# บทที่ 2
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 วัสดุทดลอง

### 2.1.1 อลูมิเนียม

ปราโมทย์ พูนนายม และคณะ [10] ได้สรุป ทฤษฎีเกี่ยวกับอลูมิเนียมที่น่าสนใจไว้ดังนี้ อลูมิเนียมเป็นธาตุที่พบมากเป็นอันดับสองในโลก [1] และเป็นโลหะที่มีความสำคัญในการนำมาใช้งานทางวิศวกรรมในปัจจุบัน สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของอลูมิเนียมแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 อลูมิเนียมมีความหนาแน่น 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือประมาณหนึ่งในสามส่วนของเหล็กกล้า (7.83 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีในบรรยากาศน้ำทะเล ปิโตรเคมีและระบบเคมีอื่นๆ ผิวอลูมิเนียมมีความสะท้อนแสงสูง อลูมิเนียมมีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนักมีค่าสูงว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High strength steel) อลูมิเนียมบริสุทธิ์มีค่าความแข็งแรงดึงสูงถึง 90 MPa และความแข็งแรงดึงสามารถเพิ่มขึ้นถึง 680 MPa เมื่อทำการขึ้นรูปเย็นอลูมิเนียมบริสุทธิ์ [11]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมบริสุทธิ์ [8]

| | |
|---|---|
| สัญลักษณ์ | Al |
| หมายเลขอะตอม | 13 |
| ความถ่วงจำเพาะ | 2.7 |
| โครงสร้างผลึก | FCC |
| จุดหลอมเหลว | 660°C |
| โมดูลัสยืดหยุ่น | 69,000 MPa |
| สินแร่ | บอกไซด์ (สารมลทินผสมระหว่าง Al2O3 และ $Al(OH)_3$ |
| ธาตุผสม: | Cu, Mg, Mn, Si, Zn |
| การใช้งาน: | บรรจุภัณฑ์ อลูมิเนียมแผ่นบาง ตัวนำไฟฟ้า หม้อ กระทะ ชิ้นส่วนโครงสร้างยานอวกาศ รถยนต์ หรือชิ้นส่วนที่ต้องการน้ำหนักเบา |

การแบ่งชนิดของอลูมิเนียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม [8] ดังแสดงในตารางที่ 2.2 คือ กลุ่มของอลูมิเนียมที่ผ่านการรีด และกลุ่มของอลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อ ในที่นี้ขอกล่าวถึงอลูมิเนียม

กลุ่มที่ผ่านการรีดเท่านั้น โดยที่อลูมิเนียมที่ผ่านการรีดนั้นสามารถแบ่งแยกได้โดยใช้ตัวเลข 4 ตัว ดังรายละเอียดด้านล่าง และตัวอย่างของอลูมิเนียมบางกลุ่มแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 การแบ่งเกรดของอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม [8]

| 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 [8]

| 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 |

- อลูมิเนียมบริสุทธิ์ ( อนุกรม 1xxx) ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมมีความบริสุทธิ์ ของอลูมิเนียมที่ 99.0 % ถึง 99.9 % อลูมิเนียมในกลุ่มนี้ยังจะมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และยังสามารถสะท้อนแสงได้ดีจึงนิยมใช้ในการแผงสะท้อนแสงในไฟหน้ารถยนต์ นอกจากนั้นยังสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่ายทั้งการตัดเฉือนและขึ้นรูปเย็นด้วยกระบวนการต่าง ๆ ความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่อลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีข้อเสีย คือในด้าน

ของความแข็งแรง และคุณสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าวัสดุอื่น แต่ก็สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมธาตุเจืออื่นเพื่อให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป หรือการขึ้นรูปเย็น คือการทำให้แข็งได้ด้วยความเค้น( Strain Hardening)

- อลูมิเนียมผสมทองแดง (อนุกรม 2xxx) เป็นอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูงคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยสามารถที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้โดยทำการอบละลาย (Solution Treatment) และชุบ (Quenching) ต่อจากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (Precipitation) เรียกกระบวนการนี้ว่า การอบบ่ม (Ageing Hardening) ซึ่งภายหลังการอบบ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจะลดลงและความสามารถในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดนี้จะต่ำว่าชนิดอื่นๆ คือ จะเชื่อมได้ยากโดยจะเกิดการอ่อนตัวที่แนวเชื่อม ดังนั้นจึงมักทำการเชื่อมต่อด้วยวิธีการย้ำหมุด

- อลูมิเนียมผสมแมงกานีส (อนุกรม 3xxx) เป็นอลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติเหมือนกับอลูมิเนียมบริสุทธิ์แต่มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้

- อลูมิเนียมผสมซิลิกอน (อนุกรม 4xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่เมื่ออยู่ในสภาพของเหลวจะไหลตัวได้ดีและขณะแข็งตัวจะไม่เกิดความแตกร้าวทั้งในสภาพร้อนและเย็น ดังนั้นอลูมิเนียมจึงนิยมใช้ในการเป็นลวดเติมสำหรับเชื่อมอลูมิเนียมผสมและอลูมิเนียมหล่อ

- อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (อนุกรม 5xxx) บางครั้งจะมีการเติม แมงกานีสลงไปด้วย อลูมิเนียมผสมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน จึงนิยมนำไปทำลวดเติมเหมือนอนุกรม 4xxx นอกจากนั้นยังนำไปทำถังหรือขวดบรรจุแก๊ส (Storage Vessels)

- อลูมิเนียมแมกนีเซียม – ซิลิกอน (อนุกรม 6xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีพอสมควร ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการแปรรูปและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่พอใช้ แต่มีข้อเสีย คือ เมื่อนำอลูมิเนียมผสมชนิดนี้ไปทำการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการให้ความร้อนแบบต่าง ๆ จะทำให้บริเวณแนวเชื่อมอ่อน

- อลูมิเนียมสังกะสี – แมกนีเซียม ( อนุกรม 7xxx) อลูมิเนียมชนิดนี้มีการเจือธาตุสังกะสีเป็นธาตุหลักและแมงกานีสเป็นธาตุรองนอกจากนั้นยังมีทองแดงและโครเมียมอีกเล็กน้อยอลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้มีความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลที่ดีมากและมีน้ำหนักเบา ความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถในการเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำเพราะจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณแนว

เชื่อม อลูมิเนียมชนิดนี้จัดว่าเป็นกลุ่มที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ แต่ในปัจจุบันได้มีการผลิตและพัฒนาในการเชื่อมของอลูมิเนียมชนิดสูงขึ้น โดยจะเกิดการอ่อนตัวบริเวณดังกล่าวได้ เกิดความแข็งตัวจากตกตะกอนตามธรรมชาติ

ตารางที่ 2.4 อักษรห้อยท้ายที่แสดงรายละเอียดของการผลิต [8]

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย |
|---|---|
| F | จากการผลิตโดยตรงไม่ผ่านการอบชุบ |
| H | การแปรรูปเพื่อเพิ่มความแข็ง (Strain hardening) |
| O | การอบอ่อน (Annealing) เพื่อลดความแข็งจากการแปรรูป และเพิ่มความเหนียวเนื่องจากแรงดึง |
| T | การอบคืนไฟ (Tempering) |
| W | การอบบ่ม (Age hardening) |

นอกจากสัญลักษณ์ตัวเลข 4 ตัวแล้ว อลูมิเนียมมักมีสัญลักษณ์กรรมวิธีทางความร้อนห้อยท้ายด้วยตัวอักษรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งเป็นการการกระทำเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับอลูมิเนียมผสม โดยที่มีวิธีการให้ความร้อนที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน และได้กำหนดสัญลักษณ์อักษรตามหลัง เพื่อที่จะเป็นการระบุถึงกรรมวิธีทางความร้อนมากกระทำต่ออลูมิเนียมผสมชนิดนั้น ๆ โดยเฉพาะอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม Non – Heat Treatable คือกลุ่ม 1xxx 3xxx และกลุ่ม 5xxx ส่วนอลูมิเนียมในกลุ่ม Heat Treatable เช่นกลุ่ม 6xxx 4xxx และกลุ่ม 2xxx ก็สามารถเชื่อมได้แต่ต้องอาศัยเทคนิคและความชำนาญเป็นพิเศษ และอาจจะทำให้ความเหนียวของอลูมิเนียมลดลงได้ ส่วนกลุ่ม 7xxx คือกลุ่มที่มีความแข็งแรงสูงมากเชื่อมได้ลำบากมากจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาเชื่อมแบบอาร์ค และรหัสของกระบวนการทางความร้อน ได้ถูกกำหนดโดยสมาคมอลูมิเนียมแห่งสหรัฐฯตั้งแต่ปี 1948 เป็นตัวอักษร 4 ตัว ตามด้วยตัวเลขอีกหนึ่งหรือสองตัว เพื่อบอกถึงความแตกต่างในสาระสำคัญของแต่ละกรรมวิธีได้แก่

- F หมายถึง สภาพโลหะที่ได้จากการหล่อ โดยยังไม่ได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหรือทางกล

- O หมายถึง สภาพของโลหะภายหลังการอบอ่อนซึ่งโลหะจะเกิดผนึกใหม่ เป็นภาวะที่โลหะจะอ่อนและเหนียวที่สุดในบรรดาอลูมิเนียมรีดทั้งหลาย

- H1 หมายถึง การขึ้นรูปเย็นอย่างเดียว

- H2 หมายถึง การขึ้นรูปเย็นและอบอ่อนให้เหนียวขึ้นเล็กน้อย

- H3 หมายถึง การขึ้นรูปเย็นแล้วนำไปอบด้วยอุณหภูมิที่ไม่สูงนัก

- T1 หมายถึง โลหะผ่านการอบละลายบางส่วนแล้วปล่อยให้แข็งตัวตามธรรมชาติ

- T2 หมายถึง โลหะผ่านการอบอ่อนมาแล้ว แล้วใช้กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อขึ้นรูปมาเท่านั้น

- T3 หมายถึง สภาพโลหะที่ผ่านการอบละลาย (Solution Heat Treatment) แล้วแปรรูปเย็นทันทีเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกล

- 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 นำไปผ่านการแปรรูปเย็นก่อนทำให้แข็งตัวแบบเทียม

อย่างไรก็ตามการใช้งานอลูมิเนียมบริสุทธิ์ค่อนข้างจำกัด ส่วนมากมักใช้กับงานที่ต้องการความ สามารถในการขึ้นรูปสูง เช่น อุปกรณ์เครื่องครัว อุปกรณ์ขนถ่ายและจัดเก็บสารเคมี เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการเติมธาตุผสมต่างๆ ลงไปในอลูมิเนียมและทำให้เกิดอลูมิเนียมเกรดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 นอกจากนั้นสัญลักษณ์ที่แสดงชนิดของอลูมิเนียมยังมีตัวอักษรห้อยท้ายต่อจากตัวเลข 4 ตัวที่เป็นสิ่งสำคัญที่บ่งบอกให้ทราบถึงรายละเอียดของการผลิตดังแสดงในตารางที่ 2.3

นอกจากนั้นแล้ว www.azom.com [12] ได้สรุปข้อมูลที่น่าสนใจไว้ว่า อลูมิเนียม 6063 เป็นโลหะผสมที่มีความแข็งแรงปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมกลุ่มอื่นๆ มีผิวค่อนข้างเรียบ มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง ง่ายต่อการเชื่อม ทำการเคลือบผิวด้วยวิธีการอโนไดซ์ (Anodizing) ได้ง่าย ส่วนมากมักถูกนำมาใช้งานเป็นผลิตที่ดึงขึ้นรูป ขอบหน้าต่าง ประตู หรือท่อต่างๆ ส่วนผสม

ทางเคมีโดยทั่วไปของอลูมิเนียมเกรดนี้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.5 สมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 2.6 และสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.5 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมเกรด 6063 [12]

| ธาตุ (%wt) | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Ti | Cr | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6063 | 0.20-0.60 | 0.35 max | 0.10 max | 0.10 max | 0.45-0.90 | 0.10 max | 0.10 max | 0.10 max | สมดุล |

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกลของอลูมิเนียมเกรด 6063 [12]

| สมบัติ | O | T4 | T6 |
|---|---|---|---|
| ความเค้นพิสูจน์ต่ำสุด (MPa) | 50 | 65 | 160 |
| ความเค้นแรงดึงต่ำสุด (MPa) | 100 | 130 | 195 |
| ความแข็งแรงเฉือน (MPa) | 70 | 110 | 150 |
| ความสามารถในการยืดตัว (%) | 27 | 21 | 14 |
| ความแข็ง (Hv) | 25 | 50 | 80 |

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมเกรด 6063 [12]

| สมบัติ | ค่าที่แสดง |
|---|---|
| ความหนาแน่น | 2.70 $g/cm^3$ |
| จุดหลอมเหลว | 600 $^{o}C$ |
| ความต้านทานไฟฟ้า | $0.035 \times 10^{-6}$ O.m |
| ความสามารถในการนำไฟฟ้า | 200 W/m.K |
| การขยายตัวเนื่องจากความร้อน | $23.5 \times 10^{-6}$ /K |

### 2.1.2 เหล็กกล้าเครื่องมือ

เหล็กกล้า SKD 11 หรือเทียบเท่าเหล็ก AISI D2 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าทำเครื่องมือชนิดคาร์บอนสูง โครเมียมสูง (12% โครเมียม) และเหล็กกล้าสำหรับใช้ทำแม่พิมพ์เย็น ที่คงรูปร่างเดิมได้ดีหลังจากการชุบแข็ง เป็นเหล็กที่เหมาะสำหรับการชุบด้วยอากาศ และมีความเหนียวดีมาก ลักษณะเด่นของเหล็กกล้า SKD 11 มีความทนทานต่อการสึกหรอดี และรักษาคมตัดได้ดีเยี่ยม รวมทั้งคมเหนียว

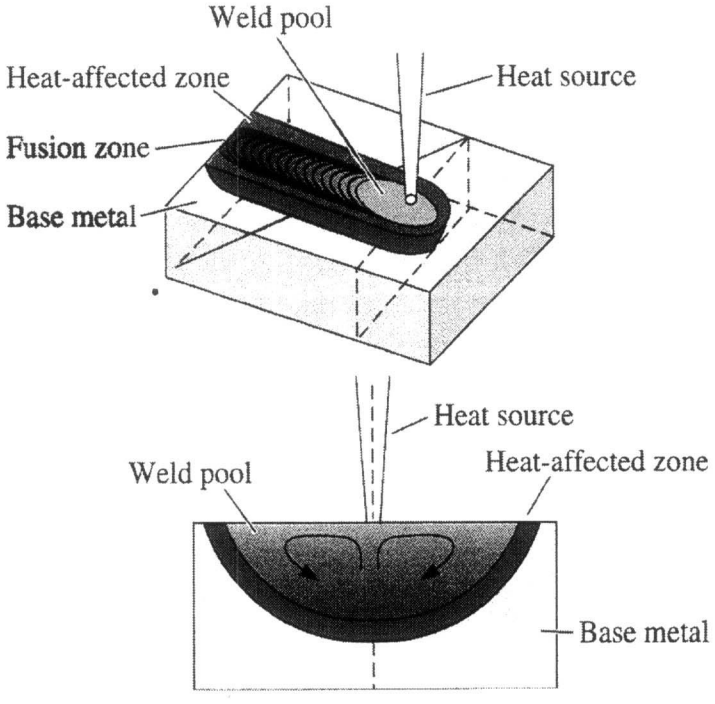
แน่นสูงความแข็งสูงมากเมื่อผ่านการชุบแข็ง ชุบแข็งง่าย สามารถชุบไนไตรดิ่งได้ ทนต่อการเสียดสีได้ดีเยี่ยมและมี ความเหนียวแกร่งพอสมควร คุณภาพสูง ทนทานการเสียดสีสูง โดยรวมแล้วเหล็กกล้า SKD 11 จะประกอบด้วยส่วนผสมหลัก โดยประมาณ คือ C 1.5% , Cr 12% , Mo 0.9-1% , V 0.8-1% และสัดส่วนธาตุอื่นๆ ที่เป็นธาตุผสมรอง คือ Mn 0.4% ,Si 0.4-0.5%

## 2.2 การเชื่อม

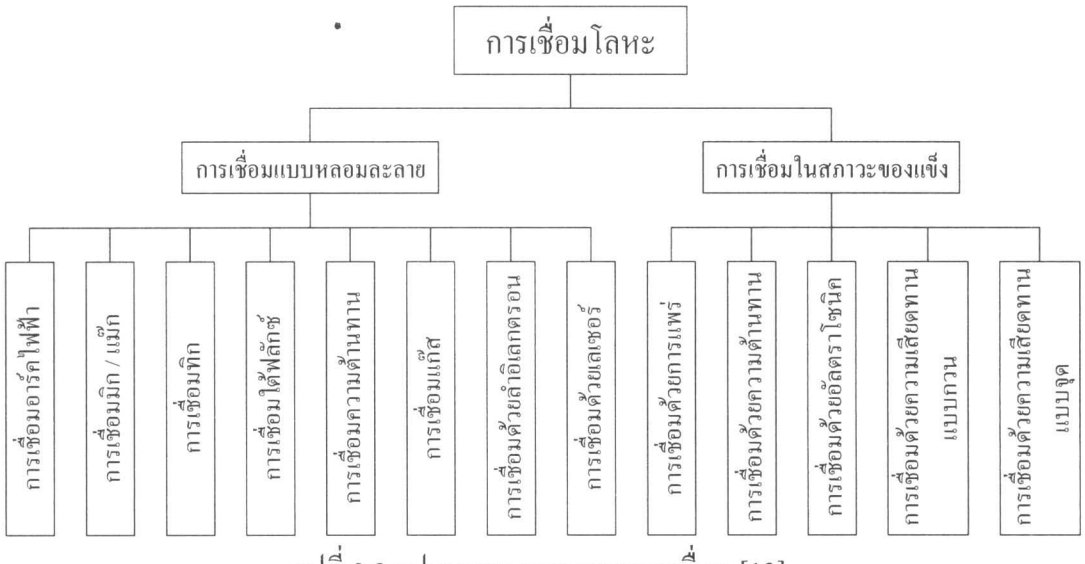
### 2.2.1 หลักการพื้นฐานการเชื่อม

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [13] สรุปความรู้เบื้องต้นของการเชื่อมโลหะไว้อย่างน่าสนใจดังนี้ การเชื่อมโลหะ คือ การต่อชิ้นโลหะเข้าด้วยกันโดยอาศัยความร้อนในการหลอมละลายรอยต่อระหว่างโลหะสองชิ้นให้หลอมละลายเข้าด้วยกันและเปลี่ยนเป็นโลหะชิ้นเดียวกัน ขณะที่โลหะที่บริเวณรอยต่อเกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกันนั้น อาจเติมโลหะผสมบางตัวในลักษณะที่เรียกว่าลวดเชื่อม (Filler metal) ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติบางตัวในแนวเชื่อมให้ดีขึ้น ตัวอย่างการเชื่อมโลหะอย่างง่ายแสดงในรูปที่ 2.1 ความร้อนจากแหล่งจ่ายความร้อน (Heat source) ถูกส่งผ่านไปที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะสองแผ่น (Base metal) ทำให้เกิดการหลอมละลายรวมกันที่บริเวณบ่อเชื่อม (Weld pool) และเมื่อเคลื่อนที่แหล่งให้ความร้อนไปตามแนวรอยต่อ จะทำให้เกิดแนวเชื่อมขึ้น โดยบริเวณบ่อเชื่อมหรือพื้นที่หลอมละลาย (Fusion zone) นี้ จะก่อให้เกิดการแข็งตัวเป็นแนวเชื่อมที่มีโครงสร้างแตกต่างจากโลหะหลัก (Base metal) ในการเชื่อมพื้นที่สำคัญอีกพื้นที่ๆ มีความสำคัญ คือ พื้นที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (Heat affected zone) พื้นที่นี้อยู่ถัดออกไปจากพื้นที่การหลอมละลายเป็นพื้นที่ๆ ไม่มีการหลอมละลาย แต่ความร้อนที่เกิดจากพื้นที่หลอมละลายทำให้โครงสร้างบริเวณนี้เกิดการเปลี่ยนแปลง และส่งผลทำให้สมบัติของโลหะเปลี่ยนแปลงไป

นอกจากนั้น กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ และคณะ [13] ได้กล่าวไว้ว่า เทคโนโลยีการเชื่อมในปัจจุบันได้แบ่งการเชื่อมเป็น 2 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คือ การเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion welding) และการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid state welding) การเชื่อมแบบหลอมลาย หรือบางครั้งเรียกว่าการเชื่อมหลอมละลายแบบดั้งเดิม (Conventional fusion welding) ความหมายของการเชื่อมแบบหลอมละลายนี้มีลักษณะเดียวกันดังอธิบายในรูปที่ 2.2 การเชื่อมหลอมละลายสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายวิธี ขณะที่การเชื่อมในสภาวะของแข็ง คือ การเชื่อมในสภาวะที่โลหะหลักไม่เกิดการหลอมละลายแต่อาศัยความร้อนที่เกิดจากแรงทางกล ทำให้โลหะเกิดการเชื่อมประสานกัน เนื่องจากงานวิจัยนี้กล่าวถึงการเชื่อมในสภาวะของแข็งเป็นหลัก ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงขอกล่าวถึงเฉพาะทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมในสภาวะของแข็งเท่านั้น



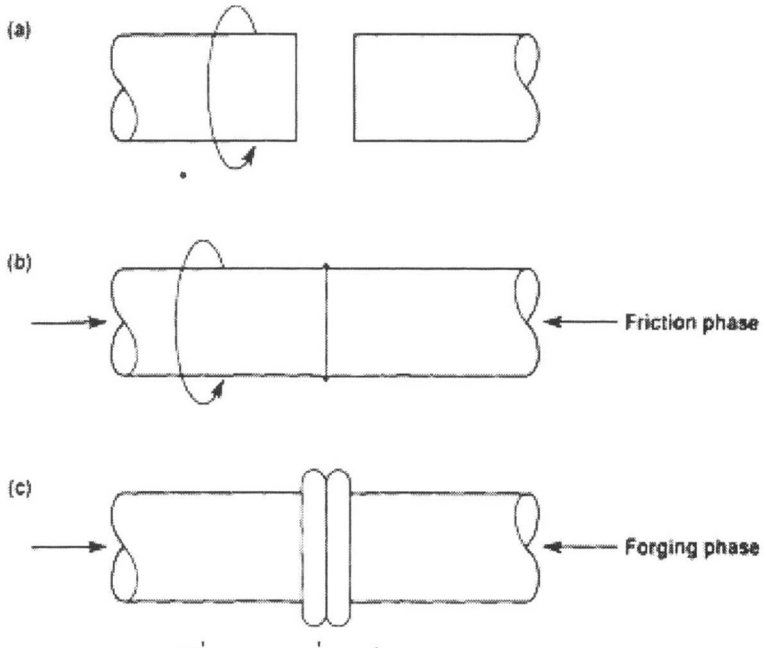

รูปที่ 2.1 หลักการพื้นฐานในการเชื่อมโลหะ [14]




รูปที่ 2.2 รูปแบบของกระบวนการเชื่อม [13]

ปราโมทย์ พูนนายม และคณะ [10] ได้กล่าวไว้ว่า การเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid Solution Welding) คือ การเชื่อมต่อวัสดุสองชิ้นเข้าด้วยกัน โดยโลหะบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชิ้นไม่เกิดการหลอมละลาย หรืออุณหภูมิของรอยต่อมีค่าต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุที่ทำการเชื่อม ส่วนมากรอยต่อของวัสดุเกิดการเชื่อมยึดกันได้ด้วยแรงทางกลหรือความเสียดทาน ตัวอย่างของการเชื่อมในสภาวะของแข็งแสดงดังรูปที่ 2.3 โดยกระบวนการเชื่อมที่แสดงเรียกว่า การเชื่อม

ด้วยการเสียดทาน (Friction Welding) มีขั้นตอนการเชื่อม คือ วัสดุทรงกระบอกตัวที่หนึ่งหมุนด้วยความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 2.3 (a) กดเข้าหาวัสดุทรงกระบอกตัวที่สองที่ถูกยึดแน่นอยู่กับที่ไม่มีการหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (b) ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานทำให้วัสดุบริเวณรอยต่อเกิดการอ่อนตัว ขณะเดียวกันแรงกดในแนวแกนยาวของแท่งทรงกระบอก จะอัดชิ้นงานเข้าด้วยกันทำให้เกิดการเชื่อมยึดเข้าด้วยกัน




รูปที่ 2.3 การเชื่อมด้วยการเสียดทาน [15]

รูปแบบของการเชื่อมในสภาวะของแข็งประกอบไปด้วยการเชื่อมต่างๆ เช่น การเชื่อมด้วยการแพร่ (Diffusion welding) การเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding) การเชื่อมด้วยอัลตราโซนิค (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 และอีกชิ้นหนึ่งยึดอยู่กับที่ หลังจากเวลาผ่านไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง แล้วให้แรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งชิ้นงานหลอมติดกันและจะหยุดหมุนทันทีแสดงดังรูปที่ 2.4

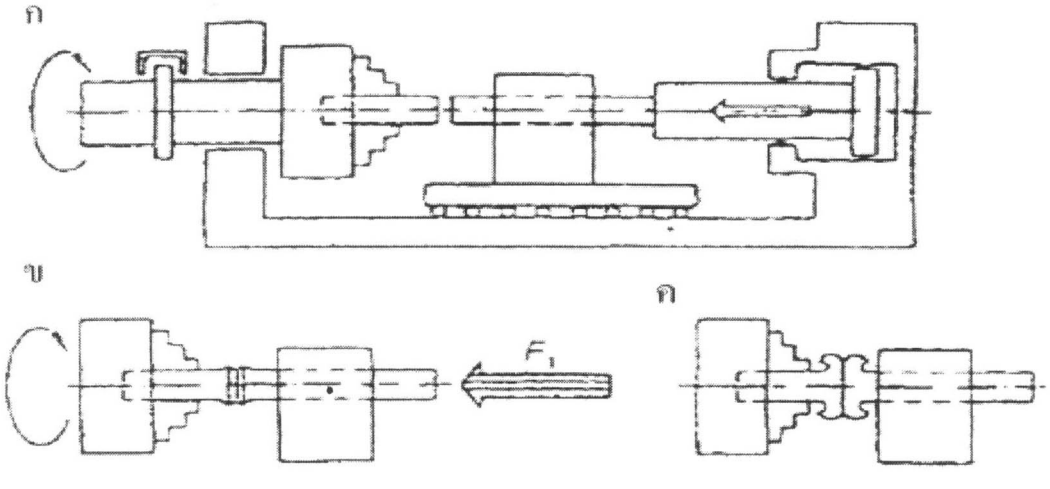
ข. การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบแรงเฉื่อย (Inertia Welding) ชิ้นงานมีสองส่วน คือ ส่วนที่หมุน และส่วนที่อยู่กับที่ ส่วนที่หมุนจะถูกยึดอยู่ในอุปกรณ์ของเครื่องเชื่อม ซึ่งมีคอลเลค-

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย ๒๕๓๘

ชัค (Collect-chuck) และล้อช่วยแรง (Flywheel) ซึ่งหมุนด้วยความเร็วคงที่ ที่ความเร็วหนึ่งจากนั้นจึงหยุดให้พลังงานที่ไปหมุนล้อช่วยแรง แต่ล้อช่วยแรงยังหมุนด้วยตัวเองอยู่ เนื่องจากแรงเฉื่อยในช่วงเวลาที่ล้อช่วยแรงหมุนด้วยตัวเองนี้ เมื่อนำชิ้นงานที่จับยึดอยู่กับที่มาสัมผัสกับชิ้นงานส่วนที่หมุนภายใต้แรงกดคงที่ พลังงานที่เกิดจากล้อช่วยแรงจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานจะเกิดการหลอมเชื่อมติดกัน

ค. การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบล้อช่วยแรง (Flywheel Friction Welding) เป็นการรวมการเชื่อมแบบธรรมดาและแบบแรงเฉื่อยเข้าด้วยกัน โดยล้อช่วยแรงจะต่ออยู่กับมอเตอร์ขับเพื่อใช้ถ่ายกำลังไปยังเพลาหมุน (Spindle) และตัวคัปเปิ้ล (Couple) ซึ่งต่อรวมอยู่กับคลัทช์ (Clutch) ระบบของมอเตอร์ที่ใช้ขับล้อช่วยแรงจะหมุนอยู่ตลอดเวลา ชิ้นงานส่วนที่หมุนจะต่ออยู่กับคัปเปิลและอีกชิ้นหนึ่งอยู่กับที่หลังจากได้ความเร็วรอบของชิ้นส่วนที่หมุนตามที่ต้องการแล้วจึงให้แรงอัดชิ้นงานส่วนที่อยู่กับที่กับส่วนที่หมุน โดยเพิ่มแรงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อชิ้นงานติดกันก็จะหยุดหมุนทันที

ง. กระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ดีในสภาวะของแข็ง คิดค้นโดยสถาบันการเชื่อมประเทศอังกฤษ (The welding institute : TWI) เพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมแบบหลอมละลาย




รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเชื่อมแบบเสียดทานทั่วไป (ก) ชิ้นงานด้านซ้ายหมุนด้วยความเร็วรอบ (n) และชิ้นงานด้านขวาถูกเลื่อนเข้าด้วยแรงจากไฮดรอลิก ; (ข) ชิ้นงานด้านขวาถูกอัดด้วยแรง ($F_1$) จนชิ้นงานหลอมละลาย ; (ค) ชิ้นงานด้านขวาถูกอัดจนติดกันอย่างสมบูรณ์กับชิ้นงานด้านซ้าย ชิ้นงานเชื่อมจะหยุดหมุนทันที [15]

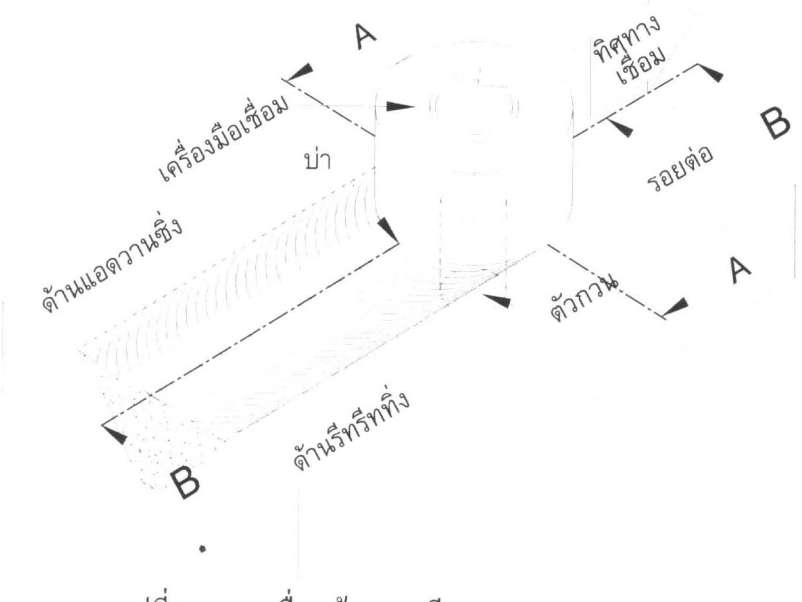
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 29 ก.พ. 2555
เลขทะเบียน 244298
เลขเรียกหนังสือ

2.2.2 การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน [16]

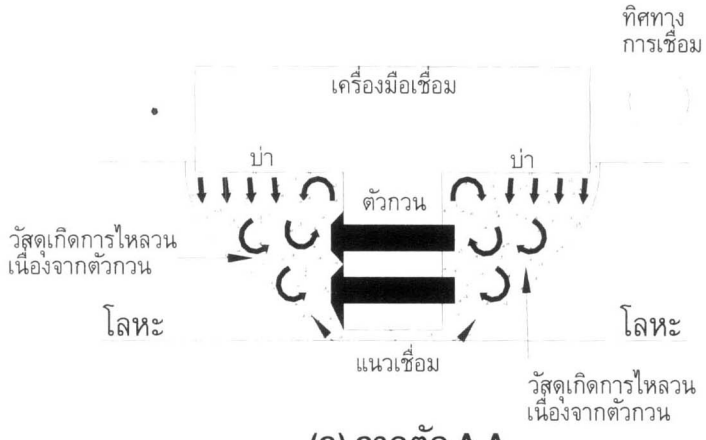
กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ [16] ได้รายงานไว้ว่า การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน มีการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น หลักการในการเชื่อม คือ ตัวกวนที่หมุนด้วยความเร็วสูง สอดเข้าไปในแนวต่อชนของแผ่นวัสดุ 2 แผ่นและทำให้เกิดความร้อนเสียดทานใต้บ่าเครื่องมือและทำให้วัสดุอ่อนตัวลง วัสดุที่อ่อนตัวจะถูกดันให้เคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวน และเมื่อเครื่องมือเชื่อมเคลื่อนที่บ่าเครื่องมือเชื่อมจะกดและอัดวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวของวัสดุเป็นแนวเชื่อม และสามารถประยุกต์ใช้การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสม และวัสดุต่างชนิดด้วย

ก. บทนำ

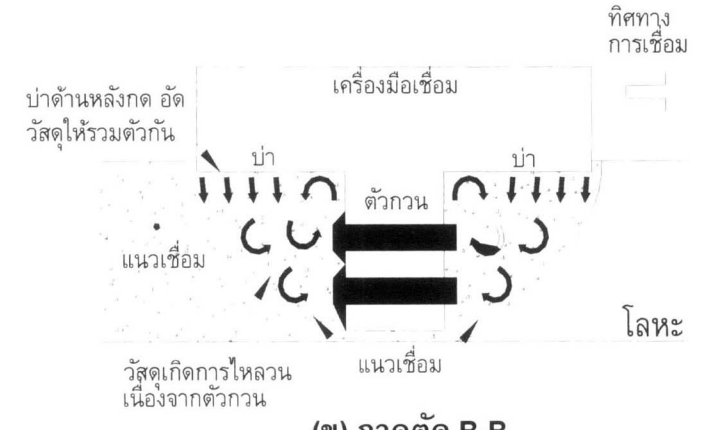
การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid State Welding) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เพื่อเชื่อมวัสดุที่มีความยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย (Conventional Fusion Welding) เช่น อลูมิเนียมผสม [5] การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนนี้ได้มีการประยุกต์ใช้อย่างมีประสิทธิผลในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบิน รถยนต์ และเรือเดินสมุทร [6] และปัจจุบันเป็นกระบวนการเชื่อมที่ได้รับความสนใจในการทำวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ลักษณะกระบวนการเชื่อมแสดงในรูปที่ 2.5




รูปที่ 2.5 การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน [16]




**(ก) ภาคตัด A-A**




**(ข) ภาคตัด B-B**

รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดแนวเชื่อมแสดงภาคตัดในรูปที่ 2.5 [16]

ตัวกวนที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องมือเชื่อมสอดลงเข้าไปในรอยต่อของวัสดุจนกระทั่งบ่าของเครื่องมือ เชื่อมสัมผัสกับผิวของรอยต่อ ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของตัวกวนและบ่าของเครื่องมือกับเนื้อวัสดุรอบๆ ตัวกวน ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวอยู่ในสภาวะคล้ายของไหล (Plastic Fluid-like State) และเคลื่อนที่รอบตัวกวนภายใต้บ่าของเครื่องมือเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงภาคตัด A-A และ B-B ในรูปที่ 2.5 วัสดุที่เคลื่อนที่รอบๆ ตัวกวนจะเกิดการเคลื่อนที่สู่ด้านบนของรอยต่อ และเกิดการกดย้อนลงมาเนื่องจากการกดของบ่าเครื่องมือทำให้วัสดุเกิดการไหลวน หรือเกิดการกวน (Stirring) ภายใต้บ่าขึ้น ซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นนี้เป็นสิ่งที่ผู้คิดค้นกำหนดชื่อกระบวนการว่า “Friction Stir Welding” อย่างไรก็ตามคำจำกัดความในภาษาไทยในปัจจุบันยังไม่มีการกำหนดขึ้น ดังนั้นผู้เขียนจึงขอใช้คำว่า “การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน” เพื่อการอธิบายในบทความนี้เป็นเบื้องต้น ขั้นตอนต่อไปเมื่อวัสดุที่อ่อนตัวเกิดการไหลวนแล้ว และเมื่อตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่ วัสดุที่อ่อนตัวและเกิดการกวนอยู่ด้านหน้าของตัวกวนจะถูกถ่ายเทมาสู่ด้านหลังตามทิศทางการหมุนของตัวกวนทางด้านรีทรีททิ่ง และบางส่วนจะไหลจากด้านหลังสู่

ด้านหน้าทางด้านแอดวานซิ่งดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 (ด้านรีทรีททิ่ง คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนสวนทางกับทิศทางการเชื่อม ขณะที่ด้านแอดวานซิ่ง คือ ด้านที่ทิศทางการหมุนของตัวกวนขนานกับทิศทางการเชื่อม) จากนั้นเมื่อวัสดุส่งผ่านรอบๆ ตัวกวนและตัวกวนเกิดการเคลื่อนที่บ่าด้านหลังของเครื่องมือเชื่อม จะกด อัด และผสมวัสดุทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 (ข)

ข. ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการ

1) ข้อดี

- เนื่องจากเป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็ง ปัญหาที่มักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นของแข็งของการเชื่อมวัสดุที่ยากต่อการเชื่อมด้วยการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น อลูมิเนียม จะหมดไป นอกจากนั้นผิวออกไซด์หนาที่เคลือบอยู่บนผิวของอลูมิเนียมจะถูกทำให้แตกออกด้วยการขัดหมุนของตัวกวนและกระจายไปทั่วทั้งแนวเชื่อม และลดปัญหาการเสื่อมสภาพของแนวเชื่อมลง แนวเชื่อมที่ได้ส่วนใหญ่เป็นแนวเชื่อมที่สมบรูณ์ไม่มีจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น
- กระบวนการเชื่อมราคาไม่แพง สามารถใช้เครื่องกัดในการเชื่อมได้
- ผิวหน้าแนวเชื่อมคุณภาพดีเยี่ยม
- ใช้พลังงานน้อย
- เชื่อมวัสดุหนาสูงสุด 12 มม. [17]
- ความแข็งแรงต่อความล้า (Fatigue strength) ดีเยี่ยม

2) ข้อเสีย

- ต้องจับยึดชิ้นงานให้แน่นเสมอเพราะแรงที่เกิดขึ้นมีค่าสูง
- ผลจากการเชื่อมทำให้เกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงาน ดังนั้นจึงต้องมีการอบชุบด้วยความร้อนเพื่อให้ได้สมบัติเดิมตลอดชิ้นงาน
- มีจุดบกพร่องที่มักเกิดขึ้นที่จุดสุดท้ายของแนวเชื่อม ที่เกิดจากการถอดตัวกวนออกจากแนวเชื่อม
- เหมาะสมกับการเชื่อมท่าราบ ชิ้นงานแบนยาว
- ช่องว่างระหว่างแผ่นมีค่าสูงสุดไม่เกิน 10% ของความหนาแผ่นชิ้นงาน [17]

ค. ตัวแปรการเชื่อม

1) ความเร็วรอบ ความเร็วเดินแนวเชื่อม และมุมเอียงของตัวกวน

ตัวแปรเหล่านี้ส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุบริเวณแนวเชื่อม ความเร็วรอบที่แตกต่างทำให้เกิดการกวนและการผสมของวัสดุในแนวเชื่อมที่แตกต่าง ขณะที่ความเร็วเดินแนวเชื่อมทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายวัสดุจากด้านหน้าของตัวกวนไปสู่ด้านหลังและทำให้เกิดแนวเชื่อมที่สมบรูณ์ที่แตกต่างกัน ความเร็วรอบที่สูงทำให้เกิดอุณหภูมิที่สูงในแนวเชื่อม ความเอียงของตัวกวนที่ทำมุมกับแกนตั้งฉากของเครื่องกัดที่มีค่าเหมาะสมทำให้บ่าด้านหลังของเครื่องมือเชื่อมกดและกวนวัสดุรอบๆ ตัวกวนให้มีการผสมรวมกันได้มากขึ้น

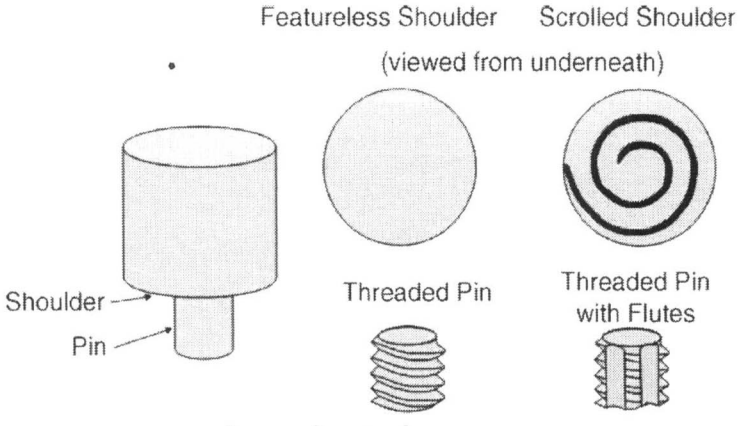
ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ทำการศึกษาค่าตัวแปรการเชื่อมเหล่านี้ เช่น การศึกษาอิทธิพลของความเร็วเดินแนวเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของรอยต่อชนอลูมิเนียม A356 ที่แสดงการเพิ่มค่าความแข็งแรงดึงเมื่อความเร็วในการเดินแนวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการตกผลึกของซิลิกอนยูเตคติคในแนวเชื่อมอลูมิเนียมทำให้ค่าความแข็งและแข็งแรงเพิ่มขึ้น และค่าความแข็งแรงสูงกว่าอลูมิเนียมที่ใช้เป็นวัสดุในการเชื่อม 20% [7] หรือแนวเชื่อมอลูมิเนียม 5083 ที่แสดงค่าความเค้นในแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเดินแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนที่แตกต่างในแนวเชื่อมและเวลาในการผ่อนคลายความเครียดในแนวเชื่อมเปลี่ยนแปลงไป [18] อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็วเดินแนวในการเชื่อมอลูมิเนียมกลุ่ม Al-Mg เกรด 6082 ไม่ส่งผลต่อความล้าตัวของแนวเชื่อม [19] และหากพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความเร็วรอบและความเร็วเดินแนวเชื่อมที่มีผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม 2017-T351 ค่าความแข็งแรงดึงจะมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น [20]

2) รูปร่างของเครื่องมือเชื่อม

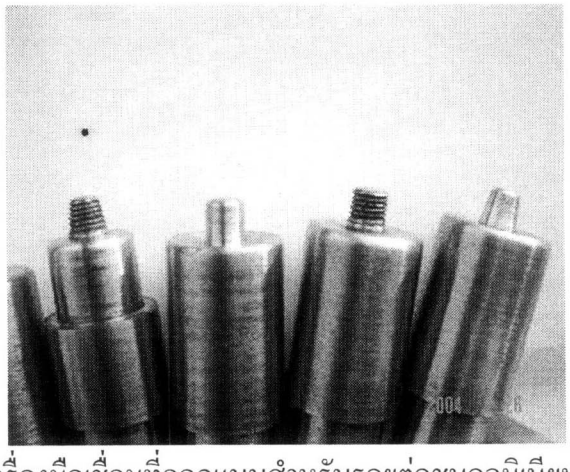
เครื่องมือเชื่อมประกอบด้วยรูปร่างสำคัญดังแสดงในรูปที่ 2.7 คือ บ่าเครื่องมือและตัวกวน โดยหน้าที่หลักของเครื่องมือเชื่อม คือ การทำให้เกิดความร้อน และการทำการรวมผสมวัสดุรอบรอยต่อเข้าด้วยกัน ปัจจุบันมีการทดลองใช้เครื่องมือเชื่อมหลายรูปแบบเพื่อทำการเชื่อมอลูมิเนียม เช่น การใช้ตัวกวนเกลียววนขวาเชื่อมอลูมิเนียม 2024 และ 6061 รวมตัวได้ดี ทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น [21]

การใช้ตัวกวนรูปร่างปริซึมสี่เหลี่ยมจตุรัส เกลียววนขวา และเกลียววนซ้าย ในการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิเนียม 1018 และแสดงการรวมตัวของวัสดุดีที่สุดในการใช้ตัวกวนเกลียววนขวา [22] หรือการเปรียบเทียบการใช้ตัวกวนทรงกระบอกเกลียววนขวา และทรงกรวยเกลียววนขวาดังแสดงในรูปที่ 2.8 ในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรด 2014 ที่แสดงค่าแข็งแรงสูงสุดประมาณร้อยละ 75 ของความแข็งแรงของอลูมิเนียม ซึ่งได้จากตัวกวนทรงกรวยเกลียวขวา นอกจากนั้นตัวกวนทรงเกลียวทำให้ได้แนวเชื่อมที่สมบรูณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) และ (ข) ขณะที่จุดบก พร่องสามารถตรวจพบ

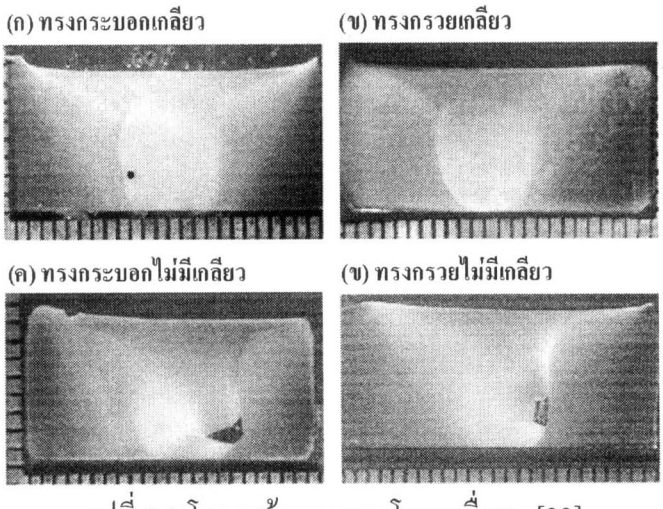
ในตัวกวนที่ไม่มีเกลียวดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ค) และ (ง) นอกจากนั้นตัวกวนทรงกรวยเกลียววนขวา ทำให้ขนาดของเม็ดเกรนเล็กและละเอียดขึ้นที่สุด และส่งผลทำให้ค่าความแข็งสูงสุดด้วย [23]




รูปที่ 2.7 เครื่องมือเชื่อม FSW [17]



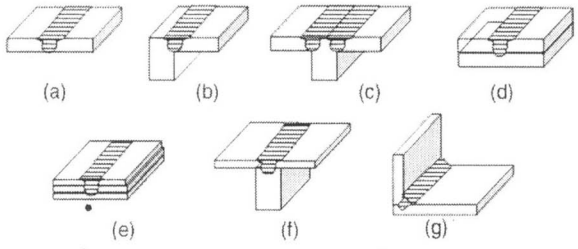
รูปที่ 2.8 เครื่องมือเชื่อมที่ออกแบบสำหรับรอยต่อชนอลูมิเนียม 2014 [23]




รูปที่ 2.9 โครงสร้างมหภาคโลหะเชื่อม: [23]

3) รอยต่อ

ในปัจจุบันรอยต่อ FSW ที่มีการใช้งานอุตสาหกรรมหรืองานวิจัยมีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.10 ประกอบไปด้วย รอยต่อชนแผ่นวัสดุสองแผ่นที่ความหนาเท่ากัน รอยต่อมุม รอยต่อตัวที รอยต่อเกย รอยต่อมุมฉาก เป็นต้น




รูปที่ 2.10 รูปแบบรอยต่อการเชื่อม FSW [17]

ง. การเชื่อมอลูมิเนียมผสม

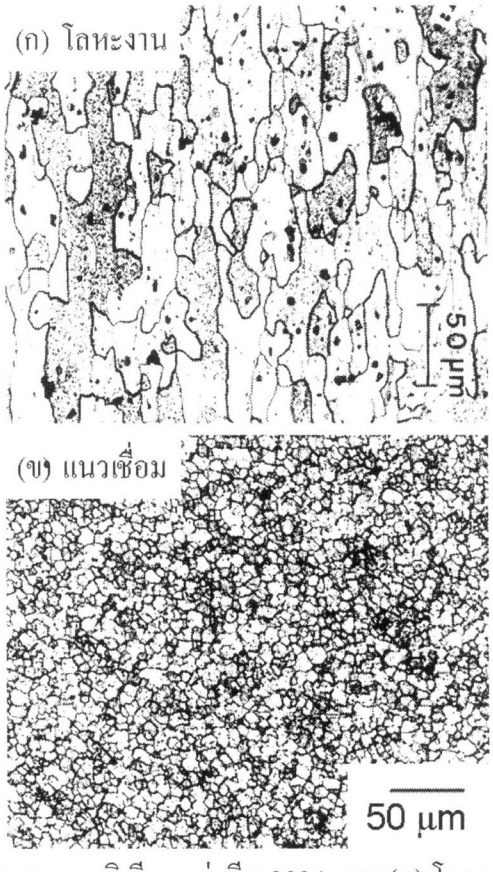
อลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีความยากต่อการเชื่อมหลอมละลาย เนื่องจากสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่ามากกว่าเหล็กถึง 6 เท่า ทำให้ความร้อนที่ให้กับอลูมิเนียมเกิดการถ่ายเทออกจากรอยต่ออย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นออก ไซด์ที่เกิดบนผิวของอลูมิเนียม เป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้แนวเชื่อมมีคุณภาพต่ำ เนื่องจากออกไซด์ของอลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวสูง (2040°C) กว่าอลูมิเนียมถึง 3 เท่า เมื่อทำการเชื่อม หากไม่สามารถกำจัดออกไซด์บนผิวชิ้นงานออกให้หมดได้จะส่งผลทำให้การควบคุมบ่อหลอมละลายเป็นไปด้วยความยากลำบาก และเกิดการรวมตัวกับโลหะเชื่อมเกิดเป็นจุดบกพร่องต่างๆ เช่น รูพรุน ได้ [24]

จากหลักการการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ที่กล่าวในข้างต้น ปัญหาที่เกิดจากผลความแตกต่างของอุณหภูมิ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน หรือสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ที่ส่งผลทำให้เกิดความยากลำบากในการควบคุมบ่อหลอมละลาย หรือการรวมตัวระหว่างออกไซด์กับโลหะเชื่อม สามารถถูกกำจัดออกไปได้ เนื่องจากการเชื่อมนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมละลายของอลูมิเนียม และการเกิดการเชื่อมยึดกันระหว่างวัสดุเกิดจากการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุที่ถูกกระทำด้วยแรงทางกลเท่านั้น

เนื่องจากการปฏิบัติการภายใต้จุดหลอมละลายของอลูมิเนียม ทำให้โครงสร้างที่เกิดจากการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นของแข็ง คือ โครงสร้างเดนไดรท์ (Dendrite structure) ที่เกิดขึ้นในโลหะเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมหลอม ละลายซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งสูงไม่เกิดขึ้น แต่ทำให้เกิดโครงสร้างเกรนที่กลมและเล็กละเอียดมากขึ้น ส่ง ผลโดยตรงทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะหลักที่มีรูปร่างเรียวยาวดังแสดงในรูปที่

2.11 (ก) เกรนในโลหะเชื่อมมีความกลมมนและเล็กละเอียดมากกว่าดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข)

ที่ผ่านมา อลูมิเนียมส่วนใหญ่ได้ถูกทดลองทำการเชื่อมด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน และเป็นที่ยอมรับว่าสามารถทำให้ได้ค่าความแข็งแรงเทียบเท่าหรือสูงกว่าอลูมิเนียมที่เป็นโลหะหลักที่ใช้ในการเชื่อม [20] ดังนั้นจึงเป็นทางเลือกสำคัญในการเชื่อมอลูมิเนียมผสมต่อไป




สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

รูปที่ 2.11 (ก) โครงสร้างจุลภาคอลูมิเนียมแผ่นรีด 2024 และ (ข) โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมของอลูมิเนียม 2024 [18]

จ. การเชื่อมวัสดุต่างชนิด

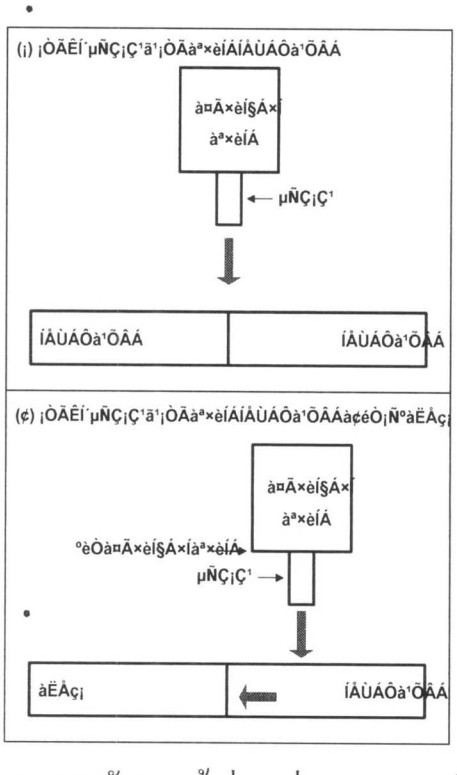
ในอุตสาหกรรมรถยนต์ปัจจุบันได้นำเอาอลูมิเนียมเข้ามาใช้แทนที่เหล็ก เพื่อลดน้ำหนักโครงสร้างของรถยนต์ [25] แต่การต่อเชื่อมอลูมิเนียมและเหล็กเข้าด้วยกันเป็นวิธีที่ค่อนข้างลำบาก เนื่องจากโลหะทั้งสองมีสมบัติทางกล กายภาพ และเคมีที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดจุดบกพร่องต่างๆ ขึ้น

ในปัจจุบัน ปัญหาเหล่านี้ลดลง เนื่องจากการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนสามารถเชื่อมรอยต่อได้ผลเป็นที่ยอมรับได้ เช่น รอยต่อระหว่างอลูมิเนียม 5083 และเหล็กกล้า SS400 [26] หรือรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมผสม Al6061 และเหล็กกล้า AISI1018 [27] หรือรอยต่อระหว่างอลูมิเนียม

6013-T4 และเหล็กกล้าไร้สนิม 304 [28] ซึ่งรอยต่อเหล่านี้แสดงความแข็งแรงดึงสูงกว่าร้อยละ 70 เมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมที่ใช้เชื่อม

อย่างไรก็ตามในการเชื่อมอลูมิเนียมเข้ากับเหล็กมีเทคนิคสำคัญที่ควรระมัดระวัง คือ เทคนิคการสอดตัวกวนเข้าสู่รอยต่อ ในการสอดตัวกวนเข้าสู่รอยต่อของอลูมิเนียมผสม แนวเส้นผ่านศูนย์กลางและแนวของรอยต่อจะอยู่ที่แนวเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) แต่ในกรณีของรอยต่อชนระหว่างอลูมิเนียมและเหล็กไม่สามารถสอดเข้าโดยตรงดังเช่นอลูมิเนียม เนื่องจากความแข็งของวัสดุที่ต่างกันจะทำให้เกิดการเลื่อนไถลของตัวกวนออกจากแนวรอยต่อชน และเกิดการแตกหักได้ ดังนั้นเทคนิคการสอดตัวกวนในการเชื่อมอลูมิเนียมและเหล็กมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข) ควรนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งมีขั้นตอน คือ ตัวกวนถูกสอดเข้าสู่ด้านอลูมิเนียมจนกระทั่งบ่าเครื่องมือเชื่อมจมลงไปสู่ผิวหน้าของอลูมิเนียมจากนั้นจึงเคลื่อนตัวกวนเข้าหาผิวด้านข้างของเหล็กเพื่อทำให้ได้รอยเชื่อมตามต้องการ [20]

การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน เป็นทางเลือกในการเชื่อมโลหะที่ยากต่อการเชื่อมหลอมละลาย หากเลือกตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อมรอยต่อ จะทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีสมบัติทางกล เคมี และกายภาพเท่า กับหรือดีกว่าโลหะที่ใช้เชื่อม นอกจากนั้นยังเป็นกระบวน การที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และประหยัดพลังงาน เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมของประเทศต่อไป




รูปที่ 2.12 ความแตกต่างของการสอดตัวกวนเข้าสู่รอยต่อชนของการเชื่อมวัสดุเดียวกันและต่างกัน

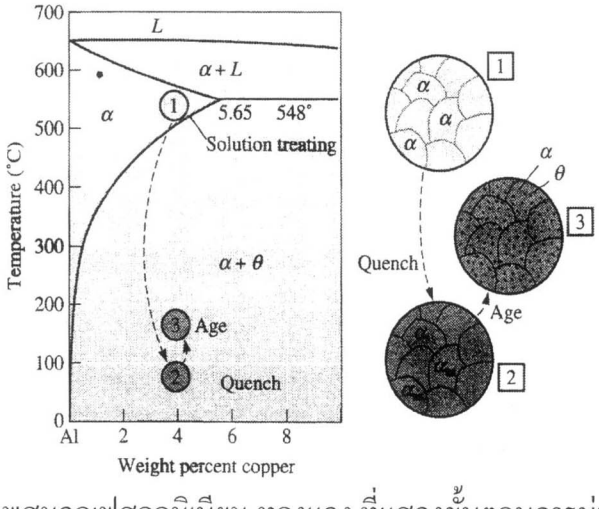
## 2.3 การอบชุบ [14]

ขั้นตอนสำคัญของการเพิ่มความแข็งแรงของโลหะเชื่อมอลูมิเนียมประกอบไปด้วยบ่มแข็งและการอบคืนไฟต่างๆ ในหัวข้อนี้ Askeland and Phule [14] ได้นำเสนอเนื้อหาที่น่าสนใจในการนำไปทำการบ่มแข็งอลูมิเนียม ดังนี้

### 2.3.1 การบ่มแข็งและการเพิ่มความแข็งด้วยการตกผลึก (Age and Precipitation Hardening)

การบ่มแข็งและการเพิ่มความแข็งด้วยการตกผลึก คือ การทำให้เกิดเฟสอันดับสองที่มีขนาดเล็กๆ เกิดการตกผลึกในพื้นหลักที่เหนียวกว่า การทำให้เกิดการตกผลึกเพื่อทำให้เกิดความแข็งมีขั้นตอนประกอบไปด้วย การอบละลาย (Solution treatment) การจุ่มชุบ (Quench) และการบ่มแข็ง (Aging) เพื่อความเข้าใจขั้นตอนการเกิดให้พิจารณาโลหะผสม 96%Al-4%Cu ในแผนภาพสมดุลเฟสทองแดงและอลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 2.13

ขั้นตอนที่ 1 การอบละลาย (Solution treatment) เริ่มต้นโดยการให้ความร้อนแก่โลหะผสมไปที่อุณหภูมิสูงกว่าเส้นโซลวัส และอบแช่ไว้จนกระทั่งสารละลายของแข็งอัลฟ่ามีความเป็นเนื้อเดียวกันโดยสมบรูณ์ ขั้นตอนนี้ทำให้เฟส $\theta$ ที่เกิดการตกผลึกเกิดการละลายกลับเข้าไปในพื้นหลักและลดการเกิดการแยกตัวของส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาค อุณหภูมิของการอบละลายสามารถเพิ่มขึ้นได้จนถึงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเส้นการแข็งตัวเพื่อลดระยะเวลาที่ทำให้เกิดความเป็นเนื้อเดียว แต่ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากอาจทำให้เกิดการแตกร้าวขณะร้อนได้ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบละลายสำหรับโลหะผสม 96%Al-4%Cu นั้นมีค่าประมาณ 500-548°C หรือกึ่งกลางระหว่างเส้นโซลวัสและเส้นการแข็งตัว

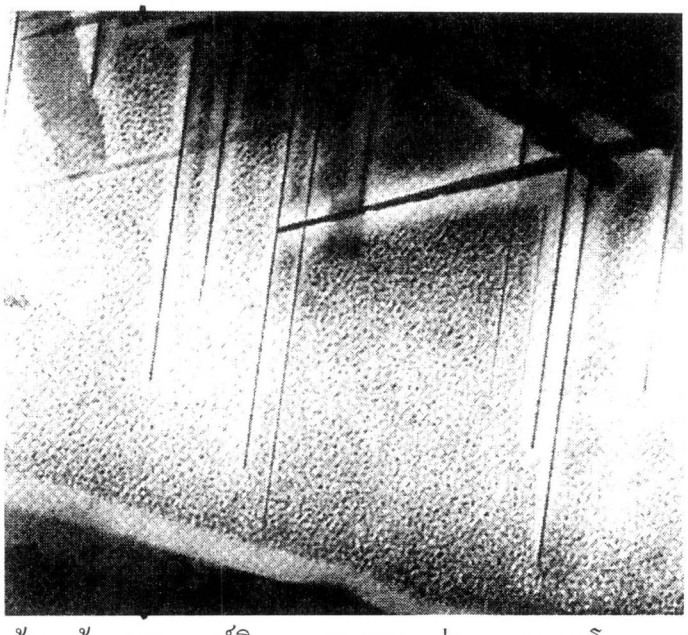



รูปที่ 2.13 แผนภาพสมดุลเฟสอลูมิเนียม-ทองแดง ที่แสดงขั้นตอนการบ่มแข็งและรูปแบบโครงสร้างจุลภาค [14]

ขั้นตอนที่ 2 การจุ่มชุบ หลังจากการอบละลายแล้ว โลหะผสมประกอบไปด้วยสารละลาย $\alpha$ เท่านั้น จากนั้นโลหะผสมถูกจุ่มชุบอย่างรวดเร็วมาที่อุณหภูมิต่ำ อะตอมในสารละลาย $\alpha$ จะไม่มีโอกาสในการแพร่เพื่อทำให้เกิดนิวเคลียสของเฟสใหม่ และทำให้เฟส $\theta$ ไม่เกิดขึ้น โครงสร้างหลังการจุ่มชุบจึงประกอบไปด้วย สารละลาย $\alpha_{ss}$ อิ่มตัวยิ่งยวดที่มีปริมาณของทองแดงที่ผสมอยู่ในปริมาณที่มากกว่าความสามารถในการละลาย สารละลายนี้เป็นสารละลายกึ่งเสถียร (Metastable)

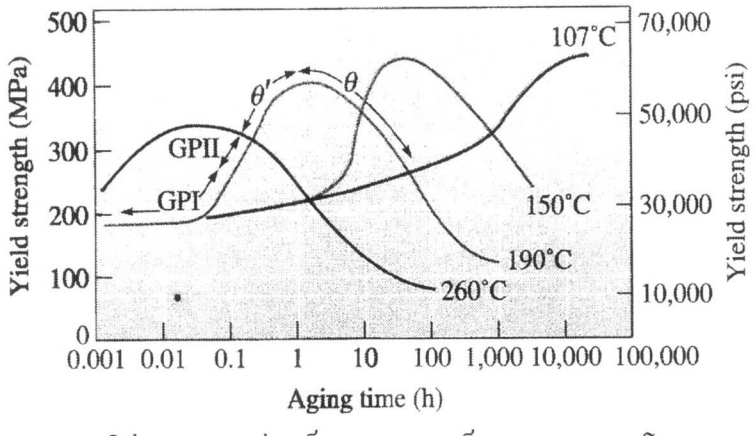
ขั้นตอนที่ 3 การบ่มแข็ง (Aging) สารละลาย $\alpha_{ss}$ อิ่มตัวยิ่งยวดจะถูกให้ความร้อนไปที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าเส้นโซลวัส ที่อุณหภูมิการบ่มแข็งนี้อะตอมจะเกิดการแพร่ในระยะทางสั้น และทำให้เกิดการตกผลึกของเฟส $\theta$ ขึ้นและเกิดการกระจายตัวในพื้นหลัก หากทำการอบแช่ที่อุณหภูมิการบ่มแข็งในช่วงระยะเวลาที่เพียงพอแล้วจะทำให้เกิดโครงสร้างที่ประกอบด้วย $\alpha$+$\theta$ ที่เสถียร ถึงแม้ว่าโครงสร้างประกอบด้วยเฟสสมดุล 2 เฟส แต่รูปร่างของเฟสที่เกิดขึ้นนั้นจะมีความแตกต่างจากโครงสร้างที่ได้จากการปล่อยให้โลหะผสมเย็นตัวอย่างช้าๆ หลังจากขั้นตอนทั้งสามของการบ่มแข็งเสร็จสิ้นแล้ว จะทำให้ได้โครงสร้างที่มีการตกผลึกของเฟสอันดับสองที่เล็กละเอียด กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโครงสร้างและส่งผลทำให้ความแข็งแรงของโลหะผสมเพิ่มขึ้น

- การตกผลึกที่ไม่สมดุลขณะบ่มแข็ง (Nonequilibrium precipitatates during aging) ขณะทำการบ่มแข็งโลหะผสมทองแดง-อลูมิเนียม มักมีการเกิดเฟสที่ตกผลึกก่อนการเกิดเฟส $\theta$ เมื่อเริ่มทำการบ่มแข็ง อะตอมของทองแดงจะมีความเข้มข้นที่ระนาบ {100} ในพื้นหลัก $\alpha$ และทำให้เกิดการตกผลึกของแถบบางๆที่เรียกว่า เขตกิวเนียร์เพรสตัน (Guinier-Preston (GP) Zone) เมื่อทำการบ่มแข็งต่อไป อะตอมของทองแดงจะเกิดการแพร่เข้าสู่พื้นที่ GP-I มากขึ้นทำให้ GP-I มีความหนามากขึ้นเป็นแผ่นหรือเขต GP-II และเมื่อเกิดการแพร่ต่อเนื่องจะเปลี่ยนเป็น $\theta'$ และเปลี่ยนเป็น $\theta$ ตอนท้ายสุดซึ่งเป็นเฟสที่เสถียร การตกผลึกของเฟสที่ไม่เสถียร GP-I GP-II และ $\theta'$ เป็นลักษณะของการตกผลึกแบบเกาะยึดแน่นกับพื้นหลัก ความแข็งแรงของโลหะผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการบ่มแข็งเพิ่มขึ้น และเมื่อเฟสที่ตกผลึกเกิดการเติบโตขณะอยู่ในช่วงแรกของการปรับปรุงด้วยความร้อน เมื่อการตกผลึกแบบเกาะยึดแน่นกับพื้นหลักเกิดขึ้นแสดงว่าโลหะผสมอยู่ในสภาวะการบ่มแข็งแล้ว ตัวอย่างของการบ่มแข็งแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงโครงสร้างของโลหะผสมอลูมิเนียม-เงินที่ผ่านการบ่มแข็งภาพขยายกำลังสูงแสดงเฟสของแผ่นตกผลึก $\gamma'$ ที่เกาะยึดแน่นกับพื้นหลักและเขต GP ที่โค้งมน เมื่อเฟส $\theta$ ที่ไม่เกาะยึดแน่นกับพื้นหลักเกิดการตกผลึกจะทำให้ความแข็งแรงของโลหะผสมลดลง สภาวะนี้เรียกว่าการบ่มแข็งที่มากเกินไป (Overaging) เฟส $\theta$ ยังคงมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในพื้นหลักแต่ $\theta$ นี้มีขนาดใหญ่เนื่องจากมีเวลาในการเติบโตนานกว่าทำให้ความแข็งแรงลดลง



รูปที่ 2.14 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผสม 85%Al-15%Ag ที่แสดงเฟส $\gamma'$ และพื้นที่ GP กำลังขยาย 40,000 เท่า [14]

2.3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาการบ่มแข็ง (Effect of Aging Temperature and Time)




รูปที่ 2.15 ผลของอุณหภูมิต่อเวลาการบ่มแข็งและความแข็งแรงครากของโลหะผสม 96%Al-4%Cu

สมบัติของโลหะผสมที่ผ่านการบ่มแข็งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาการบ่มแข็งดังแสดงในรูปที่ 2.15 ที่อุณหภูมิ 260°C การแพร่และการตกผลึกในโลหะผสม 96%อลูมิเนียม-4%ทองแดงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ความแข็งแรงมีค่าสูงสุดเมื่อเวลาผ่านไป 0.1 ชั่วโมง การบ่มแข็งที่มากเกินไปจะเกิดเมื่อเวลาบ่มแข็งมีค่ามากกว่า 0.1 ชั่วโมงหรือประมาณ 6 นาที ที่อุณหภูมิ 190 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิการบ่มแข็งสำหรับอลูมิเนียมผสมส่วนใหญ่ เวลาบ่มแข็งเพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงสูงสุดมีค่ายาวนานกว่า การบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำนี้มีประโยชน์คือ ความแข็งแรงสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการบ่ม

แข็งลดลง, โลหะผสมสามารถคงความแข็งแรงสูงสุดเมื่อเวลาการบ่มแข็งเพิ่มขึ้น และสมบัติของโลหะผสมมีความสม่ำเสมอกว่า ถ้าโลหะผสมทำการบ่มแข็งเพียง 10 นาทีที่ 260°C ผิวหน้าของชิ้นงานจะมีอุณหภูมิที่สูงตามต้องการแต่ในแกนกลางของชิ้นงานยังคงมีอุณหภูมิต่ำ

2.3.3 สิ่งจำเป็นสำหรับการบ่มแข็ง

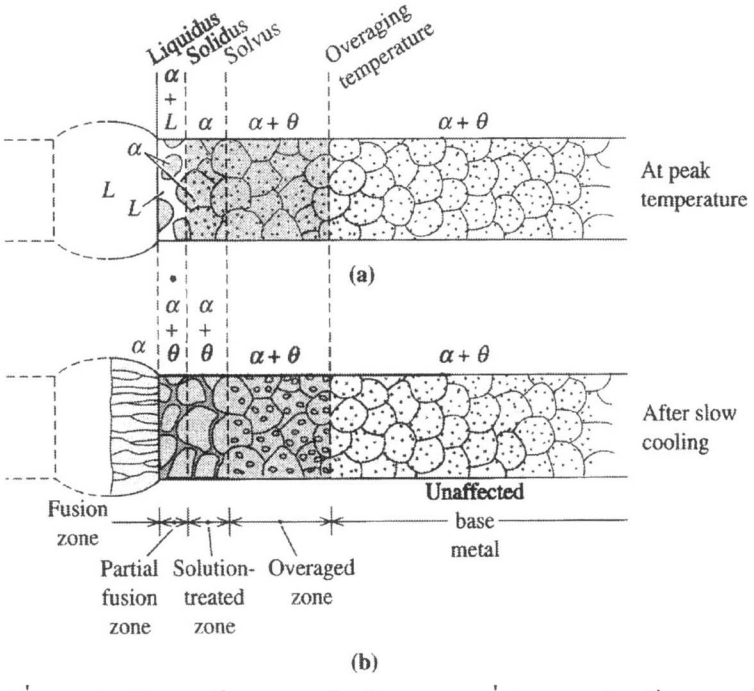
โลหะผสมส่วนใหญ่สามารถบ่มแข็งได้ ขณะที่โลหะผสมบางตัวไม่สามารถบ่มแข็งได้ ข้อพิจารณาเบื้องต้นในการพิจารณาวัสดุว่าตอบสนองต่อการบ่มแข็งหรือไม่ มีดังนี้

- ระบบโลหะผสมต้องแสดงความสามารถในการละลายที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง หรือเหนือเส้นโซลวัสประกอบไปด้วยเฟสเดียวและต่ำกว่าเส้นโซลวัสประกอบไปด้วยเฟส 2 เฟส
- พื้นหลักควรมีความอ่อนหรือเหนียว และเฟสที่ตกผลึกต้องมีความแข็งและเปราะ ในโลหะผสมที่สามารถบ่มแข็งได้ส่วนมาก เฟสที่ตกผลึก คือเฟสสารประกอบกึ่งโลหะที่แข็งและเปราะ
- โลหะผสมต้องมีความสามารถในการชุบแข็ง โลหะผสมบางตัวไม่สามารถทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเพียงพอที่ทำให้เกิดการตกผลึก อย่างไรก็ตามการเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะทำให้โครงสร้างโลหะผสมเกิดการบิดเบี้ยวได้ ในการป้องกันการบิดเบี้ยวในอลูมิเนียมผสม จึงมักทำการจุ่มชุบอลูมิเนียมลงไปในน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80°C
- เฟสตกผลึกที่เกาะยึดแน่นกับพื้นหลักต้องก่อตัวขึ้น

2.3.4 ปัญหาการใช้งานโลหะผสมที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูง

ในการใช้งานเป็นการยากที่จะเลือกใช้งานโลหะผสม 96%อลูมิเนียม-4%ทองแดง ในการใช้งานที่ช่วงอุณหภูมิสูง เช่น อุณหภูมิสูงกว่า 500°C เนื่องจากเป็นการบ่มแข็งที่อุณหภูมิและเวลาที่มากเกินไป นอกจากนั้นเฟสที่ตกผลึกออกมาจะละลายกลับเข้าไปในพื้นหลักทำให้โลหะผสมสูญเสียความแข็งแรงไปได้ ดังนั้นอลูมิเนียมผสมจึงนิยมใช้งานที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามมีโลหะผสมที่ผ่านการบ่มแข็งแล้วที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง เช่น นิกเกิลผสมที่สามารถคงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1000 °C ได้ ปัญหาที่พบในโลหะที่สามารถบ่มแข็งได้อีกอย่างหนึ่ง คือ ในขั้นตอนการเชื่อมโลหะที่สามารถบ่มแข็งได้ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ขณะทำการเชื่อมโลหะที่ใกล้กับบริเวณพื้นที่การหลอมละลายจะถูกทำให้ร้อนขึ้น พื้นที่นี้เรียกว่าพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) พื้นที่นี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำที่ติดกับโลหะที่ใช้เชื่อม บริเวณนี้ทำให้การบ่มแข็งและเวลาการบ่มแข็งที่มากเกินไป และพื้นที่ที่ติดกับบริเวณการหลอมละลายซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการอบละลาย หากพื้นที่นี้เกิดการเย็นตัวอย่างช้าๆ ทำให้เฟส $\theta$ ก่อตัวขึ้นที่ขอบเกรนและส่งผลทำให้บริเวณแนวเชื่อมเกิดความเปราะขึ้น การแก้ไขทำได้

โดยให้ความร้อนซ้ำที่แนวเชื่อมโดยใช้การเชื่อมด้วยลำอิเลกตรอน (Electron beam welding) หรือพยายามทำการเชื่อมในช่วงอุณหภูมิของการอบละลายเป็นต้น เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพของแนวเชื่อม




รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในโลหะผสมที่ผ่านการบ่มแข็งขณะทำการเชื่อมแบบหลอมละลาย: (a) โครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิสูงสุด และ (b) โครงสร้างจุลภาคในแนวเชื่อมหลังจากการเย็นตัวช้ามาที่อุณหภูมิห้อง

## 2.4 การทดสอบสมบัติของวัสดุ

### 2.4.1 การทดสอบความแข็งแรงดึง

การทดสอบโดยการดึงเป็นวิธีการทดสอบที่ง่ายที่สุด ในวิธีของการทดสอบหาสมบัติทางกลของวัสดุ และนิยมทดสอบกันมากเพราะสามารถที่จะให้ข้อมูลที่เป็นสมบัติทางกลของวัสดุ และนิยมทดสอบกันมากเพราะสามารถที่จะให้ข้อมูลที่เป็นสมบัติทางกลด้านพื้นฐานพอสมควร เช่น ความต้านทานแรงดึง ความยืดตัว และความเปราะ ซึ่งเป็นข้อสำคัญที่สุดและเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบวิธีการทดสอบทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยชิ้นทดสอบมาตรฐานจะถูกดึงด้วยแรงที่กำหนดทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปจนกระทั่งพังทลาย ในการทดสอบแรงดึงอ้างอิงตามรูปที่ 2.17 ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังแสดงในสมการที่ 2.1 ถึง 2.6 ดังนี้

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \tag{2.1}$$

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

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

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

$$E = \frac{\sigma_t}{e_t} \tag{2.5}$$

เมื่อ • $\sigma_t$ = ความเค้น

$F_t$ = แรงกระทำ

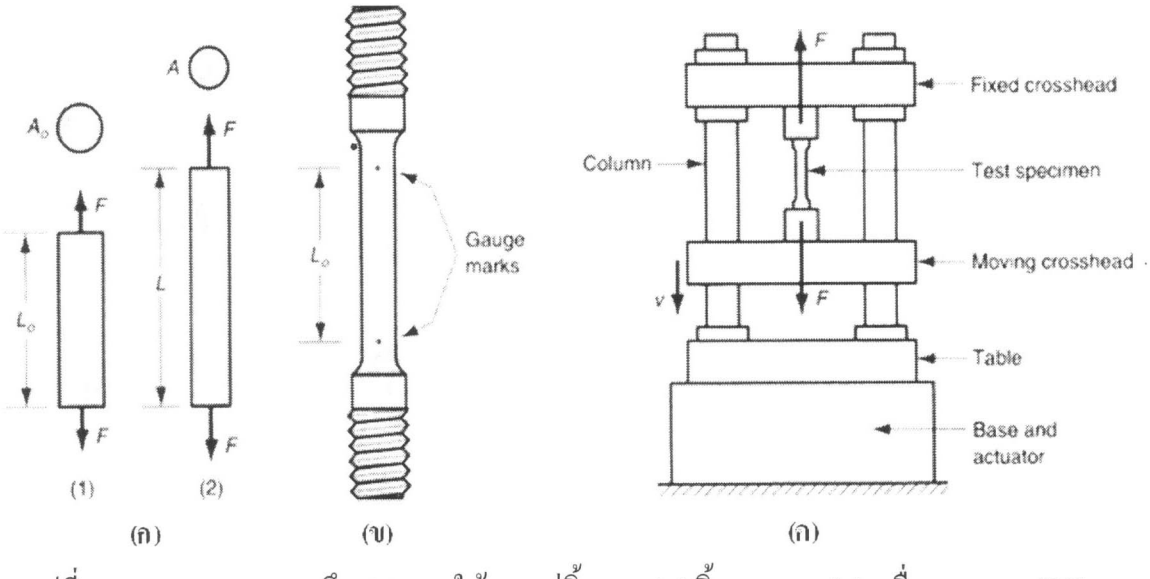
$e_t$ = ความเครียด

L = ความยาวสุดท้าย

$L_0$ = ความยาวเริ่มต้น

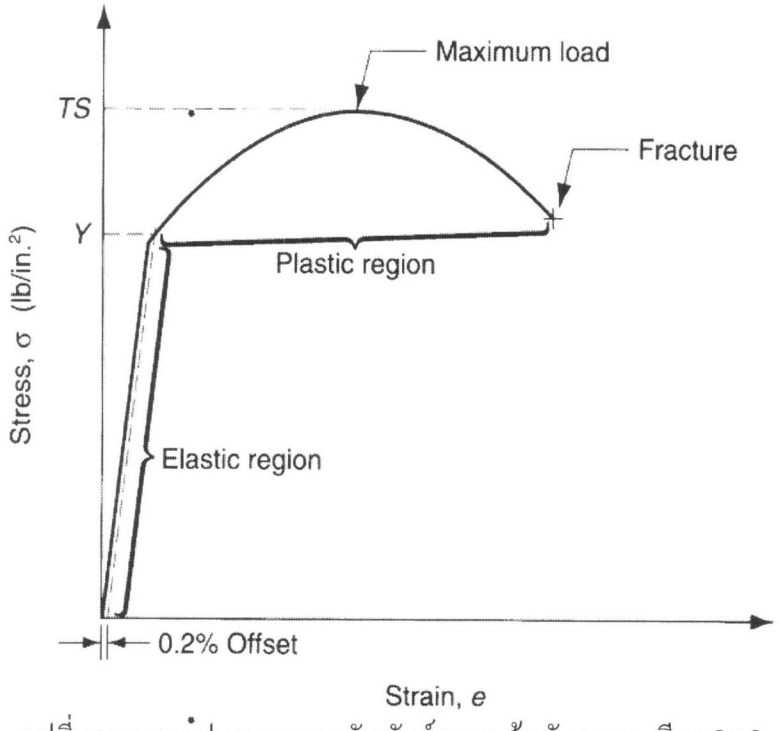
A = พื้นที่หน้าตัดสุดท้าย

$A_0$ = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น




รูปที่ 2.17 การทดสอบแรงดึง: (ก) การให้แรงแก่ชิ้นงาน (ข) ชิ้นทดสอบ (ค) เครื่องทดสอบ [29]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้นความเครียด ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพล๊อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและค่าความเครียดในแกนนอนดังรูปที่ 2.18




รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด [29]

ตารางที่ 2.8 โมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิด [29]

| **โลหะ** | **โมดูลัสการยืดหยุ่น (MPa)** |
|---|---|
| อลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม | $69 \times 10^3$ |
| เหล็กหล่อ | $138 \times 10^3$ |
| ทองแดงและทองแดงผสม | $110 \times 10^3$ |
| เหล็ก | $209 \times 10^3$ |
| ตะกั่ว | $21 \times 10^3$ |
| แมกนีเซียม | $48 \times 10^3$ |
| นิกเกิล | $209 \times 10^3$ |
| เหล็กกล้า | $209 \times 10^3$ |

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้นความเครียดเราพบว่าเมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้าๆ ชิ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดออกจนถึงจุดๆหนึ่ง ในช่วงนี้ที่จะกราฟมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดเป็นสัดส่วนคงที่ กราฟเป็นเส้นตรงตามกฎของฮุค (Hook's Law) คือความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด เรียกว่าจุดพิกัดสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) คือเมื่อปล่อยแรงกระทำชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม และเมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปอีกจนเกินพิกัดสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรงกราฟ วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดๆหนึ่งนั้น เรียกว่าจุดพิกัดการยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งที่จุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation) กับวัสดุนั้นแต่เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร(Plastic Deformation) และจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ที่จุดนี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) ซึ่งค่านี้มีประโยชน์กับวิศวกรมากเพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย ในวัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.20% แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นโค้งของกราฟค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่าความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) ดังรูปที่ 2.14 ค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิดและความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด แสดงไว้ดังตารางที่ 2.8 ถึง 2.9

ตารางที่ 2.9 ความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด [29]

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

โดยทั่วไป ในการทดสอบความแข็งแรงดึง รูปร่างของชิ้นงานที่ไม่มีความต่อเนื่อง เช่น รูร่องบาก ทำให้เกิดการกระจายตัวของความเค้นในชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอ บริเวณใกล้เคียงพื้นที่ไม่ต่อเนื่องนั้นจะมีค่าความเค้น ($\sigma_{max}$) ค่อนข้างสูงกว่าความเค้นเฉลี่ยที่บริเวณพื้นที่ที่ห่างจากความไม่

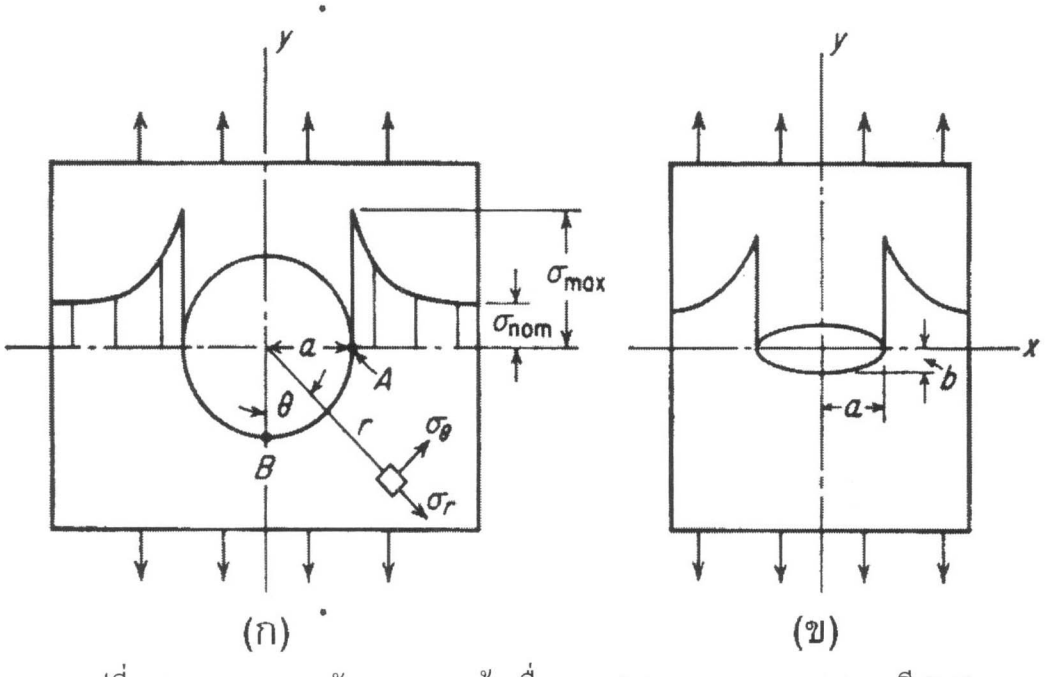
ต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.19 บริเวณด้านข้างของรูวงกลมและรูวงรี หากไม่มีรูความเค้นที่กระจายตลอดทั้งแผ่นจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับแรงส่วนด้วยพื้นที่หน้าตัดของแนวแรงดังที่กล่าวผ่านมาก่อนหน้านี้ ค่าความเข้มข้นของความเค้นหาค่าได้ โดยการหาค่าองค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี (Theoretical stress concentration factor: $K_t$) ดังแสดงในสมการที่ 2.6 ซึ่งเป็นค่าที่อธิบายอัตราส่วนระหว่างความเค้นสูงสุดกับค่าความเค้นปกติที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดจริงของชิ้นงาน ลักษณะระดับความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างชิ้นงานตัวอย่างที่มีความไม่ต่อเนื่องของพื้นผิว และค่าองค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีแสดงในรูปที่ 2.20

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{no\min al}} \tag{2.6}$$

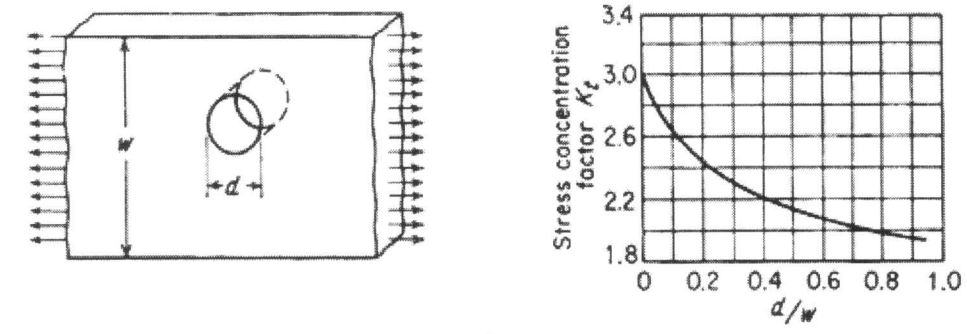
เมื่อ $K_t$ = องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎี

$\sigma_{max}$ = ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นใกล้จุดที่มีความไม่ต่อเนื่อง

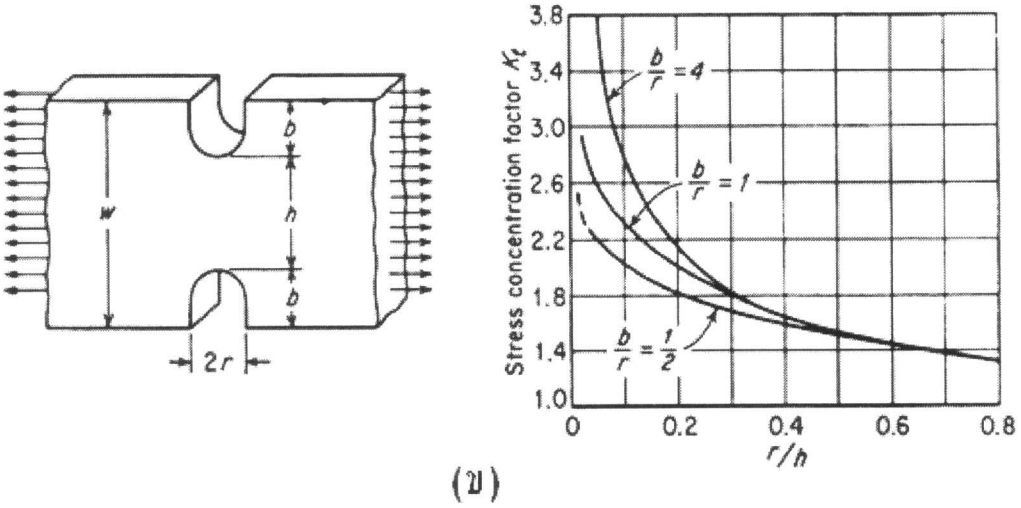
$\sigma_{nominal}$ = ความเค้นปกติในชิ้นงานที่มีความต่อเนื่อง



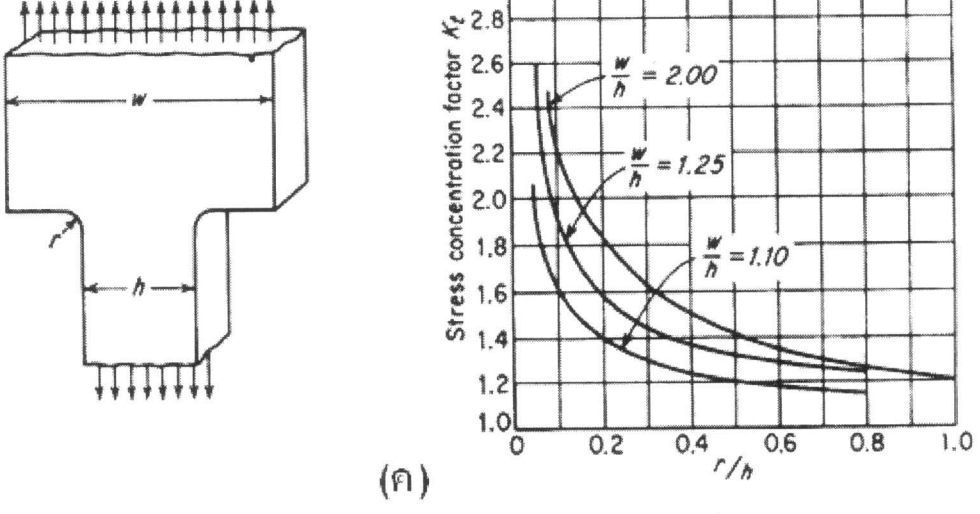

รูปที่ 2.19 การกระจายตัวของความเค้นเนื่องจาก (ก) รูวงกลม และ (ข) รูวงรี [20]




(ก)




(ข)




(ค)

รูปที่ 2.16 องค์ประกอบความเข้มข้นของความเค้นทางทฤษฎีสำหรับชิ้นงานรูปร่างต่างๆ [26]

2.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

การตรวจสอบงานเชื่อมโลหะด้วยการตรวจสอบแบบมหภาค โดยมีจุดประสงค์ ดังนี้ คือ ความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม จำนวนชั้นของแนวเชื่อม บริเวณที่มีผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) สแลกฝังในการซึมลึกของแนวเชื่อม และรูพรุนของงานเชื่อมการเตรียมชิ้นทดสอบมหภาค (Macro specimen) โดยการกัดผิวแล้วกัดด้วยน้ำยาเคมีตามความเหมาะสม แล้วตรวจสอบด้วยสายตา (Visual test) หรือใช้กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่าเข้าช่วย การตรวจสอบที่ให้ผลดีที่สุดนั้น ผู้ตรวจสอบต้องรับผิดชอบและควบคุมการตรวจสอบตามวิธีอย่างถูกต้อง และพิจารณารอยบกพร่องที่ปรากฏเปรียบเทียบเกณฑ์การตัดสินตรวจสอบเพื่อสรุปผลว่าชิ้นงานนั้นยอมรับได้หรือไม่

ก. การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

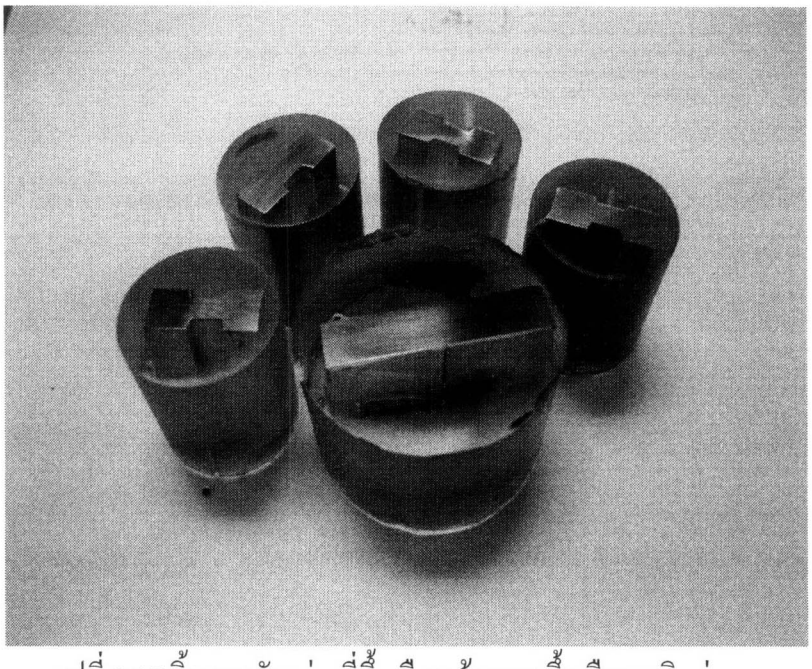
ตัดชิ้นงานตามขวางออกเป็นชิ้นประมาณ 4 – 5 ชิ้น ห่างจากขอบงานประมาณ 1 นิ้ว ของปลายทั้งสองข้าง ข้อควรระวัง คือ การตัดชิ้นงานต้องพยายามมิให้เกิดความร้อน หรือ ใช้แรงกดระหว่างการตัดมากเกินไป เพราะจะทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนรูปได้

ข. การเตรียมผิวชิ้นทดสอบ

ในการตัดผิวชิ้นงานต้องมีขนาดที่เหมาะสม ภาคตัดขวางจะอยู่บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ในการจัดเตรียมนั้นจะต้องไม่ทำงานให้เกิดความร้อนที่จะทำให้ โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง จากนั้นทำการปรับแต่งผิวให้เรียบด้วยการกลึงหรือทำการเจียระไนที่ผิวของชิ้นงาน และถ้างานมีขนาดเล็กยากแก่การจับในการเตรียมผิวชิ้นงานนั้น จะต้องทำการขึ้นตัวเรือน (Mounting) คือการฝังชิ้นงานลงในเรซิ่นโดยมีจุดประสงค์ เพื่อทำให้ชิ้นงานมีผิวหน้าที่เป็นระนาบและมีขนาดที่พอเหมาะกับการจับยึดได้สะดวก ทั้งยังรักษาขอบของชิ้นงานไม่ให้เกิดลักษณะโค้งมน ก่อนทำการขึ้นเรือนควรลบเหลี่ยมคม และมุมแหลมของชิ้นงานอยู่เสมอ ดังแสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ถูกขึ้นเรือนด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 2.17 จากนั้นทำการขัดผิวชิ้นงานแบบหยาบด้วยกระดาษทราย ซิลิกอนคาร์ไบด์ เบอร์ 600 800 1000 1200 ตามลำดับ โดยการขัดน้ำ (การขัดต้องวางกระดาษทรายบนแผ่นที่เรียบ เช่น กระจกหนา เพื่อให้ได้ระนาบเดียวกัน) จนรอยกระดาษทรายมีทิศทางเดียวกันตลอดชิ้นทดสอบ แล้วหมุนชิ้นทดสอบทำมุม 90 องศา ขัดจนรอยเดิมหายไปแล้วเปลี่ยนกระดาษทรายเบอร์ที่ละเอียดขึ้นไปจนกระทั่งถึงเบอร์ 1200 การตรวจสอบและผลการตรวจสอบ อาศัยการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual test) ตามมาตรฐาน ASME Section V โดยตรวจสอบด้วยตาเปล่า หรืออุปกรณ์กำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า แล้วบันทึกผลที่ปรากฏ โดยการถ่ายรูป หรือสเก็ตภาพ

ค. การกัดกรด

การทดสอบโครงสร้างมหภาคของเนื้อโลหะนั้น ในแต่ละชนิดจะต้องมีความแตกต่างกันในการใช้กรด เนื่องด้วยโลหะมีความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างการเกิดปฏิกิริยาต่อกรดจึงมีความแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้กรดให้เหมาะสมกับโลหะงานนั้นๆ สำหรับที่ทำการทดสอบโครงสร้างมหภาคของอลูมิเนียมผสม การใช้กรดกัดจะต้องมีผสมของ น้ำกลั่น และกรดชนิดต่างๆที่ประกอบด้วยชนิด กรดไฮโดรฟูริก(HF) กรดไฮโดรครอริก กรดไนตริก และเมื่อทำการกัดกรดจนมองเห็นโครงสร้างตามต้องการในเวลาที่กำหนดนำชิ้นงานล้างกรดออกด้วยน้ำที่สะอาด และเช็ดด้วยเอทานอล และเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน



รูปที่ 2.17 ชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นเรือนด้วยสารขึ้นเรือนชนิดต่าง ๆ

## 2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร และคณะ [9] ทำการเชื่อมอลูมิเนียมเกรด 6063 ด้วยกระบวนการเชื่อม MIG (Gas Metal Arc Welding :GMAW) โดยศึกษาตัวแปรหลักที่เกี่ยวกับการอบชุบอะลูมิเนียมเกรดรีด 6063 ภายหลังผ่านการเชื่อม มีตัวแปรที่ต้องการศึกษาดังนี้คือ อุณหภูมิในการอบ และระยะเวลาหน่วงก่อนการบ่ม ซึ่งตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์ที่สำคัญต่อโครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็งแรงในบริเวณ HAZ (Heat Affect Zone) ทั้งนี้ได้ออกแบบการทดลอง โดยทำการอบเทียม (Artificial aging) และอบแบบธรรมชาติ (natural aging) พร้อมกับเปรียบเทียบผลของรูปแบบค่าความแข็งในบริเวณ fusion zone adjacent zone และ HAZ (Heat Affect Zone) โดยใช้ผลของช่วงเวลาในหน่วงก่อนการอบเป็นตัวเปรียบเทียบ

พบว่าการอบเทียมทันทีโดยไม่ต้องหน่วงเวลารอให้ผลค่าความแข็งสูงถึง 140 HV ซึ่งถือว่าสูงที่สุด และการหน่วงเวลามีผลทำให้ค่าความแข็งบริเวณ HAZ มีแนวโน้มลดลง

2.5.2 Sato *et al.* [31] ทำการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T5 ด้วยการเสียดทานแบบกวน ชิ้นงานเชื่อมถูกนำไปทำการบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิ 448K เวลา 43.2ks ทำการอบละลายและทำการอบละลาย+การบ่มแข็ง ผลการทดลองพบว่า โลหะเชื่อมของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายและบ่มแข็งแสดงค่าความแข็งแรงสูงสุด รองลงมา คือ ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง โลหะหลัก และโลหะเชื่อมที่ไม่ผ่านการอบชุบตามลำดับ ค่าความแข็งตัดขวางแนวเชื่อม พบว่า ความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแสดงค่าความแข็งที่สม่ำเสมอระหว่างโลหะหลักและโลหะเชื่อม ขณะที่ในชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบนั้น บริเวณโลหะเชื่อมมีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าโลหะหลัก โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่แสดงค่าความแข็งสูง (โลหะหลัก) แสดงการกระจายตัวของเฟสเสริมแรงไม่เป็นระเบียบ ขณะที่บริเวณที่มีความแข็งต่ำนั้น เฟสเสริมแรงจีการละลายเข้าสู่โครงสร้างได้มากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้ความแข็งแรงของโลหะเชื่อมมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

2.5.3 พันธ์พงษ์ คงพันธุ์ และคณะ [32] ทำการเชื่อมอลูมิเนียมเกรด 6063 ต่อชนด้วยการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน โดยมีจุดประสงค์หลักในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเร็วเดินแนวของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1 การเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึง และโครงสร้างมหภาคที่แตกต่างกัน ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่า 110 MPa เมื่อทำการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125 mm/min ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงของรอยต่อมีค่าที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วเดินแนวเชื่อมที่สูงกว่าทำให้จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมมีขนาดที่เล็กลง อย่างไรก็ตามความเร็วรอบที่สูงเกินไป ทำให้เกิดจุดบกพร่องบริเวณผิวหน้าและจุดบก พร่องขนาดใหญ่ที่บริเวณด้านแอดวานซิ่งของรอยต่อ และส่งผลโดยตรงต่อการลดความแข็งแรงดึง โครงสร้างจุลภาคของรอยต่อแสดงการเกิดเกรนใหม่ ที่มีรูปร่างที่กลมมนและมีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมหลัก

2.5.4 นราธิป แสงซ้าย และคณะ [33] เสนอผลการศึกษาอิทธิพลรูปร่างตัวกวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน เช่น ทรงกระบอก ทรงกรวย ทรงเกลียวนซ้าย และเกลียววนขวา ต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม 6063-T1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างตัวกวนส่งผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมต่อชนอลูมิเนียมผสมเกรด 6063-T1 ตัวกวนทรงกระบอกและตัวกวนทรงกรวยทำให้เกิดจุดบก พร่องในแนวเชื่อมบริเวณด้านล่าง และเป็นจุดกำเนิดการพังทลายบริเวณกึ่งกลางของแนวเชื่อมขณะทำการทดสอบแรงดึง ตัวกวนทรงเกลียววนซ้ายและวน

ขวาทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีความสมบรูณ์ ไม่มีจุดบกพร่องภายในแนวเชื่อม ส่งผลทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงกว่าโลหะหลักอลูมิเนียม