

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเชื่อม (Welding)

การเชื่อม คือ การประสานโลหะสองชนิดเข้าด้วยกัน โดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนถึงจุดการหลอมละลายแล้วใช้เนื้อโลหะชิ้นงานเป็นตัวประสานเข้าด้วยกัน หรือจะเติมโลหะ โดยใช้ลวดเชื่อมซึ่งเป็นโลหะชนิดเดียวกัน หรือสมบัติใกล้เคียงกัน เป็นตัวประสาน ในขณะที่ชิ้นงานกำลังหลอมละลาย ความร้อนที่ให้แก่ชิ้นงานอาจได้จากพลังงานเคมี พลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานกล ขึ้นอยู่กับวิธีการเชื่อม แต่ละชนิดแตกต่างกันออกไป ซึ่งการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานด้วยแกนหมุน เป็นการใช้พลังงานกลให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน ในงานอุตสาหกรรมนั้นสามารถแบ่งกลุ่มของการเชื่อมออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

2.1.1 การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welding)

การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welding) คือ การเชื่อมโลหะที่อาศัยแหล่งความร้อน (Heat source) ภายนอกใส่เข้าไปในบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นวัสดุจนกระทั่งเกิดการหลอมเหลวเข้าด้วยกัน โดยขณะที่ทำการเชื่อมนั้นอาจมีการเติมลวดเชื่อม (Filler metal) ลงไปในแนวเชื่อมหรือไม่ก็ได้ ส่วนประกอบสำคัญของการเชื่อมประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

- แหล่งให้ความร้อน (Heat source) คือ แหล่งจ่ายความร้อนจากภายนอก เพื่อทำให้อุณหภูมิเกิดการหลอมละลาย

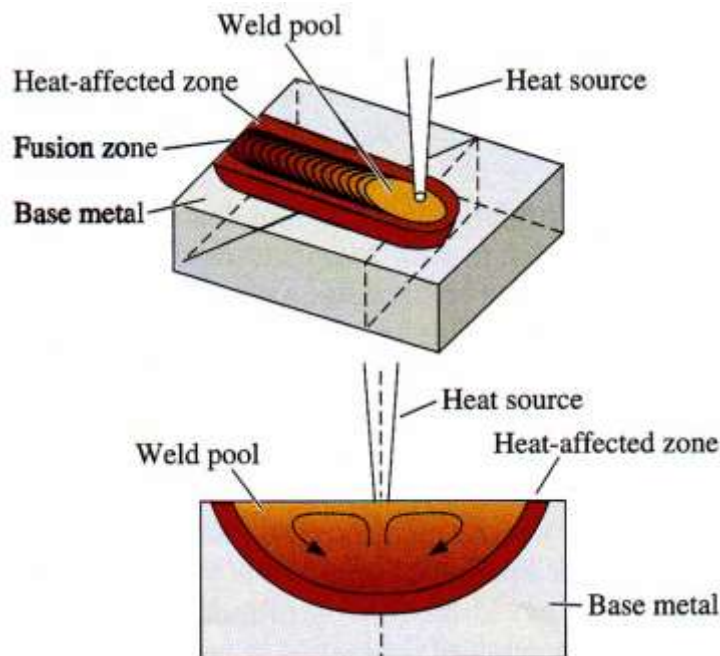
- บ่อหลอมละลาย (Weld pool) คือ บริเวณพื้นที่การหลอมละลายเนื่องจากความร้อนจากแหล่งให้ความร้อน โดยปกติโลหะหลอมละลายในบ่อหลอมละลายมักเกิดการกวนในขั้นตอนการหลอมจากแหล่งให้ความร้อนด้วย

- พื้นที่การหลอมละลาย (Fusion Zone) คือ พื้นที่ของโลหะเชื่อมที่ผ่านการหลอมละลายและแข็งตัวเป็นโลหะในสถานะของแข็ง

- พื้นที่อิทธิพลความร้อน (Heat Affected Zone) คือ พื้นที่ที่ไม่เกิดการหลอมละลายในขั้นตอนของการเชื่อม แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลง

การเชื่อมแบบหลอมละลายแบ่งออกได้เป็นหลายๆ รูปแบบ ขึ้นอยู่กับแหล่งให้ความร้อนเพื่อทำให้โลหะเกิดการหลอมละลาย เช่น การเชื่อมไฟฟ้า (Shield Metal Arc Welding: SMAW) การเชื่อมแก๊ส (Oxy-acetylene Gas Welding) การเชื่อมมิก/แม็ก (Gas Metal Arc Welding) การเชื่อมอาร์คด้วยลวด

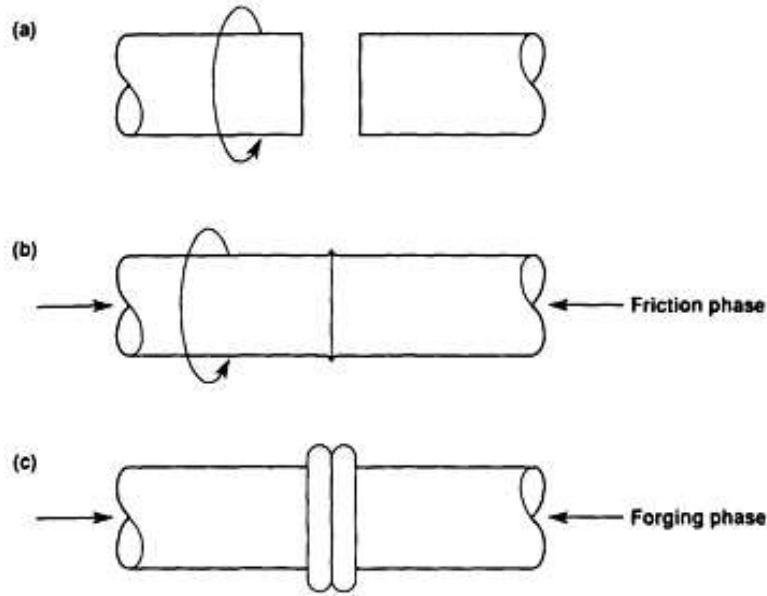
เชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux-cored Arc Welding) การเชื่อมอาร์คด้วยแท่งทังสเตน (Gas Tungsten Arc Welding) หรือการเชื่อมทิก (Tungsten Arc Welding) การเชื่อมอาร์คพลาสมา (Plasma Arc Welding) การเชื่อมอาร์คคาร์บอน (Carbon Arc Welding) การเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerge Arc Welding) การเชื่อมอาร์คสตั๊ด (Stud Arc Welding) เป็นต้น[14]



รูปที่ 2.1 การเชื่อมแบบหลอมละลาย [13]

2.1.2 การเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid Solution Welding)

การเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid Solution Welding) คือ การเชื่อมต่อวัสดุสองชิ้นเข้าด้วยกัน โดยโลหะบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชิ้นไม่เกิดการหลอมละลาย หรืออุณหภูมิของรอยต่อมีค่าต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุที่ทำการเชื่อม ส่วนมากรอยต่อของวัสดุเกิดการเชื่อมยึดกันได้ด้วยแรงทางกลหรือความเสียดทาน ตัวอย่างของการเชื่อมในสถานะของแข็งแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยกระบวนการเชื่อมที่แสดงเรียกว่า การเชื่อมด้วยการเสียดทาน (Friction Welding) มีขั้นตอนการเชื่อม คือ วัสดุทรงกระบอกตัวที่หนึ่งหมุนด้วยความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 2.2 (a) กดเข้าหาวัสดุทรงกระบอกตัวที่สองที่ถูกยึดแน่นอยู่กับที่ ไม่มีการหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (b) ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานทำให้วัสดุบริเวณรอยต่อเกิดการอ่อนตัว ขณะเดียวกันแรงกดในแนวแกนยาวของแท่งทรงกระบอก จะอัดชิ้นงานเข้าด้วยกันทำให้เกิดการเชื่อมยึดเข้าด้วยกัน

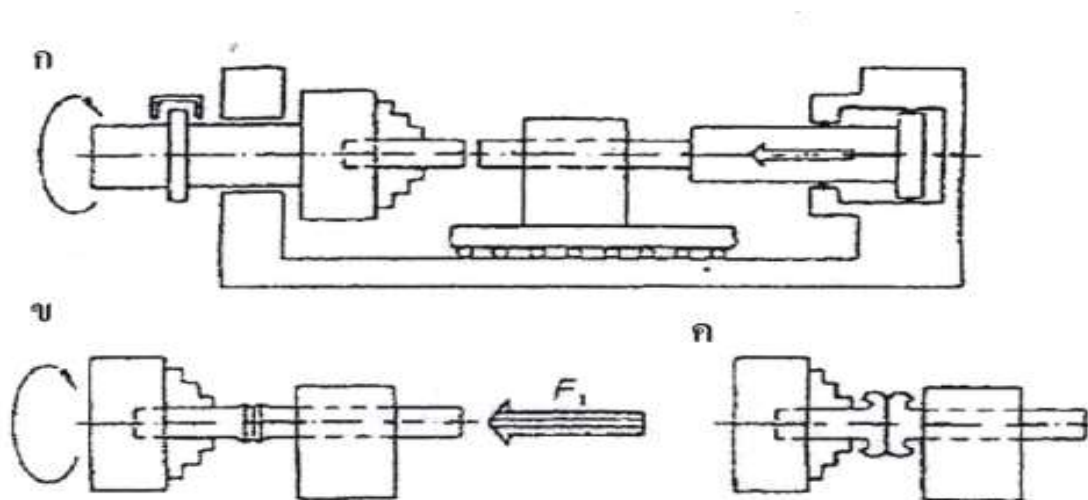


รูปที่ 2.2 การเชื่อมด้วยการเสียดทาน [14]

รูปแบบของการเชื่อมในสถานะของแข็งประกอบไปด้วยการเชื่อมต่างๆ เช่น การเชื่อมด้วยการแพร่ (Diffusion welding) การเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding) การเชื่อมด้วยอัลตราโซนิก (Ultrasonic welding) การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบจุด (Friction spot joining) หรือการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding) เป็นต้น เดิมทีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมีวิธีการเชื่อมอยู่ 3 วิธีด้วย แต่เนื่องจากได้มีการวิจัยและพัฒนาการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน จึงสามารถแบ่งการเชื่อมด้วยการเสียดทานออกเป็น 4 วิธี คือ

- ก. การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบธรรมดา (Conventional Friction Welding) เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานความร้อน โดยให้โลหะชิ้นงานชิ้นหนึ่ง และอีกชิ้นหนึ่ง ยึดอยู่กับที่ หลังจากเวลาผ่านไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง แล้วให้แรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งชิ้นงานหลอมติดกันและจะหยุดหมุนทันที
- ข. การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบแรงเฉื่อย (Inertia Welding) ชิ้นงานมีสองส่วน คือ ส่วนที่หมุน และส่วนที่อยู่กับที่ ส่วนที่หมุนจะถูกยึดอยู่ในอุปกรณ์ของเครื่องเชื่อม ซึ่งมีคอลเลก-ชัค (Collect-chuck) และล้อช่วยแรง (Flywheel) ซึ่งหมุนด้วยความเร็วคงที่ ที่ความเร็วหนึ่งจากนั้น จึงหยุดให้พลังงานที่ไปหมุนล้อช่วยแรง แต่ล้อช่วยแรงยังหมุนด้วยตัวเองอยู่เนื่องจากแรงเฉื่อย ในช่วงเวลาที่ล้อช่วยแรงหมุนด้วยตัวเองนี้ เมื่อนำชิ้นงานที่จับยึดอยู่กับที่มาสัมผัสกับชิ้นงาน ส่วนที่หมุนภายใต้แรงกดคงที่ พลังงานที่เกิดจากล้อช่วยแรงจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานจะเกิดการหลอมเชื่อมติดกัน

- ก. การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบล้อช่วยแรง (Flywheel Friction Welding) เป็นการรวมการเชื่อมแบบธรรมดาและแบบแรงเฉื่อยเข้าด้วยกัน โดยล้อช่วยแรงจะต่ออยู่กับมอเตอร์ขับเพื่อให้ถ่ายกำลังไปยังเพลาหมุน (Spindle) และตัวคัปเปิล (Couple) ซึ่งต่อรวมอยู่กับคลัทช์ (Clutch) ระบบของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนล้อช่วยแรงจะหมุนอยู่ตลอดเวลา ชิ้นงานส่วนที่หมุนจะต้องอยู่กับคัปเปิลและอีกชิ้นหนึ่งอยู่กับที่หลังจากได้ความเร็วรอบของชิ้นส่วนที่หมุนตามที่ต้องการแล้วจึงให้แรงอัดชิ้นงานส่วนที่อยู่กับที่กับส่วนที่หมุน โดยเพิ่มแรงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อชิ้นงานติดกันก็จะหยุดหมุนทันที
- ง. กระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ดีในสถานะของแข็ง คิดค้นโดยสถาบันการเชื่อมประเทศอังกฤษ (The welding institute : TWI) เพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลาย



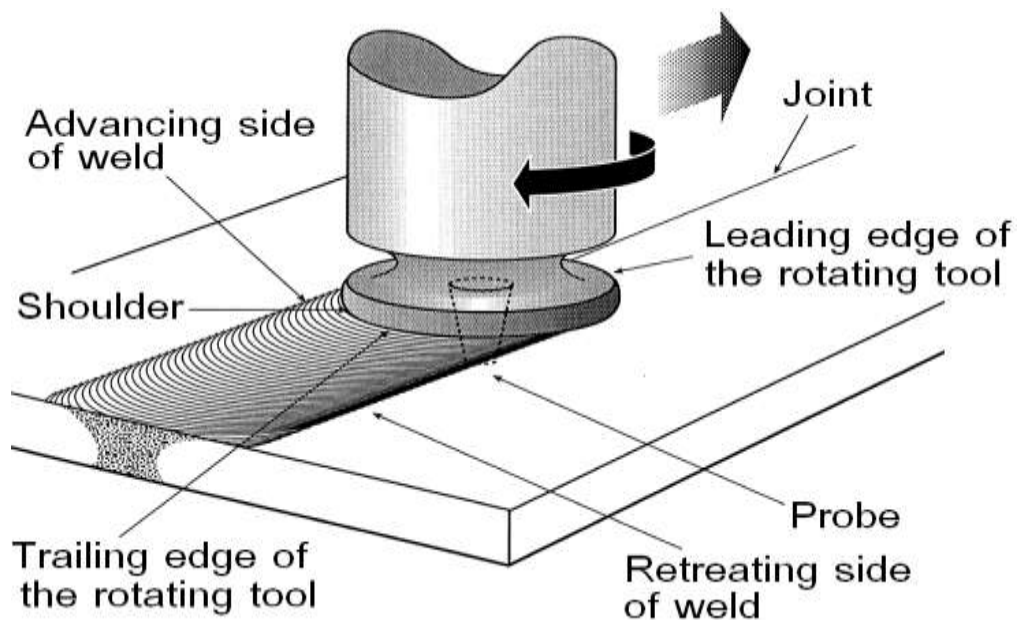
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเชื่อมแบบทั่วไป (ก) ชิ้นงานด้านซ้ายหมุนด้วยความเร็วรอบ (n) และชิ้นงานด้านขวาถูกเลื่อนเข้าด้วยแรงจากไฮดรอลิก ; (ข) ชิ้นงานด้านขวาถูกอัดด้วยแรง (F_1) จนชิ้นงานหลอมละลาย ; (ค) ชิ้นงานด้านขวาถูกอัดจนติดกันอย่างสมบูรณ์กับชิ้นงานด้านซ้าย ชิ้นงานเชื่อมจะหยุดหมุนทันที [15]

2.2 การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding : FSW) [3]

2.2.1 หลักการพื้นฐาน

การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็งที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการ

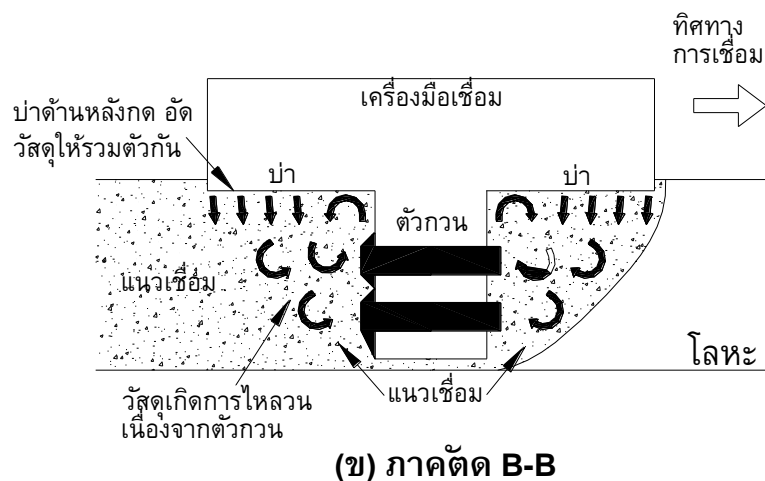
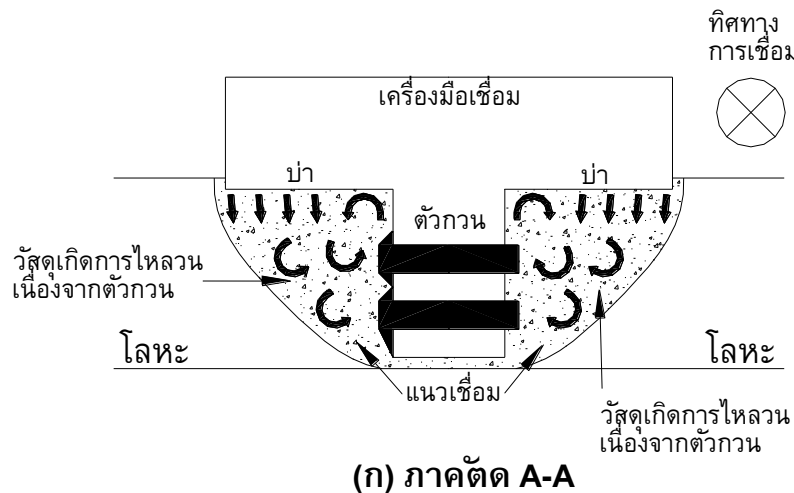
เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย (Conventional Fusion Welding) ลักษณะกระบวนการเชื่อมโดยสังเขปแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ตัวกวน (Probe or Stirrer) ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องมือเชื่อม (Rotating Tool) สอดลงเข้าไปในรอยต่อของวัสดุจนกระทั่งบ่า (Shoulder) ของเครื่องมือเชื่อมสัมผัสกับผิวของรอยต่อ ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างเครื่องมือเชื่อมกับวัสดุ ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวอยู่ในสถานะคล้ายของไหล (Plastic Fluid-like State) และเคลื่อนที่รอบตัวกวนภายใต้บ่าของเครื่องมือเชื่อม เมื่อเครื่องมือเชื่อมเคลื่อนที่วัสดุในสถานะคล้ายของไหลจะเคลื่อนที่เข้ามารวมตัวกันและบ่าเครื่องมือด้านหลัง (Trailing Edge of the Rotating Tool) จะกดอัด และผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นแนวเชื่อม



รูปที่ 2.4 กรรมวิธีการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน [2]

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [3] ได้อธิบายขั้นตอนการเชื่อมไว้อย่างน่าสนใจ ดังนี้ ตัวกวนที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องมือเชื่อมสอดลงเข้าไปในรอยต่อของวัสดุจนกระทั่งบ่าของเครื่องมือเชื่อมสัมผัสกับผิวของรอยต่อ ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของตัวกวนและบ่าของเครื่องมือกับเนื้อวัสดุรอบๆ ตัวกวน ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวอยู่ในสถานะคล้ายของไหล (Plastic fluid-like state) และเคลื่อนที่รอบตัวกวนภายใต้บ่าของเครื่องมือเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงภาคตัด A-A และ B-B ในรูปที่ 2.5 วัสดุที่เคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวนจะเกิดการเคลื่อนที่สู่ด้านบนของรอยต่อ และเกิดการกดซ้อนลงมา เนื่องจากการกดของบ่าเครื่องมือทำให้วัสดุเกิดการไหลวน หรือเกิดการกวน (Stirring) ภายใต้บ่าขึ้น ซึ่ง

ลักษณะที่เกิดขึ้นนี้เป็นสิ่งที่ผู้คิดค้นกำหนดชื่อกระบวนการว่า “Friction Stir Welding” อย่างไรก็ตามคำจำกัดความในภาษาไทยในปัจจุบันยังไม่มีกำหนดขึ้น ดังนั้นผู้เขียนจึงขอใช้คำว่า “การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน” เพื่อการอธิบายในบทความนี้เป็นเบื้องต้น ขั้นตอนต่อไปเมื่อวัสดุที่อ่อนตัวเกิดการไหลวนแล้ว และเมื่อตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ วัสดุที่อ่อนตัวและเกิดการกวนอยู่ด้านหน้าของตัวกวนจะถูกถ่ายเทมาสู่ด้านหลังตามทิศทางการหมุนของตัวกวนทางด้านรีทริทึง และบางส่วนจะไหลจากด้านหลังสู่ด้านหน้าทางด้านแอดวานซึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 (ด้านรีทริทึง คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนสวนทางกับทิศทางการเชื่อม ขณะที่ด้านแอดวานซึ่ง คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนขนานกับทิศทางการเชื่อม) จากนั้นเมื่อวัสดุส่งผ่านรอบๆ ตัวกวนและตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ปาดด้านหลังของเครื่องมือเชื่อม จะกดอัด และผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.5 (ข)



รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดแนวเชื่อมแสดงภาคตัดในรูปที่ 2.4 [3]

หากนำเอาการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนมาทำการเชื่อมอลูมิเนียมผสมต่างๆ แล้วอาจทำให้เกิดข้อดีและข้อเสียกับกระบวนการได้ดังนี้

ข้อดี

- เนื่องจากเป็นกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็ง ปัญหาที่มักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นของแข็งของการเชื่อมวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมด้วยการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น อลูมิเนียม จะหมดไป นอกจากนั้นผิวออกไซด์หนาที่เคลือบอยู่บนผิวของอลูมิเนียมจะถูกทำให้แตกออกด้วยการขัดหมุนของตัวกวนและกระจายไปทั่วทั้งแนวเชื่อม และลดปัญหาการเสื่อมสภาพของแนวเชื่อมลง แนวเชื่อมที่ได้ส่วนใหญ่เป็นแนวเชื่อมที่สมบูรณ์ไม่มีจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น
- กระบวนการเชื่อมราคาไม่แพง สามารถใช้เครื่องกวดในการเชื่อมได้ผิวหน้าแนวเชื่อมคุณภาพดีเยี่ยม
- ใช้พลังงานน้อย
- เชื่อมวัสดุหนาสูงสุด 12 มม.
- ความแข็งแรงต่อความล้า (Fatigue strength) ดีเยี่ยม

ข้อเสีย

- ความดันและแรงที่เกิดขึ้นมีค่าสูง ดังนั้นในการเชื่อมต้องจับยึดชิ้นงานให้แน่นเสมอ
- ผลจากการเชื่อมทำให้เกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงาน ดังนั้นจึงต้องมีการอบชุบด้วยความร้อนเพื่อให้ได้สมบัติเดิมตลอดชิ้นงาน
- มีจุดบกพร่องที่มักเกิดขึ้นที่จุดสุดท้ายของแนวเชื่อม ที่เกิดจากการถอดตัวกวนออกจากแนวเชื่อม
- เหมาะสมกับการเชื่อมทำราบ ชิ้นงานแบนยาว
- ช่องว่างระหว่างแผ่นมีค่าสูงสุดไม่เกิน 10% ของความหนาแผ่นชิ้นงาน

2.2.2 ตัวแปรการเชื่อม

รอยต่อของวัสดุที่เกิดจากการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนเกิดจากการไหลตัวของวัสดุที่อ่อนตัวจากความร้อนเสียดทานและเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของวัสดุ ตัวแปรการเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญที่ป้องกันการเกิดขึ้นของการไหลอย่างมีประสิทธิภาพของวัสดุ และค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน ตัวแปรการเชื่อมที่สำคัญประกอบไปด้วย

- ความหนาของวัสดุ
- ชนิดของรอยต่อ
- ชนิดของวัสดุ
- รูปร่างของตัวกวน
- ความเร็วรอบของตัวกวน
- ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม
- ความเอียงของตัวกวน
- ตำแหน่งการวางแผ่นอลูมิเนียม

2.3 อลูมิเนียม

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมบริสุทธิ์ [18]

สัญลักษณ์	Al
หมายเลขอะตอม	13
ความถ่วงจำเพาะ	2.7
โครงสร้างผลึก	FCC
จุดหลอมเหลว	660°C
โมดูลัสยืดหยุ่น	69,000 MPa
สินแร่	บอกไซต์ (สารมลทินผสมระหว่าง Al_2O_3 และ $Al(OH)_3$)
ธาตุผสม:	Cu, Mg, Mn, Si, Zn
การใช้งาน:	บรรจุภัณฑ์ อลูมิเนียมแผ่นบาง ตัวนำไฟฟ้า หม้อ กระทะ ชิ้นส่วนโครงสร้าง ยานอวกาศ รอยยนต์ หรือชิ้นส่วนที่ต้องการน้ำหนักเบา

อลูมิเนียมเป็นธาตุที่พบมากเป็นอันดับสองในโลก [16] และเป็นโลหะที่มีความสำคัญในการนำมาใช้งานทางวิศวกรรมในปัจจุบัน สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของอลูมิเนียมแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 อลูมิเนียมมีความหนาแน่น 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือประมาณหนึ่งในสามส่วนของเหล็กกล้า (7.83 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยมในบรรยากาศน้ำทะเล ปิโตรเคมี และระบบเคมีอื่นๆ ผิวของอลูมิเนียมมีความสะท้อนแสงสูง อลูมิเนียมมีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนักมีค่าสูงกว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel) อลูมิเนียมบริสุทธิ์มี

ค่าความแข็งแรงดึงสูงถึง 90 MPa และความแข็งแรงดึงสามารถเพิ่มขึ้นถึง 680 MPa เมื่อทำการขึ้นรูป
เส้นอลูมิเนียมบริสุทธิ์ [17]

ตารางที่ 2.2 การแบ่งเกรดของอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม [18]

กลุ่ม	บริสุทธิ์	Cu	Mn	Si	Zn	Sn
ผ่านการรีด	1XXX	2XXX	3XXX	4XXX	7XXX	8XXX
ผ่านการหล่อ	1XXX	2XX.X		4XX.X	7XX.X	2XX.X

ตารางที่ 2.3 สมบัติของอลูมิเนียมผสม [18]

รหัส	ส่วนผสมทางเคมี (%)						การอบ	ความแข็งแรง (MPa)	%การยืดตัว
	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si			
1100	99.0	-	0.6	-	-	0.3	O	90	40
							H18	165	10
2024	93.5	4.4	0.5	1.5	0.6	0.5	O	185	20
							T3	485	18
3034	96.5	0.3	0.7	1.0	1.2	0.3	O	180	22
							H36	260	7
4043	93.6	0.3	0.8	-	-	5.2	O	130	25
							H18	285	1
5050	96.9	0.2	0.7	1.4	0.1	0.4	O	125	18
							H38	200	3
6063	98.5	-	0.3	0.7	-	0.4	O	90	25
							T4	172	20

การแบ่งชนิดของอลูมิเนียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม [18] ดังแสดงในตารางที่ 2.2 คือ กลุ่ม
ของอลูมิเนียมที่ผ่านการรีด และกลุ่มของอลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อ ในที่นี้ขอลำถึงอลูมิเนียมกลุ่มที่
ผ่านการรีดเท่านั้น โดยที่อลูมิเนียมที่ผ่านการรีดนั้นสามารถแบ่งแยกได้โดยใช้ตัวเลข 4 ตัว ดัง
รายละเอียดด้านล่าง และตัวอย่างของอลูมิเนียมบางกลุ่มแสดงในตารางที่ 2.3

- อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (อนุกรม 1xxx) ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมมีความบริสุทธิ์ ของอลูมิเนียมที่ 99.0 % ถึง 99.9 % อลูมิเนียมในกลุ่มนี้ยังจะมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และยังสามารถสะท้อนแสงได้ดีจึงนิยมใช้ในการแผ่สะท้อนแสงในไฟหน้ารถยนต์ นอกจากนั้นยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายทั้งการตัดเฉือนและขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการต่าง ๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่อลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีข้อเสีย คือในด้านของความแข็งแรง และคุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุอื่น แต่ก็สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมธาตุเจืออื่นเพื่อให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป หรือการขึ้นรูปเย็น คือการทำให้แข็งได้ด้วยความเค้น (Strain Hardening)
- อลูมิเนียมผสมทองแดง (อนุกรม 2xxx) เป็นอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูงคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยสามารถที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ด้วยการวิธีทางความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (Solution Treatment) และชุบ (Quenching) ต่อจากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) เรียกกระบวนการนี้ว่า การอบบ่ม (Ageing Hardening) ซึ่งภายหลังการอบบ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจะลดลงและความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดนี้จะต่ำกว่าชนิดอื่นๆ คือ จะเชื่อมได้ยากโดยจะเกิดการอ่อนตัวที่แนวเชื่อม ดังนั้นจึงมักทำการเชื่อมต่อด้วยวิธีการย้ำหุค
- อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (อนุกรม 3xxx) เป็นอลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติเหมือนกับอลูมิเนียมบริสุทธิ์แต่มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการวิธีทางความร้อนได้
- อลูมิเนียมผสมซิลิกอน (อนุกรม 4xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการวิธีทางความร้อนได้ แต่เมื่ออยู่ในสภาพของเหลวจะไหลตัวได้ดีและขณะแข็งตัวจะไม่เกิดความแตกร้าวทั้งในสภาพร้อนและเย็น ดังนั้นอลูมิเนียมจึงนิยมใช้ในการเป็นลวดเติมสำหรับเชื่อมอลูมิเนียมผสมและอลูมิเนียมหล่อ
- อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (อนุกรม 5xxx) บางครั้งจะมีการเติม แมกนีเซียมลงไปด้วย อลูมิเนียมผสมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ด้วยการวิธีทางความร้อน จึงนิยมนำไปทำลวดเติมเหมือนอนุกรม 4xxx นอกจากนั้นยังนำไปทำถังหรือขวดบรรจุแก๊ส (Storage Vessels)
- อลูมิเนียมแมกนีเซียม – ซิลิกอน (อนุกรม 6xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยการวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีพอสมควร ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการแปรรูปและความสามารถในการ

เชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ แต่มีข้อเสีย คือ เมื่อนำอลูมิเนียมผสมชนิดนี้ไปทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการให้ความร้อนแบบต่าง ๆ จะทำให้บริเวณแนวเชื่อมอ่อน

- อลูมิเนียมสังกะสี – แมกนีเซียม (อนุกรม 7xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้มีการเจือธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลักและแมกนีเซียเป็นธาตุรองนอกจากนั้นยังมีทองแดงและโครเมียมอีกเล็กน้อยอลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีมากและมีน้ำหนักเบา ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำเพราะจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณแนวเชื่อม อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตและพัฒนาในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดสูงขึ้น โดยจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณดังกล่าวได้ เกิดความแข็งแรงตัวจากตกตะกอนตามธรรมชาติ

ตารางที่ 2.4 อักษรย่อท้ายที่แสดงรายละเอียดของการผลิต [18]

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
F	จากการผลิตโดยตรงไม่ผ่านการอบชุบ
H	การแปรรูปเพื่อเพิ่มความแข็งแรง (Strain hardening)
O	การอบอ่อน (Annealing) เพื่อลดความแข็งแรงจากการแปรรูป และเพิ่มความเหนียวเนื่องจากแรงดึง
T	การอบคืนไฟ (Tempering)
W	การอบป่ม (Age hardening)

นอกจากสัญลักษณ์ตัวเลข 4 ตัวแล้ว อลูมิเนียมยังมีสัญลักษณ์กรรมวิธีทางความร้อนท้ายด้วยตัวอักษรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งเป็นการการกระทำเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับอลูมิเนียมผสม โดยที่มีวิธีการให้ความร้อนที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน และได้กำหนดสัญลักษณ์อักษรตามหลัง เพื่อที่จะเป็นการระบุถึงกรรมวิธีทางความร้อนมากกระทำต่ออลูมิเนียมผสมชนิดนั้น ๆ โดยเฉพาะอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม Non – Heat Treatable ก็คือกลุ่ม 1xxx 3xxx และกลุ่ม 5xxx ส่วนอลูมิเนียมในกลุ่ม Heat Treatable เช่นกลุ่ม 6xxx 4xxx และกลุ่ม 2xxx ก็สามารถเชื่อมได้แต่ต้องอาศัยเทคนิคและความชำนาญเป็นพิเศษ และอาจจะทำให้ความเหนียวของอลูมิเนียมลดลงได้ ส่วนกลุ่ม 7xxx ก็คือกลุ่มที่มีความแข็งแรงสูงมากเชื่อมได้ลำบากมากจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมแบบอาร์ค และรหัสของกระบวนการทางความร้อน ได้ถูกกำหนดโดยสมาคมอลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี 1948 เป็น

ตัวอักษร 4 ตัว ตามด้วยตัวเลขอีกหนึ่งหรือสองตัว เพื่อบอกถึงความแตกต่างในสาระสำคัญของแต่ละกรรมวิธีได้แก่

- F หมายถึง สภาพโลหะที่ได้จากการหล่อ โดยยังไม่ได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหรือทางกล
- O หมายถึง สภาพของโลหะภายหลังการอบอ่อนซึ่งโลหะจะเกิดผิวกใหม่ เป็นภาวะที่โลหะจะอ่อนและเหนียวที่สุดในบรรดาอุณหภูมิชนิดทั้งหลาย
- H1 หมายถึง การขึ้นรูปเย็นอย่างเดียว
- H2 หมายถึง การขึ้นรูปเย็นและอบอ่อนให้เหนียวขึ้นเล็กน้อย
- H3 หมายถึง การขึ้นรูปเย็นแล้วนำไปอบด้วยอุณหภูมิที่ไม่สูงนัก
- T1 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายบางส่วนแล้วปล่อยให้แข็งตัวตามธรรมชาติ
- T2 หมายถึง โลหะผ่านการอบอ่อนมาแล้ว แล้วใช้กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อขึ้นรูปมาเท่านั้น
- T3 หมายถึง สภาพโลหะที่ผ่านการอบละลาย (Solution Heat Treatment) แล้วแปรรูปเย็นทันที เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกล
- T4 หมายถึง สภาพโลหะที่ผ่านการอบละลาย และปล่อยให้แข็งตัวตามธรรมชาติจนอยู่ในสภาพคงรูป
- T5 หมายถึง โลหะที่ผ่านการอบละลายบางส่วนและทำให้แข็งตัวแบบเทียม (Artificial aging)
- T6 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายมาก่อนแล้ว นำไปทำให้เย็นตัวด้วยกรรมวิธีทางความร้อน
- T7 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายแล้วปรับให้คงสภาพโดยการควบคุมอุณหภูมิและเวลา เพื่อให้ได้ขนาดเม็ดเกรนให้มีขนาดที่ทำให้โครงสร้างภายในมีเสถียรภาพ
- T8 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลาย ผ่านการแปรรูปเย็นและทำให้แข็งตัวแบบเทียม
- T9 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายทำให้แข็งตัวแบบเทียมด้วยกระบวนการทางความร้อน แล้วจึงนำไปแปรรูปเย็น
- T10 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายบางส่วนทำนองเดียวกับ T5 นำไปผ่านการแปรรูปเย็นก่อน ทำให้แข็งตัวแบบเทียม

อย่างไรก็ตามการใช้งานอลูมิเนียมบริสุทธิ์ค่อนข้างจำกัด ส่วนมากมักใช้กับงานที่ต้องการความสามารถในการขึ้นรูปสูง เช่น อุปกรณ์เครื่องครัว อุปกรณ์ขนถ่ายและจัดเก็บสารเคมี เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการเติมธาตุผสมต่างๆ ลงไปในอลูมิเนียมและทำให้เกิดอลูมิเนียมเกรดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 นอกจากนั้นสัญลักษณ์ที่แสดงชนิดของอลูมิเนียมยังมีตัวอักษรห้อยท้ายต่อจากตัว เลข 4 ตัวที่เป็นสิ่ง

สำคัญที่บ่งบอกให้ทราบถึงรายละเอียดของการผลิตดังแสดงในตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลและการใช้งานของอูมิเนียมผสมบางเกรดแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

2.4 เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 [17]

เหล็กกล้า SKD 11 หรือเทียบเท่าเหล็ก AISI D2 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าทำเครื่องมือชนิดคาร์บอนสูง โครเมียมสูง (12% โครเมียม) และเหล็กกล้าสำหรับใช้ทำแม่พิมพ์เย็น ที่คงรูปร่างเดิมได้ดีหลังจากการชุบแข็ง เป็นเหล็กที่เหมาะสมสำหรับการชุบด้วยอากาศ และมีความเหนียวดีมาก ลักษณะเด่นของเหล็กกล้า SKD 11 มีความทนทานต่อการสึกหรอดี และรักษาคมดัดได้ดีเยี่ยม รวมทั้งคมเหนียวแน่นสูงความแข็งแรงสูงมากเมื่อผ่านการชุบแข็ง ชุบแข็งง่าย สามารถชุบในโตรคิงได้ ทนต่อการเสียดสีได้ดีเยี่ยมและมีความเหนียวแกร่งพอสมควร คุณภาพสูง ทนทานการเสียดสีสูง โดยรวมแล้วเหล็กกล้า SKD 11 จะประกอบด้วยส่วนผสมหลัก โดยประมาณ คือ C 1.5% , Cr 12% , Mo 0.9-1% , V 0.8-1% และสัดส่วนธาตุอื่นๆ ที่เป็นธาตุผสมรอง คือ Mn 0.4% ,Si 0.4-0.5%

2.5 การทดสอบความแข็งแรงดึง

การทดสอบโดยการดึงเป็นวิธีการทดสอบที่ง่ายที่สุด ในวิธีการทดสอบหาสมบัติทางกลของวัสดุ และนิยมทดสอบกันมากเพราะสามารถที่จะให้ข้อมูลที่เป็นสมบัติทางกลของวัสดุ และนิยมทดสอบกันมากเพราะสามารถที่จะให้ข้อมูลที่เป็นสมบัติทางกลด้านพื้นฐานพอสมควร เช่น ความต้านทานแรงดึง ความยืดตัว และความเปราะ ซึ่งเป็นข้อสำคัญที่สุดและเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบวิธีการทดสอบทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยชิ้นทดสอบมาตรฐานจะถูกดึงด้วยแรงที่กำหนดทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปจนกระทั่งพังทลาย ในการทดสอบแรงดึงอ้างอิงตามรูปที่ 2.6 ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังแสดงในสมการที่ 2.1 ถึง 2.6 ดังนี้

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

$$e_t = \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (2.2)$$

$$\%elongation = \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100\% \quad (2.3)$$

$$\%R.A. = \frac{(A - A_0)}{A_0} \times 100\% \quad (2.4)$$

$$E = \frac{\sigma_t}{e_t} \quad (2.5)$$

เมื่อ

σ_t = ความเค้น

F_t = แรงกระทำ

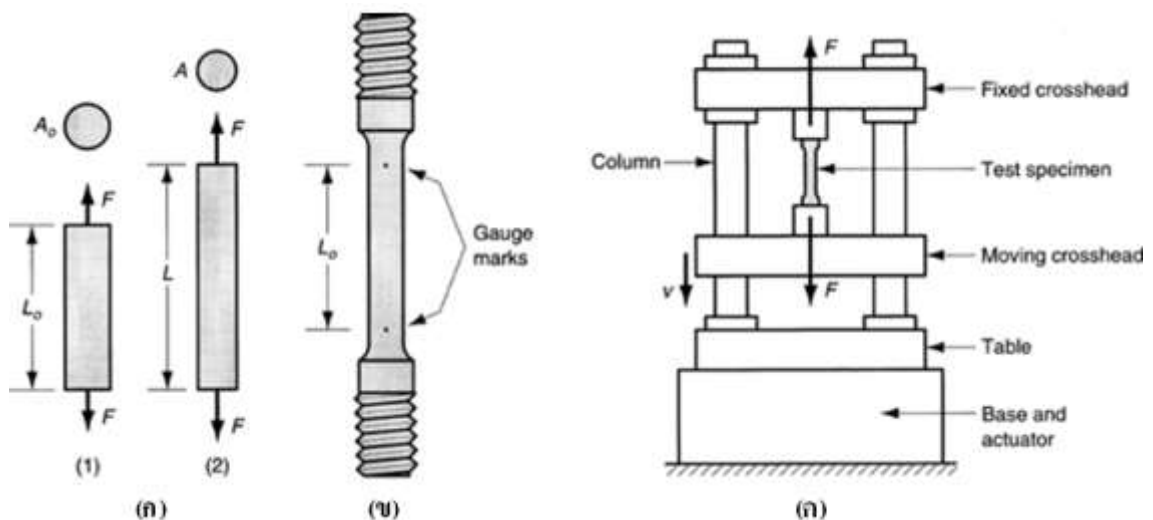
e_t = ความเครียด

L = ความยาวสุดท้าย

L_0 = ความยาวเริ่มต้น

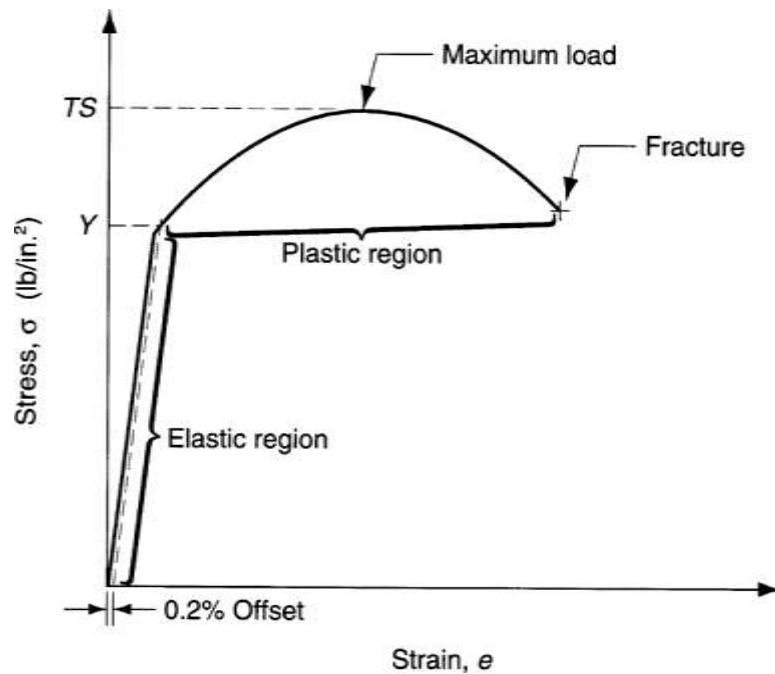
A = พื้นที่หน้าตัดสุดท้าย

A_0 = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น



รูปที่ 2.6 การทดสอบแรงดึง: (ก) การให้แรงแก่ชิ้นงาน (ข) ชิ้นทดสอบ (ค) เครื่องทดสอบ [18]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้นความเครียด ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและค่าความเครียดในแกนนอนดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด [18]

ตารางที่ 2.5 โมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิด [18]

โลหะ	โมดูลัสการยืดหยุ่น (MPa)
อลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม	69×10^3
เหล็กหล่อ	138×10^3
ทองแดงและทองแดงผสม	110×10^3
เหล็ก	209×10^3
ตะกั่ว	21×10^3
แมกนีเซียม	48×10^3
นิกเกิล	209×10^3
เหล็กกล้า	209×10^3

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้นความเครียดเราพบว่าเมื่อเราเริ่มดึงขึ้นทดสอบอย่างช้าๆ ขึ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดออกจนถึงจุดๆหนึ่ง ในช่วงนี้ที่กราฟมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดเป็นสัดส่วนคงที่ กราฟเป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's Law) คือความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด เรียกว่าจุดพิภักสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิภักสัดส่วนนี้วัสดุจะแสดง

พฤติกรรมการคืนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Behavior) คือเมื่อปล่อยแรงกระทำขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม และเมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปอีกจนเกินขีดจำกัดส่วน เส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรงกราฟ วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดๆ หนึ่งนั้น เรียกว่าจุดพิบัติการยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งที่จุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Permanent Deformation) กับวัสดุนั้นแต่เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation) และจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ที่จุดนี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) ซึ่งค่านี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราจะใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย ในวัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.20% แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นโค้งของกราฟค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่าความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) ดังรูปที่ 2.5 ค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิดและความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด แสดงไว้ดังตารางที่ 2.5 ถึง 2.6

ตารางที่ 2.6 ความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด [18]

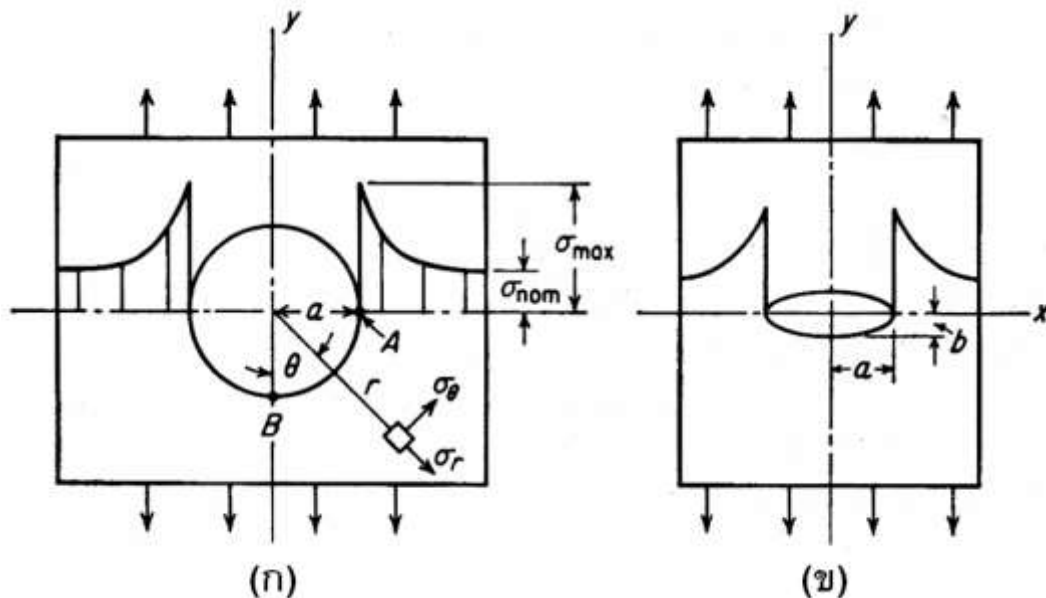
โลหะ	ความแข็งแรงคราก (MPa)	ความแข็งแรงสูงสุด (MPa)
อลูมิเนียมผสม	175	350
เหล็กหล่อ	275	275
ทองแดงผสม	205	410
แมกนีเซียมทองแดง	175	275

โดยทั่วไป ในการทดสอบความแข็งแรงดึง รูปร่างของชิ้นงานที่ไม่มีความต่อเนื่อง เช่น รู ร่องบาก ทำให้เกิดการกระจายตัวของความเค้นในชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอ บริเวณใกล้เคียงพื้นที่ที่ไม่ต่อเนื่องนั้นจะมีค่าความเค้น (σ_{max}) ค่อนข้างสูงกว่าความเค้นเฉลี่ยที่บริเวณพื้นที่ที่ห่างจากความไม่ต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.8 บริเวณด้านข้างของรูวงกลมและรูวงรี หากไม่มีรูความเค้นที่กระจายตลอดทั้งแผ่นจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงส่วนด้วยพื้นที่หน้าตัดของแนวแรงดึงที่กล่าวผ่านมาก่อนหน้านี้ ค่าความเข้มข้นของความเค้นหาค่าได้โดยการหาค่าองค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี (Theoretical stress concentration factor: K_t) ดังแสดงในสมการที่ 2.6 ซึ่งเป็นค่าที่อธิบายอัตราส่วนระหว่างความเค้น

สูงสุดกับค่าความเค้นปกติที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดจริงของชิ้นงาน ลักษณะระดับความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างชิ้นงานตัวอย่างที่มีความไม่ต่อเนื่องของพื้นผิว และค่าองค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีแสดงในรูปที่ 2.9

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nominal}}} \quad (2.6)$$

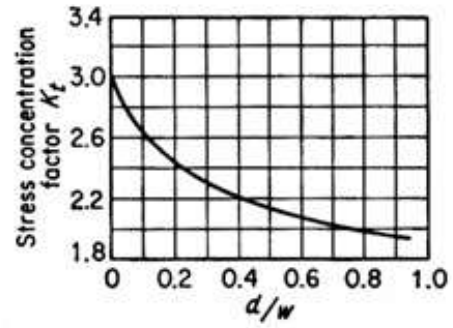
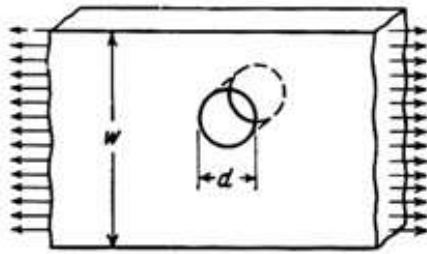
เมื่อ K_t = องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี
 $\sigma_{\max}$ = ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นใกล้จุดที่มีความไม่ต่อเนื่อง
 σ_{nominal} = ความเค้นปกติในชิ้นงานที่มีความต่อเนื่อง



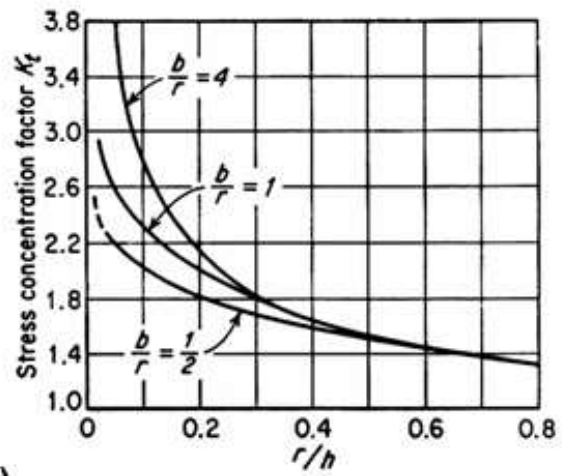
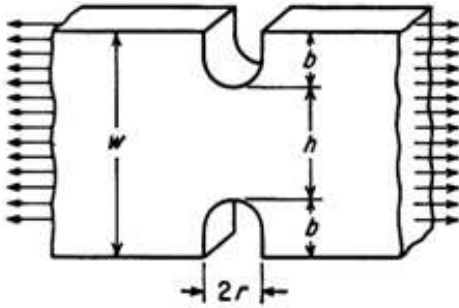
รูปที่ 2.8 การกระจายตัวของความเค้นเนื่องจาก (ก) รูวงกลม และ (ข) รูวงรี [20]

2.6 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

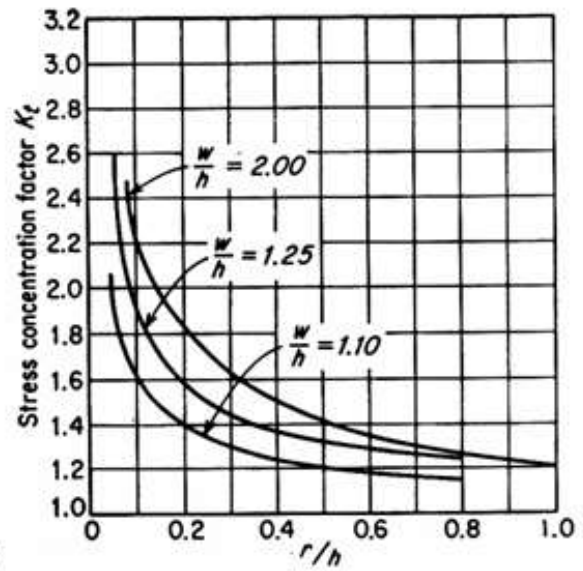
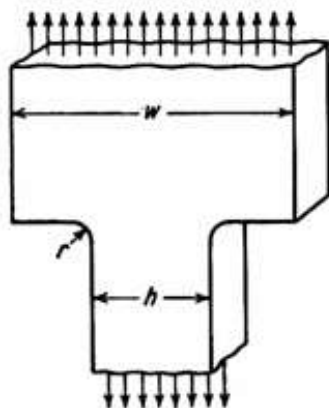
การตรวจสอบงานเชื่อมโลหะด้วยการตรวจสอบแบบมหภาค โดยมีจุดประสงค์ ดังนี้ คือ ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม จำนวนชั้นของแนวเชื่อม บริเวณที่มีผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) สลักฝังในการเชื่อมของแนวเชื่อม และรูพูนของงานเชื่อมการเตรียมชิ้นทดสอบมหภาค (Macro specimen) โดยการกัดผิวแล้วกัดด้วยน้ำยาเคมีตามความเหมาะสม แล้วตรวจสอบด้วยสายตา (Visual test) หรือใช้กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่าเข้าช่วย การตรวจสอบที่ให้ผลดีที่สุดนั้น ผู้ตรวจ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.9 องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีสำหรับชิ้นงานรูปร่างต่างๆ [20]

สอบต้องรับผิดชอบและควบคุมการตรวจสอบตามวิธีอย่างถูกต้อง และพิจารณารอยบกพร่องที่ปรากฏ เปรียบเทียบเกณฑ์การตัดสินตรวจสอบเพื่อสรุปผลว่าชิ้นงานนั้นยอมรับได้หรือไม่

2.6.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ตัดชิ้นงานตามขวางออกเป็นชิ้นประมาณ 4 – 5 ชิ้น ห่างจากขอบงานประมาณ 1 นิ้ว ของปลายทั้งสองข้าง ข้อควรระวัง คือ การตัดชิ้นงานต้องพยายามมิให้เกิดความร้อน หรือ ใช้แรงกด ระหว่างการตัดมากเกินไป เพราะจะทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนรูปได้

2.6.2 ขั้นตอนการตรวจสอบ

การเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบโดยการขัดผิวชิ้นงานที่ทำการทดสอบด้วยกระดาษทราย ซิลิกอนคาร์ไบด์ เบอร์ 600 800 1000 1200 ตามลำดับ โดยการขัดน้ำ (การขัดต้องวางกระดาษทรายบน แผ่นที่เรียบ เช่น กระดาษหนา เพื่อให้ได้ระนาบเดียวกัน) จนรอยกระดาษทรายมีทิศทางเดียวกันตลอดชิ้น ทดสอบ แล้วหมุนชิ้นทดสอบทำมุม 90 องศา ขัดจนรอยเดิมหายไปแล้วเปลี่ยนกระดาษทรายเบอร์ที่ละเอียดขึ้นไปจนกระทั่งถึงเบอร์ 1200

การตรวจสอบและผลการตรวจสอบ อาศัยการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual test) ตามมาตรฐาน ASME Section V โดยตรวจสอบด้วยตาเปล่า หรืออุปกรณ์กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า แล้วบันทึกผลที่ปรากฏ โดยการถ่ายรูป หรือสเก็ตภาพ

2.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Micro structure examination)

มีจุดประสงค์ของการทดสอบเพื่อศึกษาความไม่สม่ำเสมอของเนื้อภายในและสิ่งบกพร่องเกิดความเค้นขัดขึ้นและสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น รอยแตกร้าวที่แนวเชื่อม การเกิดฟองอากาศ สลักฝังใน ความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อม และในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลความร้อนเป็นต้น ในการทดสอบจะต้องจัดเตรียมชิ้นงานดังต่อไปนี้

2.7.1 การเตรียมผิวชิ้นทดสอบ

ในการตัดผิวชิ้นงานต้องมีขนาดที่เหมาะสม ภาคตัดขวางจะอยู่บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ในการจัดเตรียมนั้นจะต้องไม่ทำงานให้เกิดความร้อนที่จะทำให้ โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงจากนั้นทำการปรับแต่งผิวให้เรียบด้วยการกลึงหรือทำการเจียรไนที่ผิวของชิ้นงาน และถ้างานมีขนาดเล็กยากแก่การจับในการเตรียมผิวชิ้นงานนั้น จะต้องทำการขึ้นตัวเรือน (Mounting) คือการฝังชิ้นงานลงในเรซิน

โดยมีจุดประสงค์ เพื่อให้ชิ้นงานมีผิวหน้าที่เป็นระนาบและมีขนาดที่พอเหมาะกับการจับยึดได้ สะดวก ทั้งยังรักษาขอบของชิ้นงานไม่ให้เกิดลักษณะโค้งมน ก่อนทำการขึ้นเรือนควรลบเหลี่ยมคม และมุมแหลมของชิ้นงานอยู่เสมอ ดังแสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ถูกขึ้นเรือนด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 2.9 จากนั้นทำการขัดผิวชิ้นงานแบบหยาบด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์จนถึงความละเอียดของ เม็ดขัด 800 กริต



ภาพที่ 2.10 ชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นเรือนด้วยสารขึ้นเรือนชนิดต่าง ๆ

2.7.2 การกัดกรด

การทดสอบโครงสร้างมหภาคของเนื้อโลหะนั้น ในแต่ละชนิดจะต้องมีความแตกต่างกันในการใช้กรด เนื่องด้วยโลหะมีความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างการเกิดปฏิกิริยาต่อกรดจึงมีความแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้กรดให้เหมาะสมกับโลหะงานนั้นๆ สำหรับที่ทำการทดสอบ โครงสร้างมหภาคของอลูมิเนียมผสม การใช้กรดก็จะต้องมีผสมของ น้ำกลั่น และกรดชนิดต่างๆที่ประกอบด้วยชนิด กรดไฮโดรฟลูอริก(HF) กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และเมื่อทำการกัดกรดจนมองเห็นโครงสร้างตามต้องการในเวลาที่กำหนดนำชิ้นงานล้างกรดออกด้วยน้ำที่สะอาด และเช็ดด้วยเอทานอล และเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน ดังรูปที่ 2.10

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 2.8.1 Li *et al.* [9] ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมเกรด 2024 และอลูมิเนียมเกรด 6061 โดยทำการตรวจสอบการไหลตัวของอลูมิเนียมทั้งสองเกรดครอบรอยต่อ และออกแบบตัวกวนให้มีรูปร่างแบบเกลียวขวา (Right screw) ผลการทดลองพบว่า ตัวกวนเกลียวขวาทำให้อลูมิเนียม 2024 สามารถรวมตัวเข้ากับอลูมิเนียม 6061 ได้ดีและเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อ โครงสร้างจุลภาคแสดงการไหลตัวของอลูมิเนียมทั้งสองเกรดเข้าสู่แนวเชื่อมได้เป็นอย่างดี
- 2.8.2 Prado *et al.* [10] ทำการเชื่อมรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมเกรด 6061 เข้ากับเซรามิก เกรด 20% Al_2O_3 โดยการใช้ตัวกวนเกลียวขวาในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเซรามิก พบการเชื่อมวัสดุทั้งสองเข้าด้วยกันมีความเป็นไปได้ แต่อัตราการสึกกร่อนของตัวกวนที่มีรูปร่างเป็นเกลียวนั้นมีค่าสูง
- 2.8.3 Boz and Kurt [11] ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างตัวกวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อการเชื่อมยึดและสมบัติทางกลของรอยต่อชนอลูมิเนียม 1018 โดยการออกแบบตัวกวนที่มีรูปร่างหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เกลียวขวา และเกลียวซ้าย ในการเชื่อม ผลการทดลองพบว่าการรวมตัวของวัสดุเป็นไปได้ดีในการใช้ตัวกวนเกลียวขวา ขณะที่อลูมิเนียมไม่สามารถรวมตัวกันได้ดีในการเชื่อมด้วยตัวกวน ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส เนื่องจากตัวกวนดังกล่าวดันอลูมิเนียมออกจากบริเวณแนวเชื่อม การทดสอบความแข็งแรงด้วยการดัดโค้ง ในแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนเกลียวซ้าย ขึ้นทดสอบไม่แสดงการแตกหักบริเวณรอยเชื่อม แต่ในแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยตัวกวนที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส เกิดการแตกหักบริเวณแนวเชื่อม
- 2.8.4 Zhao *et al.* [12] ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างตัวกวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อการเชื่อมยึดและสมบัติทางกลของรอยต่อชนอลูมิเนียม 2014 โดยการออกแบบการออกแบบตัวกวนเกลียวขวาที่เป็นทรงกระบอกและทรงกรวยในการเชื่อม ผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงสูงสุดมีค่าประมาณร้อยละ 75 ของความแข็งแรงของอลูมิเนียม สามารถทำได้โดยตัวกวนเกลียวขวาทรงกรวย เนื่องจากขนาดของเกรนเล็กและละเอียดขึ้น

- 2.8.5 บรรเจิด คอนเนตรงาม และ สมนึก วัฒนศรีสกุล [19] การเปรียบเทียบสลักแกนหมุนที่ใช้ในการเชื่อม FSW สองแบบที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมโดยสลักแกนหมุนทั้งสองแบบคือ แบบทรงกระบอกหัวตัดตรงและทรงกระบอกหัวโค้ง ที่ทำการเชื่อมบนอลูมิเนียมเกรด AA 6063-T6 พบว่ามีความเป็นไปได้ในการเชื่อมอลูมิเนียมผสม AA 6063-T6 ด้วยกระบวนการเชื่อมความเสียดทานหมุนกวนโดยมีความแข็งแรงที่สามารถใช้งานได้จริง ซึ่งตัวแปรที่ทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงและแนวเชื่อมสมบูรณ์ที่สุด คือ การเชื่อมด้วยสลักแกนหมุนแบบหัวโค้ง เชื่อมเอียงมุม 3° มาด้านหลัง หมุนด้วยความเร็วรอบ 1000 รอบ/นาที และเดินเชื่อมด้วยความเร็วช่วง 300 – 700 มม./นาที ให้ค่าความดันแรงดึงที่ 180 MPa มีความแข็งแรงประมาณ 83% หากเทียบกับเนื้อวัสดุเดิม นอกจากนี้สลักแกนหมุนแบบหัวโค้งยังให้ผลในด้านความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมที่ดีกว่าโดยเฉพาะหากเชื่อมโดยเอียงหัวสลักแกนหมุน 3° จะส่งผลให้เนื้อวัสดุบริเวณแนวเชื่อมเต็มสมบูรณ์
- 2.8.6 กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และคณะ [21] การศึกษาเรื่องอิทธิพลรูปร่างตัวกวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อสมบัติรอยต่อชนอลูมิเนียม A 6063-T1 โดยการใช้เครื่องมือเชื่อมสามลักษณะคือ แบบทรงกระบอก แบบทรงกระบอกเกลียวขวา แบบทรงเรียวเอียง 9 องศา และทำการเปลี่ยนความเร็วในการเดินแนวเชื่อมในเครื่องมือเชื่อมแต่ละ 50 ,75 ,100 ,125 ,150 ,200 และ 225 มม./นาทีและใช้ความเร็วรอบของเครื่องมือเชื่อม 2000 รอบ/นาที พบว่าอิทธิพลตัวกวนในงานเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อสมบัติรอยต่อชนอลูมิเนียม A 6063-T1 ที่ใช้ความเร็วรอบของตัวกวนที่ 2000 รอบ/นาที และบ่า (Shoulder) ของเครื่องมือเชื่อมเปิดทำมุมกับชิ้นงาน 2 องศา ตัวกวนสามารถทำการเชื่อมได้ดีที่สุดในสถานะการเชื่อมที่ได้กล่าวมาแล้ว นั่นคือตัวกวนเกลียวขวาหมุนตามเข็มนาฬิกา โดยให้ค่าความแข็งแรงที่ 170 MPa และมีเปอร์เซ็นต์การยึดตัวเท่ากับ 29% ของความยาวเดิม โดยที่สถานะการเชื่อมนี้ไม่พบจุดบกพร่องใด ๆ ในแนวเชื่อม