บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประเทศไทยในปัจจุบัน การเชื่อมโลหะด้วยเทคนิคการเสียดทานแบบกวน กำลังเป็นที่สนใจในวงการอุตสาหกรรมและมีแนวโน้มที่จะนำมาใช้งานในกระบวนการผลิตมากขึ้น เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโลหะ (welding) เป็นการตอบสนองการเลือกใช้วัสดุในอุตสาหกรรมให้เหมาะสมยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการนำวัสดุอะลูมิเนียม ที่มีสมบัติเด่นหลายประการมาทดแทนวัสดุเดิม ซึ่งในกลุ่มอะลูมิเนียมผสมบางกลุ่ม มีข้อจำกัดในการเชื่อมแบบหลอมละลาย เนื่องจากความร้อนจากการเชื่อมมีผลกระทบต่อรอยเชื่อมทำให้สมบัติเชิงกลในรอยเชื่อมลดลง **[7]**

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นเทคนิคการเชื่อมประสานโลหะ โดยการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นความร้อนบริเวณรอยต่อ ที่มีอุณหภูมิสูงใกล้จะถึงจุดหลอมละลาย หรืออยู่ในสภาวะพลาสติก (plastic stage) โดยมีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องกัดโลหะแกนตั้งที่ควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติด้วยระบบคอมพิวเตอร์หรือแบบกึ่งอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยผู้ปฏิบัติงาน ผู้ทำวิจัยจึงสนใจทำการศึกษาค้าเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยประยุกต์ใช้งานเครื่องกัดโลหะแกนตั้งแบบกัดปาดหน้าชิ้นงานที่มีใช้งานกันทั่วไปให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยศึกษาวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลในรอยชนของอะลูมิเนียมผสม 6061-T6

2.1 นิยามคำศัพท์ที่สำคัญ [8][20]

ในประเทศไทยเริ่มให้ความสนใจเทคนิคการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน โดยได้มีการศึกษาวิจัยและมีผลงานทางวิชาการเผยแพร่ช่วงประมาณปี พ.ศ. 2550 เป็นต้นมา แหล่งอ้างอิงข้อมูลมาจากการแปลเอกสารจากภาษาต่างประเทศ ซึ่งในประเทศไทยยังไม่มีคำศัพท์บัญญัติทางเทคนิคขึ้น จึงมีการแปลความหมายคำศัพท์เทคนิคเป็นภาษาไทยแตกต่างกันไป และในงานวิจัยเล่มนี้ ผู้วิจัยได้พยายามให้ความหมายจากผู้วิจัยก่อนหน้าเป็นแนวทาง เพื่อให้การสื่อความหมายไปในทิศทางเดียว ซึ่งมีคำศัพท์ที่เรียกในงานวิจัยเล่มนี้ ดังต่อไปนี้

2.1.1 กระบวนการเชื่อม (welding process) หมายถึงการ ประสานโลหะเข้าด้วยกันโดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนถึงจุดหลอมละลาย แล้วใช้เนื้อโลหะชิ้นงานเป็นตัวประสานเข้าด้วยกัน หรือจะเติมโลหะโดยใช้ลวดเชื่อม ซึ่งอาจเป็นโลหะชนิดเดียวกันหรือมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันเป็นตัวประสานในขณะที่ชิ้นงานกำลังหลอมละลาย ความร้อนที่ให้แก่ชิ้นงานอาจจะเป็นพลังงานจาก

พลังงานเคมี พลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานกล ขึ้นอยู่กับวิธีการเชื่อมแต่ละชนิดแตกต่างกันออกไป ซึ่งการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน หัวกดเชื่อมจะหมุนด้วยพลังงานกล ให้เกิดความร้อนแก่ชิ้นงาน

2.1.2 การเชื่อม (weld) หมายถึง การประสานให้ชิ้นส่วนโลหะหลอมรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันบริเวณรอยต่อชิ้นงานที่ต้องการให้ประสานติดกัน

2.1.3 เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน หมายถึง การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) อยู่ในกลุ่มกระบวนการเชื่อมด้วยแรงดันชนิดหนึ่งจากสามชนิด ซึ่งต่อจากนี้ไปจะใช้คำนี้ หรือใช้ตัวย่อภาษาอังกฤษ FSW ในการเขียนเนื้อหาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.1.4 ความเสียดทาน (friction) หมายถึงแรงต้านทานจากการเสียดสี เมื่อวัตถุกำลังจะเคลื่อนที่ และขณะเคลื่อนที่ เกิดขึ้นได้จากผิวสัมผัสของวัตถุเสียดสีกัน สำหรับในที่นี้จะกล่าวถึงแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่าง หัวกดเชื่อมที่สร้างจากเหล็กเครื่องมือ และชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมผสม เสียดสีกันจนเกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณนั้น ซึ่งแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมีอยู่สองลักษณะได้แก่ แรงเสียดทานสถิต (static friction) คือ ปริมาณของแรงที่กระทำต่อวัตถุที่อยู่นิ่งให้เริ่มเกิดการเคลื่อนที่ และแรงเสียดทานจลน์ (kinetic friction) คือ ปริมาณของแรงที่วัตถุเคลื่อนที่ ซึ่งจะมีปริมาณน้อยกว่าแรงเสียดทานสถิตเสมอ

2.1.5 หัวกดเชื่อม (Tool Pressure) หมายถึง ส่วนที่หมุนส่งกำลัง ซึ่งถูกจับยึดเข้ากับเครื่องจักรต้นกำลังอย่างมั่นคงและสามารถถอดเปลี่ยนได้ เป็นส่วนที่สร้างความเสียดทานให้เกิดความร้อนในการเชื่อม ประกอบด้วยบ่าให้ความร้อน (shoulder) และ สลักแกนหมุนกวน (pin) ซึ่งจะทำหน้าที่กวนวัสดุบริเวณรอยต่อเชื่อมประสานเข้าด้วยกัน

2.1.6 Retreating Side หมายถึง ชิ้นงานทดสอบด้านที่ถูกกวนให้เนื้อออกไปเติมในด้าน Advancing ในการเชื่อมทดสอบเทคนิคการเชื่อมแบบ FSW จะกำหนดให้หัวกดเชื่อม หมุนตามเข็มนาฬิกา (clockwise) จากจุดเริ่มต้น เทียบกับทิศทางการเชื่อม โดยให้ด้าน Retreating อยู่ด้านขวามือ

2.1.7 Advancing Side หมายถึง ชิ้นงานทดสอบด้านที่ถูกกวนให้เนื้อเข้ามาเติมจากด้าน Retreating ส่วนด้าน Advancing จะอยู่ทางด้านซ้ายของรอยเชื่อมหรืออยู่ด้านตรงกันข้ามกับด้าน Retreating เสมอ

2.1.8 การเชื่อมแบบต่อชน (Butt Joint) หมายถึง การนำชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบมาต่อเข้าด้วยกัน โดยให้ขอบรอยต่อสัมผัสกันและอยู่ในระนาบเดียวกัน ซึ่งเป็นหนึ่งในมาตรฐานการเชื่อมต่อจากห้าแบบ

2.1.9 รอยเชื่อม (weld bead) หมายถึง รอยต่อที่เกิดขึ้นหลังจากการเชื่อมด้วยเทคนิค FSW

2.1.10 Stirred Zone หมายถึง บริเวณกลางรอยเชื่อมที่ได้รับความร้อนโดยตรงและบริเวณแนวกึ่งกลางของภาคตัดรอยเชื่อมที่สลักแกนหมุนกวนแทรกตัวผ่านตลอด

2.1.11 Heat Affected Zone หมายถึง บริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนจากการเชื่อมทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนไป ซึ่งต่อจากนี้ไปจะใช้ตัวย่อภาษาอังกฤษ HAZ

2.1.12 Thermo Mechanically Affected Zone หมายถึง บริเวณที่ได้รับอิทธิพลทางความร้อนที่เกิดจากกระบวนการเสียดสีเชิงกล ซึ่งต่อจากนี้ไปจะใช้ตัวย่อภาษาอังกฤษ TMAZ

2.2 กระบวนการเชื่อมโลหะ (welding process)

การเชื่อมโลหะ หมายถึง กรรมวิธีการต่อโลหะให้ติดกัน โดยการให้ความร้อน หรือแรงกด หรือทั้งสองอย่างร่วมกันบริเวณที่ต้องการต่อเชื่อมโลหะนั้นให้ประสานติดเป็นชิ้นเดียวกัน ซึ่งแบ่งได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ คือ การเชื่อมด้วยการหลอมละลาย (fusion welding) และ การเชื่อมด้วยความดัน (welding with pressure)

การเชื่อมด้วยการหลอมละลายเป็นการเชื่อมประสานโลหะให้ติดกัน โดยให้ความร้อนที่บริเวณแนวเชื่อมจนเกิดการหลอมละลายประสานเป็นเนื้อเดียวกัน ความร้อนในการหลอมละลายอาจจะเกิดจากการอาร์ค (Arc) หรือความร้อนจากการเผาไหม้ของก๊าซเชื้อเพลิงกับออกซิเจน รวมทั้งความร้อนจากการอาร์คของอิเล็กโทรดแล้วหลอมละลายลงไปในแนวเชื่อม (filler rod) ตลอดจนแหล่งความร้อนจากเทคโนโลยีชั้นสูงในรูปแบบอื่นๆ แสงเลเซอร์ พลาสมา หรือ คลื่นความถี่สูง เป็นต้น **[9]**

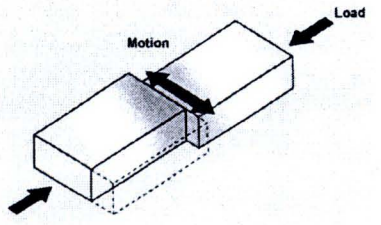
การเชื่อมด้วยความดัน เป็นการเชื่อมโลหะให้ติดกันโดยให้ความร้อนที่บริเวณแนวเชื่อมจนอุณหภูมิเกือบจะถึงจุดหลอมละลายหรืออยู่ในสภาวะพลาสติกขณะเดียวกันก็ให้แรงดัน (pressure) แก่ชิ้นงานให้ติดกันบริเวณพื้นที่ได้รับแรงกด ซึ่งปัจจุบันได้พัฒนาให้เป็นการเชื่อมแบบอัตโนมัติที่ควบคุมการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ หรือ การเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ (welding robot)

2.3 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Friction Welding) **[2][9]**

เป็นเทคนิคที่จัดอยู่ในกลุ่มการเชื่อมด้วยความดันแหล่งพลังงานความร้อนในการเชื่อมได้จากการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานความร้อน ที่บริเวณผิวหน้าสัมผัสของชิ้นงาน จากแรงเสียดทานที่เกิดจากการเสียดสีของชิ้นงานโดยตรง แรงฝืดจากการขัดถูหรือการหมุนของชิ้นงานด้วยความเร็ว จนเกิดความร้อนสูงถึงช่วงสภาวะพลาสติกบริเวณแนวเชื่อมภายใต้แรงกดดันของชิ้นงานโดยไม่มีพลังงานอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้องในการให้ความร้อน ซึ่งปัจจุบันกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานได้รับการพัฒนาให้เป็นส่วนหนึ่งของสายการผลิตในอุตสาหกรรมแบบอัตโนมัติ โดยได้

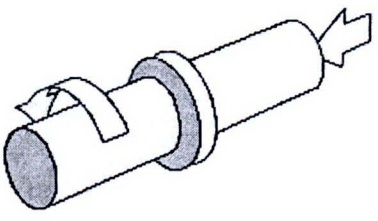
พัฒนาให้อยู่ในรูปแบบเครื่องจักรและหุ่นยนต์เชื่อม ซึ่งมีการเรียกชื่อเทคนิคการเชื่อมตามลักษณะการให้แรงเสียดทานของชิ้นงาน ดังนี้

2.3.1 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบเชิงเส้น (Linear Friction Welding) **[2]** ลักษณะการเชื่อมแบบเชิงเส้นนี้เหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีหน้าสัมผัสเป็นแท่งเหลี่ยม การเคลื่อนที่เพื่อให้เกิดการเสียดสีกันของชิ้นงานจะมีทิศทางในแนวเชิงเส้นแบบถูไปกลับ (แสดงตามรูปที่ 2-1) ในขณะเคลื่อนที่นั้นจะให้แรงกดและจับยึดชิ้นงานด้านหนึ่งไว้อยู่กับที่ เมื่อเกิดความร้อนถึงสภาวะพลาสติกจึงจะหยุดและกดให้ชิ้นงานเชื่อมติดกัน โดยมีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องไสโลหะ จะแตกต่างกันที่การเชื่อมด้วยวิธีนี้จะใช้ความเร็วและช่วงชักสั้นมากกว่า สามารถควบคุมการหยุดได้รวดเร็วเที่ยงตรงกว่า มีจังหวะเพิ่มแรงกดยู่ (upset force) ได้แม่นยำ



รูป 2-1 ลักษณะการเชื่อมเสียดทานแบบเชิงเส้น **[2]**

2.3.2 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบหมุน (Rotation Friction Welding) **[2]** ลักษณะการเชื่อมเกิดจากการเคลื่อนที่เสียดสีกันของผิวหน้าสัมผัสของชิ้นงาน ความร้อนเกิดจากการหมุนของชิ้นงาน ส่วนใหญ่จะเหมาะสมกับชิ้นรูปทรงแบบแท่งกลม (แสดงตามรูปที่ 2-2) หรือ บริเวณที่ต้องการเชื่อมประสานระหว่างงานลักษณะแท่งกลมกับงานที่เป็นแท่งเหลี่ยมก็ได้ ขึ้นอยู่กับการประดิษฐ์เครื่องมือขึ้นมาเป็นพิเศษ โดยเฉพาะงานที่มีการผลิตเป็นจำนวนมากๆ หลักการทำงานของการเชื่อมแบบหมุนคล้ายกับเครื่องกลึงโลหะจะมีความแตกต่างกันที่ การเชื่อมสามารถหยุดหมุนได้เร็วกว่าเครื่องกลึงโลหะ และ ในขณะที่หยุดหมุนจะมีระบบเพิ่มแรงกดยู่โดยอัตโนมัติทันที ซึ่งการเชื่อมแบบนี้ส่วนใหญ่หลังจากเสร็จสิ้นการเชื่อม จะต่อเนื่องด้วยการกลึงปลอกผิวรอยเชื่อมให้เรียบเป็นขั้นตอนสุดท้าย



รูป 2-2 ลักษณะการเชื่อมเสียดทานแบบหมุน **[10]**

2.4 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน FSW

เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จัดอยู่ในกลุ่มการเชื่อมด้วยแรงดัน เป็นการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (solid state welding) ที่ไม่ใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากภายนอกในการหลอมละลายชิ้นงาน แต่จะอาศัยการเสียดสีจากพลังงานกลให้เกิดความร้อนขึ้น เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จะมีความแตกต่างจากเทคนิคการเชื่อมแบบเชิงเส้น และแบบหมุน คือทั้งสองแบบจะใช้ชิ้นงานเสียดสีกันเองให้เกิดความร้อนขึ้น แต่เทคนิคการเสียดทานแบบกวน มีลักษณะการสร้างแรงเสียดทานโดยชิ้นงานจะถูกยึดอยู่กับที่อย่างมั่นคง (แสดงตามรูปที่ 2-3) การเสียดสีเกิดจากการหมุนของหัวกดเชื่อม (tool pressure) เมื่อบริเวณที่เสียดสีกันเกิดความร้อนขึ้น จนถึงสภาวะพลาสติก (plastic deformation) สลักแกนหมุนกวน (pin) ที่ติดอยู่ส่วนปลายของหัวกดเชื่อมจะหมุนกวนให้เนื้อโลหะประสานเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

ความร้อนจากการเสียดทาน (friction) **[11]** เกิดขึ้นจากแรงต้านทานผิวสัมผัสของวัตถุเสียดสีกันระหว่างหัวกดเชื่อม (เหล็กเครื่องมือ) และชิ้นงานตัวอย่าง (แผ่นอะลูมิเนียมผสม) จึงเกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณรอยต่อเชื่อม ซึ่งปริมาณความร้อนจะเกิดขึ้นสองขั้นตอนด้วยกันคือ

ขั้นตอนที่หนึ่ง ความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่หัวกดเชื่อมแทรกตัวเข้าไปในเนื้อโลหะงาน (sticking) จนบ่าให้ความร้อนสัมผัสเสียดสีกับผิวชิ้นงาน ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1)

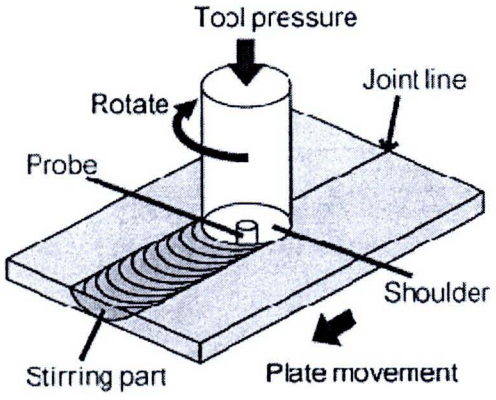
ขั้นตอนที่สอง ความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อหัวกดเชื่อมเคลื่อนที่ให้เกิดรอยเชื่อม (sliding) ซึ่งเกิดขึ้นต่อเนื่องจากขั้นตอนแรก ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2)

$$Q_{total} = \frac{2}{3}\pi P \mu \omega \left(R^3_{shoulder} - R^3_{pin}\right) \quad \text{.....(1)}$$

$$Q_{total} = \frac{2}{3}\pi \tau \omega \left(R^3_{shoulder} - R^3_{pin}\right) \quad \text{.....(2)}$$

โดยที่ Q_{total} คือ ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดทาน P คือ แรงกดดันของหัวกดเชื่อมลงบนวัสดุงาน μ คือ แรงเสียดทานระหว่างหัวกดเชื่อมและวัสดุงาน τ คือ แรงบิดของหัวกดเชื่อม ω คือ ความเร็วเชิงมุมของหัวกดเชื่อม $R_{shoulder}$ คือ รัศมีของบ่าให้ความร้อน และ R_{pin} คือ รัศมีของสลักแกนหมุนกวน

วัสดุโลหะที่สามารถนำมาเชื่อมต่อกันได้เป็นทั้งวัสดุชนิดเดียวกัน หรือต่างชนิดกันก็สามารถประสานติดกันได้ โดยไม่ก่อให้เกิดรังสีและควันพิษที่จะแพร่ออกมาจากการหลอมละลายวัสดุ ซึ่งมีส่วนประกอบและรายละเอียดของเครื่องมือการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีดังต่อไปนี้



รูป 2-3 ลักษณะการเชื่อมเสียดทานแบบกวน **[12]**

2.4.1 หัวกดเชื่อม (Tool Pressure) **[3][13]** เป็นเครื่องมือที่สำคัญมาก นอกจากจะส่งกำลังในการหมุนหัวกดเชื่อมให้เกิดการเสียดทานในการเชื่อมแล้ว ยังต้องรับภาระทั้งแรงกด แรงบิด และการเสียดสี ดังนั้นในการเชื่อมโลหะด้วยเทคนิคการเสียดทานแบบกวน จึงให้ความสำคัญที่หัวกดเชื่อมมากที่สุด ซึ่งนักวิจัยทั่วโลกให้ความสนใจ ทำการศึกษาเกี่ยวกับหัวกดเชื่อมเป็นส่วนใหญ่ เพื่อต้องการคุณสมบัติของหัวกดที่มีอายุการใช้งานยาวนาน มีความต้านทานการเสียดสีได้สูง รับแรงกดและอุณหภูมิสูงระหว่างการเชื่อม ดังนั้นวัสดุที่ใช้ในการทำหัวกดเชื่อม นอกจากจะทนความร้อนได้มากกว่าวัสดุชิ้นงานที่ต้องการเชื่อมแล้ว ต้องมีความสามารถในการต้านทานแรงอัดและแรงเฉือนสูง ส่วนรูปร่างลักษณะด้านที่ใช้ในการจับยึดกับเครื่องจักรต้นกำลัง ขึ้นอยู่กับหัวจับของเครื่องจักรที่ใช้ ที่มีลักษณะการจับยึดที่คล้ายๆ กับการจับดอกกัดของเครื่องกัดโลหะแบบแกนตั้งแต่จะมีขนาดที่โตกว่าหรืออาจมีการจับยึดจากแกนหมุนส่งกำลังโดยตรง ซึ่งสามารถจับยึดได้อย่างมั่นคงแข็งแรงทนแรงบิดได้สูง โดยไม่เกิดหมุนฟรีขึ้นขณะกำลังหมุนหัวกดเชื่อม

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องจักรต้นกำลัง ที่สามารถปรับความเร็วรอบได้สูงถึง 5,000 รอบต่อนาที และปรับความเร็วในการเชื่อมได้ถึง 6.0 เมตรต่อนาที และยังมีการพัฒนาให้หัวกดเชื่อมใช้งานได้ทนทานยาวนานสามารถทำการเชื่อมอะลูมิเนียมเกรด 6000 ได้รอยเชื่อมเป็นความยาวมากกว่า 1,000 เมตร **[13]** การออกแบบสร้างหัวกดเชื่อมยังไม่มีการกำหนดเป็นมาตรฐาน ข้อมูลที่ใช้กันยังไม่ครอบคลุม การใช้งานจริงยังต้องเทียบเคียง การใช้เหล็กกล้าเครื่องมือที่เหมาะสม (แสดงตามตารางที่ 2-1) ในการออกแบบสร้างหัวกดเชื่อม ซึ่งต้องพิจารณาตัวแปรหลายด้านประ กอบได้แก่ชนิดของโลหะชิ้นงานที่จะเชื่อม ความหนาของชิ้นงาน และขนาดความโตของหัวกดเชื่อมที่เหมาะสมให้ความร้อนได้เพียงพอ หัวกดเชื่อมประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วนคือ

ตาราง 2-1 วัสดุสร้างหัวกดเชื่อมในงานโลหะผสม **[14]**

Alloy	Thickness (mm.)	Tool material
Aluminum alloys	≤12	Tool steel , WC-Co
	≤ 26	MP159
Magnesium alloys	≤ 6	Tool steel , WC
Copper and copper alloys	≤ 50	Nickel alloys , PCBN, Tungsten alloys
	≤11	Tool steel
Titanium alloys	≤ 6	Tungsten alloys
Stainless steels	≤ 6	PCBN, Tungsten alloys
Low – alloys	≤10	WC, PCBN
Nickel alloys	≤ 6	PCBN

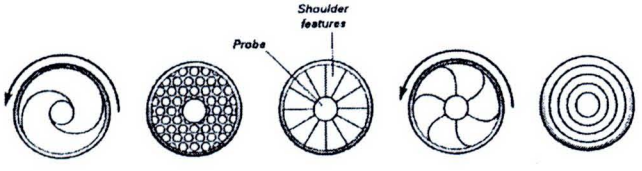
PCBN, polycrystalline cubic boron nitride

2.4.2 บ่าให้ความร้อน (Tool Shoulder) คือ ส่วนที่เป็นพื้นที่ผิวสัมผัส เสียดทานให้เกิดความร้อนจากการหมุนสัมผัสกับผิวชิ้นงานที่บริเวณรอยเชื่อม ซึ่งความเร็วและพื้นที่สัมผัสของบ่านั้นจะมีผลโดยตรงต่อการให้อุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อมจากการส่งแรงกดสู่เนื้อวัสดุ เพื่อให้เกิดการซึมลึกของรอยเชื่อม ขนาดความกว้างบริเวณหน้าสัมผัส อาจมีขนาดไม่เท่ากับส่วนที่ส่งกำลังของหัวกดเชื่อม บ่าให้ความร้อนโดยทั่วไปมีอยู่สองแบบ คือ แบบที่ใช้เชื่อมงานด้านเดียว และแบบที่ใช้เชื่อมงานสองด้านพร้อมกัน ซึ่งตัวแปรสำคัญในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ได้แก่ความเร็วรอบของหัวกดเชื่อม (rotational speed) มุมเอียงหัวกดหมุน (tool tilt) ความเร็วในการเชื่อม (travel welding speed) ซึ่งมีผลต่อการหมุนกวนในการประสานติดกันของวัสดุรอบๆ แกนหมุนและอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของการเชื่อมรวมทั้งลักษณะของสลักแกนหมุนกวนวัสดุ

การกำหนดขนาดความโตของบ่าให้ความร้อน ในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานกำหนดหลักเกณฑ์ที่แน่นอน ข้อมูลที่มีเป็นเพียงการรวบรวมจากผลการศึกษางานวิจัย ซึ่งยังไม่ครอบคลุม จากการศึกษางานวิจัยการเชื่อม FSW อะลูมิเนียมผสมเกรด 6XXX ความโตของบ่าให้ความร้อนจะมีขนาดประมาณสามถึงสี่เท่าของความหนาวัสดุชิ้นงานเชื่อม (แสดงตามตารางที่ 2-2) นอกจากขนาดความโตของบ่าให้ความร้อนที่เหมาะสมแล้ว ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ผิวรอยเชื่อมจะออกมาดีมีคุณภาพยังต้องพิจารณาตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ลักษณะพื้นผิวของบ่าให้ความร้อน เพราะนอกจากจะเสียดสีให้เกิดความร้อนแล้วยังเพิ่มแรงดันให้โลหะที่อ่อนตัวในรอยเชื่อม ทำให้มีผลต่อโครงสร้างภายในและความเรียบของผิวรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น ลักษณะพื้นผิวที่บ่าให้ความร้อนนอกจากจะทำเป็นผิวเรียบแล้วยังมีการประดิษฐ์พื้นผิวในลักษณะอื่นๆ (แสดงตามรูปที่ 2-4)

ตาราง 2-2 ขนาดบ่าให้ความร้อนตามชนิดความหนาวัสดุเชื่อม **[14]**

Shoulder diameter		Cylindrical pin diameter			
mm	in.	mm	in.	Shoulder-to-pin ratio	Workpiece material and thickness, mm
13	0.5	5	0.2	2.6:1	6061-T6 Al, 3 mm
20–30	0.8–1.2	8–12	0.3–0.5	2.5:1, 1.6:1	7050, 2195, 5083, 2024, 7075 Al, 6.35 mm
23	0.9	8.2	0.32	2.8:1	2024-T351 Al, 6.4 mm
20,16	0.8, 0.6	6	0.24	3.3:1, 2.7:1	5083 and 6061 Al, 5.5 mm
12	0.5	4	0.16	3:1	1050 Al and oxygen-free copper, 1.8 mm
25.4	1.0	7.87	0.31	3.22:1	7075-T7351 Al, 9.53 mm
23	0.9	8.4	0.33	2.7:1	2524-T351 Al, 6.4 mm
20	0.79	4	0.16	5:1	6064 Al to carbon steel, 4.5 mm
23	0.9	8.2	0.32	2.8:1	2024-T351, 7 mm
10	0.4	3.8	0.15	2.6:1	2095 Al, 1.63 mm
25	1.0	9	0.35	2.8:1	5251 Al, 5 mm



รูป 2-4 ลักษณะผิวบ่าให้ความร้อนของหัวกดเชื่อม **[14]**

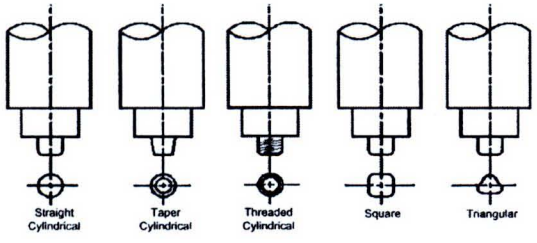
2.4.3 สลักแกนหมุนกวน (Pin) คือ ส่วนแกนที่ยื่นยาวออกจากบ่าให้ความร้อนทำหน้าที่หมุนกวนเนื้อวัสดุที่ได้รับความร้อนสภาพอ่อนตัวในสภาวะพลาสติก สลักแกนหมุนจะกวนวัสดุรอบแกนหมุนให้เคลื่อนที่ เกิดการเติมเนื้อวัสดุจากด้าน Advancing การเคลื่อนที่ไปในทิศทางของการหมุนจนเกิดการประสานติดกันของเนื้อวัสดุไปที่ด้าน Retreating การออกแบบสลักแกนหมุนจะให้ขนาดความโตของสลักแกนหมุน มีขนาดโตกว่าความหนาชิ้นงานเชื่อมประมาณหนึ่งเท่า หรือมากกว่าเล็กน้อย (แสดงตามตารางที่ 2-3) บางกรณีอาจคิดเป็นอัตราส่วนจากขนาดความโตของบ่าให้ความร้อน ซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยกันมาแล้วกับวัสดุบางชนิด (แสดงตามตารางที่ 2-2)

ตาราง 2-3 ขนาดสลักแกนหมุนกวนเชื่อมสำหรับอะลูมิเนียมผสมบางเกรด **[14]**

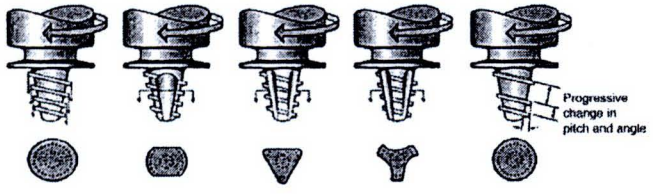
Thickness (mm)	**Shoulder diameter** (mm)	**Pin diameter** (mm)
AA 2195-T8		
8.1	25.4	10.0
AA6061-T6		
6.35	19.0	6.4
AA 70575-T651		
6.35	N/A	N/A

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ - 3 ก.ย. 2555
เลขทะเบียน 248512
เลขเรียกหนังสือ

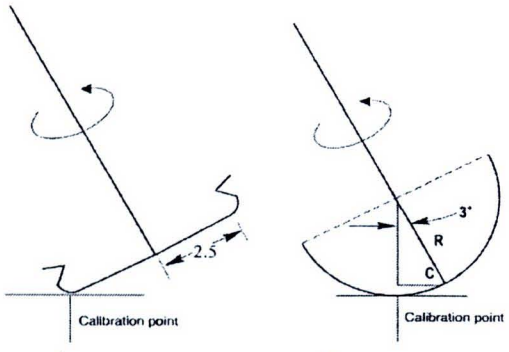
นอกจากการเอียงมุมหัวกดเชื่อม (tool tilt) และตัวแปรความเร็วรอบในการหมุนแล้ว รูปร่างลักษณะของสลักแกนหมุนกวนก็เป็นส่วนหนึ่ง ที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้าง และข้อบกพร่องภายในรอยเชื่อม รูปทรงสลักแกนหมุนกวนส่วนใหญ่จะมีลักษณะรูปทรงทั่วไปทางเรขาคณิตเป็นพื้นฐานในการออกแบบ (แสดงตามรูปที่ 2-5) แต่ก็มีบางกรณีที่สนใจ และทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของสลักแกนหมุนแบบทรงเรียวผิวเป็นเกลียว (taper cylindrical) โดยมีจำนวนแฉกปลายแกนในลักษณะแบบต่างๆ เปรียบเทียบกัน (แสดงตามรูปที่ 2-6) ซึ่งสลักแกนหมุนที่ดีควรจะให้ผลด้านความแข็งแรง และไม่มีข้อบกพร่องเกิดขึ้นในรอยเชื่อม เพราะสลักแกนหมุนกวนเป็นส่วนที่ต้องแทรกตัวเข้าไปภายในรอยเชื่อม ลักษณะรูปทรงของสลักแกนหมุนกวนที่ต่างกันจะใช้ปริมาณแรงกด และใช้เวลาในการเจาะแทรกเข้าไปในเนื้องานเชื่อมขณะเริ่มต้นต่างกัน นอกจากนี้รูปทรงที่มีความแตกต่างกันทางเรขาคณิต เช่น ทรงกระบอกปลายตัด และทรงกระบอกปลายโค้งมน เมื่อตั้งมุมเอียงของหัวกดเชื่อมไปมากกว่าศูนย์องศา (ไม่เกิน 3 องศา) จะมีระยะจุดสัมผัสต่างกัน (แสดงตามรูปที่ 2-7) เมื่อเทียบจากระนาบผิวหน้างานเชื่อมจะได้ความลึกในการเชื่อมไม่เท่ากัน ดังนั้นความยาวของสลักแกนหมุนกวน จึงขึ้นอยู่กับระยะซึมลึกของรอยเชื่อม (penetration) ซึ่งยังไม่มีมาตรฐานกำหนด ที่ใช้กันโดยทั่วไปจะคำนวณได้จากการปรับมุมเอียงของหัวกด ซึ่งที่ผ่านมามีการศึกษาตัวแปรมุมเอียงของหัวกดตั้งแต่ศูนย์ถึงสามองศา และลักษณะปลายสลักแกนหมุนที่จุดสัมผัส เมื่อเทียบกับชิ้นงานเชื่อมจะให้เหลือระยะซึมลึกประมาณ 0.1 ถึง 0.3 มิลลิเมตร ซึ่งในปัจจุบันนักวิจัยทั่วโลกยังให้ความสนใจกับลักษณะรูปร่างของสลักแกนหมุนกวนและยังมีการศึกษากันต่อไป



รูป 2-5 ลักษณะสลักแกนหมุนกวนแบบพื้นฐาน **[15]**



รูป 2-6 สลักแกนหมุนกวนทรงเรียวผิวเกลียวลักษณะพิเศษ **[14]**



รูป 2-7 การประมาณความยาวของสลักแกนหมุนกวน **[14]**

2.5 ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (steps of the process)

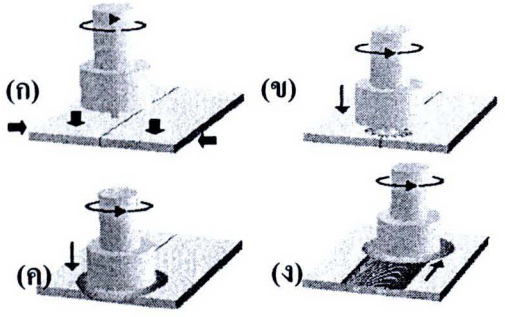
เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีขั้นตอนการเชื่อมแตกต่างไป ลักษณะการเชื่อมเสียดแบบเชิงเส้น และเสียดทานแบบหมุน ทั้งสองแบบมีขั้นตอนการทำงานที่เหมือนกัน โดยเฉพาะการหยุดเคลื่อนที่อย่างฉับพลัน และเพิ่มแรงกดอยู่ทีหลัง แต่ในเทคนิคเสียดทานแบบกวนจะแตกต่างออกไปโดยสิ้นเชิง ซึ่งอธิบายได้เป็นขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่หนึ่ง เป็นขั้นตอนการเริ่มต้น ด้วยการจับยึดแผ่นชิ้นงานเชื่อมด้วยอุปกรณ์จับยึด เพื่อรักษาตำแหน่งชิ้นงานให้อยู่ที่เดิมอย่างมั่นคงขณะทำการเชื่อม โดยปกติจะจับยึดในสามแนวแกน คือ ด้านข้าง ด้านหน้า และด้านบน และปรับมุมเอียงหัวกดเชื่อมไปทางด้านหลัง ($\leq 3^0$) ที่หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ (แสดงตามรูปที่ 2-8 ก)

ขั้นตอนที่สอง เลื่อนหัวกดเชื่อมลงบริเวณกึ่งกลางรอยต่อ จนกระทั่งส่วนปลายของสลักแกนหมุนกวนสัมผัสกับผิวหน้าของชิ้นงาน เพิ่มแรงกดสลักแกนหมุนให้แทรกตัวเข้าไปในชิ้นงานด้วยความร้อนจากการเสียดสี โดยให้ลึกถึงระยะซึมลึก (แสดงตามรูปที่ 2-8 ข)

ขั้นตอนที่สาม บ่าให้ความร้อนจะเสียดทานกับผิวหน้างานเชื่อมจนเกิดความร้อนและแพร่สู่เนื้อวัสดุรอบๆ หัวกดเชื่อมจะสร้างความร้อนจนวัสดุบริเวณนั้น เกิดการอ่อนตัวอยู่ในสภาวะพลาสติก ใช้เวลาประมาณ 15 ถึง 20 วินาที ซึ่งในกรณีใช้เครื่องจักรแบบอัตโนมัติสามารถตั้งเวลาในขั้นตอนที่สองและขั้นตอนที่สามได้ แต่ถ้าเป็นเครื่องจักรแบบกึ่งอัตโนมัติ สามารถควบคุมขั้นตอนการเชื่อมได้จากการสังเกตบริเวณรอบๆ หัวกดเชื่อมถ้าปรากฏวัสดุปริเยิ้มออกรอบๆ หัวกดเชื่อมแสดงว่าเริ่มเข้าสู่ขั้นตอนที่สี่ได้ทันที (แสดงตามรูปที่ 2-8 ค)

ขั้นตอนที่สี่ เป็นขั้นตอนการสร้างรอยเชื่อมหรือทำการเชื่อม โดยการเคลื่อนที่ของชิ้นงานหรือหัวกดเชื่อมไปตามรอยต่อจากจุดเริ่มต้น ด้วยความร้อนจากบ่าของหัวกดเชื่อมและกวนเนื้อวัสดุภายในด้วยสลักแกนหมุนกวนให้ประสานเชื่อมติดกันด้วยอัตราเร็วคงที่ จนถึงจุดสิ้นสุดการเชื่อม (แสดงตามรูปที่ 2-8 ง)



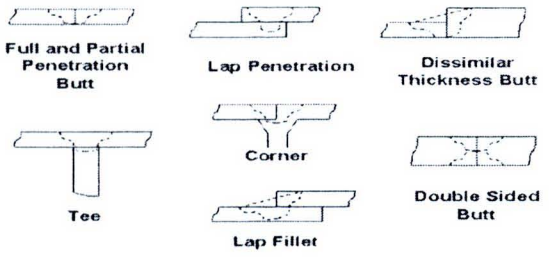
รูป 2-8 ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน **[4]**

2.6 รอยต่องานเชื่อมเสียดทานแบบกวน (joint design)

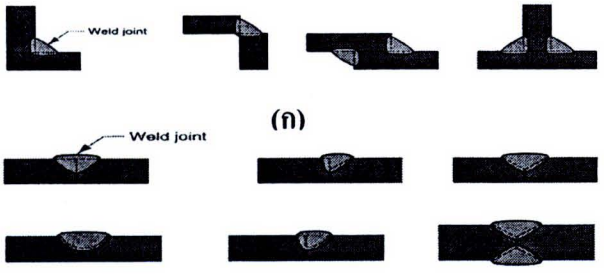
ในการเชื่อมแบบหลอมละลาย โดยทั่วไปก่อนการเชื่อมจะมีการเตรียมรอยต่อห้าแบบ ได้แก่ แบบรอยต่อชน (Butt Joint) แบบรอยต่อเกย (Lap Joint) แบบรอยต่อมุม (Conner Joint) แบบรอยต่อขอบ (Edge Joint) และแบบรอยต่อตัวที (Tee Joint) ในการเชื่อมเสียดทานแบบหมุนกวน สามารถทำการเชื่อมได้เหมือนการเชื่อมแบบหลอมละลายได้ทุกแบบรอยต่อ แม้แต่ชิ้นงานที่มีความหนาต่างกัน (แสดงตามรูปที่ 2-9) และในเครื่องจักรสมัยใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้น การเชื่อมเสียดทานแบบกวนยังสามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม โดยเฉพาะงานที่มีลักษณะเหมือนกันจำนวนมากๆ สิ่งสำคัญอยู่ที่การจับยึดชิ้นงานได้อย่างมั่นคงเท่านั้นก็สามารถทำการเชื่อมงานนั้นได้ยกเว้นการเชื่อมกับรอยต่อแบบฟิลเลท (fillet) ที่ไม่สามารถทำได้ (แสดงรอยต่อตามรูปที่ 2-10 ก)

การเชื่อมแบบต่อชนด้วยเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ถือเป็นการเชื่อมพื้นฐานโดยทั่วไป แต่ที่น่าสนใจเพราะไม่มีการเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อมแบบหลอมละลายทั่วไป (แสดงตามรูปที่ 2-10 ข) ที่ต้องเลือกวิธีบากผิวหน้างานก่อนทำการเชื่อมจากหกวิธีหรือ บากหน้าตามแบบงานที่กำหนด ถ้าวัสดุชิ้นงานนั้นมีความหนามากกว่าหนึ่งเท่าของลวดเชื่อม ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าการเตรียมรอยต่อต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายเท่าๆ กับการเชื่อม แต่การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะไม่มีการเตรียมรอยต่อก่อนการเชื่อม นั้นหมายความว่าสามารถลดเวลาและค่าใช้ จ่ายได้จากการเชื่อมที่ไม่มีการเตรียมงานก่อนการเชื่อม

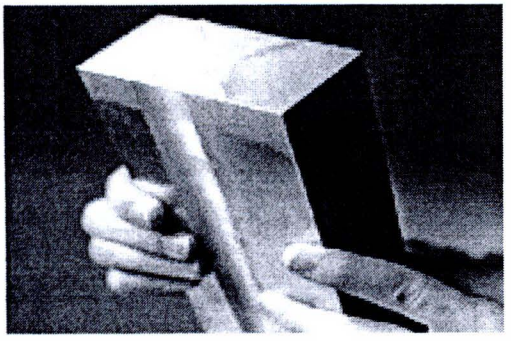
ปัจจุบันเครื่องจักรที่มีการออกแบบขึ้นใหม่ๆ มีความสามารถ เชื่อมด้วยเทคนิคเสียดทานแบบกวน แบบต่อชน ในกลุ่มอะลูมิเนียมผสม โดยการเชื่อมด้านเดียว (single pass butt joints) ได้ความหนามากกว่า 1.2 ถึง 50 มิลลิเมตร และเชื่อมสองด้าน (two passes) ที่ความหนามากกว่า 100 มิลลิเมตร (แสดงตามรูปที่ 2-11) ในการเชื่อมแบบต่อชนด้วยเทคนิคเสียดทานแบบกวนยังสามารถออกแบบเครื่องจักรประยุกต์ใช้งานตามลักษณะงาน ได้แก่ การต่อชนระบบสองมิติ และต่อชนระบบสามมิติ เป็นต้น



รูป 2-9 ลักษณะรอยต่อการเชื่อมเสียดทานแบบกวน **[16]**



รูป 2-10 ลักษณะรอยต่อการเชื่อมแบบหลอมละลาย **[17]**



รูป 2-11 ตัวอย่างงานเชื่อมแบบต่อชนสองด้าน **[18]**

2.7 ข้อดีและข้อเสียของเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [19][20]

เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน นอกจากจะพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาในการเชื่อมโลหะกลุ่มอะลูมิเนียมอัลลอย โดยเฉพาะอะลูมิเนียมกลุ่ม 2000 และกลุ่ม 7000 ซึ่งเชื่อมแบบหลอมละลายได้ยากให้สามารถเชื่อมด้วยเทคนิคนี้ได้ก็ถือว่ามีข้อดีอย่างมาก แต่ยังประยุกต์ให้สามารถเชื่อมได้กับโลหะนอกกลุ่มเหล็กอย่างอื่นหรือกลุ่มเหล็กได้อีก และยังเป็นเทคนิคที่สามารถพัฒนาให้เป็นระบบอัตโนมัติได้ในลักษณะต่างๆ ได้ไม่จำกัด ซึ่งสรุปเป็นข้อดี และข้อจำกัดของเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ดังนี้

2.7.1 ข้อดีของการเชื่อมเสียทานแบบกวน

1) เกิดการเสียรูปต่ำ จากการเชื่อมแนวยาว
2) ให้สมบัติเชิงกลดี ในด้าน ความต้านทานแรงดึง การดัดงอ ความล้าตัวของวัสดุ
3) ไม่ใช้ลวดเชื่อมเติมในระหว่างเชื่อม
4) ไม่ต้องใช้ก๊าซคลุมระหว่างทำการเชื่อมอะลูมิเนียม
5) ไม่เกิดการอาร์ค จึงไม่มีควันและรังสีใดๆ
6) ภายหลังการเชื่อมไม่ต้องมีการตกแต่งผิวรอยเชื่อม
7) ไม่เกิดรูพรุน (porosity) ภายในรอยเชื่อม
8) ไม่มีสะเก็ดเม็ดโลหะ (spatter) ระหว่างการเชื่อม
9) ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูง และสามารถทำการเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม
10) ฟิล์มออกไซด์บนผิวงานเชื่อมไม่เป็นอุปสรรค์ต่อการเชื่อม
11) ไม่สิ้นเปลื้องเครื่องมือ หัวกดเชื่อมหนึ่งอันสามารถเชื่อมได้มากกว่า 1,000 เมตร

2.7.2 ข้อเสียของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

1) ต้องมีแผ่นรองหลังงานเชื่อมและการจับยึดชิ้นงานที่แข็งแรงและรวดเร็ว
2) การเชื่อมในท่าเชื่อมต่างๆ ต้องใช้อุปกรณ์จับยึดที่มีลักษณะเฉพาะชิ้นงานนั้นๆ
3) ลงทุนเครื่องจักรครั้งแรกมีราคาสูง
4) ไม่สามารถเชื่อมรอยต่อแบบฟิลเลท (fillet welds) และงานที่ซับซ้อนได้
5) ชิ้นงานต้องมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่จับยึด ของเครื่องจักรที่จะทำการเชื่อม
6) เกิดรูที่ปลายรอยเชื่อมหลังจากสิ้นสุดการเชื่อมเสมอ

2.8 เหล็กกล้า (Steels) **[21][22]**

หัวกดเชื่อมเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ซึ่งการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมสามารถสร้างหัวกดเชื่อมจากวัสดุจำพวกโลหะเหล็กได้ เหล็กกล้า คือ โลหะผสมเหล็กกับคาร์บอน (Carbon: C) และมีธาตุอื่นผสมบ้าง จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เนื่องจากความสามารถในการดัดแปลงสมบัติทางกล ได้อย่างกว้างขวางหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่ผสม ซึ่งในเหล็กกล้าโดยปกติจะมีปริมาณน้อยกว่า 1.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก (wt%) จึงมีการแบ่งเหล็กกล้าเป็นกลุ่มหลักใหญ่ๆ ตามปริมาณคาร์บอนที่ผสมและนอกจากนี้แล้ว ในแต่ละกลุ่มยังแบ่ง เป็นกลุ่มเหล็กย่อยตามส่วนผสมธาตุอื่นที่มีปริมาณสูงๆ ได้แก่

2.8.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (low carbon steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีคุณสมบัติเด่น คือ มีความเหนียวและอ่อนตัวสูง ความแข็งแรงน้อย จึงสามารถนำมาแปรรูปเย็น โดยกระบวนการรีดหรือดึงรีดเป็นเหล็กรูปพรรณต่างๆ ส่วนใหญ่จะใช้เป็นวัสดุในอุตสาหกรรมก่อสร้างและอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งเหล็กรูปพรรณเหล่านี้สามารถนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องมือกลและการเชื่อมได้ดีมาก มีปริมาณการผลิตขึ้นใช้งานมากกว่าและมีราคาถูกกว่าเหล็กกล้าในกลุ่มอื่นๆ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำไม่สามารถทำให้แข็งขึ้น โดยกรรมวิธีทางความร้อนได้แต่สามารถเพิ่มความแข็งได้โดยการรีดเย็น

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ยังแยกกลุ่มออกมาตามธาตุที่ผสม ให้เป็นเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High-Strength Low Alloy: HSLA) ซึ่งธาตุที่ผสมจะมีความเข้มข้นโดยรวมไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้สมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น มีคุณสมบัติที่พิเศษขึ้น สามารถเพิ่มความแข็งโดยกรรมวิธีทางความร้อนได้ ต้านทานการกัดกร่อนได้ดีขึ้น จึงใช้กับงานลักษณะพิเศษกว่า เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแบบธรรมดา เช่น โครงสร้างหอสูง โครงสร้างสะพาน และภาชนะทนความดัน เป็นต้น

2.8.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (medium carbon steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.25-0.60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงความแข็งโดยผ่านกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่ต้องอบคืนตัว (tempering) ก่อนนำไปใช้งานความสามารถในการชุบแข็งต่ำ (heat treatment) ดังนั้นการชุบแข็งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงต่อเมื่อมีอัตราการเย็นตัวสูง ลักษณะงานที่เหมาะสมจึงมีขนาดความหนาไม่มากนัก เนื่องจากธาตุผสมบางอย่างในเหล็กกลุ่มนี้ช่วยเพิ่มความสามารถในการอบชุบได้ความแข็งแรงมากกว่ากลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่ความแกร่งและความเหนียวจะลดน้อยลง จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุที่ต้องการคุณสมบัติผสมผสานระหว่างความแข็งแรงกับความเหนียวหลายแบบ เช่น ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของเครื่องจักรกล ได้แก่ เพลาส่งกำลัง เฟือง รางรถไฟ สลักเกลียว ค้อน เป็นต้น

2.8.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (high carbon steel) เป็นเหล็กกล้ากลุ่มที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.60 – 1.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้งานได้หลังจากการชุบแข็งแล้วอบคืนตัว มีสมบัติด้านความเหนียวต่ำกว่าเหล็กกล้ากลุ่มอื่นๆ แต่ให้ความแข็งแรงมากกว่า เนื่องจากธาตุที่ผสมสูงในเหล็กกล้าจะร่วมตัวกับคาร์บอน กลายเป็นสารประกอบคาร์ไบด์อยู่ตามขอบเกรน เช่น โครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) เหล็กกลุ่มนี้ให้สมบัติทางกลที่เด่นชัด คือ มีค่าความแข็งสูงมากและทนทานต่อการสึกหรอดีกว่าเหล็กกล้ากลุ่มอื่นๆ ซึ่งเรียกกันทั่วไปว่าเหล็กกล้าเครื่องมือ

เหล็กกล้าเครื่องมือ ส่วนใหญ่จะใช้สำหรับเป็นวัสดุตัดเฉือน หรือเรียกกันโดยทั่วไปว่า เหล็กเครื่องมือ เป็นกลุ่มเหล็กกล้าที่มีความหลากหลายตามลักษณะการใช้งาน ดังนั้นการเลือกใช้จึงไม่จำกัดที่จะต้องเลือกเกรดใดเกรดหนึ่ง แต่สามารถใช้งานแทนกันได้ มีการแบ่งเหล็กกล้าเครื่องมือตามลักษณะการนำไปใช้งานเป็นประเภทต่างๆ ได้หกประเภท ได้แก่ เหล็กกล้าเครื่องมือชุบแข็งด้วยน้ำ เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน เหล็กกล้าเครื่องมือทนต่อแรงกระแทก เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วรอบสูง และเหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับทำแม่พิมพ์งานพลาสติก

2.8.4 กลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (cold work tool steels) เป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนและธาตุผสมอื่นๆ ในปริมาณที่สูง มีความสามารถในการชุบแข็งได้ดีมากโดยการสร้างคาร์ไบด์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้มีความต้านทานการสึกหรอสูง หลังการอบชุบ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อย จึงมีความเหมาะสมในการใช้งานที่ไม่มีความร้อน เช่น ใบมีด เครื่องมือตัดงานไม้ แม่พิมพ์ปั๊มตัดโลหะแผ่น ฯลฯ ซึ่งจะมีระบบมาตรฐานในการบ่งบอกชนิดเกรดเหล็กตามส่วนผสมทางเคมีและลักษณะการใช้งาน ในระบบมาตรฐาน ของสมาคมเหล็กและเหล็กกล้าแห่งอเมริกา (The American Iron and Steel Institute: AISI) ใช้ตัวอักษรเป็นสัญลักษณ์ (แสดงตามตารางที่ 2-4) ซึ่งมีความหมายการแยกกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นตามลักษณะการใช้งานและกรรมวิธีการอบชุบได้อีกหลายประเภทดังนี้ (แสดงในภาคผนวก ก)

ตาราง 2-4 สัญลักษณ์เหล็กกล้าเครื่องมือตามระบบ AISI [22]

สัญลักษณ์	ความหมาย
W	เหล็กกล้าเครื่องมือที่ชุบแข็งด้วยน้ำ
S	เหล็กกล้าเครื่องมือทนแรงกระแทก
O	เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นที่ชุบแข็งด้วยน้ำมัน
A	เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นที่ชุบแข็งด้วยลม
D	เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นผสมโครเมียมและคาร์บอนสูง
P	เหล็กทำแม่พิมพ์
H	เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน
T	เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง ผสมสูงทังสเตน
M	เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วรอบสูง ผสมสูงโมลิบดีนัม

ก. ประเภทชุบด้วยน้ำมัน เป็นกลุ่มที่มีธาตุโครเมียม โมลิบดินั่ม และทังสเตน ผสมต่ำ จึงสามารถชุบแข็งด้วยน้ำมัน จึงมีคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอและมีความแข็งสูง ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณคาร์บอนสูงและคาร์ไบด์ขนาดเล็กอยู่อย่างกระจัดกระจาย ซึ่งมีข้อดีกว่าเหล็กเครื่องมือชุบแข็งด้วยน้ำ เพราะการชุบด้วยน้ำมันจะทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดตัวและมีโอกาสแตกได้น้อยกว่าการชุบแข็งด้วยน้ำ เกรดที่ได้รับความนิยมนำมาใช้งานกันมาก คือเกรด O1 เนื่องจากสามารถชุบแข็งได้ดีและที่อุณหภูมิสูงเกรนยังขยายตัวได้ช้า อีกทั้งได้ความเหนียวมากกว่าเกรดอื่นๆ เล็กน้อย

การใช้งานของเหล็กเครื่องมืองานเย็นกลุ่มนี้ ได้แก่ ดอกเจาะ (Drills) ดอกคว้านรูเรียบ (Reamers) ดอกตัดเกลียว (Taps) ใบตัด (Circular Cutters) ปั๊มตัดเจาะ (Blanking Dies) แม่พิมพ์ปั๊มตัด (Punches) แม่พิมพ์ขึ้นรูป (Forming Dies) งานปั๊มตัดขอบเย็น (Cold-Trimming Dies) ใบมีดตัดขนาดเล็ก (Small Shear Blades) แม่พิมพ์งานดึงขึ้นรูป (Drawing Dies) ตลอดจนงานสร้างแม่พิมพ์สำหรับยางหรือพลาสติก เป็นต้น

ส่วนเหล็กเครื่องมือเกรด O6 สามารถกลึงไสได้ในสภาพการอบอ่อนดี เนื่องจากมีการฟอร์มตัวของเกล็ดกราไฟต์ แต่ที่อุณหภูมิสูงการรักษาความแข็งไว้ได้ไม่ดี เมื่อเทียบกับเหล็กเครื่องมือชุบแข็งด้วยน้ำ สำหรับงานที่ต้องการอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นอาจใช้เกรด O7 ซึ่งมีคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอสูงที่สุดกลุ่มนี้

ข. ประเภทชุบด้วยลม เกรดเหล็กที่ได้รับความนิยมนำมาใช้งานกันมาก ได้แก่ เกรด A2 เป็นกลุ่มที่มีธาตุผสมสูงกว่ากลุ่มที่ชุบแข็งด้วยน้ำมัน โดยมีปริมาณคาร์บอนสูงและธาตุผสมสูงปานกลาง การชุบแข็งด้วยลม ก็เพียงพอที่จะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ อัตราการเย็นตัวที่ต่ำ ทำให้ลดโอกาสที่ชิ้นงานจะแตกหรือเกิดการบิดเบี้ยว มีคุณสมบัติการชุบที่ดีเยี่ยม คือ ไม่เปลี่ยนรูปร่างหรือขนาดจากความร้อนในระหว่างการอบชุบ ส่วนปริมาณคาร์ไบด์จำนวนมากทำให้มีคุณสมบัติที่ทนต่อการเสียดสีได้ดี ถึงแม้ว่าจะมีธาตุผสมที่สูง แต่ก็ยังรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงได้ไม่เพียงพอที่จะใช้กับงานร้อนหรืองานตัดความเร็วสูงได้ เหล็กกลุ่มนี้จึงเหมาะกับงานในกลุ่มงานเย็น

เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ สามารถใช้งานได้เช่นเดียวกับกลุ่มที่ชุบด้วยน้ำมันแต่ให้คุณสมบัติที่ดีกว่า คือ ในการชุบแข็งจะเกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานที่น้อยกว่า มีความปลอดภัยใน ขณะปฏิบัติมากกว่า สำหรับเกรดอื่นที่มีการใช้งานอยู่บ้างจะมีกราไฟต์อิสระในโครงสร้าง เพื่อช่วยให้สามารถ ทำการกลึงและการไสง่ายขึ้น ได้แก่ A6 A8 และ A10

ค. ประเภทคาร์บอนสูงและโครเมียมสูง เป็นกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นที่มีธาตุคาร์บอน โครเมียม และโมลิบดินั่ม ในเปอร์เซ็นต์สูงเป็นที่นิยมใช้งานกันมาก เพราะมีคุณสมบัติเด่นที่ทนต่อการสึกหรอและการเสียดสีที่ดีเยี่ยมรักษาคมตัดได้ยาวนาน เนื่องจากมีปริมาณสารประกอบคาร์ไบด์สูงหลังจากชุบแข็ง และทำการอบคืนตัวได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) และเมื่อ

เทียบกับเหล็กเครื่องมืองานเย็นในกลุ่มอื่นแล้ว จะมีค่าความเหนียวน้อยลง ทำให้การนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องมือกล เช่นการกลึง การไส ยากขึ้น

เหล็กเครื่องมืองานเย็นกลุ่มนี้อยู่ในเกรด D2 ซึ่งนิยมใช้งานกันมากโดยทั่วไป เนื่องจากสามารถใช้งานได้ครอบคลุมกว่า เหมาะกับงานทำชิ้นส่วนต่างๆ ที่ทนต่อการสึกหรอ ส่วนมากใช้สำหรับงานแม่พิมพ์ และหัวกดงานขึ้นรูปเย็นงานเจาะรู (Blanking) เช่น งานแม่พิมพ์เจาะรู แม่พิมพ์ขึ้นรูปแม่พิมพ์ดึงลวด (Wire-Drawing Dies) แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น (Cold-Extrusion Dies) ลูกรีดงานดัดโค้งและงานขึ้นรูป (Bending And Forming Rolls) ใบมีด (Shear Blades) เป็นต้น สำหรับงานที่ต้องการอายุใช้งานยาวนานขึ้นสามารถเลือกเหล็กเครื่อง มือ องานเย็น เกรดที่มีคาร์บอนสูงๆ ที่มีความต้านทานการสึกหรอได้สูงกว่าเกรด D2 ได้แก่เกรด D3 D4และเกรด D7 แต่ความสามารถในการกลึงและการไส ในสภาพอบอบอ่อนจะทำได้ยากยิ่งขึ้น

2.8.5 การเทียบมาตรฐานเหล็กกล้าเครื่องมือ [23][24] ระบบ AISI เป็นมาตรฐานหนึ่งจากหลายมาตรฐานเหล็กกล้าเครื่องมือ ในเชิงการค้าแล้วเหล็กกล้าเครื่องยังมีสัญลักษณ์มาตรฐานอื่นๆ จากประเทศผู้ผลิตต่างๆ อีกมากมายหลายประเทศทั่วโลก ในบางประเทศยังมีสัญลักษณ์มาตรฐานของแต่ละบริษัทผู้ผลิตเหล็กกล้าเครื่องมือนั้นๆ ส่วนเหล็กกล้าเครื่องมือในงานเย็นกลุ่มเดียวกันที่นิยมใช้งานในประเทศไทยได้แก่ เกรด D2 ตามมาตรฐาน AIS Iเกรด SKD11 ตามมาตร ฐานของญี่ปุ่น และ DIN 1.2379 ตามมาตรฐานของเยอรมัน (แสดงตามตารางที่ 2-5) ในการเลือกนำมาใช้งานจริง สามารถเทียบเคียงเกรดเหล็กกล้าเครื่องมือ ในกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นได้ โดยสามารถเทียบเกรดเหล็กได้จากตารางมาตรฐานนานาชาติ **[25]** (แสดงในภาคผนวกที่ ก)

ตาราง 2-5 การเทียบเกรดมาตรฐานเหล็กเครื่องมืองานเย็น **[23]**

มาตรฐาน			ความแข็งที่จำหน่าย	การใช้งาน
DIN	AISI	JIS	HB	
1.2379	D2	SKD11	240	ทนเสียดสีสูง รักษาความคมตัดได้ดี เสียรูปน้อยมากหลังการชุบ ทำลูกรีดโลหะ ใบมีด
1.2510	01	SKS3	210	ทนเสียดสี ชุบแข็งง่าย ทำแม่พิมพ์ตัด
1.2080	D3	SKD1	240	ทนเสียดสีสูง ทำแม่พิมพ์ตัดโลหะบาง

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

2.9 อะลูมิเนียมและโลหะผสมของอะลูมิเนียม [21]

อะลูมิเนียม (Aluminum) จัดอยู่ในกลุ่มโลหะเบาที่มีการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ด้วยคุณลักษณะเด่นของอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าโลหะเหล็กประมาณสามเท่า แต่ให้กำลังวัสดุต่อน้ำหนักที่สูงกว่า มีค่าการนำไฟฟ้าและความร้อนดี ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีในบางสภาวการณ์ มีการสร้างผิวออกไซด์มาเคลือบผิวได้เองหรือนำไปชุบเคลือบผิวให้สวยงามได้หลากหลาย และยังสามารถนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีต่างๆ ได้ง่ายและรุนแรงโดยไม่เกิดการแตกร้าว เนื่องจากมีความเหนียวสูง มีจุดหลอมเหลวต่ำให้อัตราการไหลตัวสูง จึงมีคุณสมบัติที่ดีด้านการหล่อหลอม จากข้อดีหลายประการของอะลูมิเนียม ทำให้มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าวัสดุในกลุ่มเหล็ก

ในระยะแรกๆ ความสามารถในด้านการเชื่อมอะลูมิเนียม ถูกจำกัดอยู่ที่การใช้หมุดย้ำเท่านั้น การเชื่อมต่ออลูมิเนียมเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก เนื่องจากอะลูมิเนียมสร้างฟิล์มออกไซด์ปกคลุมผิวหน้า ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงทำให้การรวมตัวของลวดเชื่อมกับบ่อหลอมยากขึ้น บริเวณรอยเชื่อมจึงเกิดความไม่สมบูรณ์ได้ง่าย และต้องใช้พลังงานสูงในการหลอมละลาย ตลอดจนการเชื่อมยังต้องใช้ช่างฝีมือที่มีทักษะสูง เพราะสีของอะลูมิเนียมที่หลอมละลายจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจึงยากต่อการสังเกต และเมื่อมีการค้นพบเทคนิคการเชื่อมแบบอาร์คไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซเฉื่อยคลุมขณะที่เชื่อม เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาจากออกซิเจน คุณภาพรอยเชื่อมอะลูมิเนียมดีขึ้น การใช้งานจากวัสดุอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมขยายวงกว้างออกไปจากเดิม และด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีสมัยใหม่ อะลูมิเนียมยังเป็นที่สนใจในการศึกษาพัฒนาเครื่องมือเชื่อม ที่ให้ความร้อนด้วยแรงเสียดทาน เพื่อแก้ปัญหาการเชื่อมให้มีคุณภาพสูงขึ้นเรื่อยๆ

2.9.1 การแบ่งเกรดอะลูมิเนียม [26][27] การแบ่งเกรดอะลูมิเนียม โดยทั่วไปมีหลักเกณฑ์การแบ่งเกรดของอะลูมิเนียมอยู่สองประเภท ในประเภทแรกจะแบ่งเกรดตามกรรมวิธีการผลิตมีอยู่สองลักษณะ คือ อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น (Wrought aluminum alloy) อะลูมิเนียมหล่อ (Cast aluminum alloy) ส่วนประเภทที่สอง จะแบ่งเกรดตามส่วนผสมทางเคมี ซึ่งมีอยู่สองลักษณะเช่นกัน คือ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และอะลูมิเนียมผสม

อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น โดยทั่วไปนิยมแบ่งเกรดตามมาตรฐานของอเมริกา ซึ่งกำหนดมาตรฐานโดยสมาคมอะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา (The Aluminum Association of America) ที่ใช้ระบบตัวเลขสี่หลักเป็นสัญลักษณ์ของธาตุผสมทั้งหมดรวมเก้ากลุ่มเริ่มจากกลุ่มที่ขึ้นต้นด้วยตัวเลขหนึ่งเป็นสัญลักษณ์ ถึงกลุ่มสัญลักษณ์ที่ขึ้นต้นด้วยเลขเก้า ซึ่งสามารถจำแนกออกโดยใช้ระบบตัว เลขสี่หลักดังนี้

ก. ตัวเลขหลักที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่สุด ในการแสดงกลุ่มของอะลูมิเนียมผสม ซึ่งมีอยู่ แปด กลุ่ม (แสดงตามตารางที่ 2-6) เช่นกลุ่ม 1XXX เรียกเกรดที่มีอะลูมิเนียมไม่น้อยกว่า 99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นต้น

ข. ตัวเลขหลักที่สอง เป็นสัญลักษณ์ เพื่อใช้สำหรับกำกับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของโลหะให้แตกต่างไปจากโลหะผสมเดิม เช่น ตัวเลขศูนย์ แสดงว่าเป็นโลหะผสมดั้งเดิม ส่วนตัวเลขหนึ่งถึงเก้าแสดงว่าเป็นโลหะที่ผสมให้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมตัวอย่างเช่น สัญลักษณ์กลุ่ม 2024 ตัวเลขหลักที่สอง คือ ศูนย์ (4.5%Cu, 1.5%Mg, 0.5%Si , 0.1%Cr) เมื่อเปรียบเทียบกับสัญลักษณ์กลุ่ม 2218 ตัวเลขหลักที่สองคือ สอง(4.0%Cu, 2.0%Ni, 1.5%Mg, 0.2%Si) ซึ่งจะมีธาตุนิเกิล (Ni) ผสมเข้ามาอีก

ตาราง 2-6 การแบ่งเกรดอะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นตามมาตรฐานอเมริกา **[26]**

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1XXX	อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มากว่า 99.0 %
2XXX	อะลูมิเนียมผสมทองแดง
3XXX	อะลูมิเนียมผสมแมงกานีส
4XXX	อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน
5XXX	อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม
6XXX	อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม และซิลิกอน
7XXX	อะลูมิเนียมผสมสังกะสี
8XXX	ผสมธาตุอื่นๆ
9XXX	ยังไม่มีการกำหนดใช้

ค. ตัวเลขหลักที่สามและสี่ เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงถึง ชนิดย่อยๆ ของธาตุที่ผสมในกลุ่มเดียวกันความแตกต่างที่เกิดขึ้น จะเป็นส่วนผสมที่แตกต่างกัน เช่น สัญลักษณ์กลุ่ม 2014 ตัวเลขหลักที่สามและสี่ คือ 14 (4.4%Cu, 0.8%Si, 0.8%Mn, 0.4%Mg) และ สัญลักษณ์กลุ่ม 2017 ตัวเลขหลักที่สามและสี่คือ 17 (4.0%Cu , 0.8%Si , 0.5%Mn , 0.5%Mg , 0.1%Cr)

เฉพาะอะลูมิเนียมในกลุ่ม 1XXX ตัวเลขหลักที่สามและหลักที่สี่ จะแสดงปริมาณของอะลูมิเนียมที่เป็นจุดทศนิยมสองตำแหน่งที่อยู่หลัง 99% เช่น สัญลักษณ์กลุ่ม 1060 และ สัญลักษณ์กลุ่ม 1080 หมายถึง อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นที่มีอะลูมิเนียม 99.60% และ 99.80% ตามลำดับ

2.9.2 การเพิ่มความแข็งอะลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีทางความร้อน [28] อะลูมิเนียมจำแนกตามส่วนผสมทางเคมีได้หลายกลุ่ม และในแต่ละกลุ่มยังแยกเป็นชนิดย่อยๆ ออกไปอีกมากมาย เพื่อให้การเลือกนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม จึงมีมาตรฐานกำหนดกรรมวิธีทางความร้อนอะลูมิเนียม (Temper Designations of Aluminum Alloys) ซึ่งเป็นกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อต้องการให้อะลูมิเนียมผสมเปลี่ยนแปลงไปในทางที่แข็งแรงขึ้น (heat treatment) จึงกำหนดเป็นมาตรฐานตามมาตรฐาน ASM (American Society of Metals) โดยได้กำหนดมาตรฐานเป็นสัญลักษณ์ตามหลังการจำแนกการแบ่งเกรดกลุ่มตัวเลขสี่หลักขึ้นด้วย เครื่องหมายขีดตามด้วยตัวอักษร เพื่อบ่งบอกมาตร ฐานกำหนดกรรมวิธีทางความร้อน สำหรับปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียมชนิดนั้นๆ ตามความ หมายของสัญลักษณ์ต่างๆ (แสดงในภาคผนวก ข)

อะลูมิเนียมกลุ่มที่สามารถนำไปปรับปรุงสมบัติให้แข็งแรงด้วยกรรมวิธีทางความร้อน ได้คือกลุ่ม 6XXX และกลุ่ม 7XXX อะลูมิเนียมทั้งสองกลุ่มนี้ จึงเรียกกันอีกอย่างหนึ่งว่า เป็นพวกที่ทำกรรมวิธีทางความร้อนได้ (heat treatment alloys) ส่วนอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ปรับปรุงกรรมวิธีทางความร้อนได้แก่อะลูมิเนียมบางเกรดในกลุ่ม 2XXX และ 5XXX ส่วนอะลูมิเนียมในกลุ่มที่เหลือ คือกลุ่ม 1XXX กลุ่ม 3XXX และกลุ่ม 4XXX บางชนิดไม่อาจจะทำการปรับปรุงด้วยกรรมวิธีทางความร้อน ให้สมบัติทางกลมีความแข็งแรงเด่นชัดได้ เรียกว่าไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยการทำกรรมวิธีทางความร้อน (non heat treatment alloys) แต่สามารถทำให้แข็งแรงได้โดยการทำแปรรูปเย็น

2.9.3 อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นกลุ่ม 6XXX [26][7] เป็นกลุ่มที่ผสมแมกนีเซียม (0.6-1.2%) และ ซิลิกอน (0.4-1.3%) ในอะลูมิเนียม จัดอยู่ในกลุ่ม ที่ผ่านการขึ้นรูปมาก่อน ทำให้สามารถทำการปรับปรุงสมบัติทางกล ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนโดยการทำเอจจิ่งและเอจจิ่งเทียม เพื่อเพิ่มความแข็งและความแข็งแรง ในอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน เมื่อนำไปเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมที่ใช้ความร้อนในการหลอมละลาย ผลกระทบจากความร้อนจะทำให้บริเวณรอยเชื่อมอ่อนตัวลง

ความต้านทานการกัดกร่อน (resistance of corrosion) ของอะลูมิเนียมกลุ่มนี้ จะมีความ ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ในสภาพแวดล้อมธรรมชาติและในหลายสภาวะ การนำไปใช้งาน (application) ของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน เป็นวัสดุที่ใช้ในชิ้นส่วนเครื่องจักร ที่ต้องการความแข็งแรง เนื่องจากสามารถทำการเอจจิ่งได้ นอกจากนี้แล้วยังใช้กับชิ้นส่วนเครื่องกลที่ต้องการให้ทนต่อการกัดกร่อนในการใช้งาน เช่น โครงสร้างของเรือ สายไฟฟ้า ที่ต้องการความแข็งแรงสูง สกรูที่ต้องการให้ทนทานต่อการกัดกร่อน

2.9.4 อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอนเกรด 6061-T6 เป็นอะลูมิเนียมทางการค้าที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานลักษณะโครงสร้างที่ต้องการทนต่อการกัดกร่อน เช่น เรือ รถไฟ อาคาร ท่อลำเลียงน้ำมัน ส่วนประกอบในอุตสาหกรรมยานยนต์ อากาศยาน ซึ่งในวัสดุอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 หรือ T651 จะมีปริมาณส่วนผสมทางเคมีและสมบัติอื่นๆ ขึ้นอยู่กับโรงงานผู้ผลิตที่แตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปแล้วตามมาตรฐานของเกรด 6061-T6 มีรายละเอียดส่วนผสมทางด้านเคมี (chemical composition) (แสดงตามตารางที่ 2-7) มีสมบัติทางความร้อน (thermal properties) (แสดงตามตารางที่ 2-8) และมีสมบัติทางกล (mechanical properties) (แสดงตารางที่ 2-9)

ตาราง 2-7 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมAA6061-T6 **[26]**

ธาตุผสม	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%)
ซิลิกอน (Si)	0.40 - 0.80
เหล็ก (Fe)	0.70
ไททาเนียม(Ti)	0.15
ทองแดง (Cu)	0.15 - 0.40
แมกนีเซียม (Mg)	0.80 -1.20
สังกะสี (Zn)	0.25
แมงกานีส (Mn)	0.15
โครเมียม (Cr)	0.04 -0.35
อื่นๆ	0.05

ตาราง 2-8 สมบัติทางความร้อนของอะลูมิเนียมผสมAA6061-T6 **[26]**

คุณสมบัติเฉพาะ	ค่าคงที่
อุณหภูมิหลอมเหลว	652 C^0
อุณหภูมิแข็งตัว	582 C^0
สัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ 20 องศาเซลเซียส	23.6 µm/m.K
ความร้อนจำเพาะ	896 J/kg.K
ความหนาแน่น	2.70 g/cm^3

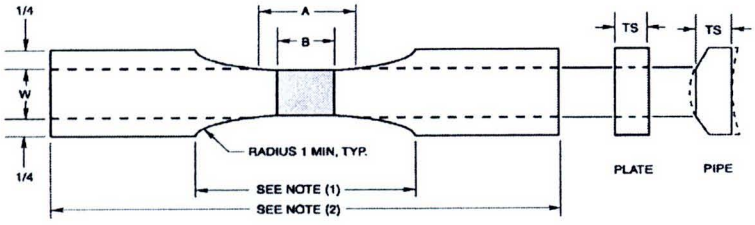
ตาราง 2-9 สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมAA6061-T6 **[29]**

Temper	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Shear Strength (MPa)
0	124	55	25	83
T4 , T451	241	145	22	165
T6 , T651	310	276	12	207

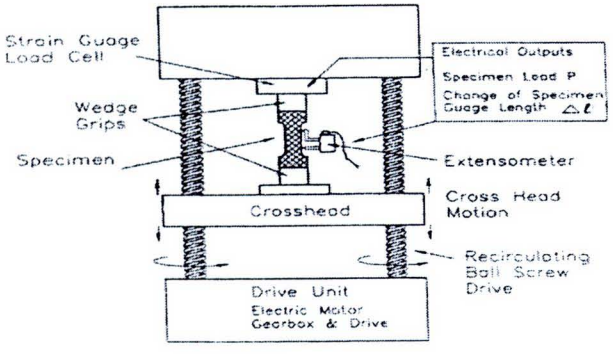
2.10 การทดสอบแรงดึงรอยเชื่อม (Tensile Test) **[21][30][31]**

การทดสอบแรงดึง คือ การให้แรงที่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการผิดรูป แรงดึงทำให้ชิ้นทดสอบมีขนาดความยาวเพิ่มขึ้น เป็นวิธีการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ แบบทำลายสภาพวัสดุ (Destructive Test: DT) เพื่อวิเคราะห์สมบัติเชิงกลที่ต้องการประเมินความแข็งแรง เช่น ความต้าน ทานแรงดึง ความยืดตัว และความเปราะ ซึ่งชิ้นทดสอบนั้นจะมีลักษณะแตกต่างกันออกไป โดยมีการกำหนดเป็นมาตรฐานต่างๆ เช่น มาตรฐานของอเมริกา (American Society of Testing and Materials: ASTM) มาตรฐานของอังกฤษ (British Standards: BS) มาตรฐานของญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standards: JIS) และ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย มอก. นอกจากมีมาตรฐานกำหนดขนาดและรูปร่างแล้ว ความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำต่อชิ้นทดสอบก็จะถูกกำหนดตามมาตรฐาน เพื่อให้ผลลัพธ์มีความเชื่อถือได้ ชิ้นทดสอบแรงดึงจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามรูปพรรณภาคตัดของวัสดุได้แก่ ลักษณะกลม แท่ง แผ่น และท่อ ตัวอย่าง เช่น การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงรอยเชื่อม ที่กำหนดมาตรฐานงานเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยด้วยเทคนิคการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ตามมาตรฐานของอเมริกา AWS D17.3/D17.3M:200X (American Welding Society) (แสดงตามรูปที่ 2-12)

ในการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานจะถูกจับยึดปลายทั้งสองด้าน โดยทั่วไปปลายจับทั้งสองด้านจะไม่มีกำหนดตามมาตรฐาน แต่ให้มีความยาวที่เหมาะสมกับเครื่องมือนั้นๆ โดยให้จับยึดได้สองในสามส่วนของความยาวทั้งสองด้าน ด้วยปากจับ (grips) ของเครื่องมือทดสอบแรงดึง (แสดงตามรูปที่ 2-13) หลังจากนั้นจะเพิ่มแรงดึงให้แก่ชิ้นทดสอบ ด้วยอัตราเร็วคงที่ เพื่อดึงให้ยืดออกจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกันในที่สุดด้วยช่วงเวลาสั้นๆ เช่น ดึงด้วยความเร็ว 1.0 มิลลิเมตรต่อนาที พร้อมกับวัดขนาดของแรงดึงกระทำต่อชิ้นทดสอบ (load cell) และการยืดตัวที่เกิดขึ้นขณะที่ทำการทดสอบ ผลลัพธ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับขีดความสามารถของเครื่องมือที่ออกแบบผลิตขึ้น



รูป 2-12 ชิ้นทดสอบรอยเชื่อมตามมาตรฐาน AWS D17.3/D17.3M:200X **[32]**



รูป 2-13 เครื่องมือทดสอบความเค้น-ความเครียดในรูปแบบแรงดึง **[33]**

ผลลัพธ์จากการทดสอบด้านแรงดึง ก็คือความเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำ (load) กับระยะความยาวที่ยืดออก (elongation) ที่เกิดขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะที่ยืดออกนี้ จะขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นทดสอบ เช่น ต้องใช้แรงดึงมากขึ้นสองเท่า เพื่อทำให้ชิ้นทดสอบที่มีขนาดหน้าตัดใหญ่ขึ้นเป็นสองเท่า แต่ยืดออกด้วยระยะที่เท่ากัน เพื่อเป็นการลดปัจจัยทางด้านขนาดเหล่านี้ออก แรงและระยะยืดจึงถูกแปลงรูปให้เป็น ความเค้นทางวิศวกรรมและความเครียดทางวิศวกรรมตามลำดับดังนี้

ค่าความเค้นทางวิศวกรรม (σ) ถูกนิยามจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3)

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{.....(3)}$$

โดยที่ F คือแรงกระทำซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับหน้าตัดชิ้นทดสอบมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) หรือปอนด์แรง (lb_f) และ A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นทดสอบก่อนที่จะถูกแรงกระทำมีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2) หรือ ตารางนิ้ว (in^2) หน่วยของความเค้นทางวิศวกรรม (ต่อไปจะเรียกว่าความเค้น) ในระบบเอสไอ (SI Unit) มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (1MPa มีค่าเท่ากับ $10^6 N/m^2$) ดังนั้น ความเค้นดึง (tensile stress) คืออัตราส่วนของแรงดึงที่ตั้งฉากกับผิว (F) ต่อพื้นที่ภาคตัดขวาง (A) ซึ่งมีผลทำให้ชิ้นทดสอบยาวขึ้น **[34]**

ความเครียดทางวิศวกรรม (ε) นิยามตามสมการที่ (4)

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{.....(4)}$$

โดยที่ l_0 คือความยาวเดิมก่ อนที่ถูกแรงกระทำ และ li คือความยาวที่เปลี่ยนไป ในหลายกรณี l_0-li กำหนดให้เป็น Δl ซึ่งคือช่วงความยาวที่เปลี่ยนไป หรือระยะที่ชิ้นทดสอบยืดออก ความเครียดทางวิศวกรรม (ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า ความเครียด) เป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย แต่ในทางปฏิบัติมักให้หน่วยเป็นเมตรต่อเมตร (m/m) หรือนิ้วต่อนิ้ว (in/in) หรือระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ความเครียด (percent strain) หรือเปอร์เซ็นต์ความยืด (percent elongation) ดังนั้น ความเครียดดึง (tensile strain) คือ อัตราส่วนของความยาวที่เพิ่มขึ้น (Δl) ต่อความยาวเดิม (li) ชิ้นทดสอบ **[34]**

ข้อมูลที่ได้จะขึ้นอยู่กับขีดความสามารถของเครื่องมือทดสอบ ซึ่งสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (แสดงตามรูปที่ 2-14) เส้นกราฟที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ การวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติเชิงกลของวัสดุ ค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) จะทำให้ทราบถึงสมบัติด้านต่าง ดังต่อไปนี้

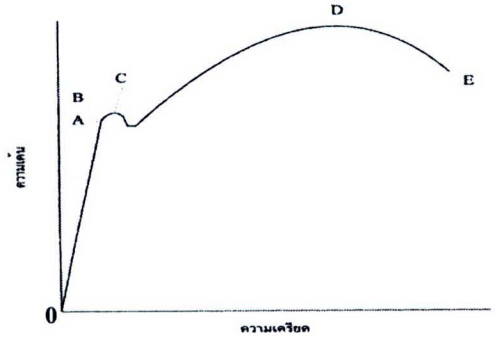
2.10.1 มอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ในการทดสอบแรงดึง (ตามรูปที่ 2-14) เป็นช่วงแรกที่ให้แรงดึงแก่วัสดุ (เส้นตรง 0-A) การเปลี่ยนรูปจะเป็นไปในลักษณะยืดหยุ่น คือ เมื่อให้แรงดึงวัสดุจะยืดออกด้วยความเร็วคงที่จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด0-A) ช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น- ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้ได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้ เรียกว่าพิกัดสัดส่วน (proportional limit) และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบ อิลาสติก (elastic behavior) เมื่อหยุดให้แรงกระทำวัสดุจะหดกลับคืนสู่ความยาวเดิม หรือมีขนาดเท่าเดิม (elastic deformation) ซึ่งสามารถอธิบายด้วยกฎของฮุก (Hook's law) ตามสมการที่ (5)

$$\sigma = \mathrm{E}\varepsilon \quad \text{.....(5)}$$

โดยที่ E คือค่าสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ซึ่งเป็นความแข็งแกร่งของวัสดุ ที่แสดงถึงความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปชั่วคราวขณะได้รับแรงดึง หรือค่า Young's modulus ตามสมการที่ (6)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta l}{l_o}} \quad \text{.....(6)}$$

โดยที่ E คือมอดูลัสของยัง σ คืออัตราส่วนของความเค้นตามยาว ε คือความเครียดตามยาว มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร(N/m^2) ดังนั้นวัสดุที่มีค่ามอดูลัสของยังมาก แสดงว่าวัสดุนั้นมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความยาว หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ วัสดุนั้นมีการเปลี่ยน แปลงความยาวได้น้อยในขณะที่มีความเค้นมาก



รูป 2-14 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด **[35]**

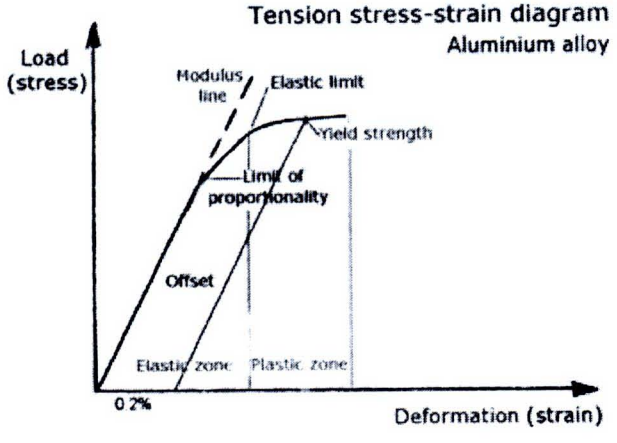
สมบัติการยืดหยุ่นของวัสดุ เป็นความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมของวัสดุ ซึ่งถ้าค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุมากจะทำให้วัสดุมีสมบัติด้านความแข็งมากว่าทนต่อแรงภายนอกได้มาก ทำให้ผิดรูปหรือดัดให้งอได้ยาก (แสดงตามตารางที่ 2-10) ตัวอย่าง เช่น เหล็กกล้ามีค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น $200x10^3$ MPa ส่วนอะลูมิเนียมมีค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น $70x10^3$ MPa อะลูมิเนียมจึงดัดงอ ได้ดีกว่าวัสดุเหล็ก เนื่องจากมีค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นน้อยกว่าเหล็กหรือมีความเหนียวมากกว่าเหล็กนั้นเอง

2.10.2 ความเค้นจุดคราก (Yield strength) เป็นค่าความแข็งแรงของวัสดุที่จะเปลี่ยนรูปเกิดขึ้นอย่างถาวร (Stress-Strain Curve) คือ เมื่อให้แรงวัสดุจะยืดออกมากกว่าช่วงที่วัสดุยืดหยุ่นได้ (จุด B-C จากรูปที่ 2-14) และเมื่อหยุดให้แรงกระทำต่อวัสดุแรงดึง วัสดุนั้นจะไม่สามารถกลับเข้าสู่ความยาวเดิมได้ ในการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรม จึงเลือกเอาค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก เพื่ อให้มั่นใจว่าจะเกิดการรับแรงเพียงแค่การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นเท่านั้น ซึ่ งในวัสดุที่เป็นโลหะพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นไปสู่การเปลี่ยนรูปแบบถาวร จะมีลักษณะอย่างค่อยเป็นค่อยไปอาจถือได้ว่าจุดที่เกิดการคราก คือจุดที่กราฟความเค้นความเครียดเริ่มที่จะเบี่ยงเบนไปจาก

เส้นตรง (แสดงตามรูปที่ 2-15) เรียกจุดนี้ว่าขีดจำกัดการแปรผันตรง (limit of proportionality) โดยทั่วไปแล้วการพิจารณาหาจุดครากดังกล่าวอาจจะทำได้ยาก เนื่องจากไม่มีจุดสิ้นสุดที่แน่นอน แสดงถึงช่วงยืดหยุ่น (elastic strain) และจุดเริ่มต้น (plastic-strain curve) ดั้งนั้นจึงมีการตกลงให้ใช้วิธีลากเส้นตรงขนานกับกราฟ ที่เป็นเส้นตรงลากจากแกนนอนที่มีค่าความเครียด เท่ากับ 0.1 ถึง 0.2 เปอร์เซ็นต์ แต่มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างในอเมริกากำหนดให้ใช้ 0.2 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเค้นที่จุดตัดระหว่างกราฟกับเส้นตรงที่ลากขึ้นไปจะตัดกันในบริเวณที่เกิดการแปรรูปอย่างถาวรไปแล้วเรียกว่า ความเค้นจุดคราก σ_y ความเค้นที่ 0.2% (offset yield strength) ที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (proof stress)

ตาราง 2-10 ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ **[21]**

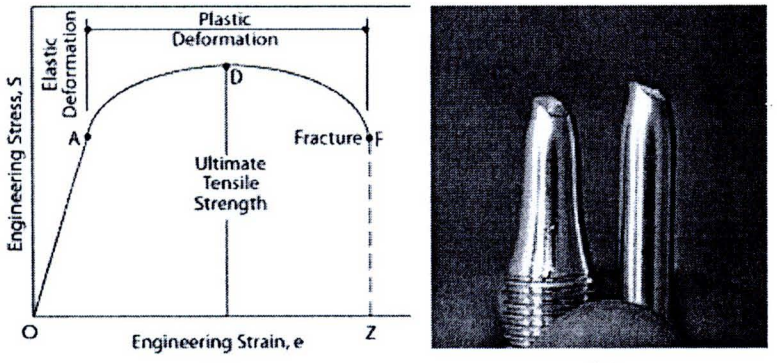
วัสดุ	มอดูลัสของความยืดหยุ่น	
	GPa	**10^6 psi**
อะลูมิเนียม	69	10
ทองเหลือง	97	14
ทองแดง	110	16
แมกนีเซียม	45	6.5
นิเกิล	207	30
เหล็กกล้า	207	30
ไทเทเนียม	107	15.5
ทังสเตน	407	59



รูป 2-15 กราฟแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปวัสดุในโลหะ **[36]**

2.10.3 ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) เป็นการเปลี่ยนรูปถาวรหลัง จากเกิดการครากตัว ความเค้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดสูงสุด (แสดงตามรูปที่ 2-16 ก) ที่บริเวณจุดดี (D) ของกราฟ จากนั้นความเค้นจะลดลงจนถึงจุดที่ชิ้นทดสอบจะขาดออกจากกัน ที่จุดเอฟ (F) ค่าความต้านทานแรงดึง คือค่าความเค้นที่จุดสูงสุดค่านี้ คือความเค้นสูงสุดเท่าที่โครงสร้างของวัสดุหนึ่งๆ สามารถที่จะทนรับได้นั้นเอง และเมื่อมีความเค้นเกิดขึ้นต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ในที่สุดชิ้นทดสอบแรงดึงก็จะแตกหักออกจากกัน เมื่อการเปลี่ยนรูปถาวรเกิดต่อเนื่องถึงจุดความเค้นสูงสุดนี้ พื้นที่ภาคตัดของชิ้นทดสอบจะเริ่มเกิดคอคอดขึ้น (neck) การเปลี่ยนรูปอย่างถาวรจะถูกจำกัดให้เกิด ขึ้นเฉพาะบริเวณคอคอดเป็นหลัก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์คอดตัว (necking) สุดท้ายจะเกิดการแตกหักของชิ้นทดสอบที่บริเวณคอคอด (แสดงตามรูปที่ 2-16 ข) ค่าความเค้นที่จุดแตกหักนี้เรียกว่า ความเค้นประลัย (fracture strength) นั้นเอง

ความแข็งแรงของวัสดุที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ถ้าเป็นค่าความเค้นแรงดึงที่ใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรม มักหมายถึงค่าความเค้นที่จุดคราก ซึ่งการรับแรงของวัสดุจะอยู่ในช่วงยืดหยุ่น หากเลือกใช้ค่าความเค้นในจุดความเค้นสูงสุด โดยเฉพาะกลุ่มวัสดุโลหะอ่อน แรงที่กระทำต่อวัสดุจนเกิดการแปรรูปถาวรไปในปริมาณที่สูง ความปลอดภัยในการใช้ก็จะมีน้อย ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมักถูกใช้กรณีศึกษาวิจัยมากกว่า เช่น การทดสอบค่าความแข็งแรงในรอยเชื่อม ซึ่งสามารถที่จะบงชี้ถึงความไม่สมบูรณ์ภายในรอยเชื่อม หากมีความไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นภายในค่าความเค้นต้านทานแรงดึงสูงสุดย่อมลดลงกว่าปกติ เป็นต้น ส่วนค่าความเค้นประลัย มักไม่มีผลในการใช้งานเพื่อการออกแบบทางวิศวกรรม แต่ในกรณีศึกษาทางโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจะนำมาวิเคราะห์การหักขาด ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงลักษณะการหักขาดของชิ้นทดสอบ จะเป็นกรณีการหักขาดแบบเหนียว หรือการหักขาดแบบเปราะ ของวัสดุนั้นๆได้



(ก) (ข)

รูป 2-16 แสดงการเปลี่ยนรูปของโลหะจนหักขาด **[37][38]**

2.10.4 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (percent of elongation) เป็นสมบัติทางกลด้านความเหนียว (ductile) ของวัสดุที่บงชี้ถึงปริมาณการเปลี่ยนรูปถาวรที่เกิดขึ้นได้ ก่อนที่จะถึงจุดประลัย หากเป็นวัสดุที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปเลยหรือมีแต่น้อยมาก เรียกว่า เป็นวัสดุแบบเปราะ (brittle) (แสดงตามรูปที่ 2-17) อธิบายถึงพฤติกรรมการเกิดความเค้น-ความเครียดในวัสดุแบบเหนียวและวัสดุแบบเปราะในกลุ่มวัสดุที่จำพวกโลหะ ยิ่งเป็นโลหะอ่อนมาก ยิ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดมาก แสดงว่าโลหะนั้นสามารถที่เปลี่ยนรูปได้มากความเหนียวสามารถระบุ เป็นปริมาณตัวเลขด้วย ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวหรือเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่ภาคตัด (percent reduction in area) โดยการวัดขนาดความยาวของชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบ ด้วยวิธีการนำชิ้นทดสอบที่หักขาดจากกันมาวางต่อเข้ารอยเดิม หรือเครื่องมือวัดระยะยืดแบบต่อเนื่อง (Extensometer) (แสดงตามรูปที่ 2-13)

ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%E) คือค่าความเครียดถาวรคิดเป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์ ที่จุดแตกหักมีความสำคัญทางวิศวกรรมมาก เพราะนอกจากจะทราบความเหนียวแล้วยังบ่งชี้คุณภาพของวัสดุนั้นๆ เช่น ในการทดสอบรอยเชื่อมถ้าค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำลงหรือสูงขึ้นกว่าปกติที่ควรจะเป็น แสดงว่าในรอยเชื่อมนั้นอาจจะมีข้อบกพร่องเกิดขึ้น หรืออาจจะได้รับอิทธิจากความร้อนจนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในรอยเชื่อม เป็นสาเหตุให้เกิดความผิดปกติเกิดขึ้นได้ ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสามารถหาคำนวณได้ ตามสมการที่ (7)

$$\%E = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \text{X} 100\% \quad \text{.....(7)}$$

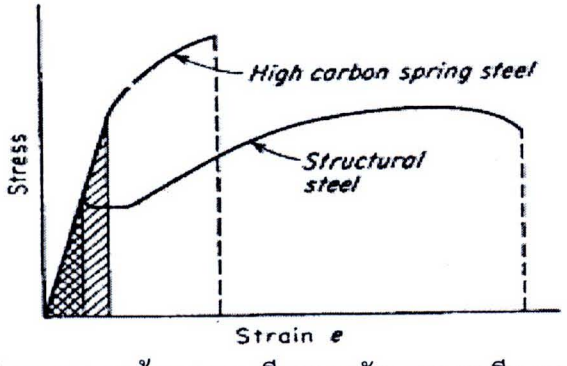
โดยที่ l_f คือ ความยาวชิ้นทดสอบหลังการขาด l_0 คือ ความยาวเดิมชิ้นทดสอบ (gage length) โดยมีมาตรฐานกำหนดใช้ระยะ 2.0 นิ้ว หรือระยะ 50.0 มิลลิเมตร (ระยะ A ตามรูปที่ 2-12)

2.10.5 เปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (percent reduction in area) ในกลุ่มโลหะที่มีความเหนียว ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวอาจจะแสดงได้ด้วยค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่ หน้าตัดของชิ้นทดสอบตามมาตรฐานการเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึง ถ้าเป็นชิ้นทดสอบที่มีลักษณะแท่งกลมขนาดที่วัดได้แก่ เส้นผ่าศูนย์กลางก่อนและภายหลังการทดสอบแรงดึง ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปรากฏการณ์คอดตัวจากการแปรรูปถาวรจนเกิดการแตกหัก ดังที่ได้กล่าวในตอนต้นวัสดุที่มีความเหนียว จะเกิดปรากฏการณ์คอดตัวได้ชัดเจนกว่า วัสดุที่แข็งเปราะ แต่โดยทั่วไปแล้ว ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดจะไม่เท่ากันเพราะความยาวก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบไม่เกี่ยวข้องกับการหาพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ที่สำคัญการหักขาดแบบ

เหนียวและแบบเปราะ อุณหภูมิจะมีส่วนเกี่ยวข้องอย่างยิ่ง เช่น ในวัสดุที่เป็นโลหะจะมีความเหนียวที่อุณหภูมิ ห้อง และจะเปราะยิ่งขึ้นที่อุณหภูมิต่ำๆ ดังนั้นในการแยกกลุ่มวัสดุเหนียว หรือเปราะนั้น ใช้เกณฑ์กำหนดการแตกหักถ้าวัสดุที่ทดสอบแรงดึงแล้วแตกหักได้ที่ความเครียดน้อยกว่าประมาณ 5.0 เปอร์เซ็นต์ ถือว่าเป็นวัสดุแบบเปราะ ซึ่งเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดคำนวณได้ ตามสมการที่ (8)

$$\%RA = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \text{X} 100\% \quad \text{.....(8)}$$

โดยที่ A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดชิ้นทดสอบเดิม A_f คือ พื้นที่หน้าตัดชิ้นทดสอบที่จุดแตกหัก



รูป 2-17 พฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของวัสดุแบบเหนียวและเปราะ **[39]**

2.11 การทดสอบความแข็ง (Hardness test) **[21][31][40]**

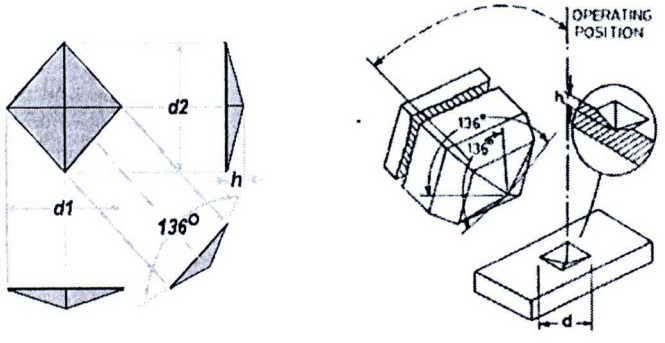
ความแข็ง หมายถึง ความสามารถของวัสดุในการต้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง จากการถูกกระทำโดยวัสดุอื่นที่มีความแข็งกว่า โดยวิธีการกด การกระแทกหรือ การขีดข่วน การกระทำดังกล่าวไม่รวมถึงการกระทำโดยวิธีทางความร้อน วิธีทางความเย็น วิธีทางเคมี วิธีทางไฟฟ้า ฯลฯ ค่าความเป็นสมบัติทางกลที่บอกถึงความต้านทานของวัสดุ เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความแข็ง มีอยู่สามประเภท คือ ประเภทแรก การวัดความแข็งแบบขีดข่วน (Scratch hardness test) ประเภทที่สอง การวัดความแข็งแบบกระดอน (Rebound hardness test) และประเภทสุดท้ายคือ การวัดค่าความแข็งแบบกด (Indentation hardness test)

การวัดความแข็งด้วยวิธีกด (Indentation method) เป็นวิธีที่เก่าแก่ที่ใช้ในการวัดค่าความแข็งของวัสดุวิธีหนึ่ง และปัจจุบันยังคงได้รับความนิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรม ซึ่งการวัดความแข็งแบบกดนี้ ยังมีอีกหลายวิธีขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับวัสดุ และวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ได้แก่ การวัดความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell hardness testing) การวัดความแข็งแบบ

รอคเวลล์ (Rockwell hardness testing) การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness testing) และการวัดความแข็งแบบนูป (Knoop hardness testing)

ในส่วนการวัดความความแข็งระดับโครงสร้างจุลภาค ขนาดของรอยกดมีขนาดเล็กมาก พื้นที่การวัดน้อย (Micro-indentation) จึงต้องเลือกวิธีการวัดความแข็งแบบกดที่เหมาะสม เนื่องจากแรงกดของตุ้มน้ำหนัก ที่ใช้จะมีขนาด หนึ่งกิโลกรัม-แรง (gmf) และสามารถที่จะกำหนดตำแหน่งจุดกดวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 ถึง 500 เท่า ดังนั้น วิธีการวัดความแข็งแบบกด ในระดับจุลภาค ที่เหมาะสมกับงานด้านโลหะวิทยา หรือการศึกษาวิจัยในระดับจุลภาคกับงานที่มีขนาดเล็กและบางๆ เช่นผิวชุบแข็ง ผิวชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า ความแตกต่างของเฟสผสม หรือการศึกษาผลกระทบทางความร้อนในรอยเชื่อม การวัดความแข็งแบบกดลักษณะนี้นิยมใช้กันอยู่สองวิธี ได้แก่

2.11.1 การทดสอบความแข็งแบบวิเกอร์ส (Vickers hardness test) **[40]** ถูกคิดค้นและประ ดิษฐ์โดย R.Smith และ G.Sandland วิศวกรบริษัท Vickers Ltd. ประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ. 1925 การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์สมีช่วงการวัดที่กว้างที่สุด ครอบคลุมความต้องการในการวัดความแข็งทั้งหมดและสามารถประยุกต์ใช้งาน ได้กับวัสดุเกือบทุกชนิดด้วยสเกลวัดแบบเดียวกัน โดยแบ่งการวัดเป็นสามช่วงวัด (แสดงตามตารางที่ 2-11) ค่าความแข็งการวัดแบบวิเกอร์สมีสัญลักษณ์ของหน่วยความแข็งเป็นตัวอักษร HV (Hardness of Vickers hardness testing) และมีการกำหนดวิธีทดสอบให้เหมาะสมกับชิ้นงานโดยวิธีวิกเกอร์ส ที่มีแรงกดและระยะการให้เวลา (testing cycle) ในการทดสอบที่แตกต่างกันตามช่วงวัด (แสดงตามตารางที่ 2-12) มีหลักการคล้ายคลึงกับการวัดความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell hardness testing) แต่ความเรียบของผิวชิ้นงานจะต้องมีคุณภาพมากกว่า โดยแรงกดชิ้นงานจะส่งผ่านหัวกดซึ่งทำจากเพชรรูปทรงทางเรขาคณิตแบบพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม มีมุมยอดพีระมิด 136 องศา ความลึกของรอยกดบนชิ้นงาน จะมีขนาดความยาวประมาณหนึ่งส่วนจากเจ็ดส่วน ของความยาวเส้นทแยงมุม (แสดงตามรูปที่ 1-18)



รูป 2-18 ลักษณะรอยกดทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส **[41]**

ตาราง 2-11 ช่วงแรงกดวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส **[40]**

Hardness test		Low-force Hardness test		Microhardness test	
Hardness symbol	Nominal Value of The test force F (N)	Hardness symbol	Nominal Value of The test force F (N)	Hardness symbol	Nominal Value of The test force F (N)
HV 5	49.03	HV 0.2	1.961	HV 0.01	0.098 07
HV 10	98.07	HV 0.3	2.942	HV 0.015	0.147
HV 20	196.1	HV 0.5	4.903	HV 0.02	0.196 1
HV 10	294.2	HV 1	9.807	HV 0.025	0.245 2
HV 50	490.3	HV 2	19.61	HV 0.05	0.490 3
HV 100	980.7	HV 3	29.42	HV 0.1	0.980 7

.

Nominal test forces greater than 980.7 N may be applied

ตาราง 2-12 ช่วงเวลากดวัดความแข็งแบบวิเกอร์ส **[40]**

ประเภท	แรงกด F (kgf)	ตัวแปร		
		ความเร็วก่อนสัมผัส (วินาที/มิลลิเมตร)	เวลาเพิ่มแรงกด (วินาที)	เวลากดแรง (วินาที)
Vickers Test	≥ 5	≤ 0.2	2 - 8	10 -15
Low force Vickers Test	$0.2 < 5$	≤ 0.2	≤ 10	10 -15
Vickers Microhardness Test	$0.01 < 0.2$	0.015 – 0.070	≤ 10	10 -15

โดยสามารถคำนวณหาค่าความแข็งได้จากผลหารของแรงกด ในหน่วยกิโลกรัม-แรง (kgf) ต่อพื้นที่รอยกดภายใต้แรงกดจากการวัดความยาวของเส้นทแยงมุมของหลุมกด และผลการวัดอาจจะแสดงในหน่วย Pa หรือ MPa โดยการคูณด้วย 9.807×10^6 และ 9.807 ตามลำดับ ซึ่งในหนึ่งกิโลกรัมแรงในหน่วยนิวตัน (N) มีค่าเท่ากับ 9.81 นิวตัน หรือ หนึ่งกิโลกรัมแรงในหน่วยปอนด์ (lbf) มีค่าเท่ากับ 2.2 ปอนด์แรง และทั้งสามช่วงวัดแบบวิกเกอร์สจะคำนวณหาค่าความแข็งได้ ตามสมการที่ (9) **[31]**

เมื่อ แรงกด(F) $= 2F\left(Sin\frac{136^0}{2}\right)$

พื้นที่รอยกด(A) $= 2\left(\frac{1}{2}\times d\times\frac{1}{2}\right)$

$= \frac{d^2}{2}$

แทนค่า $= \frac{F}{A}$

$= \frac{2F\left(Sin\frac{136^0}{2}\right)}{d^2}$

$$\therefore HV = \left(\frac{1.8544F}{d^2}\right) \quad \text{..... (9)}$$

โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบวิเกอร์ส

F คือ แรงกดมีหน่วยเป็นกิโลกรัมแรง (kgf) นิวตัน (N) ปอนด์แรง (lbf)

d คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมของ d_1 และ d_2

2.11.2 การทดสอบความแข็งแบบนูป (Knoop hardness test) **[21][40]** ถูกประดิษฐ์คิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1939 โดย Fredrick Knoop และเพื่อนร่วมงานของเขา ณ National Bureau of Standard (ปัจจุบันคือ NIST) ประเทศสหรัฐอเมริกา ต่อมาถูกทำให้เป็นมาตรฐานตามเอกสาร ASTM D-1474 การทดสอบความแข็งแบบนูปโดยปกติถูกใช้งานและมีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับวิธีแบบวิเกอร์ส มาก เช่น สามารถทดสอบค่าความแข็งมหภาค หรือความแข็งปกติเหมือนแบบวิเกอร์ส แต่ไม่เป็นที่นิยมในประเทศกลุ่มยุโรป ความแตกต่างกันอยู่ที่รูปร่างลักษณะของหัวกดเพชรรูปพีระมิดรอมบิก (Rhombic) ฐานสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน หรือเป็นลักษณะแบบคมดาบ โดยมีมุมยอดแหลม 130 และ 172.5 องศา มีเส้นทแยงมุมยาวไม่เท่ากัน (แสดงตามรูปที่ 2-19) ซึ่งมีความยาวที่แตกต่างกันถึงเจ็ดเท่า ให้แรงกดหัวเพชรคงที่ ขนาด 1.0 ถึง 1000 กรัม ทำให้ความลึกของรอยกด มีรอยลึกได้เพียงหนึ่งส่วนจากสามสิบส่วนของเส้นทแยงมุมด้านยาว จึงสามารถวัดค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมด้านยาวได้ละเอียดชัดเจน ได้รอยกดที่ตื้นกว่าแบบวิเกอร์สถึงสองเท่า (แสดงตามรูปที่ 2-20) ทำให้การวัดค่าความแข็งเหมาะกับชิ้นงานที่เป็นผิวเคลือบ ชิ้นงานลักษณะเป็นแผ่นบางๆ และชิ้นงานที่เป็นวัสดุแข็งเปราะ เช่น กระจก เซรามิก ได้เหมาะสมและคลาดเคลื่อนน้อยกว่าวิธีแบบวิกเกอร์สมาก

ค่าความแข็งแบบนูปสามารถคำนวณได้จาก สัดส่วนผลหารของแรงกดผ่านหัวกดในหน่วยกิโลกรัมแรง (kgf) ต่อพื้นที่ผิวรอยกดภายใต้แรงกดในหน่วยตารางมิลลิเมตร (mm^2) ซึ่งถูกวัดความยาวของเส้นทแยงมุมของรอยกดในหน่วยมิลลิเมตร (mm) และผลการวัดอาจจะแสดงในหน่วยวัดอื่นได้เหมือนวิธีแบบวิเกอร์ส ค่าความแข็งคำนวณได้ตามสมการที่ (10) **[30]**

$$\text{เมื่อ} \quad KHN = \frac{F}{A} = \frac{F}{CL^2}$$

$$\therefore KHN = 14229\left(\frac{F}{d}\right)^2 \quad \text{.....(10)}$$

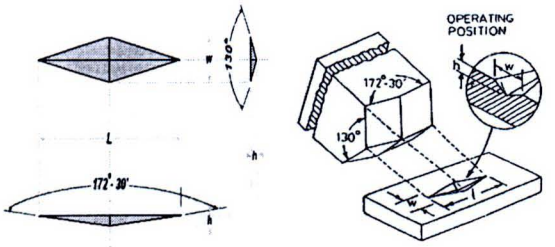
โดยที่ KHN คือ ค่าความแข็งแบบนูป

F คือ แรงกดมีหน่วยเป็นกิโลกรัมแรง (kgf) นิวตัน (N) ปอนด์แรง (lbf)

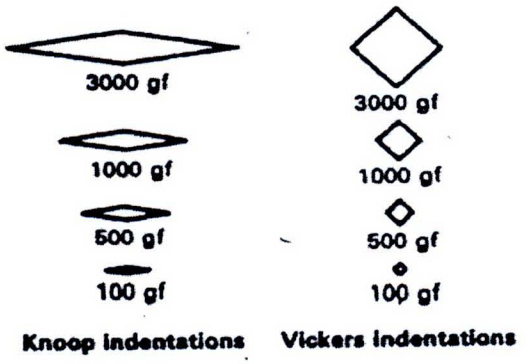
L คือ ความยาวของเส้นทแยงรอยกดด้านยาว

C คือ ค่าคงที่จากความสัมพันธ์ของพื้นที่รอยกดถาวรกับความยาวเส้นทแยงมุมด้านยาวของรอยกดเท่ากับ 0.07028

d คือ เส้นทแยงมุมของหัวกดพีระมิดด้านยาว



รูป 2-19 ลักษณะรอยกดทดสอบความแข็งแบบนูป **[41][42]**



รูป 2-20การเปรียบเทียบรอยกดระหว่างนูปและวิเกอร์ส **[40]**

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

2.12 การทดสอบงานเชื่อมด้วยวิธีทางโลหะวิทยา [31][43][44]

การศึกษาโลหะจากภาพ (metallography) เป็นการศึกษาองค์ประกอบ และโครงสร้างทั้งแบบมหภาคและแบบจุลภาคของโลหะจากภาพถ่าย วิเคราะห์โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์สำหรับโลหะขยายดูผิวโลหะเรียกว่า โครงสร้าง (structure) หรือเกรน (grain) ซึ่งมีกระบวนการเตรียมผิวชิ้นทด สอบที่เหมาะสมในการวิเคราะห์โครงสร้าง เช่น ตรวจสอบจำนวนของเฟส หรือเกรน และสัดส่วนของเกรนแต่ละชนิดของโลหะ ตลอดจนขนาดและรูปร่าง การกระจัดกระจายของเกรนแต่ละเกรนขึ้นอยู่กับความเหมาะสมตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษาวิเคราะห์ สิ่งสำคัญของการศึกษาโครงสร้างโลหะจากภาพ คือ การเตรียมชิ้นทดสอบ (preparation of specimen) ชิ้นทดสอบสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยา มีมาตรฐานขั้นตอนการปฏิบัติงานตามลำดับก่อนและหลัง เพื่อความแม่นยำในการตรวจวิเคราะห์ผลจะหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดผลกระทบ ที่อาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยน แปลงไปจากตัวอย่างงานเดิม ที่อาจจะมีผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจวิเคราะห์ได้ ในการเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อการวิเคราะห์ทางโลหะวิทยา จึงมีหลักปฏิบัติโดยทั่วไปดังต่อไปนี้

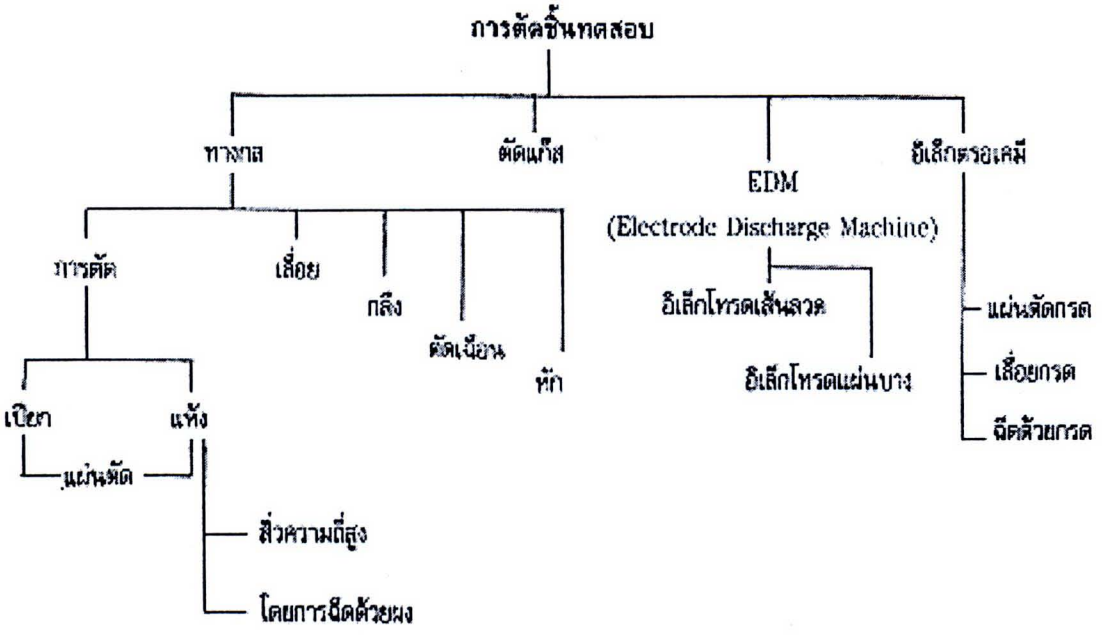
2.12.1 การทดสอบโครงสร้างระดับมหภาค (Macro testing) ในด้านการทดสอบงานเชื่อมหมายถึง การศึกษาโครงสร้างในรอยเชื่อม และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ด้วยการตรวจวิเคราะห์ด้วยสายตา (Visualtest) ในกรณีที่ใช้เครื่องมือประกอบในการตรวจวิเคราะห์ต้องมีมีกำลังขยายได้ไม่เกินสิบเท่า (10X) แต่ทางด้านการศึกษาโครงสร้างมหภาคในทางโลหะวิทยาที่ไม่เกี่ยวกับการตรวจสอบรอยเชื่อม (macrostructure) หมายถึง โครงสร้างของโลหะที่ปรากฏโดยใช้กำลังขยายไม่เกินยี่สิบห้าเท่า (25X) บนผิวโลหะที่ผ่านการเตรียมโครงสร้างอย่างเหมาะสม

2.12.2 การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค (Micro testing) ในด้านการทดสอบงานเชื่อมหมายถึง การศึกษาโครงสร้างในรอยเชื่อม และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนและเนื้อวัสดุเดิม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายในการตรวจวิเคราะห์มากว่าสิบเท่า แต่ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค (microstructure) คือโครงสร้างของโลหะที่ปรากฏโดยใช้กำลังขยายมากกว่ายี่สิบห้าเท่า รายละเอียดที่ปรากฏได้แก่ เกรน เฟสต่างๆ ความพรุน บนผิวงานที่ผ่านการเตรียมแบบละเอียดและทำการกัดขึ้นรอย โดยทั่วไปกล้องจุลทรรศน์สำหรับ ตรวจสอบโครงสร้างโลหะจะกำหนดขนาดเลนส์ต่ำสุดที่กำลังขยาย 50 เท่า

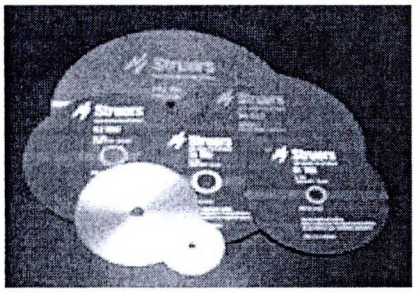
2.12.3 การตัดชิ้นทดสอบ (cutting) เป็นขั้นตอนแรกในทางปฏิบัติของการเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์ทางโลหะวิทยา ซึ่งมีความสำคัญมาก หากเลือกตัดชิ้นทดสอบที่ไม่ถูกต้อง จะทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดไปจากความเป็นจริงที่ควรจะเป็น ในทางปฏิบัติที่เหมาะสมมีมาตรฐานข้อกำหนดในการเลือกตัดชิ้นทดสอบ เช่น ในงานเชื่อมทดสอบก็จะมีลำดับการตัดตัวอย่างชิ้นทดสอบ เพื่อ

นำไปทดสอบแบบต่างๆ ดังนั้นเครื่องมือสำหรับตัดตัวอย่าง จึงมีวิธีการที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับ ขนาด รูปร่าง หรือวัสดุของชิ้นทดสอบแต่มีข้อควรปฏิบัติที่สำคัญไม่ว่าจะใช้เครื่องมือตัดแบบใดก็ตาม จำเป็นต้องหลีกเลี่ยง ไม่ให้มีผลกระทบต่อชิ้นงานที่จะทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม ได้แก่ เกิดการร้าวขึ้น หรือทำให้รอยร้าวในชิ้นทดสอบขยายตัวเพิ่มขึ้น เกิดการแตกหัก ความร้อนและการหลอมละลายจากขั้นตอนการตัดชิ้นทดสอบ จะสร้างผลเสียแก่ชิ้นทดสอบ คือ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยการคืนรูปผลึก (recrystallization) หรือ การคืนตัว ซึ่งปกติจะสามารถแก้ ปัญหานี้ โดยการใช้สารหล่อเย็นในขณะที่ทำการตัดชิ้นทดสอบ ด้วยน้ำ น้ำมัน และอากาศ เป็นสารหล่อเย็นควบคุมไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะทำการตัดชิ้นทดสอบ

ในตัวอย่างงานเชื่อมทดสอบ ส่วนใหญ่ชิ้นทดสอบที่ตัดจะมีขนาดใหญ่ การตัดที่นิยมใช้ตัดในเบื้องต้นด้วยก๊าซ (แสดงตามรูปที่ 2-21) ซึ่งไม่สามารถหล่อเย็นได้ จึงใช้วิธีตัดให้มีขนาดชิ้นทดสอบที่ใหญ่กว่า เพื่อหลีกเลี่ยงความร้อนจากการตัด แล้วจึงนำมาแต่งผิวทางกลภายหลัง แต่ในงานวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นทดสอบจะมีขนาดเล็กโดยทั่วไปมักตัดด้วยใบตัดอะแบรซี (abrasive cutoff wheel) (แสดงตามรูปที่ 2-22) ที่มีทั้งใบตัดอ่อนสำหรับตัดชิ้นทดสอบที่เป็นวัสดุแข็งๆ และใบตัดแข็งสำหรับตัดชิ้นทดสอบที่เป็นวัสดุอ่อนๆ ส่วนใบตัดเพชร (diamond cutting) มีทั้งตัดแบบเปียกและตัดแบบแห้ง ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ตัดในวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงเช่น แร่ เซรามิก ฯลฯ ส่วนการตัดด้วยวิธีอื่นๆ จะให้ผิวตัดที่มีความเรียบของผิวมาก บางครั้งสามารถนำชิ้นทดสอบไปขัดผิวมันได้ เลย แต่มีใช้จ่ายสูงกว่า



รูป 2-21 แสดงวิธีการตัดตัวอย่างทดสอบ **[44]**



รูป 2-22 ลักษณะใบตัดอะแบรซีฟ **[45]**

2.12.4 การจับยึดชิ้นทดสอบ [46] เพื่อให้การปฏิบัติงานได้สะดวกไม่สร้างความเสียหายให้เกิดแก่ชิ้นทดสอบ จึงจำเป็นต้องทำการจับยึดชิ้นทดสอบให้มั่นคงแข็งแรง และชิ้นงานที่ขนาดเล็กยังสามารถจับยึดได้หลายๆ ชิ้นพร้อมกันและให้ผลการวิเคราะห์จะเกิดความถูกต้องยิ่งขึ้น การจับยึดชิ้นทดสอบนอกจากจะใช้อุปกรณ์ช่วยจับแล้ว การจับยึดที่นิยมใช้อีกแบบ คือ การจับยึดด้วยการขึ้นเรือน (mounting) เป็นวิธีการเตรียมชิ้นทดสอบ โดยการฝังชิ้นงานลงในวัสดุเรซิน ให้มีรูปทรงและขนาดที่เหมาะสม มีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อความสะดวกในการจับถือ และการเตรียมชิ้นงานในขั้นตอนต่างๆ สำหรับเครื่องมือ หรือลำดับการเตรียมชิ้นงาน ในขั้นตอนต่อไป ก็จะสามารถทำได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น เช่น ขั้นตอนการปรับแต่งระนาบผิวชิ้นทดสอบเบื้องต้นด้วยเครื่องกลึงโลหะหรือ แต่งผิวหน้าด้วยเครื่องเจียระไนผิวเรียบ เพื่อต้องการให้ชิ้นงานมีผิวหน้าที่ได้ระนาบเสมอกันโดยตลอดทำให้ไม่เกิดการโค้งมนที่ขอบชิ้น งานเมื่อทำการขัดผิว

การจับยึดชิ้นทดสอบด้วยการขึ้นเรือนนั้น ควรมีการเลือกวิธีการและวัสดุที่เหมาะสมการลักษณะชิ้นงาน ในการขึ้นเรือน เพื่อไม่ให้มีผลกระทบแก่ชิ้นงานอันเนื่องมาจากความร้อนและความดัน ตลอดจนการหดตัวของวัสดุขึ้นเรือน ดังนั้นการเลือกจับยึดชิ้นงานทดสอบด้วยการขึ้นเรือน จึงต้องเลือกเทคนิควิธีการให้เหมาะสมกับชิ้นทดสอบ การจับยึดชิ้นทดสอบด้วยเรซินมีอยู่สองเทคนิค คือ

ก. การขึ้นเรือนชิ้นทดสอบแบบร้อน (hot mount) เป็นการขึ้นเรือนโดยใช้การผงเรซิน ภายใต้สภาวะแรงดันและความร้อน (Hot-Pressing resin) ด้วยใช้เครื่องมือ (แสดงตามรูปที่ 2-23) ทำให้ผงเรซินแข็งตัวคงรูปในแม่พิมพ์จับยึดชิ้นทดสอบไว้ เหมาะกับเตรียมชิ้นงานที่มีจำนวนมากและต้องการคุณภาพสูง มีขนาดและรูปร่างแน่นอน วัสดุเรซินที่ใช้มีอยู่สองประเภท คือ

1) เรซินชนิดเทอร์โมเซทติง (Thermosetting resins) เป็นเรซินที่ใช้เวลาคงรูปน้อยในแม่พิมพ์(Mold) สามารถที่จะนำออกจากแม่พิมพ์ได้ทันที ที่นิยมใช้กันทั่วไปมีอยู่สองชนิด ชนิดแรกคือ เรซินฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ (phenol - formaldehyde resin) มีชื่อทางการค้าว่า เบ

เคอไลต์(Bakelite) นิยมใช้งานเนื่องจากมีราคาถูก ใช้งานง่าย และมีสีหลากสี มีความแข็งไม่สูงนัก ทนทานต่อการสึกหรอได้ในระดับปานกลาง ใช้แรงอัด 29.0 MPa และอุณหภูมิการขึ้นรูป150 C^0 ใช้เวลาคงรูปประมาณเจ็ดนาที

ชนิดที่สองคือเรซินไดอัลลิลพาทาเลต (Diallylphthalate) หากเติมสารประเภทแก้วลงไปจะเป็นเรซินที่แข็งมากทนทานต่อสารเคมีได้ดีจึงเหมาะสมกับงานที่ต้องการกัดขึ้นรอยผิวหน้าด้วยสารเคมีชนิดที่รุนแรงและอุณหภูมิสูงและสามารถทำให้นำไฟฟ้าได้โดยการเติมสารที่เป็นโลหะลงไปด้วยใช้ความดันอัด 22.0 MPa และอุณหภูมิการขึ้นรูป150C^0 ใช้เวลาคงรูปประมาณ 12 นาที

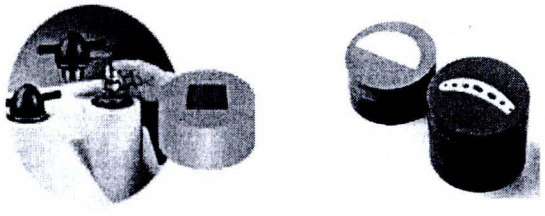
2) เรซินเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic resin) เป็นเรซินผงที่คงรูปภายใต้แรงดัน 22 MPa และอุณหภูมิการหลอมตัว 150 C^0 และรักษาแรงดันจนกระทั่งอุณหภูมิลดลงมาที่ 40 C^0 หรือที่อุณหภูมิห้อง ถ้าไม่มีการหล่อเย็นต้องใช้เวลาประมาณ 40 นาที ในการคงรูป จึงไม่เหมาะสำหรับการขึ้นเรือนชิ้นทดสอบที่ อ่อนและค่อนข้างบอบบาง วัสดุเรซินที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ โพลีสไตรีน (Polystyrene) โพลีไวนีลคลอไรด์ (PVC) โพลีไวนีลฟอร์มอล (Polyvinylformal) และเมทิลเมตาไครเลตแบบใส (Transparent methyl Methacrylate) เป็นต้น

ข. การขึ้นเรือนชิ้นทดสอบแบบเย็น (Cold Mount) คือ การขึ้นเรือนที่อุณหภูมิห้องโดยการใช้วิธีหล่อลงแบบด้วยเรซินเหลว (castable rasin) ที่ไม่มีแรงดันและความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง การแข็งตัวเกิดจากการทำปฏิกิริยาของเรซินเหลวและสารเร่งปฏิกิริยาให้แข็งตัวเรียกว่า ฮาร์เดนเนอร์ (hardener) ในอัตราส่วนเรซินเหลวห้าสิบส่วนต่อฮาร์เดนเนอร์หนึ่งส่วน หรือในปริมาณที่เหมาะสมเทลงแบบหล่อ โดยคว่ำหน้าชิ้นงานลงด้านล่าง (แสดงตามรูปที่ 2-24) ระยะเวลาในการแข็งตัวขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของฮาร์เดนเนอร์ การขึ้นเรือนแบบเย็นเหมาะกับชิ้นงานที่มีรูพรุน มีความอ่อนมากๆ ชิ้นงานที่ไม่ทนต่อความร้อน ไม่ทนต่อแรงดัน อีกทั้งชิ้นงานจะไม่เสียหายอันเนื่องจากสารเคมี นอกจากจะใช้กับชิ้นงานเล็กได้เหมือนการขึ้นเรือนแบบร้อนแล้ว ยังใช้ได้กับชิ้นงานขนาดใหญ่ แต่มีข้อเสียคือ จะเกิดไอระเหยเกิดขึ้นขณะเทหล่อ บางชนิดยังเป็นอันตรายต่อการสัมผัสโดยตรง วัสดุเรซินที่ใช้กับการขึ้นเรือนแบบเย็นมีอยู่หลายชนิด ได้แก่

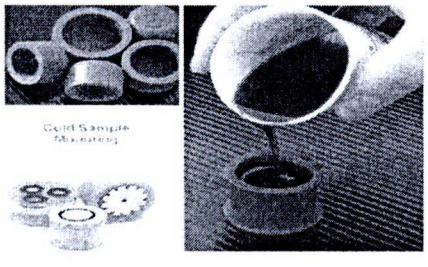
1) เรซินอีพอกซี (Epoxy) ให้ความแข็งแรงในการจับยึดชิ้นทดสอบได้ดีภายหลังการแข็งตัวมีค่าความชื่นที่ต่ำ จึงใช้กับเครื่องวิเคราะห์ที่มีระบบสุญญากาศได้ดี แข็งตัวด้วยการผสมสารเร่งปฏิกิริยาระยะเวลาขึ้นอยู่กับส่วนการผสมของสารเร่งในการผสม เมื่อแข็งตัวแล้วจะมีสมบัติเป็นพลาสติกแบบเทอร์โมเซทติง (Thermosetting) หรือเรียกว่า ดูโรพลาสติก (Duroplastics) ซึ่งมีความทนทานต่อสารเคมีและแรงดัน ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่สูงมากนัก ใช้งานได้ที่อุณหภูมิห้องปกติทั่วไป ขณะใช้งานจะมีกลิ่นเหม็น จึงควรใช้ในสถานมีการระบายอากาศได้ดี

2) เรซินอคริลิก (Acrylic) การแข็งตัวเกิดขึ้นได้ด้วยการผสมสารเร่งปฏิกิริยาและใช้เวลาในการแข็งตัวคงรูปประมาณ 30 นาที ใช้งานง่ายไม่ยุ่งยาก เมื่อแข็งตัวแล้วจะมีสมบัติเป็นพลาสติกแบบคืนรูป (Thermoplastic) เรซินเทหล่อชนิดนี้จะเกิดความร้อนขึ้นขณะทำปฏิกิริยาแม่พิมพ์ที่ใช้เป็นแบบเทหล่อต้องสามารถถ่ายเทความร้อนได้

3) เรซินโพลีเอสเทอร์ (Polyester) การแข็งตัวเกิดขึ้นด้วยการผสมสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปจะมีการหดตัวเล็กน้อยและใช้เวลาในการคงรูปนานกว่า เมื่อแข็งตัวแล้วจะมีสมบัติเป็นพลาสติกแบบเทอร์โมเซทติงหรือเรียกว่าดูโรพลาสติก ซึ่งมีความสามารถทนทานต่อสารเคมีได้ดีกว่า ชนิดอคิลิกเรซิน



รูป 2-23 การขึ้นเรือนชิ้นทดสอบแบบร้อน **[47][48]**

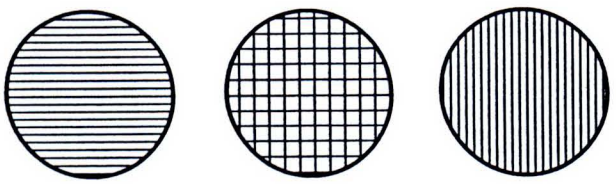


รูป 2-24 การขึ้นเรือนชิ้นทดสอบแบบเย็น **[48]**

2.12.5 การเตรียมผิวชิ้นทดสอบ เป็นการเตรียมงานโครงสร้างเพื่อการศึกษาทางโลหะวิทยา ซึ่งความสำคัญจะอยู่ที่การปรับระนาบและความเรียบด้วยการขัดผิวหน้าชิ้นทดสอบ เพื่อกำจัดร่องรอยบนพื้นผิวหน้าของชิ้นทดสอบที่มีผลต่อการทบกระทบของแสงจากเครื่องมือวิเคราะห์ ซึ่งในการตรวจสอบทางโลหะวิทยา การเตรียมผิวชิ้นทดสอบ ต้องการให้มีระดับความหยาบของผิวขนาดไหนขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการศึกษา ในการเตรียมผิวเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคจะมีความละเอียดของผิวชิ้นงานมากกว่า การเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างระดับมหภาค ดังนั้นการเตรียมผิวชิ้นงานที่เหมาะสม จึงขึ้นอยู่กับวัสดุข องชิ้นงานและจุดมุ่งหมายในการวิเคราะห์ทางโลหะวิทยา ซึ่งมีรายละเอียดการเตรียมผิวชิ้นทดสอบดังต่อไปนี้

ก. การขัดผิวแบบหยาบ (grinding) นิยมใช้ขัดผิวชิ้นทดสอบด้วยกระดาษทรายแบบเปียก (wet grinding) การเลือกใช้เบอร์ (ขนาดเม็ดกริต) ของกระดาษทรายเริ่มต้น ขึ้นอยู่กับความเรียบหลังการตัดด้วยเครื่องมือตัดที่เลือกใช้วิธีการตัดชิ้นทดสอบ เช่น ความเรียบหลังการตัดด้วยเลื่อย (band saw) โดยทั่วไปจะเริ่มขัดด้วยกระดาษทรายขนาด 60 ถึง 120 กริต (#60-#120) และความเรียบหลังการตัดชิ้นทดสอบด้วยใบตัดอะแบรซีฟจะเริ่มต้นด้วยกระดาษทรายขนาด 240 กริต หรือในการปรับระนาบผิวหลังการขึ้นเรือนด้วยเครื่องจักรกล ก็จะให้ความเรียบหลังการปรับแต่งไม่เท่ากัน เพื่อเป็นการลดเวลาและค่าใช้จ่าย จึงจำเป็นต้องพิจารณาเลือกใช้ขนาดเม็ดกริต เริ่มต้นที่เหมาะสม

ในวัสดุชิ้นงานประเภทโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง ทองเหลือง ตะกั่ว ฯลฯ ที่มีค่าความแข็งต่ำการขัดจะต้องให้ผิวหน้าชิ้นงานเปลี่ยนรูปน้อยที่สุด ลำดับกระดาษทรายที่เหมาะสม คือ ขนาด 320 400 และ 600 เม็ดกริต ส่วนกลุ่มโลหะผสมที่ขึ้นรูปด้วยแรง (อะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิคอน) จะขัดผิวหยาบจนถึง 1,200 กริต การขัดผิวสามารถทำได้ด้วยเครื่องมือในการหมุนกระดาษทราย หรือขัดผิวด้วยการนำชิ้นงานถูบนกระดาษทรายรองพื้นด้วยกระจก โดยขัดผิวไปทิศทางเดียวกันให้รอยขัดผิวใหม่มีทิศทางทำมุม 45 ถึง 90 องศา ของรอยขัดเดิม (แสดงตามรูปที่ 2-25) ควบคุมแรงกดให้สม่ำเสมอ แรงที่มากเกินไปอาจจะทำให้มีเศษวัสดุขัดผิวฝังในผิวชิ้นงาน โดยใช้เวลาในการขัดกระดาษทรายแต่ละเบอร์ประมาณหนึ่งถึงสองนาที หรือสังเกต จนปรากฏรอยขัดใหม่ขึ้นจนทั่วผิวหน้าชิ้นงาน



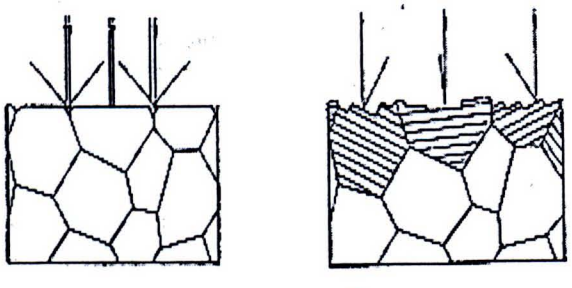
รูป 2-25 แสดงรอยขัดเก่าและรอยขัดใหม่

ข. การขัดผิวแบบละเอียด (polishing) ในการทดสอบทางโลหะวิทยาระดับมหภาค การเตรียมผิวโครงสร้างตัวอย่างด้วยกระดาษทรายตั้งแต่ขนาด 800 ถึง 1,200 กริต ก็มีความละเอียดเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ได้ ซึ่งขนาดของเบอร์กระดาษทรายยิ่งมีค่าตัวเลขมาก ผิวขัดจะมีความละเอียดมากขึ้น แต่สำหรับในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างในระดับจุลภาคความละเอียดจากกระดาษทรายยังไม่เพียงพอ เนื่องจากรอยขีดข่วนจากการขัดยังจะปรากฏผ่านกล้องจุลทรรศน์อย่างชัดเจนเมื่อใช้กำลังขยายสูงขึ้น จึงต้องใช้ความเรียบของผิวต้องมีคุณภาพสูงมาก โดยการขัดมันผิวชิ้นทดสอบด้วยผงขัดให้ผิวมันที่เหมาะสมกับความแข็งของตัวอย่างทดสอบ ที่ใช้กันทั่วไปได้แก่

ผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และผงเพชร (diamond polishing) ซึ่งมีความแข็งสูงตามลำดับค่าความแข็ง สามารถใช้ขัดวัสดุได้ทุกชนิดในทางการค้ามีทั้งชนิดครีมและชนิดผงผสมน้ำแบบขัดเปียกกับ ผ้าขัด (polishing cloths) ในลักษณะต่างๆ เช่น ผ้าขัดแบบขนสั้น ผ้าขัดแบบขนยาว การเลือกใช้งานในการขัดผิวมันในเบื้องต้นจะใช้ผงขัดที่มีขนาด 30 ถึง 3.0 ไมครอน แต่ในทางปฏิบัตินิยมใช้ขนาด 6.0 ไมครอน ที่ความเร็ว 150 ถึง 600 รอบต่อนาที โดยใช้ผ้าขัดขนสั้น และการขัดผิวมันในขั้นที่มีความเรียบสูงขึ้นขนาดของผงขัดจะใช้ขนาด 1.0 ถึง 0.05 ไมครอน กับผ้าขัดที่มีขนยาวขึ้น ซึ่งเป็นการขัดผิวมันแบบละเอียดทางกล นอกจากนี้ยังสามารถทำให้ผิวชิ้นงานเรียบมันด้วยวิธีทางไฟฟ้าได้อีก

ในวัสดุชิ้นงานประเภทโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีค่าความแข็งน้อย ในกรณีอะลูมิเนียมผสมที่ขึ้นรูปด้วยแรง ในการขัดผิวละเอียดที่ไม่ทำการกัดขึ้นรอยแบบสี ที่ไม่มีการเตรียมผิวด้วยไฟฟ้า เริ่มต้นด้วยผงอะลูมิเนียมออกไซด์ขนาด 6.0 ไมครอน ด้วยผ้าขัดสังเคราะห์แบบหยาบ ตามด้วยผงขนาด 0.3 ไมครอน ด้วยผ้าฝ้าย สุดท้ายขัดมันด้วยสารแขวนลอยซิลิก้าออกไซด์ (Si_2O_3) ด้วยผ้าสังเคราะห์แบบขนสั้น หล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นน้ำในปริมาณน้อยๆ

2.12.6 การกัดขึ้นรอย (etching) เป็นกระบวนการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี ที่บริเวณผิวหน้าวัสดุที่ต้องการวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยา เพราะผิวของชิ้นงานที่ผ่านการขัดผิวเมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์จะไม่ปรากฏภาพความแตกต่างในโครงสร้าง เนื่องจากการสะท้อนของแสงจากการตกกระทบที่พื้นผิวในแนวตั้งฉากเท่ากันไม่เกิดการกระเจิงของแสง (แสดงตามรูปที่ 2-26) ความสว่างจึงสะท้อนกลับเท่ากัน เกิดเป็นภาพสว่าง (bright field) ไม่สามารถเห็นลักษณะขอบเกรนได้ เนื่องจากเกรนในโครงสร้างโลหะมีความทนทานต่อกรดได้ไม่เท่ากัน เมื่อกัดด้วยกรดในระยะเวลาที่เหมาะสมบริเวณขอบเกรนหรือผิวหน้าจะมีความเรียบไม่เท่ากัน เมื่อแสงจากกล้องจุลทรรศน์ตกกระทบในมุมตั้งฉาก บริเวณที่ถูกกรดกัดจะกระเจิงเป็นเงาดำ (dark field) จึงปรากฏเห็นความแตกต่างระหว่างสีขาวและดำผ่านกล้องจุลทรรศน์เป็นรอยเกรนเกิดขึ้น การกัดขึ้นรอยที่เหมาะสมกับวัสดุที่ต้องการศึกษา ขึ้นอยู่กับกำลัง ขยายที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างแบ่งได้ สองระดับ คือ



รูป 2-26 การสะท้อนแสงที่ตกกระทบตั้งฉากขอบและผิวเกรน **[44]**

ก. การกัดขึ้นรอยระดับมหภาค (Macro etching) เป็นการกัดขึ้นรอยที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ในด้านการตรวจสอบสภาพรอยเชื่อมสามารถใช้อุปกรณ์อื่นช่วยได้แต่มีกำลังขยายต่ำไม่เกิน 10 เท่า ลักษณะที่ปรากฏขึ้นได้แก่ ขนาดของเกรน อิทธิพลจากความร้อน สารมลทิน ความพรุน ช่องว่าง แนวการไหล รอยแตก ฯลฯ ส่วนใหญ่ใช้ในการควบคุมคุณภาพของชิ้นงาน ที่ช่วยให้แก้ปัญหาความเสียหาย ที่เกิดในกระบวนการผลิต เช่น การทดสอบงานเชื่อมโลหะ งานโลหะที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน งานหล่อโลหะ และงานขึ้นรูปโลหะ ด้วยการตีเป็นต้น การกัดขึ้นรอยที่ใช้ในอุณหภูมิห้องสำหรับตรวจสอบโครงสร้างมหภาคงานเชื่อมอะลูมิเนียมผสมด้วยสารเคมี (แสดงตามตาราง 2-13)

ข. การกัดขึ้นรอยระดับจุลภาค (Micro etching) เป็นการกัดขึ้นรอย เพื่อทำให้โครงสร้างในระดับจุลภาคของชิ้นทดสอบปรากฏขึ้น ด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย มากกว่า 10 เท่า หรือใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (SEM) การกัดขึ้นรอยลักษณะนี้ใช้สำหรับตรวจสอบหา รูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัว ในแต่ละองค์ประกอบของโครงสร้างโลหะได้แก่ เฟส สารมลทิน รูพรุน ฯลฯ เพื่อศึกษาวิเคราะห์ถึงความเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง จากผลกระทบทางความร้อน ทางกล และ ทางเคมีในชิ้นงาน มักใช้ในการศึกษาวิจัยโครงสร้างระดับสูงที่มีขั้นตอนการเตรียมผิวงานที่ละเอียดประณีตใช้เวลามากกว่างานตรวจสอบในระดับมหภาค ในการเตรียมผิวชิ้นทดสอบอาจใช้เทคนิคอื่น นอกจากขัดผิวมันวิธีทางกลทั่วไป เช่น การขัดผิวละเอียดด้วยสารเคมี หรือ การขัดผิวละเอียดด้วยวิธีไฟฟ้า และในการกัดขึ้นรอยก็สามารถกัดด้วยวิธีทางไฟฟ้าได้ในงานที่ต้องการคุณภาพสูงๆ ในรายที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะสูตรสารเคมีที่เหมาะสมกับการกัดขึ้นรอยโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมจากหลายๆ สูตรเคมี (แสดงตามตารางที่ 2-14) การกัดขึ้นรอยเพื่อแสดงโครงสร้างที่แท้จริงของชิ้นทดสอบ โดยอาศัยการเตรียมผิวชิ้นทดสอบอย่างมีคุณภาพ การกัดขึ้นรอยที่เหมาะสมจะเลือกใช้สารเคมีพื้นฐานมากที่สุด และนิยมเลือกใช้วิธีการกัดขึ้นรอยด้วยสารเคมี เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกกว่าเทคนิคอื่นๆ ในการใช้สารเคมีจำเป็นต้องศึกษาข้อควรระวังในการใช้งานให้เกิดความปลอดภัยเป็นสำคัญ

ตาราง 2-13 สารเคมีกัดขึ้นรอยระดับมหภาคงานเชื่อมอะลูมิเนียมผสม **[43]**

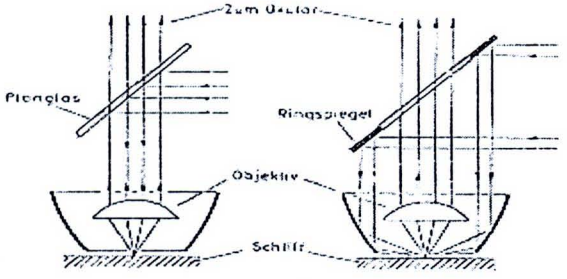
สภาพผิว	สารกัดขึ้นรอย		ข้อแนะนำ
ขัดผิวถึง 1200 กริต	กรดไฮโดรคลอริก (HCL)	60 มล.	แช่หรือเช็ดผิวหน้าชิ้นงาน ด้วยสารกัดขึ้นรอย
	กรดไนตริก (HNO_3)	30 มล.	
	กรดไฮโดรฟลูออริก 48% (HF)	15 มล.	
	น้ำกลั่น	5 มล.	

ตาราง 2-14 สารเคมีกัดขึ้นรอยระดับจุลภาคอะลูมิเนียมผสม **[43]**

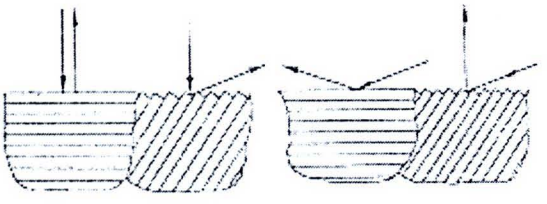
สารกัดขึ้นรอย		รายละเอียด
กรดไฮโดรคลอริก (HCL) เข้มข้น	10 มล.	เมื่อผสมแล้วให้ใช้งานทันทีโดยให้เติมกรดไฮโดร-
กรดไนตริก (HNO_3)	30 มล.	คลอริก เป็นลำดับสุดท้าย แช่หรือเช็ดผิวหน้าชิ้น
น้ำกลั่น	20 มล.	งานที่อุณหภูมิห้อง 2-3 วินาที ล้างด้วยน้ำเย็น และ
กรดเฟอริกคลอไรด์ ($FeCL_3$)	5 กรัม	ทำซ้ำได้หากผลลัพธ์ไม่ได้ตามต้องการ

2.12.7 กล้องจุลทรรศน์สำหรับโลหะ (Metal microscope) ในปัจจุบันเทคนิคการกัดขึ้นรอยเพื่อศึกษาโครงสร้างโลหะยังไม่ได้มีการพัฒนาที่ก้าวหน้าไปจากอดีตที่ผ่านมามากนัก เนื่องจากได้มีการพัฒนาไปในส่วนของกล้องจุลทรรศน์เข้าสู่ยุคที่มีเทคนิคการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง ซึ่งมีระบบถ่ายภาพด้วยกำลังขยายสูงให้ภาพที่มีความคมชัด ถึงแม้ชิ้นทดสอบตัวอย่างนั้นจะไม่ผ่านการกัดขึ้นรอยในระดับใดก็ตาม นอกจากนี้ยังมีระบบที่สามารถแยกเฟสของวัสดุได้จากค่าระดับพลังงาน หรือความยาวคลื่นจากอะตอมของธาตุ ถึงแม้จะสามารถทำให้ลดเวลาและขั้นตอนในการเตรียมโครงสร้างในเบื้องต้นลงได้ แต่ก็ไม่ได้ทำให้ค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์สำหรับงานโลหะทั่วไป สำหรับการตรวจสอบ หรือควบคุมคุณภาพในเชิงอุตสาหกรรม เช่น ในการวิเคราะห์ทดสอบงานเชื่อมโลหะ มีความต้องการแค่เพียงหาคุณลักษณะเฉพาะโครงสร้างที่ถูกต้อง หรือสังเกตพฤติกรรมจากผลกระทบทางความร้อนที่เกิดขึ้นกับวัสดุ ซึ่งการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope: OM) ก็เพียงพอสำหรับการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบได้ ข้อสำคัญในการเตรียมผิวชิ้นทดสอบและเตรียมสารเคมีพื้นฐานสำหรับการกัดขึ้นรอย ต้องอาศัยทักษะความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง จะให้ความชัดลึกน้อยมาก การจับยึดตัวอย่างที่นำมาศึกษาจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยผิวชิ้นงานตัวอย่างทดสอบจะต้องวางในตำแหน่งให้ตั้งฉากกับแนวศูนย์ของเลนส์กล้อง ซึ่งกล้องจุลทรรศน์สำหรับงานโลหะนั้นจะมีความแตกจากกล้องจุลทรรศน์ทั่วไป คือ การส่งคลื่นแสงไปตกกระทบตั้งฉากกับผิวของชิ้นทดสอบจะให้ภาพสว่าง และคลื่นแสงที่ไปตกกระทบกับผิวชิ้นทดสอบแล้วสะท้อนเป็นมุมเอียงจะให้เงาหรือเกิดเป็นภาพมืด (แสดงตามรูปที่ 2-27) ซึ่งกล้องจะมีระบบปรับมุมตกกระทบ ให้เปลี่ยนภาพที่เกิดจากสว่างเป็นมืดหรือมืดเป็นสว่างได้ เช่นถ้าภาพที่ได้ส่วนใหญ่เป็นสีดำ การเปลี่ยนส่วนที่มืดกลายเป็นส่วนที่สว่าง ทำให้เปรียบเทียบเห็นความแตกต่าง (แสดงตามรูปที่ 2-28) ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จากการสร้างให้ภาพมีความชัดลึก สีที่ผิวงานจะเป็นธรรมชาติเนื่องจากมีลักษณะคล้ายกับการมองแสงสีขาวทั่วไป



รูป 2-27 การหักเหของแสงจากกล้องจุลทรรศน์สำหรับโลหะ **[44]**



รูป 2-28 การสะท้อนแสงจากสว่างเป็นมืดและมืดเป็นสว่าง **[44]**

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน เริ่มมีการศึกษาวิจัยขึ้นโดย บริษัท ล็อกฮีดมาร์ติน ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่ผลิตเกี่ยวกับชิ้นส่วนอากาศยานมีความต้องการที่จะเชื่อมอะลูมิเนียมผสม แทนการใช้วิธียำหมุดแบบเดิม จึงให้ทุนสนับสนุนการค้นคว้าวิจัยด้านนี้ โดย ศาสตราจารย์ ด็อกเตอร์ กลินน์ อดัมส์ ที่ปรึกษาของบริษัทเป็นผู้รับผิดชอบโครงการ ร่วมกับ ด็อกเตอร์ ไมเคิล สจ๊วต และด็อกเตอร์ โรเบิร์ต เรโนด์ล แห่งมหาวิทยาลัยอาคาซ่าที่ปรึกษา บริษัทดวันตัน ได้ประสบความสำเร็จและมีการเผยแพร่ผลการ วิจัยโดยสถาบัน TWI (The Welding Institute) สถาบันวิจัยเทคโนโลยีของอังกฤษในปี ค.ศ. 1991 และได้มีการพัฒนาวิจัยต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน **[1][3][12][11]**

2.13.1 P. Cavaliere, G. Campnile, F. Panella, A. Squillace [49] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรในการเชื่อมที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม 6056 ด้วยหัวกดเชื่อมที่มีสลักแกนหมุนกวนแบบทรงกระบอกปลายตัด บ่าให้ความมีขนาดความแตกต่างกันสองขนาด คือ บ่าให้ความร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14.0 มิลลิเมตร และขนาดความโตของสลักแกนหมุนกวน 6.0 มิลลิเมตร มีความยาว 3.9 มิลลิเมตร ทำการเชื่อมตัวอย่างหนา 4.0 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 500 800 และ 1,000 รอบต่อนาที ความเร็วการเชื่อม 40 56 และ 80 มิลลิเมตรต่อนาที เอียงหัวกดเชื่อม 3.0 องศา ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการต้านทานแรงดึง พบว่า แนวเชื่อมที่ใช้ความเร็วรอบหมุนที่ 1,000 รอบต่อนาที และความเร็วในการเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ผลด้านความแข็งแรงดีที่สุด ส่วนที่ความเร็วในการเชื่อม 56 มิลลิเมตรต่อนาที จะให้ผลในด้านความละเอียดของเกรนดีกว่าความเร็วในระดับอื่นๆ

2.13.2 บรรเจิด ดอนเนตรงาม [20] ทำการศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลรูปร่างของสลักแกนหมุนกวนสองแบบ คือ แบบทรงกระบอกปลายกลม และ แบบทรงกระบอกปลายตรงต่อคุณสมบัติทางกลในอะลูมิเนียมผสม 6063-T6 โดยเครื่องกัดโลหะแบบอัตโนมัติ ทำการทดลองเชื่อมตัวอย่างหนา 6.0 มิลลิเมตร มุมเอียง 0.0 และ 3.0 องศา ใช้ตัวแปรความเร็วรอบหมุนเชื่อมสามระดับ 500 1,000 และ 1,500 รอบต่อนาที ตัวแปรความเร็วการเชื่อมสี่ระดับ 100 300 500 และ 700 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า สลักแกนหมุนกวนแบบทรงกระบอกปลายกลม มุมเอียง 3.0 องศา ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที ความเร็วการเชื่อม 700 มิลลิเมตรต่อนาที รอยเชื่อมให้ความสมบูรณ์แข็งแรงดีที่สุด มีค่าความต้านทานแรงดึงรอยเชื่อม 80.0 เปอร์เซ็นต์ ของวัสดุเดิม และมีค่าความแข็งต่ำสุดที่ข้างแนวเชื่อม 55.0 VHN บริเวณกลางรอยเชื่อม 66.0VHN และที่บริเวณวัสดุเดิม 88.0 VHN ตำแหน่งรอยขาดเกิดที่บริเวณข้างแนวเชื่อมระหว่าง HAZ กับเนื้อวัสดุเดิม

2.13.3 อนุชา ขวัญสุข [50] ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของสลักแกนหมุนกวนสองแบบ คือ แบบทรงกระบอกผิวเรียบ และแบบทรงกระบอกผิวเกลียว ของอะลูมิเนียมผสม 6063-T1ด้วยเครื่องกัดโลหะแบบอัตโนมัติทำการเชื่อมตัวอย่างหนา 6.0 มิลลิเมตร เอียงหัวกดเชื่อม 0.0 และ 3.0 องศา ที่ความเร็วรอบ 500 1,000 และ 1,500 รอบต่อนาที ความเร็วการเชื่อม 100 300 500 700 และ 900 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า สลักแกนหมุนกวนแบบทรงกระบอกผิวเรียบมุมเอียง 3.0 องศา ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที ความเร็วการเชื่อม 300 มิลลิเมตรต่อนาที รอยเชื่อมให้ความแข็งแรงสูงสุด 163 MPa ส่วนสลักแกนหมุนกวนแบบผิวเกลียวรอยเชื่อมแข็งแรงสูงสุด 169 MPa และมีค่าความแข็งสูงกว่าวัสดุเดิม 69.4 ถึง 76.3 VHN

2.13.4 P.M.G.P. Moreira [51] ทำการศึกษาสมบัติทางกลและลักษณะโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม 6061-T6 และ 6082-T6 ทำการเชื่อมตัวอย่างหนา 3.0 มิลลิเมตร ขนาดความโตของบ่าให้ความร้อน 17.0 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบ 1,120 รอบ/นาที ความเร็วการเชื่อม 224.0 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการเอียงหัวเชื่อม 2.5 องศา วัสดุอะลูมิเนียม 6061กับ 6082 เทียบกับการเชื่อมอะลูมิเนียม 6061และ 6082 ปกติ พบว่ารอยเชื่อมอะลูมิเนียม 6061กับ 6082 ให้ผลการต้านทานแรงดึง 218.6 MPa ใกล้เคียงกับ รอยเชื่อมอะลูมิเนียม 6061 มีค่าความ ต้านทานแรงดึง 221.3 MPa ส่วนรอยเชื่อมอะลูมิเนียม 6082 มีค่าความต้านต้านทานแรงดึงสูงกว่า 231.6 MPa ค่าความแข็งของรอยเชื่อมอะลูมิเนียม 6061 กับ 6082 ที่ตำแหน่งความกว้างของบ่าให้ความร้อนกับอะลูมิเนียม 6082 จะให้ค่าต่ำสุดที่ 58.0 VHN และรอยเชื่อมด้านอะลูมิเนียม 6061 จะมีค่าความแข็งสูงกว่า ที่ 68.0 VHN ซึ่งรอยเชื่อมกลุ่มตัวอย่างอื่น ค่าความแข็งบริเวณนี้จะสมดุลกัน ส่วนโครงสร้างทางจุลภาคอะลูมิเนียมกลุ่ม 6082 หรือ รอยเชื่อมบริเวณใกล้กับ 6082 จะมีเอกลักษณ์ที่ชัดเจนกว่า รอยเชื่อมของ 6061

2.12.5 K. Elangovan, V. Balasubramanian, and S. Babu, [15] ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างสลักแกนหมุนกวน และความโตของบ่าให้ความร้อนที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงบริเวณ HAZ บนอะลูมิเนียมผสม 6061 ด้วยลักษณะสลักแกนหมุนกวนห้าแบบ คือ แบบทรงกระบอกตัดตรง แบบทรงกระบอกผิวเกลียว แบบทรงกรวย แบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม และแบบหน้าตัดสามเหลี่ยม ทำการเชื่อมบนตัวอย่างหนา 6.0 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที ความเร็วการเชื่อม 75 มิลลิเมตรต่อนาที ขนาดความโตของบ่าให้ความร้อน 15.0 18.0 และ 21.0 มิลลิเมตร ขนาดความโตของสลักแกนหมุนกวน 6.0 มิลลิเมตร และมีความยาว 5.8 มิลลิเมตร พบว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยสลักแกนหมุนกวนแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม ที่ขนาดความโตของบ่าให้ความร้อน 18.0 มิลลิเมตร ให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมดีที่สุด และเกิดสิ่งบกพร่องภายในแนวเชื่อมน้อยที่สุด