# บทที่ 2

# ความรู้และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม

ปัจจุบันวิธีการเชื่อมส่วนใหญ่ที่ใช้กับเหล็กกล้าไร้สนิมก็คือ การเชื่อมไฟฟ้า การเชื่อมมิก (Metal Inert Gas) และการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas) นอกจากนี้แล้วยังมีวิธีการเชื่อมแบบอื่น ซึ่งบางครั้งก็นำมาใช้เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมเหมือนกัน เช่น การเชื่อมแบบซัมเมอร์จอาร์ค การเชื่อมแบบลำแสงอิเล็กตรอน (Electron Beam Welding) และการเชื่อมแบบตัวต้านทาน (Resistance Welding) เป็นต้น

ความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถแบ่งตามชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมได้ ดังนี้

(1) เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิติก ในการเชื่อมความร้อนเกิดขึ้นที่รอยเชื่อมอย่างรวดเร็ว และรอยเชื่อมก็เย็นตัวรวดเร็วด้วย ทำให้โครงสร้างบริเวณรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้เป็นมาร์เตนไซท์ ซึ่งโครงสร้างเช่นนี้เปราะ และรอยเชื่อมจึงแตกง่าย นั่นคือความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมไม่ดี

(2) เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติค บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ของรอยเชื่อมจะไม่แข็ง แต่เกรนในบริเวณนี้หยาบมาก ซึ่งเป็นผลให้ความสามารถในช่วงการยืดตัว (Ductility) และความเหนียว (Toughness) ลดต่ำลง เมื่อรอยเชื่อมค่อย ๆ เย็นตัวผ่านช่วงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ถึง 700 องศาเซลเซียส รอยเชื่อมจะเปราะมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส ดังนั้นการเปราะในลักษณะเช่นนี้จึงเรียกว่า การเปราะที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส

(3) เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเตนิติค ความสามารถในการเชื่อมของเหล็กชนิดนี้ดีกว่าสองชนิดแรกที่กล่าวมาแต่ปัญหาของการเชื่อมเหล็กกล้าชนิดนี้คือในขณะที่เหล็กกล้าค่อย ๆ เย็นตัวจากอุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ถึง 480 องศาเซลเซียส ภายหลังการเชื่อมนั้นคาร์บอนและโครเมียมในโครงสร้างออสเตไนท์จะรวมตัวกันเกิดเป็นสารประกอบโครเมียมคาร์ไบด์ตกตะกอนที่ขอบเกรน การตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์เช่นนี้จะเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ปรากฏการณ์

ดังกล่าวเรียกว่า เวลด์ ดีเค ซึ่งทำให้คุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนและคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมลดลง

## 2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการใช้งานของนิโอดิเมียมแย็กเลเซอร์

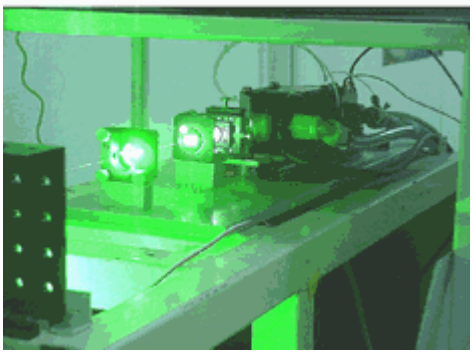
เราสามารถรู้ว่าเลเซอร์ถูกใช้อย่างไรได้ดีขึ้นโดยแบ่งเลเซอร์ออกเป็น 3 ชนิด คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยส่วนใหญ่ใช้เลเซอร์เป็นหลอดไฟนำทางในกระบวนการบอกรายละเอียด เช่น การอ่านหนังสือ การเขียน และการส่งสัญลักษณ์ พลังงานของเลเซอร์สามารถใช้ในการเปลี่ยนสิ่งต่าง ๆ เช่น จากการใช้แต้มสัญลักษณ์บนชิ้นส่วนไปจนถึงการเชื่อมเหล็กกล้าแผ่นหนา ๆ

นิโอดิเมียมแย็กเลเซอร์ชนิดของแข็ง โดยมีตัวกลางเป็นผลึกของ Yttrium-aluminium garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า YAG ส่วน impurity คือ $Nd^{3+}$ ซึ่งจะถูกกระตุ้นเข้าไปประมาณ 1% โดยน้ำหนัก โดยทั่วไปนีโอดิเมียมแย็กเลเซอร์มีกำลังเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3 – 1,000 วัตต์ สามารถให้แสงได้ทั้งแบบพัลส์ (pulse) และแบบต่อเนื่อง (continuous) ขึ้นอยู่กับว่าแหล่งกระตุ้นที่ใช้เป็นแบบหลอดไฟแฟลชหรือหลอดไฟอาร์ค

เลเซอร์ชนิดนี้มีความยาวคลื่น 1064 นาโนเมตร อยู่ในย่านอินฟราเรดแต่นิยมใช้ควบคู่กับผลึกอันดับสองที่เข้าคู่กัน เช่น KTP (Potassium Tetranyl Phosphate) ทำให้ได้ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร เป็นแสงสีเขียวออกมาได้ เนื่องจากเลเซอร์ชนิดนี้สามารถทำให้เกิดค่ากำลังสูงสุดถึง 2,000 วัตต์ ได้ในระบบเลเซอร์ที่มีค่ากำลังเฉลี่ย 3 วัตต์ เท่านั้นจึงทำให้ระบบเลเซอร์นี้มีขนาดเล็กสามารถนำไปทำการเจาะ ตัด หรือแกะสลักวัสดุที่มีความแข็งสูง วัสดุจำพวกโลหะ หรือวัสดุ เช่น แก้ว เซรามิก หรืออัญญมณี ได้เป็นอย่างดี

ระบบนิโอดีเมียมแย็กเลเซอร์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมเป็นแบบใช้หลอดไฟแฟลช หรือหลอดไฟอาร์ค เป็นแหล่งกระตุ้นซึ่งระบบนี้มีการสิ้นเปลืองพลังงานมาก เนื่องจากพลังงานทั้งหมดที่ใส่ให้แก่หลอดอาร์คจะมีเพียง 4 – 7% เท่านั้นที่ถูกนำไปใช้ในการกระตุ้น ส่วนที่เหลือคือความร้อนซึ่งจะต้องถูกระบายทิ้งออกไป

ในปัจจุบันมีการพัฒนาเลเซอร์ไดโอดให้มีประสิทธิภาพสูงและมีราคาที่ถูกลงมาก จึงได้นำเอาเลเซอร์ไดโอดมาใช้เป็นแหล่งกระตุ้นแทนที่หลอดไฟอาร์คชนิดเดิม ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นถึง 50 – 70% ของประสิทธิภาพรวม โดยที่ระบบเดิมมีค่าเพียง 2 – 3% เท่านั้น ระบบจึงมีขนาดเล็กลงมาก และมีอุปกรณ์ระบายความร้อนที่มีขนาดเล็กด้วย ทำให้ค่าใช้จ่ายในการทำงานลดลงมาก



ภาพที่ 2.1 แสงสีเขียวของนิโอดิเมียมแย็กเลเซอร์
(ที่มา : ข้อมูลจากทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี)

2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กทั่ว ๆ ไปจะเกิดสนิมได้ง่ายในบรรยากาศที่มีความชื้นและการเกิดสนิมจะเกิดต่อ ๆ ไปไม่มีการหยุด กล่าวคือ สนิมจะเกิดหนาขึ้นเรื่อย ๆ ยิ่งถ้าเหล็กอยู่ในน้ำก็จะยิ่งเป็นสนิมหรือผุกร่อนได้ง่ายขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเพราะเหล็กมีความเป็นขั้วบวกสูง

เมื่อผสมธาตุโครเมียมในเหล็กให้มีปริมาณสูงๆ เหล็กจะมีคุณสมบัติต้านทานต่อการเกิดสนิมได้มากขึ้น จนกระทั่งไม่เกิดสนิมแม้จะอยู่ในน้ำหรือในสารละลายที่เป็นกรดเจือจาง กล่าวได้ว่าเหล็กผสมโครเมียมมีคุณสมบัติความเป็นขั้วบวกลดลงหรือมีความเป็นขั้วลบเพิ่มขึ้น เหล็กที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้จะเรียกว่า เหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิมมีหลายประเภท ขึ้นอยู่กับปริมาณโครเมียมและขึ้นอยู่กับโครงสร้าง ซึ่งสามารถแยกประเภทของ เหล็กกล้าไร้สนิม โดยอาศัยลักษณะแตกต่างของโครงสร้างออกเป็น 3 ประเภท คือ

(1) เหล็ก เฟอร์ริติค สเตนเลส

(2) เหล็ก มาร์เทนซิติค สเตนเลส

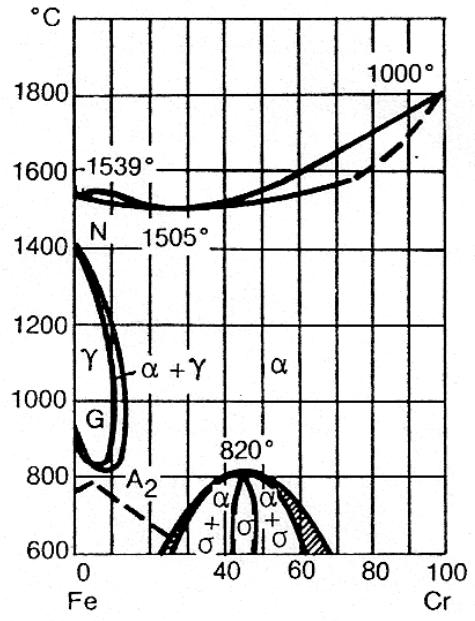
(3) เหล็ก ออสเตนนิติค สเตนเลส

ซึ่งในที่นี้จะเน้นในส่วนของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทที่ 1 คือ เหล็ก เฟอร์ริติค สเตนเลส เนื่องจากชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กประเภทนี้

เหล็กเฟอร์ริติคสเตนเลส (Ferritic Stainless Steel) เป็นเหล็กที่มีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรท์ และเป็นเหล็กที่ผสมโครเมียมอยู่ระหว่าง 15-16% เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จะมีโครงสร้าง

จุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์และมีคุณสมบัติที่แม่เหล็กสามารถดูดติดได้ มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) และค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ปานกลาง มีค่าความยืด (Elongation) สูง เช่น เกรด 430 และ 409 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติกมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มออสเตนนิติก แต่อาจพบปัญหาเรื่องเกรนหยาบ (Grain coarsening) และสูญเสียความแกร่ง (Toughness) หลังการเชื่อม ก่อนที่จะอธิบายถึงคุณสมบัติของเหล็กชนิดนี้ จำเป็นต้องกล่าวถึงบทบาทของโครเมียมในเหล็กเสียก่อน การศึกษาจะอาศัยแผ่นภาพสมดุลของเหล็กกับโครเมียมและ pseudo-binary diagram ของ Fe-Cr-C

จากแผ่นภาพสมดุล Fe-Cr จะพบว่าโครเมียมเป็นธาตุที่ช่วยในการขยายพื้นที่ของ $\alpha$ และลดอาณาเขตของ $\gamma$ ให้แคบลง โดยจะปิด $\gamma$ - loop ที่ปริมาณโครเมียม 12-13% โดยมีพื้นที่ของ $\alpha + \gamma$ ล้อมรอบอยู่ เมื่อปริมาณของโครเมียมเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 45% จะพบเฟส $\sigma$ ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 820 องศาเซลเซียส ลงมา โดยจะเกิดพื้นที่ของ $\sigma$ และมีพื้นที่ของเฟส $\alpha + \sigma$ ล้อมรอบอยู่และขยายกว้างขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ดูภาพที่ 2.2 ประกอบ

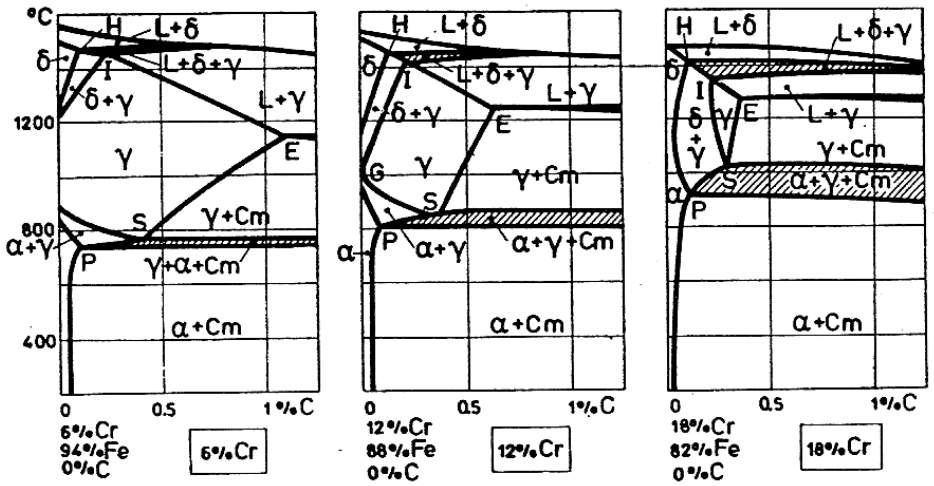



ภาพที่ 2.2 แผ่นภาพสมดุล Fe-Cr

เฟส $\sigma$ มีส่วนสำคัญมากในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเหล็กได้ เพราะ $\sigma$ มีคุณสมบัติแข็ง เปราะและสามารถตกผลึก (precipitation) ได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ ถึงแม้ว่าจะมีโครเมียมไม่ถึง 45% เพียงแค่ 20% ถ้าเผาเหล็กอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 650 – 800 องศาเซลเซียส จะ

เกิดปฏิกิริยา $\alpha \rightarrow \alpha + \sigma$ แต่อัตราการเกิด σ ช้ามาก ถ้าเหล็กดึงรีด หรือตีขึ้นรูปมาก่อน การเกิด σ จะมีอัตราการตกผลึกเร็วขึ้น ซึ่งเมื่อเกิด σ ขึ้นแล้วเหล็กจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่คุณสมบัติทาง ductility จะลดลงอย่างรวดเร็ว

การศึกษาจากแผ่นภาพ pseudo-binary diagram ของ Fe-Cr-C โดยศึกษาเปรียบเทียบตามปริมาณของโครเมียมในเหล็ก 6 12 และ 18% จะเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อมีคาร์บอนผสมอยู่ด้วยในเหล็ก เฟส γ จะถูกจำกัดพื้นที่แคบลงเมื่อปริมาณโครเมียมเพิ่มขึ้น และปริมาณคาร์บอนที่สามารถจะละลายได้มากที่สุดใน γ ก็จะลดลงโดยลำดับ เช่น เหล็ก 18% Cr พื้นที่ของ γ จะถูกลดแคบลงโดยการลดปริมาณคาร์บอนใน γ ทางด้านขวาและถูกลดอาณาเขตด้วยพื้นที่ γ + σ ทางด้านซ้ายมือ ดูภาพที่ 2.3 ประกอบ




ภาพที่ 2.3 จากแผ่นภาพ pseudo-binary diagram ของ Fe-Cr-C

นอกจากนี้เมื่อเหล็กมีคาร์บอนสูงตั้งแต่ 0.4% จะปรากฏมีโครเมียมคาร์ไบด์เกิดขึ้นและมีเสถียรภาพสูงจนถึงจุดหลอมเหลว ดังนั้น ในเหล็กที่มีทั้งโครเมียมและคาร์บอนสูงจะเผาเหล็กให้เป็นออสเตนไนท์ โดยสมบูรณ์จะทำได้ยากมาก

เหล็ก เฟอร์ริติค สเตนเลส แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

(1) เหล็ก เฟอร์ริติค สเตนเลสคาร์บอนต่ำ จะผสมโครเมียม 15-18% และมีคาร์บอนไม่เกิน 0.12% โครงสร้างจะเป็นเฟอร์ไรท์ไม่สามารถทำการรักษาด้วยความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งได้ การที่กำหนดปริมาณคาร์บอนไว้ให้ต่ำไม่เกิน 0.12% เพราะไม่ต้องการให้เกิดการรวมตัวระหว่างคาร์บอนกับโครเมียม ซึ่งจะไปทำให้คุณสมบัติทางด้านทนต่อการกัดกร่อนลดลง เพื่อที่จะให้ได้

เฟอร์ไรท์อย่างสมบูรณ์จะเผาเหล็กที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส เพื่อให้คาร์ไบด์ที่มีอยู่สลายตัวหมด จากนั้นจึงทำการ quench ในน้ำ การใช้งานจะต้องระมัดระวังไม่ให้อยู่ในช่วง 550 - 700 องศาเซลเซียส เพราะอาจทำให้เกิดเฟส σ ขึ้นมาได้ซึ่งจะทำให้เหล็กเสียคุณสมบัติความเหนียว

ในการเชื่อมเหล็กเฟอร์ริติค สเตนเลส อาจจะเกิดโครงสร้างมาเทนไซท์ขึ้นได้ตรงบริเวณรอยเชื่อม ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้นได้ขณะใช้งาน (ถ้าเหล็กมีปริมาณคาร์บอนต่ำมาก ๆ อาจจะไม่เกิดมาเทนไซท์) ปกติในการเชื่อมจะพยายามใช้เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.03%

คุณสมบัติของเหล็ก เฟอร์ริติค สเตนเลส จะสามารถทนต่อการเป็นสนิมได้ดี ในบรรยากาศทั่ว ๆ ไป ยกเว้นในน้ำทะเลและในบรรยากาศอุตสาหกรรมบางประเภท โดยเฉพาะที่เป็นกรด สามารถทนต่อกรดไนตริคได้ทุกความเข้มข้นจนถึงอุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส ทนกรดฟอสฟอรัสได้เฉพาะกรดเจือจางและที่อุณหภูมิต่ำ ทนกรดอะซิติคได้ทุกความเข้มข้นจนถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และทนกรดซิตริคและทาร์ทาริคได้ทุกความเข้มข้น (เฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ)

(2) เหล็ก เฟอร์ริติค สเตนเลส ชนิดทนต่อความร้อน (Refractory Ferritic Stainless Steel) เป็นเหล็กที่ผสมโครเมียมสูงกว่าประเภทเฟอร์ริติคชนิดแรก กล่าวคือ ผสมโครเมียมประมาณ 25-30% และมีคาร์บอน 0.3% เป็นเหล็กที่มีคุณสมบัติทนต่อความร้อนได้ดีที่อุณหภูมิสูงเกิน1000 องศาเซลเซียส จนอาจถึง 1300 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับปริมาณของโครเมียม โครงสร้างของเหล็กชนิดนี้จะประกอบด้วยแมทริกซ์เป็นเฟอร์ไรท์ และมีโครเมียมคาร์ไบด์ตกผลึกอยู่ทั่ว ๆ ไป

เนื่องจากมีปริมาณโครเมียมสูง ในขณะใช้งานนานๆ จะปรากฏเฟสซิกม่า (σ ) เกิดขึ้นมีปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้คุณสมบัติเปราะ ความเหนียวลดลง (ที่อุณหภูมิ 550-750 องศาเซลเซียส) จะเริ่มเกิดเฟสซิกม่าและอาจจะเกิดคุณสมบัติการแข็งตัวโดยการตกผลึก ที่อุณหภูมิประมาณ 475 องศาเซลเซียส ในการใช้งานจำเป็นต้องระวังไม่ให้รับแรงมาก ๆ ที่อุณหภูมิสูง จากสาเหตุนี้เองทำให้การใช้งานไม่กว้างขวางเท่าที่ควร ทั้ง ๆ ที่อาจจะมีราคาต่ำกว่าเหล็กทนความร้อนชนิดอื่น ๆ

ส่วนผสมพื้นฐานของเหล็กกล้าไร้สนิม ได้แก่ คาร์บอน แมงกานีส ซิลิกอน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน ในระหว่างกระบวนการหลอมละลายที่ใช้ผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม การเพิ่มธาตุใด ๆ ต้องพิจารณาควบคุมข้อกำหนดเฉพาะว่าธาตุที่จะผสมเพิ่มเข้าไปนั้นจะปรับปรุงให้สมบัติด้าน

ใดบ้าง เช่น ความต้านทานการกัดกร่อน สมบัติเชิงกล กายภาพ ที่สำคัญแต่ละชนิดที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิม สรุปได้ดังนี้

(1) โครเมียม เป็นธาตุผสมที่ทำให้เกิดเหล็กกล้าไร้สนิม โดยต้องมีโครเมียมผสมอยู่ไม่ต่ำกว่า 11% ถึงเพียงพอที่จะสร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์เคลือบผิวได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีความต้านทานการกัดกร่อนทั้งในสภาวะแวดล้อมที่เปียกและแห้ง ปริมาณโครเมียมที่สูงกว่า 26% ในเหล็กกล้าไร้สนิมรีด และ สูงกว่า 30% ในเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อจะเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนสูงขึ้นมาก

(2) คาร์บอน ในเหล็กกล้าไร้สนิมรีดจะควบคุมปริมาณส่วนผสมของธาตุคาร์บอนให้ต่ำ เช่น สูงสุดไม่เกิน 0.08% หรือต่ำกว่า 0.03% ในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด “ L ” (Low) หรือในเหล็กกล้าไร้สนิมอื่น ๆ ที่มีความหนามากและนำมาใช้ในงานเชื่อม อย่างไรก็ตามในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดมาร์เทนซิติค ต้องเพิ่มปริมาณเฉพาะของคาร์บอนให้อยู่ในช่วง 0.15% ถึง 1.2% เพื่อที่จะทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีความสามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกรรมวิธีทางความร้อนโดยการทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วและการอบคืนตัวพัฒนาให้มีความแข็งแรงสูงและปรับระดับความแข็งได้ คาร์บอนยังจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ส่วนผสมของคาร์บอนในเหล็กกล้าไร้สนิมรีด จะมีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำสุด จนสูงถึง 0.25% และในเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อมีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำสุดจนสูงถึง 0.75%

(3) นิกเกิล ถ้าผสมธาตุนิกเกิลลงไปในเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยปริมาณที่พอเพียงจะทำให้มีโครงสร้างผลึกเป็น ออส-เทนไนท์ทั้งหมด เช่น เกรด 304 (โครเมียม 18%, นิกเกิล 8%) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดที่ใช้งานกันมากที่สุด ถ้าปริมาณส่วนผสมของธาตุนิกเกิลต่ำกว่านี้ ก็จะไม่เพียงพอที่จะทำให้เป็นโครงสร้างออสเทนไนท์อย่างสมบูรณ์ได้ เป็นผลทำให้ให้เกิดโครงสร้างดูเพล็กซ์ผสมกันระหว่างโครงสร้างเฟอร์ไรท์และออสเทนไนท์เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดดูเพล็กซ์

(4) โมลิบดิบนัม ทำให้คุณสมบัติในการสร้างฟิล์มป้องกันการกัดกร่อน (Passive film) ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้านการกัดกร่อนแบบเป็นจุดเล็ก ๆ ในแนวลึก หรือเป็นรู หรือที่เรียกว่าสนิมขุมและการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นภายในซอก หรือรอยซ้อนหรือภายใต้กองตะกอน หรือในพื้นที่อับและมีน้ำหรือสารละลายมีฤทธิ์กัดกร่อนขังอยู่ ปริมาณส่วนผสมของโมลิบดิบนัมที่สูงกว่าสามารถที่จะควบคุมหรือต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่า

(5) แมงกานีส คล้ายกับนิกเกิล คือ สามารถช่วยให้เกิดโครงสร้างผลึกออสเทนไนท์ในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติคกลุ่ม 200 มีการใช้แมงกานีสแทนนิกเกิลในบางส่วน แมงกานีสยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดที่ง่ายต่อการตกแต่งโดยวิธีกลมีกำมะถันและเซเลเนียมผสมอยู่ให้สูงขึ้นเล็กน้อย

(6) ไทตาเนียม เป็นธาตุผสมที่ช่วยให้โครงสร้างเสถียร (Stabilizing alloying element) นั่นคือไวต่อการดึงคาร์บอนมารวมตัวเป็น ไทตาเนียมคาร์ไบด์ก่อนที่โครเมียมจะรวมตัวกับคาร์บอน เป็นโครเมียมคาร์ไบด์ ทำให้สูญเสียโครเมียมตามขอบเกรน ดังนั้น จึงเป็นการป้องกันความไว ที่จะเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนของเนื้อเชื่อม

(7) ไนโอเบียมและแทนทาลัม เป็นธาตุผสมที่ช่วยให้โครงสร้างเสถียรเหมือนกันทำหน้าที่เช่นเดียวกับไทตาเนียมที่กล่าวมาแล้ว ใช้ไม่มากนักที่เป็นธาตุผสมในงานแผ่นหนา แต่จะถูกใช้เป็นธาตุผสมในท่อเหล็กกล้าไร้สนิม เกรดโครงสร้างเสถียรที่ผลิตจากการกดอัดขึ้นรูป เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคจะไม่เปลี่ยนรูปเป็นเส้นยาว อันจะทำให้คุณสมบัติของโครงสร้างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้จากการกดอัดขึ้นรูปเลวลง ไนโอเบียมและแทนทาลัมใช้เป็นธาตุผสมในลวดเชื่อมและลวดเติมเกรดเสถียรได้ดีกว่าไทตาเนียม เนื่องจากไทตาเนียมมีโอกาสจะสูญหายไประหว่างส่งถ่ายน้ำโลหะขณะเกิดการอาร์ค

(8) ไนโตรเจน เป็นธาตุผสมสำคัญที่ช่วยเสริมนิกเกิล ทำให้เป็นโครงสร้างผลึกเป็นออสเทนไนท์ ในเหล็กกล้าไร้สนิม เกรดที่มีส่วนผสมของ “ไนโตรเจน” และช่วยทำให้คุณสมบัติเชิงกลสูงขึ้นเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงมาก ๆ ไนโตรเจนมีชื่อเสียงมากเมื่อใช้ในการเพิ่มโครงสร้างผลึกออสเทนไนท์ในช่วงยุคที่สองของการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดดูเพล็กซ์ เป็นการเพิ่มความสามารถในการเชื่อมและความต้านทานการกัดกร่อนแบบเป็นรูให้สูงขึ้น

(9) ซิลิกอน เพิ่มความต้านทานการเกิดสะเก็ดในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดออสเทนนิติคชนิดทนความร้อนในงานหล่อที่มีส่วนผสมของซิลิกอนสูง จะเพิ่มความสามารถในการไหลตัวขณะหลอมเหลวได้ดี ดังนั้น ซิลิกอนจึงเพิ่มความสามารถในการหล่อ

(10) กำมะถัน ปกติจะรักษาระดับไม่ให้มีส่วนผสมเกิน 0.03% ถ้าเพิ่มส่วนผสมกำมะถันที่ระดับ 0.2% (จำเป็นต้องเพิ่มส่วนผสมของแมงกานีสและฟอสฟอรัสด้วย) จะทำให้เพิ่มความสามารถในการตกแต่งด้วยวิธีกล (Machinability) แต่จะทำให้คุณสมบัติในการสร้าง

ประกอบและคุณสมบัติเชิงกล (Fabricational and Mechanical properties) รวมทั้งมีผลทำให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion resistance) ตามขอบเกรนเลวลง

(11) เซลิเนียม มีผลคล้ายกับกำมะถันช่วยเพิ่มความสามารถในการตกแต่งด้วยวิธีกลโดยเฉพาะทำให้ผิวงานเรียบสามารถรองรับการสร้างและประกอบในงานกลได้เป็นอย่างดี

## 2.4 ทฤษฎีการเชื่อมด้วยเลเซอร์

การแผ่รังสีของเลเซอร์นั้นถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1960 โดยใช้ผลึกทับทิมเป็นตัวแอคทีฟมีเดียน ซึ่งแสงเลเซอร์นั้นมีประโยชน์ในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุได้หลายอย่าง หนึ่งในนั้นคือ การเชื่อมด้วยเลเซอร์

ข้อดีของการเชื่อมด้วยเลเซอร์เมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบอื่น คือ

(1) ไม่มีเศษโลหะเหลือที่บริเวณแนวเชื่อม
(2) ไม่เกิดสนามแม่เหล็ก
(3) บริเวณรอยเชื่อมมีความแข็งแรง
(4) มีการสั่นสะเทือนตอนเชื่อมน้อย
(5) มีอุณหภูมิขณะทำการเชื่อมสูง
(6) โอกาสที่วัสดุที่ทำการเชื่อมจะเกิดความเสียหายมีน้อย
(7) มีความน่าเชื่อถือสูง (Reliability) ฯลฯ

โดยที่นิโอดิเมียมแย็กเลเซอร์มีความยาวคลื่น 1.06 ไมโครเมตร คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์มีความยาวคลื่น 10.6 ไมโครเมตร นอกจากนี้นิโอดิเมียมแย็กเลเซอร์มีการสะท้อนกลับที่ผิวโลหะต่ำกว่าคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ (ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะต่ำกว่าเมื่อความยาวคลื่นน้อยกว่า)

### 2.4.1 กระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์

การนำโลหะ (ชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้) ตั้งแต่ 2 ชิ้นขึ้นไปมาทำการเชื่อม โดยใช้หลักการดูดกลืนรังสีเลเซอร์ซึ่งทำให้บริเวณรอยต่อของโลหะเกิดโลหะที่หลอมเหลว (Melt pool หรือ Weld pool) และเมื่อโลหะที่หลอมเหลวเย็นตัวลงจะเกิดรอยเชื่อมขึ้น ซึ่งการเชื่อมด้วยเลเซอร์จะต้องมีการควบคุมความร้อน และการเย็นตัวของโลหะที่หลอมเหลวให้สมดุลด้วยเพื่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม

การเชื่อมมักทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน หรือ ฮีเลียม จุดประสงค์หลักของการใช้ก๊าซเฉื่อยเพื่อครอบคลุมบริเวณที่เชื่อมและป้องกันการเกิดออกซิเดชัน อันจะทำให้เกิดการเชื่อมที่ไม่ดี นอกจากนี้ยังช่วยขจัดไอโลหะที่อาจเกิดขึ้น (ซึ่งปกติจะฝังในเลนส์โฟกัส) ในกรณีที่เกิดมีไอโลหะซึ่งอาจจะร้อนมากจนทำให้เกิดก๊าซไอโอไนซ์ทำให้เกิดบรรยากาศของพลาสมาเหนือผิวโลหะ ซึ่งมีความสามารถในการดูดกลืนสูงที่ความยาวคลื่นของเลเซอร์ ส่งผลให้พลังงานที่จะตกกระทบผิวโลหะลดลงไปในกรณีที่ใช้เลเซอร์กำลังต่ำซึ่งจะใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซที่ฉีดเลี้ยงชิ้นงานทั้งนี้เพราะมีราคาถูกกว่าฮีเลียมแต่สามารถไอโอไนซ์เป็นอิออนได้เมื่อใช้พัลส์เลเซอร์กำลังสูงในกรณีนี้จะใช้ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนกับฮีเลียม

ในการเชื่อมด้วยเลเซอร์ใช้ได้ทั้งแบบต่อเนื่อง (Continuous Wave: CW) และแบบพัลส์ (Pulse) ในกรณีที่บริเวณที่จะเชื่อมมีขนาดเล็กมากอาจใช้ “Pulse” เดี่ยวได้ ถ้าต้องการเชื่อมอย่างต่อเนื่องอาจจะทำการกวาดลำแสงเลเซอร์ไปบนหน้าชิ้นงานก็ได้ เลเซอร์แบบต่อเนื่องจะช่วยทำให้เกิดการเชื่อมอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่แบบพัลส์จะทำให้เกิดการเชื่อมเป็นจุด ๆ ไป (ซึ่งอาจเกิดอย่างต่อเนื่องได้) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของการสแกน

คุณภาพของรอยเชื่อมจะไม่ดีถ้าโลหะที่หลอมเหลวมีขนาดใหญ่หรือเล็กเกินไปหรือมีการระเหยเกิดขึ้นขณะเชื่อม การลดอุณหภูมิที่เร็วเกินไปของโลหะที่หลอมเหลวจะส่งผลให้เกิดรอยร้าว (Cracking) และความไม่เสถียรในโลหะที่หลอมละลาย ซึ่งจะส่งผลให้เกิดรูพรุน (Porosity) ในรอยเชื่อมและรอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ การควบคุมความสมดุลระหว่างการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการดูดกลืนรังสีเลเซอร์ของโลหะจะทำได้โดยการควบคุมลักษณะการกระจายความร้อนภายในชิ้นงาน

บริเวณรอยเชื่อมที่ยังเป็นโลหะที่หลอมเหลวอยู่นั้นจะถูกรบกวนอยู่ตลอดเวลาโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่หรือลำแสงเลเซอร์มีการเคลื่อนที่ ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะของรอยเชื่อมหลังจากโลหะที่หลอมเหลวเย็นตัวลง

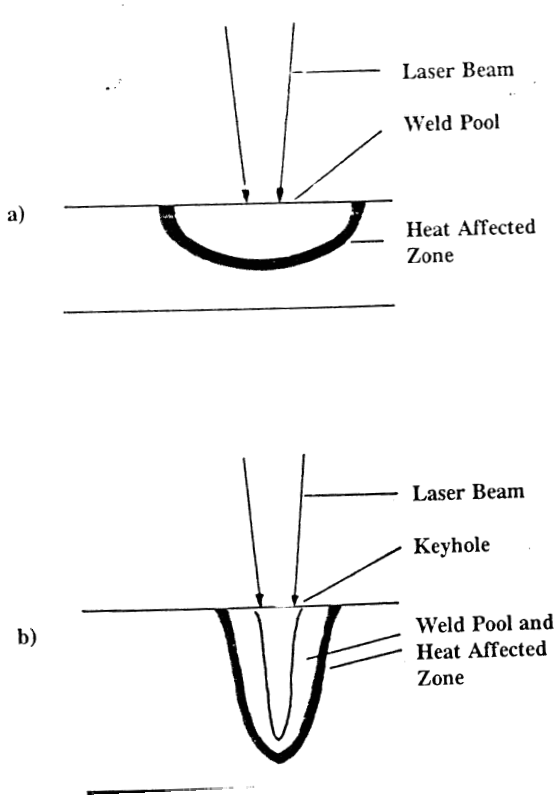
จุดประสงค์ในการศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมด้วยเลเซอร์ คือ สามารถระบุตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อความเสถียร (Stability) และความสมบูรณ์ของการเชื่อมด้วยเลเซอร์และสามารถหาวิธีการควบคุมตัวแปรเหล่านั้นได้

หลักการเชื่อมด้วยเลเซอร์มี 2 หลักการ คือ

(1) การเชื่อมแบบ Conduction

(2) การเชื่อมแบบ Keyhole หรือการเชื่อมแบบ Penetration

ซึ่งการเชื่อมแบบ Conduction นั้นผิวหน้าของชิ้นงานบริเวณโลหะที่หลอมเหลวยังเป็นระนาบเดียวกันอยู่จะยังไม่ถูกเจาะลึกลงไป ส่วนการเชื่อมแบบ Keyhole นั้นผิวหน้าของชิ้นงานบริเวณโลหะที่หลอมเหลวจะถูกเจาะลึกลงไปเมื่อลำแสงเลเซอร์กำลังสูงตกกระทบผิววัสดุจะปรากฏว่าจะมีวัสดุบางส่วนที่เกิดการระเหยเป็นไอ ทำให้เกิดหลุมเล็ก ๆ ซึ่งเรียกว่า คีย์โฮล (Keyhole) ดังภาพที่ 2.4




ภาพที่ 2.4 รูปบน : Conduction Welding , รูปล่าง : Penetration Welding

2.4.2 การเชื่อมเลเซอร์กับโลหะ

การเชื่อมโลหะ เป็นการประยุกต์การใช้งานของแสงเลเซอร์วิธีการหนึ่งกับกรรมวิธีในโรงงานอุตสาหกรรม ผลของการพัฒนาอย่างรวดเร็วและการยอมรับในการใช้เลเซอร์ในการเชื่อมนั้น เป็นผลให้การเชื่อมด้วยเลเซอร์กลายเป็นกระบวนการเชื่อมโลหะที่เป็นที่ยอมรับและสามารถใช้ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมได้

ความสามารถในการเชื่อมของโลหะ 2 ชนิดนั้นนอกจากจะสามารถใช้กับวัสดุจำพวกโลหะผสมได้แล้ว ยังสามารถใช้กับวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ตามต้องการได้

ด้วย โดยทั่วไปความสามารถในการเชื่อมจะสามารถยอมรับได้ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติจริงอาจไม่สามารถยอมรับได้เนื่องจากในกระบวนการผลิตเราต้องคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ ดังนั้น จึงต้องมีการศึกษาเรื่องคุณสมบัติของโลหะของรอยเชื่อมด้วย เช่น แนวโน้มของการเกิดรอยร้าว (Cracking) ความเปราะ (Brittleness) และการเกิดรูขนาดเล็ก ๆ (Pore Formation)

แม้ว่าการเชื่อมด้วยเลเซอร์จำสามารถใช้ได้ดีในการเชื่อมโลหะ และรอยเชื่อมมีคุณภาพสูง แต่ว่าการเชื่อมนั้นก็ยังไม่สมบูรณ์แบบสักทีเดียว รอยเชื่อมที่มีคุณภาพสูงนั้นขึ้นกับ

(1) การออกแบบและการเตรียมรอยเชื่อม
(2) วัฏจักรความร้อนของการเชื่อม
(3) ส่วนประกอบและการไหลของแก๊สเฉื่อย
(4) การอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อม
(5) ชนิดและความเร็วของสารที่ใช้เป็นตัวช่วยในขณะทำการเชื่อม
(6) การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของโลหะผสม
(7) ผลกระทบทางความร้อนบริเวณกระทบร้อน

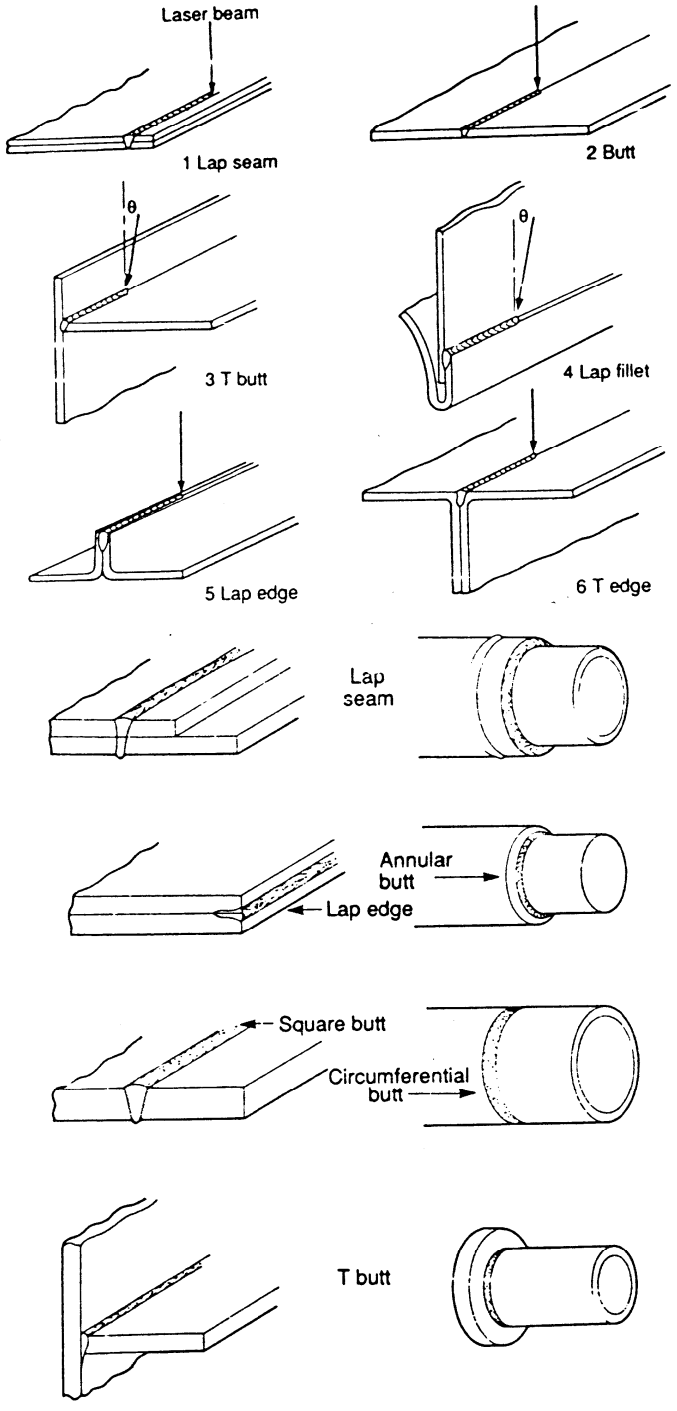
ในการเชื่อมโลหะต่างชนิดกันนั้นจุดหลอมเหลวของโลหะทั้ง 2 ชนิดมีผลกับความสามารถในการเชื่อมด้วย เช่น ถ้าอุณหภูมิต่างกันมาก โลหะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะเกิดการระเหยได้ง่ายและเป็นผลให้ส่วนเฟสภายในเปราะ

2.4.3 ก๊าซเฉื่อย

หน้าที่แรกของก๊าซเฉื่อย คือ ป้องกันการเกิดออกซิเดชันในการเชื่อมและป้องกันการเกิดขี้โลหะบริเวณรอบ ๆ รอยเชื่อม หน้าที่อย่างที่สอง คือ ยับยั้งการเกิดไอระเหยเหนือบริเวณรอยเชื่อมและช่วยเป่าไอระเหยออกไป หน้าที่สุดท้ายคือ ช่วยเพิ่มคุณภาพของรอยเชื่อม โดยก๊าซฮีเลียมมีความสามารถในการเกิดไอระเหยของโลหะได้สูง ก๊าซไนโตรเจนมักใช้แทนฮีเลียมเนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันแต่ราคาถูกกว่า อัตราการไกลทั่วไปอยู่ที่ 10 – 40 l/min แต่ถ้าความเร็วในการเชื่อมสูงกว่า 10 m/min จะต้องใช้อัตราการไหลของแก๊สมากกว่านี้และก๊าซอาร์กอนป้องกันการเกิดออกซิเดชันได้ดี

2.4.4 ลักษณะของรอยต่อ

ความหลากหลายในการใช้งานเป็นคุณสมบัติหลักอย่างหนึ่งของการเชื่อมด้วยเลเซอร์ ซึ่งทำให้สามารถเชื่อมวัสดุที่มีรูปร่างต่าง ๆ ไปได้ การเชื่อมด้วยเลเซอร์ต้องคำนึงถึงลักษณะของรอยเชื่อมด้วยเพื่อให้รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์มากที่สุด ภาพที่ 2-5 แสดงรูปร่างมาตรฐานของรอยเชื่อมแบบต่าง ๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ลักษณะของรอยเชื่อมเป็นแบบ 2 Butt ซึ่งเป็นการเชื่อมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นการเชื่อมที่ทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่าย




ภาพที่ 2-5 รอยต่อพื้นฐานแบบต่าง ๆ

2.4.5 การควบคุมตัวแปรในการเชื่อม

ในการเชื่อมด้วยเลเซอร์จำเป็นต้องมีการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อให้การเชื่อมมีประสิทธิภาพ ซึ่งตัวแปรที่จำเป็นต้องควบคุมในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 2.1 ซึ่งจะเห็นว่าในการเชื่อมแบบพัลส์ตัวแปรที่จำเป็นต้องควบคุมประกอบไปด้วย ความเข้ม พลังงาน เวลาพัลส์ จำนวนพัลส์ในหนึ่งวินาทีและรูปร่างของพัลส์

ตารางที่ 2.1 ตัวแปรที่จำเป็นต้องควบคุมในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์

| |
|---|
| CW laser |
| Intensity, I( r,t ) |
| Absolute value |
| Spatial distribution |
| Focus |
| Mode |
| Position |
| Temporal distribution |
| Modulation |
| Change in amplitude |
| Pulsed laser |
| Intensity (as for CW) |
| Pulse energy |
| Pulse duration |
| Repetition rate |
| Pulse shape |
| Mechanical |
| Scan speed |
| Acceleration |
| Other |
| Gas flow, Gas composition |

2.5 รูปแบบการถ่ายเทความร้อนในการเชื่อมด้วยเลเซอร์

การทำให้แสงเลเซอร์ที่ส่งเข้าไปยังชิ้นโลหะให้เกิดความร้อนขึ้นเฉพาะที่นั้นซับซ้อนและควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้ยาก

ในการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับที่จะใช้ในการเชื่อมนั้นต้องมีการกำหนดเงื่อนไขการทดลองที่จะทำให้การเชื่อมมีความเสถียร มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้จริงได้

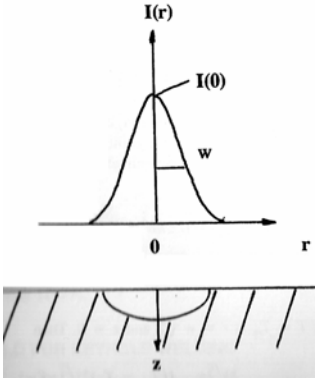
การเชื่อมด้วยเลเซอร์นั้นเป็นกระบวนการที่มีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นตั้งแต่แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ เนื่องจากความไม่แน่นอนของแสงเลเซอร์ ไอระเหยของโลหะและการเคลื่อนที่ที่ไม่เสถียรของน้ำโลหะและการเกิดไอระหว่างการเชื่อม ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ส่งผลต่อค่ากำลังของแสงเลเซอร์ที่ส่งไปยังชิ้นงานซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติและลักษณะของรอยเชื่อม

ความซับซ้อนจากกระบวนการเชื่อมและการที่โลหะที่มีสถานะเป็นของแข็งกลายเป็นของเหลวหลังจากที่มีแสงเลเซอร์ตกกระทบ ทำให้การออกแบบวิธีการเชื่อมด้วยเลเซอร์ยังไม่แม่นยำพอ เช่น ในการหาค่า การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นระหว่างทำการเชื่อมนั้นจะใช้การประมาณมาใช้ในการคำนวณ

ซึ่งในความเป็นจริงค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณควรเป็นค่าของข้อมูลการทดลองที่แน่นอนทั้งจากคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของโลหะ ภายใต้เงื่อนไขที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อม ซึ่งจะได้ค่าที่แท้จริงในการคำนวณและยังสามารถบ่งชี้แนวโน้มของตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติของรอยเชื่อมอีกด้วย

2.5.1 การเชื่อมแบบ conduction

เงื่อนไขนี้จะสามารถจำลองการเริ่มของการหลอมละลายที่ผิวโลหะซึ่งลักษณะของการหลอมละลายแสดงในภาพที่ 2.6




ภาพที่ 2.6 แบบจำลองรูปร่างของรอยเชื่อมในกรณี conduction welding

อุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของจุดโฟกัสของลำแสง (r=0) คือ

$$T(0,t) - T_0 = \frac{AI(0)w}{K(2\pi)} \tan^{-1}\left[\frac{8\ kt}{w}\right]^{1/2} \quad (2.1)$$

โดยที่ K คือ ค่า thermal conductivity

*k* คือ ค่า thermal diffusivity

*w* คือ Gaussian beam radius

$T_0$ คือ อุณหภูมิบรรยากาศโดยรอบ

t คือ เวลา

การประมาณหาค่าความลึก $z_m$ ของการเชื่อมแบบนี้เมื่อ $t_m$ คือ เวลาที่ $T(z=0) = T_m$ (Tm คือ อุณหภูมิที่ชิ้นงานหลอมเหลว) ทำได้ดังนี้

$$z_m(t) \approx \frac{0.16AI}{\rho L}(t - t_m) \quad (2.2)$$

เมื่อ $\rho$ คือ ค่า density of the melt

L คือ ค่า latent heat of fusion

2.5.2 การเชื่อมแบบ Keyhole

รูปแบบการเชื่อมแบบนี้การเชื่อมนั้นจะมีการระเหยที่ผิวของโลหะที่หลอมละลายซึ่งในการหาสมาการทางความร้อนนั้นจะใช้ $T(0,t) = T_v$ (อุณหภูมิของการกลายเป็นไอ)

$$T_v - T_0 = \frac{A_v I(0)}{K_v(2\pi)^{1/2}} \tan^{-1}\left[\frac{8k_v t}{w}\right] \quad (2.3)$$

อัตราการระเหยของมวล $\beta_{(T)}$ หาได้จาก

$$\beta(T) = p(T)\left[\frac{\overline{m}}{2\pi kT}\right]^{1/2} \quad (2.4)$$

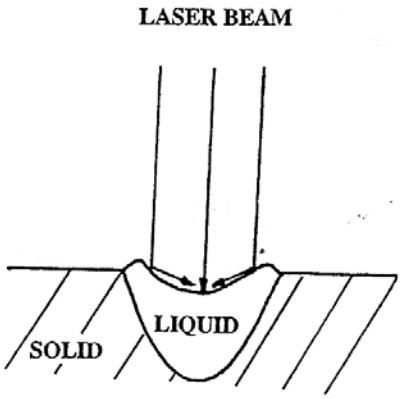
โดยที่ p(T) คือ ความดันไอ

$\overline{m}$ คือ ค่าเฉลี่ยของมวลของอะตอมที่ระเหย

k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann

T คือ อุณหภูมิที่ผิว (K)

ในการเชื่อมนั้นในบริเวณโลหะที่หลอมละลายจะมีทั้งการไหลแบบการพาและแรงตึงผิวซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการโฟกัสด้วยตัวเองของลำแสงเลเซอร์ (self-focusing) ที่ตกกระทบกับผิวชิ้นงานดังภาพที่ 2.7

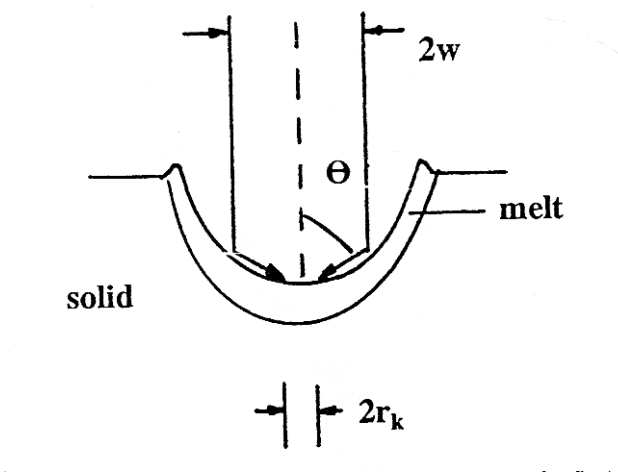



ภาพที่ 2.7 ลักษณะของโลหะที่หลอมละลายซึ่งการไหลแบบการพาและแรงตึงผิวทำให้เกิดเกิดการโฟกัสด้วยตัวเองของลำแสงเลเซอร์

กำหนดให้ ค่ามุม $\theta$ ที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของลำแสงขนานที่มากระทำกับชิ้นงานดังภาพที่ 2.8 มีค่า

$$\theta \approx \sin^{-1} \frac{\lambda}{2r} \qquad (2.5)$$

ซึ่งการเบี่ยงเบนนี้นี้จะเกิดหลุมคีย์โฮลมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง *2r*




ภาพที่ 2.8 ลักษณะของลำแสงที่เบี่ยงเบนเป็นมุม θ จนทำให้เกิดหลุมคีย์โฮลขนาดเล็ก