทนบริสุทธิ์

Ce La Th และ Zr หมายถึง ธาตุผสมที่เป็นออกไซด์ของ Cerium Lanthanum Thorium และ Zirconium

G หมายถึง ลวดทังสเทนกลุ่มทั่วไป

EWP เป็นลวดทังสเทนบริสุทธิ์ มีราคาถูก ใช้สำหรับงานโลหะทั่วไป

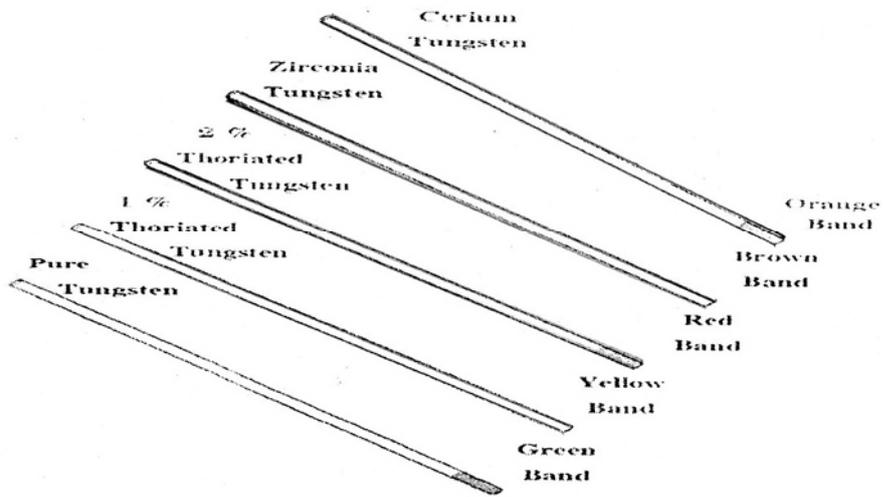
EWCe-2 เป็นลวดเชื่อมกลุ่มใหม่ มีส่วนผสมของ Cerium oxide ที่ช่วยให้การเริ่มต้นอาร์คดี การอาร์คสม่ำเสมอและลดอัตราการสึกกร่อน

EWLa-1 เป็นลวดเชื่อมที่มีส่วนผสม Lanthanum oxide ประมาณ 1% ให้ผลในการเชื่อมคล้ายกับลวดเชื่อม EWCe-2

EWTh-1 และ EWTh-2 มีส่วนผสมของ Thorium oxide ประมาณ 1 % และ 2 % ใช้กับกระแสดตรง ให้การเริ่มต้นอาร์คที่ดี อาร์คสม่ำเสมอและสามารถใช้เชื่อมที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง ตามมาตรฐานการเชื่อมของสหรัฐอเมริกา AWS A5.12 ได้แบ่งลวดทังสเทนดังนี้

ตารางที่ 2.6 การแบ่งลวดทังสเทนและส่วนผสมทางเคมีของลวดทังสเทน [5]

AWS. Classification	ธาตุผสมทางเคมี	รหัสสี
		(Color Code)
EWP	Pure Tungsten	เขียว
EWCe-2	97.3 % Tungsten, 2 % Cerium Oxide	ส้ม
EWLa-1	98.3 % Tungsten, 1 % Lanthanum Oxide	ดำ
EWTh-1	98.3 % Tungsten, 1 % Thorium Oxide	เหลือง
EWTh-2	97.3 % Tungsten, 2 % Thorium Oxide	แดง
EWZr-1	99.1 % Tungsten, 0.25 % Zirconium Oxide	น้ำตาล
EWG	94.5 % Tungsten, Remainder not Specified	เทา



รูปที่ 2.9 ลวดเชื่อมทังสเตนที่ใช้สีเป็นบาร์โค้ด [5]

ตารางที่ 2.7 ขนาดกระแสเชื่อมและลวดเชื่อมที่สัมพันธ์กัน [5]

Tungsten electrode diameter		DCEN	DCEP	AC		AC	
				Unbalanced wave		Balanced wave	
In.	m m.	EWX-X	EWX-X	EWP	EWX-X	EWP	EWX-X
0.01	0.3	Up to 15	NA	Up to 15	Up to 15	Up to 15	Up to 15
0.02	0.5	5-12	NA	5-15	5-20	10-20	5-20
0.04	1	15-18	NA	10-60	15-18	20-30	20-60
0.06	1.6	70-150	10-20	50-100	70-150	30-80	60-120
0.093	2.4	150-250	15-30	100-160	140-235	60-130	100-180
0.125	3.2	250-400	25-40	150-200	225-325	100-180	160-250
0.156	4	400-500	40-55	200-275	300-400	160-240	200-320
0.187	5	500-750	55-80	250-350	400-500	190-300	290-390
0.25	6.4	750-1000	80-125	325-450	500-630	250-400	340-525

#### 2.4.9 ตัวแปรสำคัญในการเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตน [5]

ตัวแปรการเชื่อมจะเกี่ยวข้องการควบคุมกระบวนการเชื่อมและคุณภาพของงานเชื่อม การเลือกตัวแปรการเชื่อม (Parables) ที่เหมาะสมจะช่วยให้การปฏิบัติงานเชื่อมได้ดีและมีผลโดยตรงต่อสมบัติ และรูปร่างของรอยเชื่อม ขณะที่ดำเนินการเชื่อมอยู่ผู้ปฏิบัติงานงานเชื่อมยังสามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรในการเชื่อมต่าง ๆ ได้อีกเช่น ความสูงต่ำของระยะเชื่อมหรือมุมลวดเชื่อม ถ้าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมทั้งหมดสมดุลกัน จะทำให้การเชื่อมการอาร์คจะเรียบสม่ำเสมอ และเนื้อโลหะเชื่อมที่เติมลงสู่รอยเชื่อมก็จะมีคุณภาพสูง

1) กระแสเชื่อม (Welding current) มีผลอย่างมากต่อแนวเชื่อม เพราะกระแสเชื่อมจะควบคุมการซึมลึกและปริมาณของเนื้อเชื่อมที่เติม เมื่อองค์ประกอบอื่นๆ คงที่ ถ้าเพิ่มกระแสเชื่อมให้สูงขึ้น จะเกิดการซึมลึกที่มากเกินไป เกิดการกัดขอบแนวเชื่อม (Undercut) และเกล็ดแนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ ในทางกลับกันถ้ากระแสต่ำไป การซึมลึกและขนาดของแนวเชื่อมจะลดลง

2) ระยะห่างในการเชื่อมหรือระยะอาร์ค (Arc gap) มีผลโดยตรงต่อแรงดันอาร์ค เมื่อเพิ่มระยะอาร์คแรงดันอาร์คก็จะเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าลดระยะอาร์คแรงดันอาร์คก็จะลดลง ระยะอาร์คสูงเกินไปแนวเชื่อมที่ได้เกล็ดไม่สม่ำเสมอ การซึมลึกน้อย แก๊สปกคลุมไม่เพียงพอและแนวเชื่อมเปลี่ยนสี ถ้าระยะอาร์คสั้นเกินไปจะทำให้ลวดทั้งสแตนจุ่มในบ่อหลอมละลาย และเกิดความสกปรก ทำให้อายุการใช้งานน้อยลง

3) เวลาในการเชื่อม มีผลต่อความร้อนที่ให้กับงานเชื่อม ถ้าใช้เวลาในการเชื่อมมากเกินไปการซึมลึกก็จะมากเกินไปจนทำให้ทะลุขึ้นงานได้ แต่ถ้าใช้เวลาในการเชื่อมช้าเกินไปการซึมลึกก็จะไม่ดี

4) ชนิดของแก๊สคลุม แก๊สปกคลุมจะถูกปล่อยออกมาจากหัวเชื่อม เพื่อป้องกันบรรยากาศทำปฏิกิริยากับลวดทั้งสแตนและบ่อหลอมละลาย แก๊สปกคลุมมีผลต่อการซึมลึก ความร้อน (Heat Input) และราคางานเชื่อม แก๊สอาร์กอนนิยมใช้สำหรับการเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทั้งสแตน แก๊สอาร์กอนให้การซึมลึกและความร้อน (Heat Input) ต่ำกว่าแก๊สฮีเลียม ส่วนราคาแก๊สถูกกว่า การใช้งานสั้นเปลืองน้อยเนื่องจากอัตราการไหลที่ต่ำกว่า ส่วนแก๊สฮีเลียมให้ค่าที่สูงทั้ง ความร้อน การซึมลึกและความเร็วเชื่อม โดยปกติใช้สำหรับการเชื่อมโลหะหนา

#### 2.5 การตัด (Cutting) [7]

การตัด สื่อความได้ถึงการทำให้งานขาดออกจากกันโดยอาศัยกลไกการตัดเนื้อวัสดุด้วยอนุภาคเม็ดขนาดเล็กที่หมุนด้วยความเร็วสูง ลักษณะผิวของวัสดุภายหลังการตัดจะขึ้นอยู่กับชนิดของใบตัดและเครื่องมือ ความเร็วในการตัด อัตราการป้อนใบตัด ตลอดจนปริมาณและชนิดของสารหล่อเย็น (Coolant)

การตัดด้วยใบตัดอะบราซีฟ (Abrasive cutoff wheel) สาเหตุที่เรียกว่า อะบราซีฟ เนื่องจากใบตัดดังกล่าวทำขึ้นจากการอัดของผสมระหว่างสายยึด (Binder) สายเติม (Filler) และอนุภาคเม็ดขัด (Abrasive particles) โดยทั่วไป คือ อลูมินาหรือซิลิคอนคาร์ไบด์ ในลักษณะรูปวงล้อ (Cutoff wheel) ตัวอย่างใบตัดอะบราซีฟรูปวงล้อแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างใบตัดอะบราซีฟ (Abrasive cutoff wheel) [7]

อนุภาคเม็ดขัดทำหน้าที่ขัดถูหรือตัดเนื้อวัสดุ สารยึดและสารเติมทำหน้าที่ยึดเม็ดขัดให้อยู่ติดกัน โดยตัวแปรที่ส่งผลต่ออายุการใช้งาน (อัตราการสึกของใบตัดหรือการหลุดของเม็ดขัด) ของใบตัดประเภทนี้ ได้แก่ ชนิดของสารยึดและปริมาณของสารเติม ใบตัดอะบราซีฟได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากการใช้งานสะดวก รวดเร็ว มีความแม่นยำพอสมควร มีราคาไม่สูงมากนักและคุณภาพของผิวตัดค่อนข้างดี โดยทั่วไปใบตัดอะบราซีฟจะมีอายุการใช้งานไม่ยาวนานนักเนื่องจากในขณะใช้งาน เม็ดขัดจะหลุดออกตลอดเวลา ใบตัดประเภทนี้จึงมีอีกชื่อว่า ใบตัดแบบสิ้นเปลือง (Consumable wheel)

ใบตัดที่มีอนุภาคเม็ดขัดชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์ เหมาะสำหรับตัดโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ส่วนใบตัดที่มีอนุภาคเม็ดขัดเป็นอลูมินา ( $Al_2O_3$ ) เหมาะสำหรับตัดโลหะในกลุ่มเหล็กที่มีความแข็งไม่สูงนัก ใบตัดที่มีอนุภาคใหญ่จะตัดได้อย่างรวดเร็วและเกิดความร้อนเพียงเล็กน้อย ส่วนอนุภาคเม็ดขัดที่มีขนาดเล็กสามารถตัดผิวได้เรียบกว่า จึงเหมาะสำหรับตัดชิ้นงานที่ต้องการความประณีตสูง

## 2.6 การขึ้นเรือน (Mounting) [7]

การขึ้นเรือนคือ การฝังชิ้นงานลงในเรซินหรืออื่นๆ โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ชิ้นงานมีผิวที่เป็นระนาบและมีขนาดพอเหมาะกับการจับยึดได้สะดวก ทั้งยังช่วยรักษาขอบของชิ้นงานไม่ให้เกิดลักษณะโค้งมน ก่อนการขึ้นเรือนควรลบเหลี่ยม คม และมุมแหลมของชิ้นงานก่อนเสมอ เพื่อป้องกันการฉีกขาดเสียหายของวัสดุที่ใช้สำหรับขัดผิว

### 2.6.1 วัสดุสำหรับขึ้นเรือน (Mounting materials)

การเลือกใช้วัสดุสำหรับขึ้นเรือน (กรณีของเรซิน) ต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของชิ้นงาน การเปลี่ยนโครงสร้างของชิ้นงานขณะที่ได้รับความร้อนและความดัน รวมทั้งการหดตัวของเรซินซึ่งจะมีผลต่อการคงรูปของ (Edge retention) ของชิ้นงานด้วย นอกจากนี้เรซินที่ดีควรมีความแข็งแรงมากพอที่จะไม่เกิดการเปื่อยเนืองมาจากความร้อนในขณะที่ทำการขัดผิวชิ้นงาน มีความทนทานต่อตัวทำละลาย และสารกัดกร่อน และไม่ควรถูกกัดกร่อนแตกหรือเป็นรูอากาศได้ง่าย รวมทั้งไม่ทำอันตรายต่อผู้ใช้งาน

เรซินที่ใช้ทั่วไปมี 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ต้องใช้งานภายใต้สภาวะที่มีการให้ความร้อนและความดัน ซึ่งมักอยู่ในรูปผงวัสดุ และกลุ่มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีเทหล่อซึ่งมักอยู่ในรูปส่วนผสมระหว่างของเหลวกับของเหลว หรือของเหลวกับของแข็ง

เรซินชนิดเทหล่อ เป็นการขึ้นเรือนที่ไม่ต้องใช้ความร้อนและความดันเรซินสามารถคงรูปได้ที่อุณหภูมิห้อง การใช้งานต้องผสมเรซินกับตัวทำแข็ง (Hardening) ในอัตราที่เหมาะสมก่อนแล้วจึงเทในแม่พิมพ์ เช่น แก้ว แหวนอลูมิเนียม (Aluminum ring) อลูมิเนียมแผ่นบาง (Aluminum foil) ถ้วยยางซิลิโคน (Silicone rubber cup) เป็นต้น อาจต้องใช้สารหล่อลื่นจำพวกน้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) หรือขี้ผึ้ง (Vacuum grease) ทาที่ผิวแม่พิมพ์ด้านในเพื่อป้องกันการเกาะติดของเรซินกับแม่พิมพ์ และช่วยให้ถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าเลือกแม่พิมพ์ที่มีความยืดหยุ่นดีก็ไม่จำเป็นต้องใช้สารหล่อลื่นช่วยแต่อย่างใด เรซินชนิดเทหล่อมักมีไอระเหยเกิดขึ้นขณะทำการหล่อจึงควรทำในตู้ดูดควัน การสัมผัสกับเรซินบางประเภทโดยตรงควรทำด้วยความระมัดระวังเพราะอาจเกิดความเป็นพิษกับผิวหนังได้ง่าย

## 2.7 การขัดผิว (Grinding) [7]

การขัดผิวเป็นการกำจัดรอยขีดข่วนหรือร่องรอยที่เกิดจากการตัด จำนวนขั้นตอนของการขัดผิวจะขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดกริตเพื่อกำจัดเนื้อวัสดุที่ไม่ต้องการ มีทั้งการขัดผิวแบบหยาบ การขัดผิวแบบละเอียด และการขัดผิวแบบละเอียดด้วยสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolytic polishing) ในแต่ละขั้นตอนการขัดผิวควรล้างชิ้นงานก่อนเข้าสู่ขั้นตอนถัดไปเสมอเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของเศษวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งควรล้างโดยใช้เครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิค (Ultrasonic) ซึ่งจะช่วยให้

เศษผง การทำความสะอาดเพื่อกำจัดเศษปนเปื้อนใดๆ เพื่อป้องกันการเกิดรอยขีดขื่นอีก หรือมีสิ่งสกปรกติดค้างบนผิวชิ้นงานการขัดผิวแต่ละแบบแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.7.1 การขัดผิวแบบหยาบ (Grinding)

การขัดผิวแบบหยาบนิยมใช้กระดาษทรายที่มีเม็ดขัดขนาดใหญ่แล้วตามด้วยเม็ดขนาดเล็กลงตามลำดับ สาเหตุที่เรียกว่ากระดาษทรายเนื่องจากผิวของกระดาษมีลักษณะคล้ายเม็ดทราย การเลือกใช้เบอร์กระดาษทรายเริ่มต้นหรือขนาดเม็ดกริต จะขึ้นอยู่กับความหยาบของผิวชิ้นงานหลังการตัด ถ้าตัดชิ้นงานด้วยเลื่อยวงเดือน (Band saw) ควรเริ่มขัดที่ขนาดเม็ดกริต 60 ถึง 120 ถ้าตัดด้วยใบตัดอะแบรซีฟอาจเริ่มขัดด้วยกระดาษที่มีขนาดเม็ดกริต 240 เป็นต้น การขัดผิวแบบเปียก (Wet grinding) จะใช้น้ำเป็นทั้งสารหล่อเย็นและสารหล่อลื่น น้ำจะช่วยลดความร้อนที่อาจเกิดขึ้นในขณะที่ขัด ช่วยรักษาอายุการใช้งานของกระดาษทราย และช่วยลดเศษวัสดุไม่ให้ฝังตัวหรือขูดผิวหน้าชิ้นงาน ยกเว้นในวัสดุบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับน้ำก็ควรเลือกใช้น้ำมันก๊าดหรือของเหลวอื่นๆ ทดแทน

ทิศทางการขัดควรให้รอยขัดใหม่ทำมุม 45 ถึง 90 องศา ของรอยขัดเดิม ซึ่งเวลาในการขัดของแต่ละชั้นตอนควรประมาณ 1 ถึง 2 นาที เพื่อป้องกันการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างที่ผิว แรงที่ใช้ในการกดชิ้นงานก็ควรควบคุมให้สม่ำเสมอ เพราะหากใช้แรงกดน้อยเกินไป ผิวชิ้นงานจะไม่ได้รับการขัดถูแต่จะเกิดความร้อนจากการเสียดสีขึ้นมาแทน แต่หากใช้แรงกดมากเกินไปก็อาจทำให้เศษวัสดุฝังตัวหรือขูดขีดผิวชิ้นงานได้ การใช้มือจับชิ้นงานขณะขัดผิวอาจไม่สามารถควบคุมแรงกดได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ผิวชิ้นงานไม่ได้ระนาบโดยเฉพาะในชิ้นงานที่ขึ้นเรือนมาหนามาก องค์ประกอบสำคัญของการขัดผิวหยาบได้แก่ เม็ดขัด (Grinding media) ซึ่งมีให้เลือกหลายชนิด เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ เอมเมอรี (Emery) อลูมินา เพชร โบรอนคาร์ไบด์ เป็นต้น เม็ดขัดเหล่านี้ถูกยึดติดอยู่บนกระดาษหรือผ้าขัดซึ่งอยู่ในรูปของแผ่น สายพาน หรือจานขัด ขนาดและชนิดของเม็ดขัดจะบ่งบอกถึงลักษณะและร่องลึกที่ผิวของรอยขัด

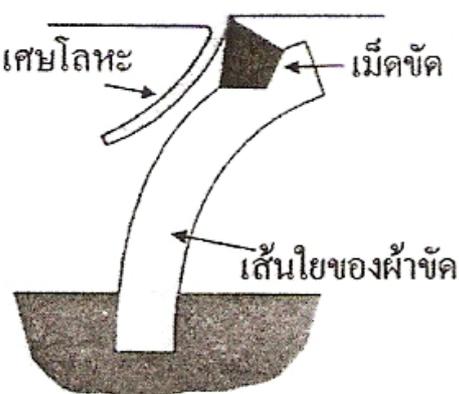
### 2.7.2 การขัดผิวแบบละเอียด (Polishing)

จุดมุ่งหมายของการขัดแบบละเอียด เพื่อให้การกำจัดร่องรอยการการขัดแบบหยาบขั้นสุดท้ายให้หมดไปหรือเหลือน้อยที่สุด ทำให้ผิวหน้าชิ้นงานมีลักษณะเรียบเป็นมันวาว ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิวที่ผ่านการขัดผิวแบบละเอียดได้แก่

- 1) ผ้าขัด (Polishing cloths) ผ้าขัดมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับความยาวและความยืดหยุ่นของเส้นใย (Fiber) ผ้าขัดที่มีเส้นใยสั้น มีขนน้อยหรือไม่มีขน และมีความหยุ่น เช่น ผ้าเตนท์ ไนลอน ไทเท็กซ์เมท เท็กซ์เมทมีเนื้อผสมระหว่างผ้าสังเคราะห์ (Chemo textile synthetic) กับผ้าแพรเทียม(Rayon) เป็นต้น ผ้าขัดชนิดนี้สามารถจับเม็ดขัดได้ดีทำให้เม็ดขัดมีโอกาสสัมผัสผิวหน้าของชิ้นงานมากจึงมีอัตราการขัดสูงและลดโอกาสเกิดจุดบกพร่องประเภทผิวบุ๋ม (Relief) จึงเหมาะกับการ

ขัดผิวแบบละเอียดเริ่มแรก เพราะเป็นวิธีการกำจัดร่องรอยจากการขัดหยาบลำดับสุดท้าย ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนผ้าขัดที่มีใยยาวและอ่อนนุ่มจะช่วยเพิ่มความนุ่มนวลของการขัดผิว ส่วนผ้าขนยาวปานกลางจะช่วยป้องกันการเกิดรอยขีดข่วนและไม่ทำให้เกิดผิวนูนมากเกินไป ดังนั้น ผ้าขัดที่ดีต้องมีความสามารถในการจับเม็ดขัดได้ดีและไม่ควรมีอนุภาคอื่นปะปนอยู่

2) เม็ดขัด (Polishing abrasives) การขัดผิวแบบละเอียดในช่วงเริ่มแรกมักจะใช้ขนาดเม็ดขัดในช่วง 30 ถึง 3 ไมครอน (โดยทั่วไปใช้เม็ดขัด 6 ไมครอนที่ความเร็วรอบ 150 ถึง 600 รอบต่อนาที) โดยใช้กับกระดาษทรายหรือผ้าขัดชนิดไม่มีขน ในขณะที่การขัดผิวที่มีความละเอียดยิ่งขึ้นจะใช้เม็ดขัด 1 ถึง 0.05 ไมครอน และใช้กับผ้าขัดชนิดที่มีขนยาวหรือขนสั้นถึงปานกลาง เม็ดขัดที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นอนุภาคเพชร (Diamond particles) ที่อยู่ในรูปของแป้งเปียก (Paste) โดยอาจใส่ลงโดยใช้หลอดฉีดยา และป้ายลงบนผ้าขัด หรืออยู่ในรูปของของเหลวผสม (Liquid extender) แบบละลายในน้ำหรือแบบละลายในน้ำมัน ซึ่งใช้หยดหรือพ่นลงบนผ้าขัด จึงทำให้ผ้าขัดเปียกขึ้นไปด้วยของเหลวผสมเม็ดขัด ปริมาณของเหลวผสมควรปรับให้เหมาะสมเพราะผ้าแห้งเกินไปอัตราการขัดผิวจะลดลงและทำให้เกิดลักษณะผิวฉีกขาด (Surface tearing) และเกิดจุดบกพร่องประเภทผิวหลุด (Pull out) แต่ถ้าใช้ของเหลวในปริมาณมากเกินไปจนกระทั่งผ้าเปียกชุ่มและอมน้ำจนทำให้เม็ดขัดแทบไม่มีโอกาสสัมผัสผิวชิ้นงานเลย ในบางครั้งอาจใช้เทคนิคการขัดผิวแบบละเอียดสลับกับการกัดชิ้นรอยกลับไปมาหลายครั้ง เพื่อลดตำหนิที่ผิวจากการขึ้นรูปเย็น (Cold working) และผิวนูน ถ้าชิ้นตัวอย่างมีโครงสร้างแบบสองเฟสที่มีความแข็งของแต่ละเฟสแตกต่างกัน การขัดผิวแบบละเอียดจะช่วยเพิ่มความสามารถในการมองเห็นเฟสที่มีความแข็งมากกว่าได้ เพราะบริเวณระหว่างเฟสแข็งกับเฟสอ่อนมีความนูนแตกต่างกันอย่างชัดเจน ในรูปที่ 2.11 เป็นการจำลองการยึดเกาะของเม็ดขัดบนเส้นใยผ้าขัด



รูปที่ 2.11 ลักษณะการยึดเกาะของเม็ดขัดบนเส้นใยผ้า [7]

เม็ดขัดผงเพชร (Polycrystalline diamond) จะให้ประสิทธิภาพการขัดที่ดีกว่า เพชรสังเคราะห์และเพชรผลึกเดี่ยว (Synthetic and monocrystalline diamond) เนื่องจาก

- มีอัตราการขัดสูงกว่า (Higher cutting rates)
- ให้คุณภาพผิวสม่ำเสมอ (Uniform surface finish)
- ขนาดอนุภาคกระจายอย่างสม่ำเสมอ (Uniform particle size distribution)
- อัตราการขัดผิวมีค่าสูง เนื่องจากผ้าขัดสามารถรักษาระดับความคมได้สม่ำเสมอ
- อนุภาคมีทั้งความแข็งและความเหนียว
- มีโครงสร้างผลึกเป็นรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal) ที่มีความแข็งเท่ากันทุกหน้า
- ผิวมีลักษณะหยาบจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการขัดเนื้อวัสดุมากกว่า
- มีพื้นที่ผิวมากกว่าเพชรผลึกเดี่ยวถึง 300%

### 2.7.3 การทำความสะอาดชิ้นงานและการทำให้แห้ง

การทำความสะอาดชิ้นงานและการทำให้แห้งอาจดูเป็นขั้นตอนที่ธรรมดาจนไม่จะกล่าวถึง แต่ในความเป็นจริง การทำความสะอาดผิวและการทำให้แห้งเป็นขั้นตอนที่มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ของโครงสร้างจุลภาคที่แท้จริงของชิ้นงาน เพราะการทำความสะอาดจะช่วยกำจัดวัสดุที่หลงเหลือจากการขัดผิว ถ้าผิวหน้าของชิ้นงานมีคราบ รอยเปื้อน หรือสิ่งสกปรกใดๆ ก็ตาม สิ่งเหล่านี้จะบดบังโครงสร้างขณะทำการตรวจสอบชิ้นงานได้ การทำความสะอาดสามารถแบ่งออกได้สองประเภท ดังต่อไปนี้

การทำความสะอาดระหว่างขั้นตอนหลัก การทำความสะอาดแบบนี้จะได้ผลดีที่สุดหากชิ้นงานภายใต้ น้ำไหล ตามด้วยการทำความสะอาดด้วยน้ำและเช็ดด้วยผ้าฝ้าย เพื่อกำจัดเศษส่วนเกินต่างๆ การทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคกับน้ำยาทำความสะอาด จะช่วยกำจัดเศษที่ติดอยู่ตามร่องหรือรอยแตกของชิ้นงานได้ จากนั้นจึงล้างน้ำยาทำความสะอาดภายใต้ น้ำไหล และทำให้แห้งด้วยลมหรืออากาศแห้ง

การทำความสะอาดขั้นสุดท้าย การทำความสะอาดขั้นสุดท้ายเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดควรทำทันทีภายหลังการขัดผิวแบบละเอียดลำดับสุดท้ายเพื่อป้องกันการเกิดผลึกหรือการเกาะกันของเม็ดขัด บนผิวหน้าชิ้นงาน โดยเฉพาะเม็ดขัดที่มีความละเอียดมากๆ การใช้ผ้าฝ้ายจุ่มแอลกอฮอล์แล้วถูผิวหน้าเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมมากสำหรับชิ้นงานที่ทำความสะอาดได้ยาก ขั้นตอนการทำความสะอาดขั้นนี้จึงมีความสำคัญเพราะผิวหน้าชิ้นงานต้องนำไปผ่านการกัดชิ้นรอย (Retching) ในขั้นตอนถัดไป

การทำให้แห้ง การใช้แอลกอฮอล์ฉีดพ่นบนผ้าขัดและผิวหน้าชิ้นงานจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการทำให้แห้ง โดยอาจใช้ควบคู่ไปกับการพ่นลมหรือนำชิ้นงานไปอบแห้ง ฯลฯ

## 2.8 การกัดขึ้นรอย (Etching) [7]

การกัดขึ้นรอยเป็นกระบวนการทำให้เนื้อวัสดุเกิดการกัดกร่อนโดยใช้สารเคมีต่างๆ ซึ่งกลไกเหล่านี้เกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการทำเชิงไฟฟ้าเคมีที่บริเวณผิวหน้าของวัสดุ สารกัดขึ้นรอย (Etchant) จะทำให้เกิดความแตกต่างของสีและแสงเงา เนื่องจากแต่ละเฟสมีความเฉพาะตัวในเหลี่ยมผลึก และการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก จึงทำให้เกรนหรือเฟสต่างๆถูกกัดกร่อนด้วยอัตราที่ไม่เท่ากัน เกิดแนวกัดเป็นชั้นๆ ที่ขอบเกรนทำให้มีการสะท้อนแสงแตกต่างกัน หรืออาจเกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่ขอบเกรนหรือขอบของเฟสเป็นแนวร่องลึก วิธีที่จะละลายเฟสทั้งเฟสเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพต้องใช้ปฏิกิริยาทางเคมีที่เหมาะสมเท่านั้น ดังนั้นการกัดผิวขึ้นรอยจึงเป็นเพียงหลักการทำให้เฟสที่เราสนใจมีผิวหยาบหรือขรุขระมากขึ้นและสะท้อนแสงได้น้อยลง หรือเป็นการทำให้เฟสนั้นเกิดคราบเปื้อน เพื่อทำให้เกิดการสะท้อนแสงที่ไม่เท่ากันจนสามารถเห็นเฟสนั้นเด่นชัดขึ้น

การกัดขึ้นรอยระดับจุลภาค เป็นการกัดขึ้นรอยเพื่อให้ลักษณะทางโครงสร้างในระดับจุลภาคของชิ้นงานปรากฏขึ้น โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 25 ถึง 1,500 เท่า หรือใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (SEM) การกัดขึ้นรอยระดับนี้เหมาะสำหรับใช้ตรวจสอบรูปร่างขนาด และการจัดเรียงตัวของโครงสร้างในแต่ละองค์ประกอบ ได้แก่ เฟส สารมลทิน รูพรุน ฯลฯ จึงทำให้เข้าใจการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเนื่องจากกระบวนการทางความร้อน ทางกล และทางเคมีของชิ้นงาน

การกัดขึ้นรอยด้วยสารเคมี การกัดขึ้นรอยด้วยสารเคมี จัดเป็นวิธีการที่มีความสะดวกมากที่สุด โดยทั่วไปมักจะเลือกใช้สารกัดขึ้นรอยสามัญที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอันตรายน้อยที่สุดก่อน วิธีการขึ้นรอยด้วยสารเคมีจะนำชิ้นงานจุ่มในสารกัดขึ้นรอยและแกว่งชิ้นงานเบาๆ หรืออาจขีดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารดังกล่าวที่อุณหภูมิต่ำ การแกว่งชิ้นงานจะช่วยป้องกันสารมลทินที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารเคมีกับเนื้อวัสดุมายึดเกาะที่ผิวหน้าชิ้นงาน และช่วยลดสภาพการขุ่นมัวของผิวหน้าชิ้นงานได้ หรืออาจนำแท่งแม่เหล็ก หมุนเพื่อกวาดสารเคมีขณะทำการขีดขึ้นรอยเพื่อประสิทธิภาพในการป้องกันสารมลทินปกคลุมผิวชิ้นงาน สำหรับวิธีการขีดผิวชิ้นงานจะใช้เฉพาะกรณีที่มีข้อเสนอแนะเท่านั้นเพื่อป้องกันปัญหาจากการเกิดรอยขีด โดยเฉพาะในโลหะที่มีความแข็งไม่สูงนัก อาจใช้แท่งไม้ที่ติดปลายด้วยผ้าฝ้ายหรือแท่งกระดาษ (Paper rod) จุ่มสารจนชุ่มแล้วขีดผิวหน้าชิ้นงาน โดยผ้าต้องเปียกชุ่มด้วยสารกัดขึ้นรอยเสมอทุกครั้งที่ใช้

ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกัดขึ้นรอย จะพิจารณาจากสภาพผิวหน้าของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น ความมันเงาหรือสีของชิ้นงานเปลี่ยนไป หากภายหลังการกัดขึ้นรอยแล้วยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ควรแช่ชิ้นงานในน้ำร้อนประมาณ 2 ถึง 3 วินาที แล้วทำให้แห้งแล้วทำการขีดขึ้นรอยซ้ำอีกครั้ง หรืออาจขีดผิวแบบละเอียดและกัดขึ้นรอยซ้ำโดยใช้ระยะเวลาอันยาวนานยิ่งขึ้นระยะเวลาของการกัดขึ้นรอยเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่ง ที่จะทำให้ได้ลักษณะทางโครงสร้างที่แท้จริงและให้

รายละเอียดของโครงสร้างที่ชัดเจน โดยทั่วไประยะเวลาที่เหมาะสมประมาณ 20 วินาที นอกจากนั้น หากชิ้นงานมีสภาพการกัดอ่อน (Under etching) จะไม่สามารถแสดงรายละเอียดของโครงสร้าง ในขณะที่ชิ้นงานที่มีสภาพการกัดเกิน (Over etching) จะปรากฏสภาพโครงสร้างที่มีลักษณะมัวและไม่ชัดเจนขึ้น

โดยสรุปแล้ว การกัดชิ้นรอยเพื่อแสดงโครงสร้างที่แท้จริงของชิ้นงานต้องอาศัยการเตรียมผิวอย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปการเลือกสารเคมี และวิธีสำหรับการกัดชิ้นรอยที่เหมาะสมจะเลือกใช้สารเคมีที่เป็นพื้นฐานมากที่สุดและนิยมเลือกใช้วิธีการกัดชิ้นรอยด้วยสารเคมีเนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกที่สุดสารกัดพิเศษและเทคนิคอื่นๆ ของการกัดชิ้นรอยจะเป็นทางเลือกถัดไปเมื่อเทคนิคที่ง่ายที่สุดไม่ก่อให้เกิดผลที่ชัดเจน อย่างไรก็ตามการใช้สารเคมีทุกชนิด จำเป็นต้องศึกษาข้อควรระวังให้มากพอ และต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นที่สำคัญ

## 2.9 การทดสอบงานเชื่อมโลหะด้วยวิธีการทางโลหะวิทยา

การทดสอบงานเชื่อมโลหะด้วยวิธีการทางโลหะวิทยา หมายถึง การตัดชิ้นทดสอบจากชิ้นงานตัวอย่าง (Sampling) หรือจากผลิตภัณฑ์ (Products) นำมาขัดหยาบ ขัดมัน และกัดกรด (Etching) เพื่อส่องดูโครงสร้างเนื้อเชื่อมและบริเวณผลกระทบร้อนเทียบกับโครงสร้างเดิม โดยใช้แว่นขยายหรือกล้องจุลทรรศน์ช่วยตรวจสอบด้วยสายตา (Visual examination)

### 2.9.1 การเตรียมชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค [8]

เมื่อต้องการตรวจสอบจุดบกพร่องภายในที่มีขนาดเล็กมากๆ หรือต้องการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายมากๆ ให้ตัดชิ้นทดสอบขนาดเล็กจากชิ้นงานเชื่อมจริง หรือตัดจากชิ้นทดสอบตัวอย่าง อัดชิ้นเรือนด้วยเรซิน และนำมาขัดหยาบด้วยผงอีเมอริย์เบอร์ละเอียด ตามด้วยล้อขัดกระดาษทรายจานหมุนเบอร์ 240 320 400 500 600 800 1000 และเบอร์ 1200 จากนั้นขัดมันด้วยล้อแผ่นผ้าสักหลาดจานหมุน ใส่ครีมขัดผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) จนกระทั่งผิวของชิ้นทดสอบมันเรียบเหมือนกระจกเงาปราศจากเส้นรอยขีดเล็กๆ จึงกัดกรดไนตรัล 3% เป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นนำไปส่องดูโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงๆ เช่น X50 X100 X200 X500 หรือ X1000 ตามความเหมาะสม

สรุปขั้นตอนในการตัดเตรียมชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค

- 1) ใช้เครื่องตัดชิ้นงานตัวอย่างโลหะวิทยาที่ใช้น้ำหล่อเย็น
- 2) ตัดเรือนชิ้นทดสอบหล่อด้วยเรซิน
- 3) การขัดระนาบ (Plane grinding)
- 4) การขัดละเอียด (Fine grinding)
- 5) ทำความสะอาดด้วยน้ำ

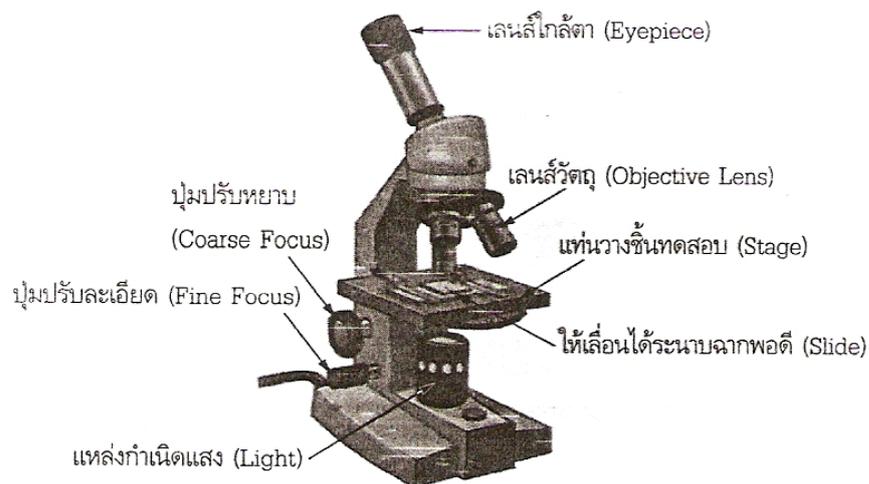
- 6) การขัดมัน (Polishing)
- 7) ทำความสะอาดด้วยน้ำ
- 8) นำชิ้นทดสอบจุ่มทำความสะอาดในอะซิโตน
- 9) ล้างชิ้นทดสอบด้วยน้ำยาที่ใช้กับเครื่องล้างอัลตราโซนิก 10 นาที
- 10) เป่าให้แห้งด้วยลมร้อนอย่างรวดเร็วเพื่อให้มีคราบติดที่ผิวด้านที่จะทดสอบดู

#### โครงสร้างจุลภาค

- 11) กัดกรด
- 12) ทำความสะอาดชิ้นทดสอบด้วยน้ำไหลสะอาด
- 13) ล้างชิ้นทดสอบด้วยน้ำยาที่ใช้กับเครื่องล้างอัลตราโซนิก
- 14) เช็ดผิวหน้าชิ้นทดสอบด้วยแอลกอฮอล์และเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน
- 15) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์
- 16) ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค
- 17) เก็บชิ้นทดสอบไว้ในโถสุญญากาศเพื่อการทดสอบซ้ำ หรือเคลือบผิวหน้าชิ้นทดสอบ

#### ด้วยวาสลิน

- 18) อัดภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค
- 19) แปลผล



รูปที่ 2.12 กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง [8]

### 2.9.2 การทดสอบความแข็งจุลภาคโครงสร้างแนวเชื่อม [8]

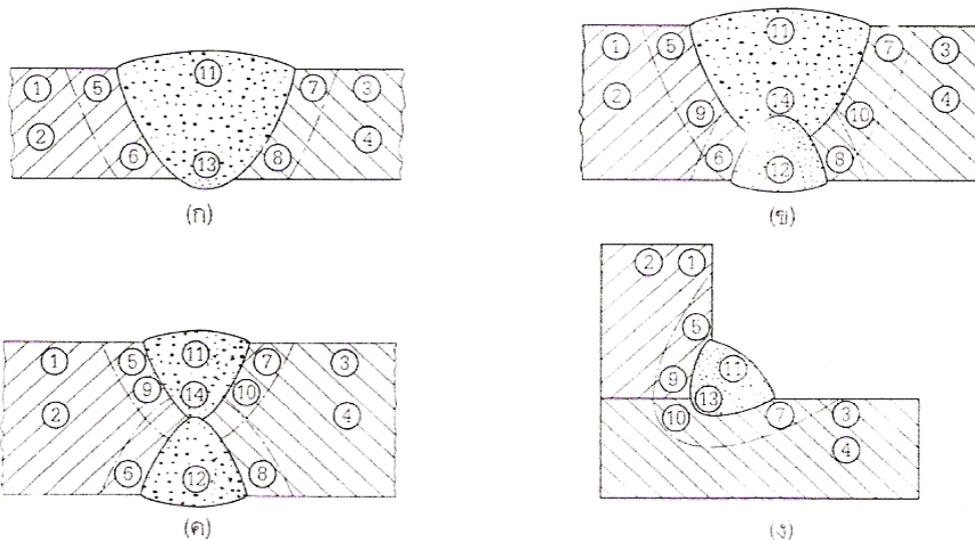
การทดสอบความแข็งของผลึกที่เม็ดเกรนจะสามารถตัดลึนใจ เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคที่แข็ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณผลกระทบบร้อน ผิวหน้าขึ้นทดสอบกัดกรดมาก่อนเพื่อจะให้เห็นโครงสร้างของผลึกที่แตกต่างกันได้

### 2.9.3 ตำแหน่งทดสอบความแข็งจุลภาคของโครงสร้างแนวเชื่อม [8]

การทดสอบความแข็งจุลภาคกำหนดมาตรฐานไว้ใน ASTM E384 “Standard Test Method for Micro hardness of Materials” สามารถใช้ประเมินผลความแข็งตามหน้าตัดขวางของแนวเชื่อม ตำแหน่งเนื้อเชื่อม บริเวณผลกระทบบร้อนและเนื้อโลหะงาน ความหนาของแนวเชื่อมและขึ้นทดสอบต้องอยู่ภายในขอบเขตที่มาตรฐานแนะนำ ดังมีรายละเอียดดังนี้

1) ใช้กำหนดความแข็งของโครงสร้างจุลภาคจากส่วนผสมของธาตุในเหล็กกล้า หรือโลหะผสมอื่นๆ เช่น เพื่อค้นหาตำแหน่งของคาร์ไบด์ หรือโครงสร้างมาร์เทนไซต์ เป็นต้น

2) ใช้ทดสอบความแข็งจุลภาคของโครงสร้างแนวเชื่อมบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณผลกระทบบร้อนจากการเชื่อม เพื่อตรวจสอบหาแนวโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ซึ่งมีผลทำให้เปราะและแตกง่าย



รูปที่ 2.13 ตำแหน่งทดสอบความแข็งจุลภาคงานเชื่อม [8]

### 2.9.4 ตัวแปรที่มีผลต่อการทดสอบความแข็งโครงสร้างจุลภาค [8]

เนื่องจากรอยกดมีขนาดเล็กมาก ผิวขึ้นทดสอบ (Specimens) จะต้องได้รับการขัดมันเรียบ ตัวแปรอื่นที่อาจทำให้เส้นผ่านศูนย์กลาง (d) รอยกดอ่านได้คลาดเคลื่อน คือ

- 1) การสั่นสะเทือนของกล้องจุลทรรศน์ขณะปฏิบัติงาน
- 2) ความไม่สม่ำเสมอของแรงกด (ต้องกดด้วยความเร็วต่ำกว่า 20 ไมโครเมตรต่อวินาที)

3) ใช้เวลาทดสอบบนผิวงานไม่เท่ากันเมื่อต้องการเปรียบเทียบค่า (เวลาทดสอบ 10 วินาที)

4) แสงสว่างไม่เพียงพอทำให้อ่านค่าวัดเส้นทแยงมุมผิดพลาด

#### 2.9.5 การทดสอบความแข็ง [9]

ค่าความแข็งของวัสดุเป็นเป็นตัวชี้สมบัติทางกลที่สำคัญในด้านความต้านทานต่อการสึกหรอ ทนต่อการเสียดสี ด้านต้านต่อแรงดึงและความเหนียวโดยปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของวัสดุ นั้นคือ ลักษณะ ส่วนผสมทางเคมีภายในวัสดุ โครงสร้างจุลภาค การขึ้นรูปของวัสดุและกรรมวิธีทางความร้อนที่กระทำต่อวัสดุโดยวิธีวัดค่าความแข็งของวัสดุนี้สามารถทำการทดสอบหลายวิธีทั้งแบบแรงไม่คงที่และแบบแรงคงที่ได้แก่ การทดสอบการวัดค่าความแข็งแบบบริเนลล์(Brinell hardness testing) การวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell hardness testing) และการวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness testing) ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการทดสอบความแข็งระดับจุลภาคที่นิยมใช้การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์สเท่านั้น

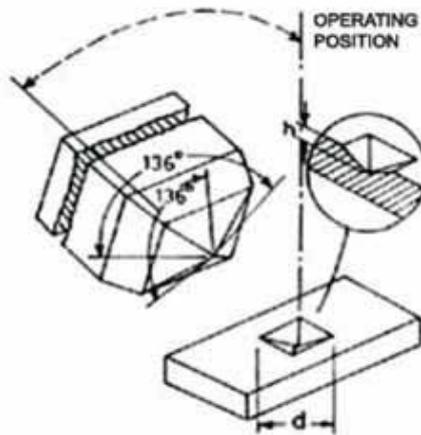
การทดสอบความแข็งระดับจุลภาคนิยมใช้การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ โดยค่าที่ได้จะเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ ต่อพื้นที่ของรอยกดซึ่งแรงที่ใช้จะเป็นแรงกดคงที่ โดยความแข็งของวัสดุจะมีผลต่อความลึกของรอยกด หัวกดที่ใช้จะเป็นหัวกดที่ทำด้วยเพชรรูปทรงปิระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสทุกด้านทำมุม 136° โดยแรงที่ใช้กดมีตั้งแต่ 1-1000 กรัม ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ โดยค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์จะได้จากการวัดความกว้างของรอยกดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่แสดงในรูปที่ 2.8 จากนั้นนำมาคำนวณค่าความแข็งตามสูตรที่ 2.1

$$HV = \frac{1.8544 P}{d^2} \quad (2.1)$$

โดยที่ P คือ น้ำหนักที่ใช้กดในหน่วยกรัม

d คือ ขนาดเส้นทแยงมุมของรอยกดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสในหน่วยมิลลิเมตร

วิธีการวัดค่าความแข็งวิธีนี้จะเหมาะสมกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กพื้นที่การวัดความแข็งน้อยแต่ที่นิยมมากที่สุดคือการนำไปวัดความแข็งของโครงสร้างจุลภาคในวัสดุ การวัดชั้นความแข็งลึกของงานที่ชุบผิวแข็งและการวัดความแข็งแนวเชื่อม โดยค่าความแข็งที่วัดได้จะมีหน่วยเป็น HV และ ถ้าเวลาในการกดชิ้นงานที่นานกว่า 15 วินาที จะต้องระบุค่าผลการทดสอบที่ได้ดังแสดงนี้ เช่น 220 HV 0.2/30 หมายถึง ใช้แรงกด 0.2 กิโลกรัมแรง (kgf) เวลาทดสอบ 30 วินาที



รูปที่ 2.14 หัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส [8]

#### 2.9.6 การเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็ง

สำหรับการทดสอบด้วยวิธีไมโครวิกเกอร์สจะมีความละเอียดมากกว่าวิธีการวัดความแข็งแบบอื่น เนื่องจากการทดสอบจะให้ลักษณะของรอยกดที่เล็กมากจึงต้องใช้กล้องขยาย เพื่อใช้ในการวัดความกว้างของรอยกดในการเตรียมชิ้นงานจะเตรียมเหมือนกับการทดสอบโครงสร้างจุลภาค นอกจากนี้ ในการจับยึดชิ้นงานจำเป็นต้องให้ผิวที่ทำการวัดได้ระนาบและตั้งฉากกับหัวกดให้มากที่สุด โดยการจับยึดชิ้นงานบางครั้งจำเป็นต้องใช้ระดับน้ำเล็กๆ ช่วยในการปรับระนาบของผิวทดสอบก่อนทำการกด ซึ่งจะทำให้ค่าที่กดได้แม่นยำมากขึ้น