

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลังงานอิสระกิบส์ (The Gibbs free energy)

การเปลี่ยนแปลงของสสารจะมีผลกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานในระบบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท [2] คือ

1. การเปลี่ยนแปลงประเภทคายความร้อนหรือประเภทคายพลังงาน คือ การเปลี่ยนแปลงที่ระบบคายพลังงานให้แก่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากระบบมีอุณหภูมิต่ำกว่าสิ่งแวดล้อม จึงถ่ายเทพลังงานจากระบบไปสู่สิ่งแวดล้อม เช่น การละลายของโซดาไฟในน้ำ อุณหภูมิของสารละลายสูงขึ้น จึงถ่ายเทพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อม เพื่อให้อุณหภูมิของระบบลดลงจนอุณหภูมิของระบบเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

2. การเปลี่ยนแปลงประเภทดูดความร้อนหรือประเภทดูดพลังงาน คือ การเปลี่ยนแปลงที่ระบบดูดพลังงานจากสิ่งแวดล้อม เนื่องจากระบบมีอุณหภูมิสูงกว่าสิ่งแวดล้อม ระบบจะปรับตัวโดยดูดพลังงานความร้อนจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ระบบ เพื่อให้อุณหภูมิของระบบเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม เช่น การละลายของเกลือแกงในน้ำ อุณหภูมิของสารละลายต่ำลง จึงดูดพลังงานเข้าสู่ระบบ เพื่อให้อุณหภูมิของระบบสูงขึ้นจนอุณหภูมิของระบบเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสสารมีความสัมพันธ์กับพลังงานอิสระกิบส์ พลังงานอิสระกิบส์ (G) เป็น state function ตัวหนึ่งที่ไม่สามารถวัดค่าได้แน่นอน แต่สามารถวัดค่าความเปลี่ยนแปลงได้ โดยพลังงานเสรีกิบส์จะทำให้สามารถอธิบายได้ว่า ปฏิกิริยานั้นเกิดขึ้นเองได้หรือไม่ ซึ่งหาได้จากการเปลี่ยนแปลงความร้อนของปฏิกิริยาหรือเอนทัลปี (H) ลบด้วย อุณหภูมิในหน่วยของสเคลวิน (T) คูณกับการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G = H - TS \quad (2.1)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระกิบส์ที่อุณหภูมิต่ำที่ จึงหาได้จากการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีและเอนทัลปีของระบบ แสดงในสมการที่ 2.2

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.2)$$

โดยที่ ΔH คือการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีของระบบ และ ΔS คือการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี สำหรับระบบ ซึ่งหาได้จากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีรวมในสมการที่ 2.3

$$\Delta S_{total} = \Delta S + \Delta S_{sur} \quad (2.3)$$

เมื่อ ΔS_{sur} คือการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของสิ่งแวดล้อมเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ความดันคงที่ สามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของระบบ ต่ออุณหภูมิคิดลบในหน่วยของสเกลวินสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta S_{sur} = -\frac{\Delta H}{T} \quad (2.4)$$

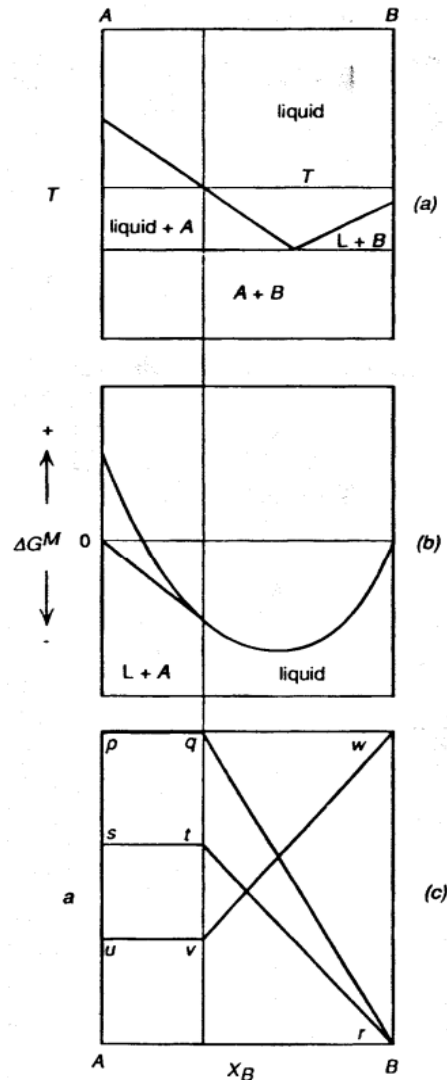
จากสมการที่ 2.3 และ 2.4 เราสามารถเขียนสมการการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระกิบส์ที่อุณหภูมิและความดันคงที่ได้ใหม่ แสดงในสมการที่ 2.5

$$\Delta G = -T\Delta S_{total} \quad (2.5)$$

ในแผนภูมิเฟสพลังงานอิสระกิบส์และส่วนผสมจะมีความสัมพันธ์กันโดยตรง ในสถานะที่เฟสเสถียร ค่าพลังงานอิสระกิบส์จะมีค่าต่ำสุด และเมื่อมีหลายเฟสอยู่ร่วมกันอย่างสมดุล ค่าพลังงานอิสระกิบส์ของแต่ละองค์ประกอบในแต่ละส่วนเฟสที่มีอยู่ในระบบจะต้องเท่ากัน สำหรับการผสมองค์ประกอบสาร A และ B เป็นองค์ประกอบสารละลาย 1 โมล ความแตกต่างของพลังงานอิสระกิบส์ของแต่ละองค์ประกอบก่อนผสมกันเป็นสารละลายหนึ่งโมล ถูกเขียนแทนด้วย ΔG^M

สำหรับการเกิดการละลายเข้ากันในเฟสของแข็ง ส่วนผสมที่เกิดสารละลายของ α กับ β นั้นน้อยมาก อาจประมาณได้ว่า A และ B นั้นไม่สามารถละลายเข้าหากันได้ ลักษณะแผนภูมิเฟสเช่นนี้แสดงในรูปที่ 2.1(a) พลังงานอิสระกิบส์ของการ formation ของ α กับ β ในระบบ A-B ที่อุณหภูมิ T ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1(b) เส้นสัมผัสร่วมระหว่างกราฟของสารละลายของแข็ง α และสารละลายของเหลวถูกเปลี่ยนเป็นเส้นที่ลากจากจุดบนแกน $X_A = 1$ ที่แสดงถึงของแข็ง A บริสุทธิ์มายังเส้นกราฟของสารละลายของเหลว ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง activity และส่วนผสมดังในรูปที่ 2.1 (c) โดยยังคงเป็นสมมุติฐานว่าสารละลายของเหลวนั้นเป็นอุดมคติ เส้น pqr แสดงค่า activity ของ A เมื่อเทียบกับของแข็ง A บริสุทธิ์ที่จุด p จุด s เป็น activity ของของเหลว A เมื่อเทียบกับของแข็ง A บริสุทธิ์ที่จุด p str แสดงค่า activity ของ A เมื่อเทียบกับของเหลว A นั้นมีค่า activity เท่ากับหนึ่งที่จุด s และเส้น

A_{uw} แสดงค่า activity ของ B เมื่อเทียบกับของเหลว B ที่มีค่า activity เท่ากับหนึ่งที่จุด w เป็นการแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแผนภูมิเฟสกับพลังงานอิสระกิบส์



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ของแผนภูมิเฟสกับพลังงานอิสระกิบส์

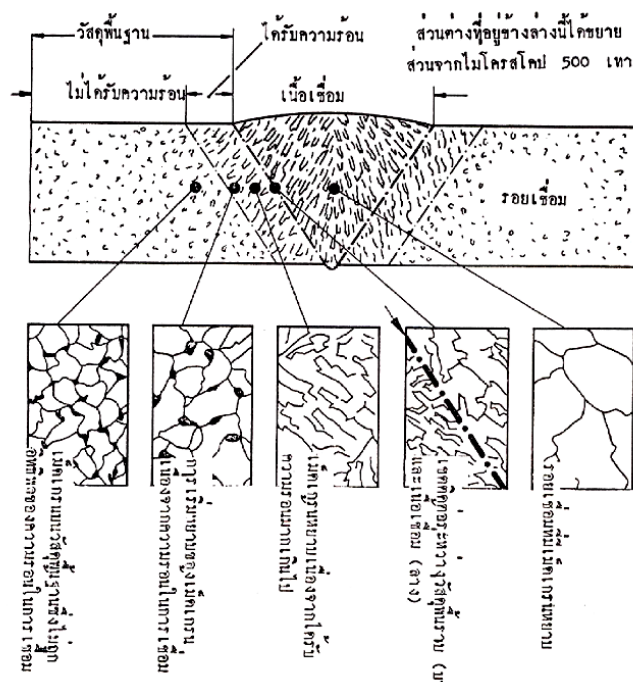
(http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~ltachai/210/lecture_notes/ch10.pdf)

2.2 อิทธิพลของความร้อนของการเชื่อมที่มีผลต่อชิ้นงานและบริเวณกระทบร้อน

การเชื่อมโลหะหมายถึงกรรมวิธีการกระบวนการเชื่อมต่อโลหะให้ติดกันอย่างแข็งแรงสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพ โดยการให้ความร้อนแก่โลหะนั้นจนหลอมละลายติดเป็นเนื้อเดียวกันหรือโดยการเติมลวดเชื่อมเป็นตัวประสานก็ได้ ในกระบวนการเชื่อมโลหะ โดยทั่วไปรอยเชื่อมที่ดีจะมีคุณลักษณะที่เทียบเท่าหรือดีกว่างานโลหะในส่วนที่ไม่ได้ถูกผลกระทบจากการเชื่อม แต่ในสภาพที่เกิดขึ้นจริงไม่

เป็นเช่นนั้น เนื่องจาก ความร้อนจากการเชื่อมจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทั้งโลหะงาน และโลหะเชื่อม ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้ทั้งขณะเชื่อมและหลังจากงานเชื่อมเย็นตัว ซึ่งขณะทำการเชื่อม จะมีอุณหภูมิประมาณ 2,000 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า แต่ในระยะห่างออกจางานเล็กน้อยจะมี อุณหภูมิเพียง 300 องศาเซลเซียส โดยประมาณ เมื่อเหล็กที่ใช้เชื่อมร้อนขึ้นจนถึงอุณหภูมิวิกฤต โครงสร้างจุลภาคจะเปลี่ยนส่งผลต่อความแข็งแรงของโลหะ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของ แนวเชื่อมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสูงสุดที่งานได้รับ ตลอดจนระยะเวลาที่งานอยู่ภายใต้อุณหภูมิดังกล่าว โดยทั่วไปรอยเชื่อมแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

- รอยเชื่อม คือ ส่วนที่หลอมเหลวขณะเชื่อมซึ่งได้จากโลหะงานบางส่วนและลวดเชื่อม คุณสมบัติที่ได้ขึ้นกับส่วนผสมทางเคมี และวิธีการเชื่อม ตามปกติรอยเชื่อมที่สมบูรณ์จะปราศจาก จุดบกพร่อง
- บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) คือส่วนของโลหะงานที่อยู่ถัดรอยเชื่อม ซึ่งไม่หลอมละลายแต่จะได้รับความร้อนสูงมากขณะทำการเชื่อมแล้วถูกปล่อยให้เย็นลงอย่างรวดเร็วทำให้ บริเวณ HAZ มีโครงสร้างที่แข็ง, เปราะ หรือมีความต้านทานต่อการแตกร้าวกว่าส่วนอื่น คุณสมบัติ ของบริเวณนี้จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของโลหะ เฟสที่เกิด และอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจนขณะเชื่อม และหลังการเชื่อม



รูปที่ 2.2 อิทธิพลของความร้อนที่มีต่อชิ้นงานเชื่อมและบริเวณกระทบร้อน(HAZ)

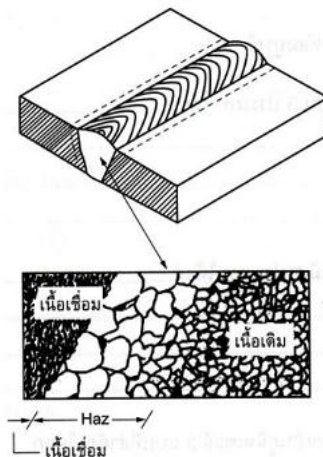
(ที่มา: http://www.sipotec.ac.th/bunchoo/2103-2103/lesson/lesson5-7_8.html)

2.2.1 การแข็งตัวของแนวเชื่อม

การแข็งตัวในบ่อหลอมละลายของแนวเชื่อม เป็นปรากฏการณ์ที่เหมือนกับการหล่อโลหะแต่มีข้อแตกต่างดังนี้

1. แหล่งกำเนิดความร้อนที่เคลื่อนที่
2. การหลอมละลายแนวเชื่อมมีอัตราการเย็นตัวสูง
3. บ่อหลอมละลายแนวเชื่อมมีอัตราการเย็นตัวสูง
4. การแข็งตัวของบ่อหลอมละลายจะกระจายไปเรื่อยๆ ตามการเปลี่ยนแปลงความร้อนระหว่างการเชื่อม

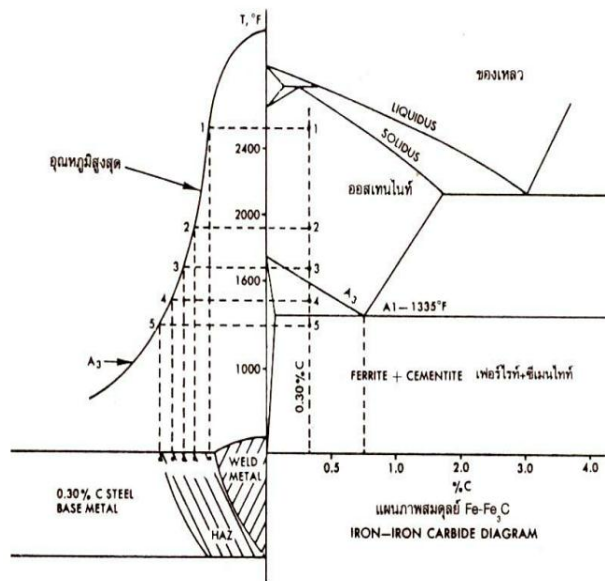
ในขณะที่ทำการเชื่อม โลหะจะถูกหลอมละลายและกลั้มาแข็งตัวอีกครั้ง โดยรับรับความร้อนจากการอาร์กและความร้อนสูงสุดในแนวเชื่อมคือ ตรงกลางแนวเชื่อม โดยทั่วไปจะมีการเข้าใจว่าบริเวณที่แข็งที่สุดของแนวเชื่อมก็คือตรงกลางแนวเชื่อมนั่นเอง แต่จากการวิจัยพบว่าแท้จริงบริเวณที่แข็งที่สุดคือบริเวณข้างแนวเชื่อม หรือบริเวณกระทบร้อน (HAZ) บริเวณนี้จะมีเนื้อหยาบกว่าตรงกลางแนวเชื่อม แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมและบริเวณกระทบร้อน(HAZ)

(ที่มา: http://www.sipotec.ac.th/bunchoo/2103-2103/lesson/lesson5-7_8.html)

ในรอยเชื่อมโลหะเราสามารถพิจารณาคุณสมบัติของรอยเชื่อม โดยดูจากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับแผนภาพ CCT หรือ TTT เช่นในรอยเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าผสม การเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมที่เย็นตัวจะมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบดังนี้



รูปที่ 2.4 แผนภาพสมดุลเหล็ก-คาร์บอนเปรียบเทียบ อุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่งต่างๆของรอยเชื่อมและแผนภาพสมดุล

(ที่มา: http://www.sipotec.ac.th/bunchoo/2103-2103/lesson/lesson5-7_8.html)

จากรูปที่ 2.9 บริเวณที่ 1 เป็นส่วนที่ได้รับความร้อนซึ่งอุณหภูมิสูงกว่า 2400 °F ดังนั้น austenite ที่เกิดขึ้นจะเป็นเกรนหยาบเพราะว่า ณ อุณหภูมิดังกล่าวจะเกิดปรากฏการณ์ grain growth บริเวณที่ 2 เป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนประมาณ 1800 °F โครงสร้างส่วนมากเป็น austenite ที่มีความละเอียดกว่าบริเวณแรก บริเวณที่ 3 เป็นส่วนที่ได้รับความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าเส้นอุณหภูมิ A₃ ณ อุณหภูมินี้ยังไม่สูงพอที่จะทำให้โครงสร้างเป็น austenite ที่มีเนื้อเดียวกัน บริเวณที่ 4 เป็นเส้นที่ได้รับความร้อนอยู่ประมาณ 1400 °F ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่างเส้น A₁ และ A₃ ดังนั้นบางส่วนของโครงสร้างจะเป็น austenite และบางส่วนของโครงสร้างแบบอื่นเกิดขึ้นด้วย บริเวณที่ 5 เป็นส่วนที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A₁ ดังนั้น austenite จะไม่เกิดขึ้น แต่อาจเกิดโครงสร้างเป็น spheroidized ก็ได้ จากตัวอย่างข้างต้นจะพบว่าโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเย็นตัว

2.3 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

เหล็กกล้าไร้สนิม หรือ สแตนเลส นั้นในทางโลหกรรมถือว่าเป็น โลหะผสมเหล็ก ที่มีโครเมียมอย่างน้อยที่สุด 10.5% ชื่อในภาษาไทย แปลจากภาษาอังกฤษว่า stainless steel เนื่องจากโลหะผสมดังกล่าวไม่เป็นสนิมอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างออกซิเจนในอากาศกับโครเมียมในเนื้อสแตนเลส เกิดเป็นฟิล์มบางๆเคลือบผิวไว้ ทำหน้าที่ปกป้องการเกิดความเสียหายให้กับตัวเนื้อสแตนเลสได้เป็นอย่างดี ปกป้องการเกิด corrosion และไม่ซำรุดหรือสึกกร่อนง่ายอย่างโลหะทั่วไป สำหรับใน

สหรัฐอเมริกาและในหลายประเทศ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการบิน นิยมเรียกโลหะนี้ว่า corrosion resistant steel เมื่อไม่ได้ระบุชัดว่าเป็นโลหะผสมชนิดใด และคุณภาพระดับใด แต่ในท้องตลาดเราสามารถพบเห็น สแตนเลสเกรด 18-8 มากที่สุด ซึ่งเป็นการระบุถึง ธาตุที่เจือลงในเนื้อเหล็กคือ โครเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ สแตนเลสประเภทนี้จัดเป็น commercial grade คือมีใช้ทั่วไปหาซื้อได้ง่าย มักใช้ทำเครื่องใช้ทั่วไป ซึ่งเราสามารถจำแนกประเภทของสแตนเลสได้จากเลขรหัสที่กำหนดขึ้นตามมาตรฐาน AISI เช่น 304 304L 316 316L เป็นต้น ซึ่งส่วนผสมจะเป็นตัวกำหนดเกรดของสแตนเลส ซึ่งมีความต้องการในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ปกติ stainless steel จะไม่เป็นสนิม การทำให้ stainless steel เป็นสนิมคือการถูกทำลายฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ที่เคลือบผิวออกไปในสถานะที่ stainless steel สามารถเกิดสนิมได้ ก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมาอีกครั้งเช่น ถ้าสแตนเลสถูกทำให้เกิดรอยขีดข่วน แล้วบริเวณรอยนั้นมีความชื้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับธาตุเหล็กก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมา ก็จะเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมขึ้นได้

2.3.1 การแบ่งชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิม [4]

องค์กร American Iron and Steel Institute (AISI) ได้มีการแบ่งชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อให้ความเป็นสากล โดยมีการแบ่งชนิดในรูปแบบของตัวเลขขึ้น โดยอาศัยสมบัติของความเป็นแม่เหล็กบนพื้นฐานของเฟสของโลหะ ซึ่งสามารถแบ่งชนิดออกเป็นดังนี้

- Martensitic (4XX) แม่เหล็กไม่สามารถดูดติด ส่วนผสมของโครเมียม 12-14% และมีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ปานกลาง มีโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมอยู่ประมาณ 0.2-1% ไม่มีนิกเกิล สแตนเลสตระกูลนี้สามารถปรับความแข็งได้โดยการให้ความร้อนแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (quenching) และอบคืนตัว (tempering) สามารถลดความแข็งได้ คล้ายกับเหล็กกล้าคาร์บอนและพบการใช้งานที่สำคัญในการผลิตเครื่องตัด, อุตสาหกรรมเครื่องบินและงานวิศวกรรมทั่วไป
- Ferritic (4XX) แม่เหล็กสามารถดูดติด มีธาตุคาร์บอนผสมปริมาณที่ต่ำ และมีโครเมียมเป็นธาตุผสมหลักที่สำคัญอาจอยู่ระหว่าง 10.5%-27% และมีนิกเกิลเป็นส่วนผสมอยู่น้อยมากหรือไม่มีเลย
- Austenitic (2XX,3XX) เป็นเกรดที่ใช้งานแพร่หลายมากที่สุดถึง 70% มีคุณสมบัติที่แม่เหล็กดูดไม่ติด (non – magnetic) มีส่วนผสมของโครเมียม 16% คาร์บอนอย่างมากที่สุด 0.15% มีส่วนผสมของธาตุนิกเกิล 8% เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการทำการประกอบ (fabrication) และเพิ่มความต้านทาน การกัดกร่อน เกรดที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและนิยมเรียกว่า 18/10 คือการที่มีส่วนผสมของโครเมียม 18% และนิกเกิล 10%

- Duplex (Austenitic and Ferritic) มีความเป็นแม่เหล็กสูง มีโครงสร้างผสมระหว่าง โครงสร้าง เฟอร์ริติกและออสเทนนิติก มีโครเมียมเป็นธาตุผสมอยู่ระหว่าง 19-28% และโมลิบดีนัมสูงกว่า 5% และมีนิกเกิลน้อยกว่าตระกูลออสเทนนิติก พบว่ามีการใช้งานมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งใน บรรยากาศแวดล้อมของคลอไรด์
- Precipitation hardened (PH) กลุ่มเพิ่มความแข็งโดยการตกผลึก เกรดที่เป็นที่รู้จักในตระกูลนี้ คือ 17-4H ซึ่งมีส่วนผสมของโครเมียม 17% และนิกเกิล 4% สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดย กลไกเพิ่มความแข็งจากการตกผลึก (precipitation hardening mechanism) โดยสามารถเพิ่มความ แข็งแรงสูงมาก มีค่าความเค้นพิสูจน์ (proof stress) อยู่ระหว่าง 1,000 ถึง 1,500 เมกาปาสกาล (MPa) ขึ้นอยู่กับชนิดและกรรมวิธีปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน (heat treatment)

2.3.2 ประโยชน์ของการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิม

- ใช้ในสิ่งแวดล้อมที่กัดกร่อน (corrosive environment)
- งานอุณหภูมิเย็นจัด ป้องกันการแตกเปราะ
- ใช้งานอุณหภูมิสูง (high temperature) ป้องกันการเกิดคราบออกไซด์ (scale) และยังคงความ แข็งแรง
- มีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับมวล (high strength vs. mass)
- งานที่ต้องการสุขอนามัย (hygienic condition) ต้องการความสะอาดสูง
- งานด้านสถาปัตยกรรม (aesthetic appearance) ไม่เป็นสนิม ไม่ต้องทาสี
- ไม่ปนเปื้อน (no contamination) ป้องกันการทำ ปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยา
- ด้านทานการขัดถูแบบเปียก (wet abrasion resistance)

2.3.3 คุณสมบัติทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิม

- ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) สแตนเลสทุกชนิดจะมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่า เหล็กกล้าคาร์บอนมาก สแตนเลสเกรดที่มีส่วนผสมโครเมียมอย่างเดี่ยว (plain chromium steel) มีค่าการนำความร้อน + 1/3 และเกรดออสเทนนิติกมีค่าการนำความร้อน +1/4 ของเหล็กกล้า คาร์บอน ทำให้มีผลต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น มีผลต่อการควบคุมปริมาณความร้อนเข้า ระหว่างการเชื่อมต้องให้ความร้อนเป็นระยะเวลานานขึ้น เมื่อต้องทำงานขึ้นรูปร้อน

- สัมประสิทธิ์การขยายตัว (expansion coefficient) สเตนเลสเกรดที่มีส่วนผสมโครเมียมอย่าง เดียวมีสัมประสิทธิ์การขยายตัว คล้ายกับเหล็กกล้าคาร์บอน แต่เกรดออสเทนนิคจะมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน $1\frac{1}{2}$ เท่า การที่สเตนเลสมีการขยายตัวสูงแต่มีค่าการนำความร้อนต่ำทำให้ต้องหามาตรการป้องกันเพื่อหลีกเลี่ยงผลเสียหายที่ตามมา เช่น ใช้ปริมาณความร้อนในการเชื่อมต่ำ, กระจายความร้อนออกโดยใช้แท่งทองแดงรองหลัง, การจับยึดป้องกันการบิดงอ ปัจจัยเหล่านี้ต้องพิจารณาการใช้งานร่วมกันของวัสดุ เช่น ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) ระหว่างเปลือกโครงสร้างเหล็กกล้าคาร์บอน และท่อออสเทนนิค เป็นต้น

2.4 คุณสมบัติของสเตนเลส เกรด SUS 321

การเลือกชนิดของโลหะที่จะนำมาทดสอบ มีแนวทางในการเลือกคือ โลหะชนิดนั้นต้องเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม มีลักษณะของโครงสร้างที่เสถียร มีลักษณะ โครงสร้างเด่นชัด ดังนั้นจึงทำการเลือก สเตนเลส SUS321 เป็นโลหะที่มีความเหมาะสมสำหรับการทดสอบในขั้นต้นของการทดลอง สเตนเลส เกรดนี้จัดเป็นสเตนเลสในกลุ่มออสเทนนิค เหมือนกันกับสเตนเลสเกรด SUS 304 แต่จะมีการเติม ธาตุไททาเนียม (Ti) ผสมลงไปเนื้อสเตนเลส ในปริมาณ 5 เท่าของเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมของ คาร์บอนที่ผสมอยู่ ไททาเนียมที่ผสมอยู่ในสเตนเลสเกรดจะจับตัวเป็นไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ซึ่งจะช่วยลดและช่วยป้องกันการเกิดโคโรเนียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23}C_6$) ในช่วงขบวนการเชื่อม ซึ่งจะเกิดในช่วง อุณหภูมิประมาณ 800 -1500 °F หรือ 427 -816 °C โดยเฉพาะอัลลอยด์นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลง คุณสมบัติเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สเตนเลสเกรดนี้ถูกผลิตขึ้นมาเพื่อรองรับกับการป้องกันทำปฏิกิริยา หรือการผุกร่อนอย่างยอดเยี่ยม ผลิตภัณฑ์ที่จะนำสเตนเลสเกรดนี้ไปใช้ ประการแรกก็คือ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานอย่างต่อเนื่อง หรือถูกใช้กับผลิตภัณฑ์ ที่ทำงานเป็นบางครั้งบางคราวในช่วง อุณหภูมิ 800 – 1500 °F หรือ 427 – 816 °C ซึ่งเป็นช่วงของการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์นั่นเอง อุปกรณ์ที่ ถูกนำไปใช้จะรวมไปถึงงานที่ใช้มีความร้อนสูง ๆ, เครื่องยนต์ดีเซล, ระบบท่อไอเสียของรถยนต์ที่ทำ งานหนัก (เครื่องจักรกลหนัก), ผนังป้องกันไฟ, กระจอกสูบ, ตัวบอดีของระบบหม้อน้ำขนาดใหญ่, ชิ้นส่วนเครื่องบิน แม้กระทั่งอุปกรณ์หลายๆ ชนิดของ โรงกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับคุณสมบัติ ของสเตนเลสเกรด 321 มีดังนี้

Name : SUS 321
 Class : Stainless steel
 Type : Austenitic standard

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของธาตุใน stainless steel SUS 321 [5]

Element	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Ti	Ta
Weight %	0.08	2.00	1.00	17.0 -19.0	9.0-12.0	0.045	0.03	5 x C-0.70	0.1

ตารางที่ 2.2 Mechanical properties of stainless steel SUS 321 [5]

Properties		Conditions	
		T (°C)	Treatment
Density ($\times 1000 \text{ kg/m}^3$)	8	25	
Poisson's Ratio	0.27-0.30	25	
Elastic Modulus (GPa)	193	25	
Tensile Strength (Mpa)	515	25	hot finished and annealed (plate, sheet, strip) more
Yield Strength (Mpa)	205		
Elongation (%)	40		
Reduction in Area (%)	50		
Hardness (HRB)	88 (max)	25	annealed (plate, sheet, strip)

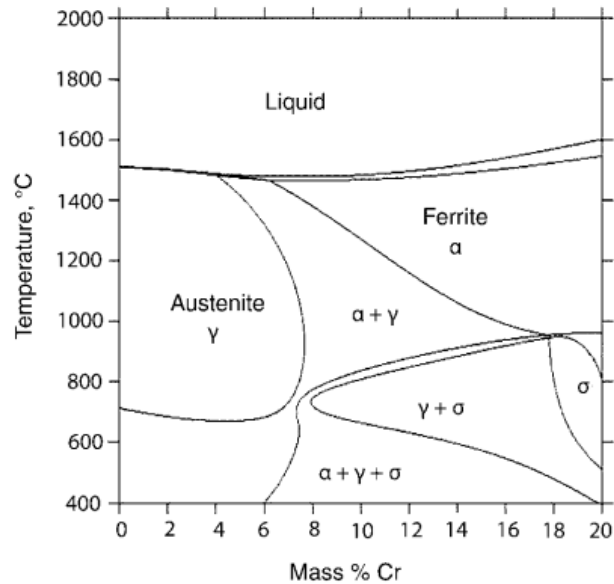
ตารางที่ 2.3 Thermal properties of stainless steel SUS 321 [5]

Properties		Conditions
		T (°C)
Thermal Expansion ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	16.6	0-100 more
Thermal Conductivity (W/m-K)	22.2	100 more
Specific Heat (J/kg-K)	500	0-100

ตารางที่ 2.4 Electric properties of stainless steel SUS 321 [5]

Properties		Conditions
		T (°C)
Electric Resistivity ($10^{-9} \Omega\text{-m}$)	730	25

2.4.1 Phase diagram of austenitic stainless steel



รูปที่ 2.5 Iron-chromium phase diagram at 8% nickel

(ที่มา: http://www.asmininternational.org/documents/10192/3473958/05231G_Sample.pdf)

เฟสที่สำคัญของเหล็กออสเทนิติกสแตนเลสที่ผ่านการรีดขึ้นรูป (wrought products) เมื่อถูกนำมาเชื่อม หลอมละลายเพื่อประกอบเป็นชิ้นงานหรือโครงสร้าง หากสัดส่วน Cr/Ni ประมาณ 1.95 จะเกิดการก่อตัวทางโลหะในรอยเชื่อมเป็นเฟส δ-Ferrite + Austenite (FA mode) คือเฟส δ-Ferrite จะเกิดก่อนเฟส Austenite (เช่นรอยเชื่อมเหล็ก 304 ด้วยลวด 308 เป็นต้น) หากสัดส่วน Cr/Ni ประมาณ 1.45 จะเกิดการก่อตัวทางโลหะในรอยเชื่อมเป็น Austenite + δ-Ferrite (AF mode) คือเฟส Austenite จะเกิดก่อนเฟส δ-Ferrite (เช่นรอยเชื่อมเหล็ก 310 ด้วยลวด 308 เป็นต้น) โดยทั่วไปเหล็ก 321 จะมีธาตุ C ผสมอยู่ 0.08% จะเกิดการตกตะกอนในแบบ MC ที่เป็น TiC ในช่วงอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสขึ้นไป และการตกตะกอนแบบ $M_{23}C_6$ ที่เป็น $Cr_{23}C_6$ ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 427 – 816 °C องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลทำให้โครเมียมที่บริเวณขอบเกรนมีปริมาณลดลง เป็นผลให้ความต้านทานการกัดกร่อนตามแนวขอบเกรนต่ำลง จนเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน (intergranular corrosion) และสนิมขึ้นได้ในแนวเชื่อม นอกจากนี้ผลกระทบของการเกิด $Cr_{23}C_6$ ยังส่งผลต่อการแตกตัวของโครเมียมคาร์ไบด์รอบ ๆ แนวเชื่อมซึ่งเป็นปัญหาเรื่องของการแตกร้าว (Crack)

2.5 การเชื่อมสแตนเลส [6]

การเชื่อมสแตนเลส (welding stainless) คือการต่อสแตนเลส 2 ชิ้นให้ติดกัน โดยการให้ความร้อนแก่สแตนเลสจนหลอมละลายติดเป็นเนื้อเดียวกันหรืออาจใช้ลวดเชื่อมด้วยก็ได้ ส่วนความหมายที่สมบูรณ์ของการเชื่อมสแตนเลส คือ การประสานสแตนเลส 2 ชิ้น (สแตนเลสทั้ง 2 ชิ้นจะเป็นสแตนเลสชนิดเดียวกันหรือต่างกันได้ หรือชิ้นหนึ่งเป็นสแตนเลสอีกชิ้นเป็นโลหะอื่นก็ได้) ให้ยึดติดกันโดยการให้ความร้อนแก่สแตนเลส ตรงบริเวณรอยต่อจนกระทั่งสแตนเลสเกิดการหลอมละลายแล้วประสานติดกัน ในขณะที่สแตนเลสกำลังหลอมละลายอยู่นั้นอาจเติมลวดเชื่อมประสานลงไปบริเวณรอยต่อหรือไม่ก็ได้ ในการเชื่อมบางแบบอาจใช้แรงกดบริเวณรอยต่อในขณะที่สแตนเลสกำลังหลอมละลายอยู่ เพื่อช่วยทำให้เนื้อสแตนเลสประสานติดกันดียิ่งขึ้น

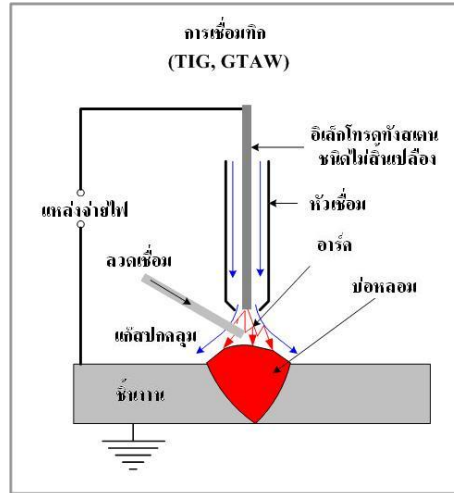
2.5.1 ประเภทของการเชื่อม

เราสามารถแบ่งประเภทของการเชื่อมสแตนเลสโดยอาศัยแหล่งให้พลังงานความร้อนได้เป็น 4 กลุ่มอันได้แก่

1. การเชื่อมแก๊ส (gas welding) อาศัยความร้อนจากการเผาไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง อย่างแก๊สอะเซทิลีนกับแก๊สออกซิเจน อุณหภูมิของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ให้ความร้อนสูง 3200 องศาเซลเซียส และจะไม่มีเขม่าหรือควัน
2. การเชื่อมอาร์ค (arc welding) อาศัยความร้อนที่เกิดจากการอาร์คของกระแสไฟฟ้า เกิดประกายอาร์คระหว่างขั้วงานและลวดเชื่อม ซึ่งการหลอมละลายของลวดเชื่อมจะทำหน้าที่ป้อนเนื้อโลหะให้แก่แนวเชื่อม
3. การเชื่อมความต้านทาน (resistance welding) อาศัยความร้อนจากความต้านทานกระแสไฟฟ้า จากนั้นใช้แรงอัดส่วนที่หลอมละลายจนกระทั่งชิ้นงานติดกันเป็นจุด หรือเป็นแนวความร้อนที่ใช้ได้จากความต้านทานไฟฟ้า
4. การเชื่อมรังสี อาศัยความร้อนจากรังสีส่งต่อพลังงานความร้อนไปสู่ชิ้นงาน สามารถเชื่อมเข้าถึงจุดที่ยาก ๆ ที่ต้องการเชื่อมได้เป็นอย่างดี จุดที่เชื่อมสามารถกำหนดให้มีขนาดใหญ่หรือเล็กได้ จึงลดปัญหาการแตกร้าวหลังจากการเชื่อม ลดปัญหาการเกิดโพรงอากาศในแนวเชื่อม ซึ่งแต่ละกลุ่มยังแบ่งออกได้อีกเป็นหลายประเภท แต่สำหรับประเภทที่นิยมนำมาใช้เชื่อมสแตนเลสกันอย่างแพร่หลายได้แก่

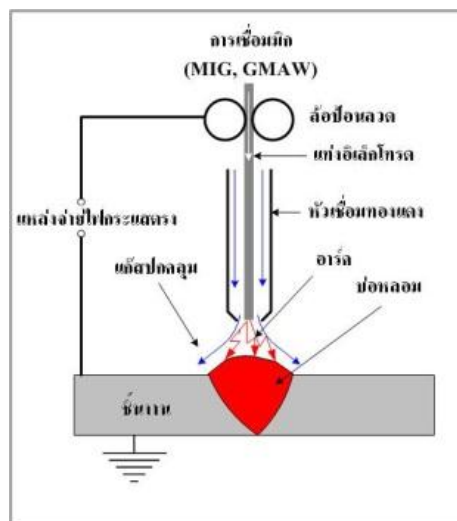
- การเชื่อมตึก (TIG) เป็นประเภทหนึ่งของการเชื่อมอาร์ค เป็นวิธีการเชื่อมสแตนเลสโดยใช้ความร้อนที่เกิดจากการอาร์คระหว่างลวดทั้งสแตนกับชิ้นงาน โดยมีแก๊สเฉื่อยปกคลุมบริเวณเชื่อมและบ่อหลอมละลายเพื่อไม่ให้บรรยากาศภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยาตรงบริเวณที่เชื่อม

สแตนเลสกลุ่มออสเทนนิติกจะใช้แก๊สอาร์กอน 95% ผสมกับแก๊สออกซิเจน 5% แต่สำหรับเฟอร์ริติกจะใช้แก๊สอาร์กอน 100%



รูปที่ 2.6 ภาพจำลองการเชื่อมติ๊ก [5]
(ที่มา: <http://www.siamstainless.com>)

- การเชื่อมมิก (MIG) เป็นประเภทหนึ่งของการเชื่อมอาร์ค การเชื่อม MIG เป็นกระบวนการเชื่อมสแตนเลสที่ได้รับความร้อนจากการอาร์คระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ลวดเชื่อมที่ใช้จะเป็นลวดเชื่อมเปลือยที่ส่งป้อนอย่างต่อเนื่อง ไปยังบริเวณอาร์คและทำหน้าที่เป็นโลหะเติมลงยังบ่อหลอมละลาย บริเวณบ่อหลอมละลายจะถูกปกคลุมไปด้วยแก๊สเฉื่อย เพื่อไม่ให้เกิดการรวมตัวกับอากาศ แก๊สเฉื่อยจะใช้แก๊สอาร์กอน 97% ผสมกับแก๊สออกซิเจน 3%



รูปที่ 2.7 ภาพจำลองการเชื่อมมิก
(ที่มา: <http://www.siamstainless.com>)

2.6 ทฤษฎีพื้นฐานการทดสอบรอยเชื่อมโลหะ[7]

ในกระบวนการเชื่อมโลหะ เนื้อโลหะทั้ง 2 ด้านจะถูกหลอมละลายรวมตัวกันเข้ากับลวดเชื่อมเมื่อโลหะเย็นลงก็จะกลายเป็นรอยเชื่อมรอยเชื่อมที่ดีจะมีคุณลักษณะที่เทียบเท่าหรือดีกว่าโลหะงานในส่วนที่มีได้ถูกผลกระทบจากการเชื่อมแต่ในสภาพที่เกิดขึ้นจริงผลกระทบจากการเชื่อมจะทำให้รอยเชื่อมและบริเวณขอบรอยเชื่อมที่กระทบร้อน (Heat affected zone: HAZ) จะมีคุณลักษณะที่ด้อยลงเนื่องจากในกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย (fusion welding) เช่น Shielded Metal Arc Welding: SMAW, Tungsten Inert Gas: TIG, Metal Inert Gas: MIG เป็นต้นในบริเวณรอยเชื่อมจะต้องใช้ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาเซลเซียสและให้ความร้อนสูงเป็นจุดเล็ก ๆ เมื่อเทียบกับขนาดชิ้นงาน ทำให้เกิดความเค้นตกค้างสูงภายหลังการเชื่อม เนื่องจากอัตราเย็นตัวที่รวดเร็ว ทำให้บริเวณ HAZ มีโอกาสเกิดความเสียหายได้มากเช่นการเกิด weld decay หรือการเกิด inter granular corrosion ซึ่งอาจนำไปสู่การแตกร้าวของแนวเชื่อม และการเสียรูปทรงของชิ้นงานเชื่อมก่อนหมดอายุการใช้งานจริงของชิ้นส่วนนั้น เป็นต้น ด้วยเหตุนี้การทดสอบรอยเชื่อมจึงเป็นวิธีการเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ได้คุณภาพตามต้องการ โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งการทดสอบรอยเชื่อมออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.6.1 การทดสอบงานเชื่อมโดยวิธีการทำลายสภาพ

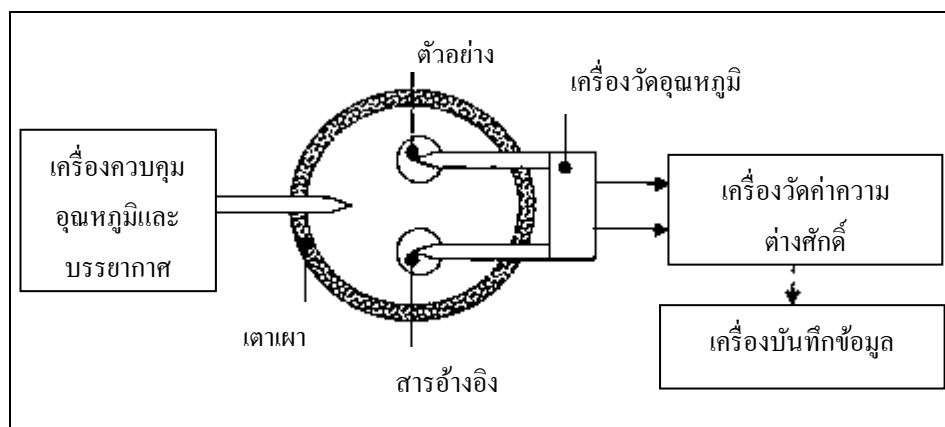
การทดสอบแบบทำลายสภาพ (destructive test) เป็นการทดสอบตัวอย่างชิ้นงานในสถานการณ์เดียวกันกับการรับแรงในการใช้งานจริง เพื่อประเมินความสามารถในการเชื่อมและสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน การทดสอบด้วยวิธีนี้ชิ้นงานที่ถูกทดสอบจะถูกทำลาย ด้วยทั่วไปการเชื่อมโลหะในงานอุตสาหกรรมนั้นจะทำการเชื่อมตามใบคำดับขั้นตอนการเชื่อม (Welding Procedure Specification: WPS) และบันทึกผลที่ผ่านการยอมรับไว้ในเอกสาร องค์ประกอบที่สำคัญของการทดสอบแบบทำลายสภาพ การเตรียมชิ้นงานทดสอบตามที่กำหนดในมาตรฐานและควบคุมวิธีการทดสอบให้ถูกต้อง นอกจากนี้การทดสอบแบบทำลายสภาพยังสามารถใช้ตรวจหาสมบัติและจุดบกพร่องต่าง ๆ ของแนวเชื่อมได้ เช่น การทดสอบหาสมบัติเชิงกล (mechanical test) การทดสอบทางเคมี (chemical test) การทดสอบทางโลหะวิทยา (metallographic test) วิธีทดสอบเชิงกลของแนวเชื่อมได้แก่ แรงดึง คัดงอ ความแข็ง แรงกระแทก การล้าตัว การคืบตัว เป็นต้น ส่วนการทดสอบทางเคมีได้แก่ การวิเคราะห์ทางเคมี การกัดกร่อน การแพร่ซึมของไฮโดรเจน การหาปริมาณเฟอร์ไรต์ เป็นต้น

2.6.2 การทดสอบงานเชื่อมโดยวิธีการไม่ทำลายสภาพ

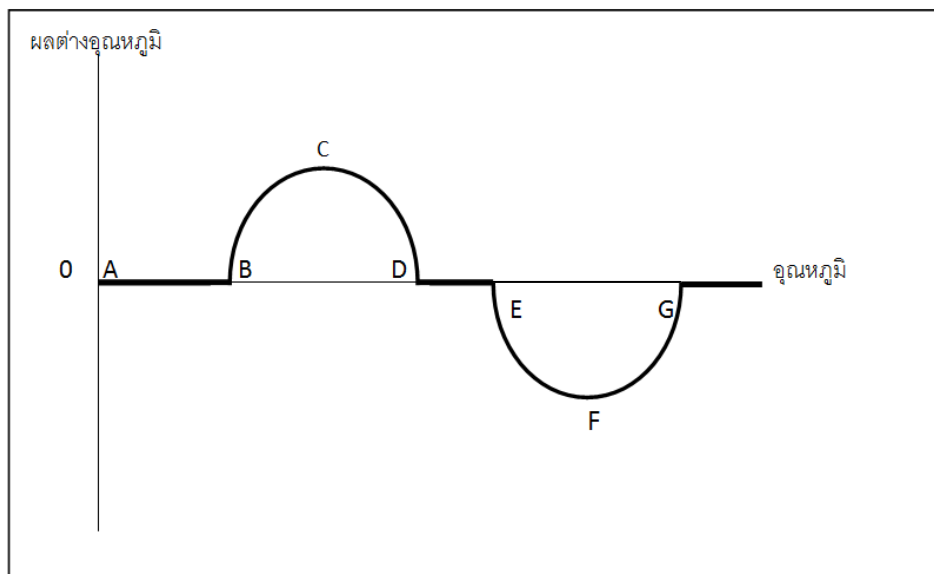
การทดสอบแนวเชื่อมแบบไม่ทำลายสภาพหรือนิยมเรียกสั้นๆ ว่า NDE (Non-Destructive Examination) เป็นการทดสอบตามชิ้นงานโดยที่ไม่ต้องทำลายสภาพชิ้นงานเดิม โดยวิธีตรวจสอบมีหลายประเภทแตกต่างกันตามลักษณะ หรือตามข้อกำหนดของชิ้นงาน เช่น การทดสอบด้วยตา, การทดสอบด้วยของเหลวแทรกซึม, การทดสอบด้วยผงแม่เหล็ก, การทดสอบด้วยคลื่นความถี่สูง และการทดสอบด้วยภาพถ่ายรังสี เป็นต้น

2.7 เทคนิค Differential Thermal Analysis (DTA)

เทคนิค Differential Thermal Analysis (DTA) ที่เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อน โดยวัดออกมาในรูปของอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างสารตัวอย่างกับสารอ้างอิงในระหว่างให้ความร้อนอุณหภูมิของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงในลักษณะการดูด (endothermic) หรือการคายความร้อน (exothermic) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายใน (enthalpy transition) เช่นจากการเปลี่ยนเฟส การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก กระบวนการ oxidation reduction และปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะถูกวัดดังรูปที่ 2.8 ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของตัวอย่างและอุณหภูมิของวัสดุอ้างอิง จะถูกบันทึกเป็นกราฟแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบหลักของเครื่อง DTA [8]



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างกราฟจากการวิเคราะห์ผลต่างของความร้อน [8]

จากรูปที่ 2.9 สามารถอธิบาย ลำดับการเกิด ปฏิกริยาของตัวอย่าง ได้ตามขั้นตอนดังนี้คือ A หมายถึง จุดที่เริ่มให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง

A ถึง B หมายถึง ตัวอย่างไม่เกิดปฏิกิริยา พิจารณาจาก ความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่าง ตัวอย่าง และสารอ้างอิง เป็นศูนย์

B หมายถึง จุดเริ่มปฏิกิริยาคายความร้อนของตัวอย่าง

B ถึง C หมายถึง ตัวอย่างคายพลังงานความร้อน เพิ่มมากขึ้น

D หมายถึง จุดที่ปฏิกิริยาคายความร้อน ของตัวอย่างสิ้นสุด

D ถึง E หมายถึง ตัวอย่างไม่เกิดปฏิกิริยาใด

E หมายถึง จุดเริ่มปฏิกิริยาดูดความร้อน ของตัวอย่าง

E ถึง F หมายถึง ตัวอย่างดูดพลังงานความร้อน เพิ่มมากขึ้น

G หมายถึง จุดที่ปฏิกิริยาดูดความร้อน สิ้นสุดลง

DTA ประกอบด้วย

1. เครื่องวัดอุณหภูมิ นิยมใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล (thermocouple) ชนิด Pt – Pt / Rh หรือ Ni – Ni / Cr เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 – 0.3 มิลลิเมตร
2. ถ้วยใส่ตัวอย่าง และสารอ้างอิง ทำ จากวัสดุที่มีสมบัติเนื่องต่อการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิที่ ทดลอง และมีค่า thermal conductivity สูงเพื่อให้สามารถนำ ความร้อนสู่ตัวอย่างหรือสารอ้างอิงได้ดี
3. ห้องควบคุมบรรยากาศในการทดลอง

แม้ว่า DTA จะสามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสในวัสดุได้แต่ก็มีข้อจำกัดที่ส่งผลให้ไม่สามารถนำ เทคนิคนี้มาใช้ในงานเชื่อมได้ เนื่องจากในงานเชื่อมมีอัตราการให้ความร้อนและการเย็นตัวอย่าง รวดเร็ว และมีสัญญาณไฟฟ้ารบกวนสูง ทำให้อุณหภูมิที่บันทึกได้มีค่าของสัญญาณรบกวนมาก ซึ่ง

ส่งผลให้การแยกกรณีการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิเริ่มต้นและที่อุณหภูมิสิ้นสุดทำได้ยาก นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องมีสารอ้างอิงที่มีสมบัติทางด้านความร้อน (specific heat and conductivity) ใกล้เคียงกับสารตัวอย่าง ซึ่งสำหรับงานเชื่อมคือ โลหะที่ทำการเชื่อมทำให้ยากสำหรับการวิเคราะห์นอกห้องปฏิบัติการ

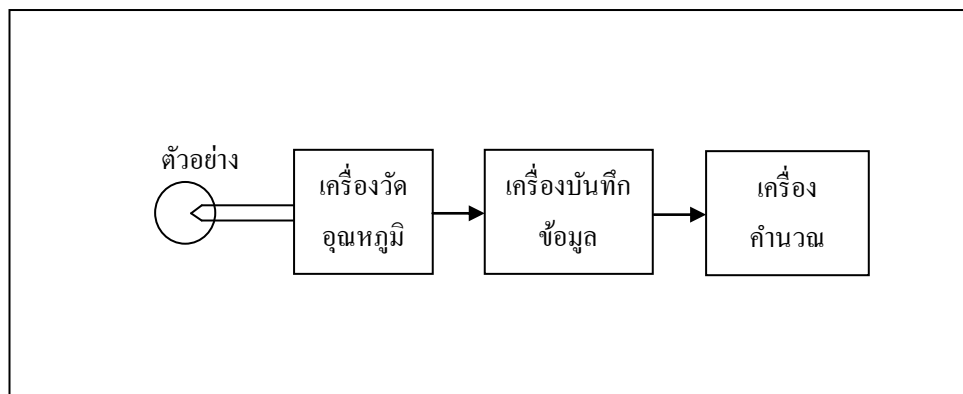
2.8 เทคนิค Single Sensor Differential Thermal Analysis (SS-DTA)

เทคนิค Single Sensor Differential Thermal Analysis (SS-DTA) [1] โดยเทคนิคนี้มีพื้นฐานมาจากเทคนิค Differential Thermal Analysis (DTA) สำหรับเทคนิค SS-DTA มีจะใช้กับการวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในลักษณะการดูดหรือการคายความร้อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายใน (enthalpy transition) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิอ้างอิง ผลต่างของอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิ จะถูกบันทึกเป็นกราฟเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ด้วย DTA แต่ความแตกต่างที่สำคัญคือ อุณหภูมิอ้างอิงที่นำมาใช้กับ SS-DTA เป็นอุณหภูมิการเย็นตัวที่ได้จากการคำนวณ thermal cycle equations [1,4] ทำให้วิธีการนี้ไม่ต้องควบคุมบรรยากาศ และใช้สารอ้างอิงในการทดสอบ จึงทำให้สามารถนำมาใช้กับการทดสอบชิ้นงานจริงนอกห้องปฏิบัติการได้ เช่น ตรวจสอบการเปลี่ยนเฟสและการตกตะกอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมโลหะ เป็นต้น สมการพื้นฐานของเทคนิค SS-DTA แสดงในสมการที่ 2.6

$$\Delta T(t) = T(t) - T_r(t) \quad (2.6)$$

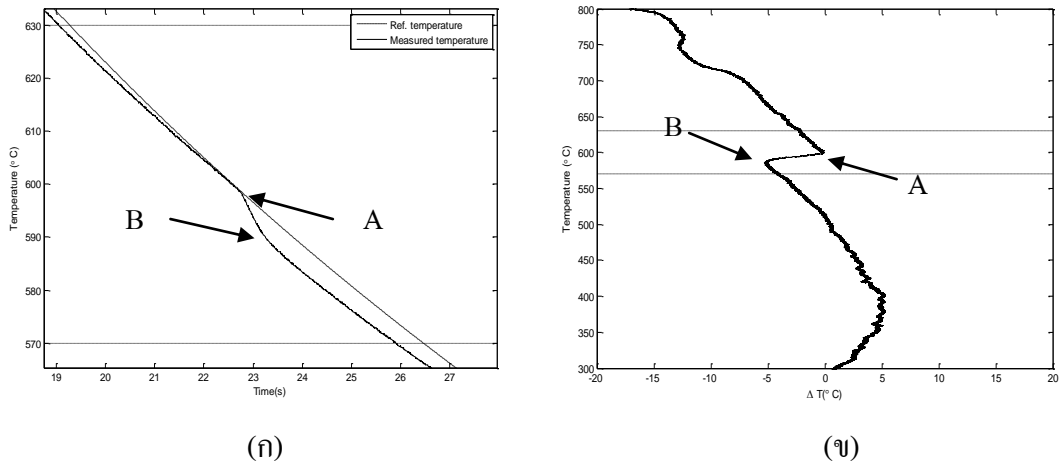
สำหรับส่วนประกอบที่สำคัญของของเครื่อง SS-DTA แสดงในรูปที่ 2.10 ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ ได้แก่

- เครื่องวัดอุณหภูมิ ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิของชิ้นงานตัว
- เครื่องบันทึกข้อมูล ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานตัวอย่าง
- เครื่องคำนวณ ทำหน้าที่คำนวณอุณหภูมิอ้างอิงและหาผลต่างอุณหภูมิ



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบหลักของเครื่อง SS-DTA

กราฟผลต่างของอุณหภูมิจะแสดงให้เห็นถึงช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนเฟสในโลหะ ตัวอย่างเช่น การเกิดการเปลี่ยนเฟสของสแตนเลส SUS 321 แสดงในรูป 2.11



รูปที่ 2.11 ผลลัพธ์ของ SS-DTA (ก) อุณหภูมิการเย็นที่ได้จากการวัดเทียบกับอุณหภูมิอ้างอิงที่ (ข) ผลต่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิจริงกับอุณหภูมิอ้างอิงที่สร้างโดยการคำนวณ thermal cycle equations

จากรูปที่ 2.11 ตำแหน่ง A แสดงถึงจุดเริ่มปฏิกิริยาคูดความร้อน ของตัวอย่าง ตำแหน่ง B หมายถึงจุดที่ปฏิกิริยาคูดความร้อนสิ้นสุดลง พบว่าจากตัวอย่างเกิดการคูดความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส สามารถตีความได้ว่าเกิดการเปลี่ยนเฟสและการตกตะกอนขึ้นในตัวอย่าง ชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นเราสามารถวิเคราะห์ได้จากแผนภาพเฟสของวัสดุชนิดนั้นๆ สำหรับวัสดุตัวอย่าง เฟสที่เกิดขึ้นเป็นการตกผลึกเป็น $Cr_{23}C_6$ เนื่องจากสแตนเลส SUS 321 จะเกิดการตกตะกอนในแบบ MC ที่เป็น TiC ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 850 องศาเซลเซียสขึ้นไป และการตกตะกอนแบบ $M_{23}C_6$ ที่เป็น $Cr_{23}C_6$ ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 850-425 องศาเซลเซียส

เทคนิค SS-DTA นั้นถูกนำไปทดสอบหาการเปลี่ยนเฟสในงานเชื่อมแบบต่างๆและในงานหล่อ แสดงในตารางที่ 2.5 โดยใช้ข้อมูลอ้างอิงจากการคำนวณ thermal cycle equations นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองสร้างอุณหภูมิการเย็นอ้างอิงจาก 3 วิธี ได้แก่ polynomial approximation, 4 –segment piecewise nonlinear approximation, piecewise linear approximation เปรียบเทียบกับวิธี thermal cycle equations เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้กับระบบตรวจจับเฟสแบบอัตโนมัติ ซึ่งรายละเอียดแสดงในบทที่ 3

ตารางที่ 2.5 In-situ Application of SS-DTA to welding Processes and Casting [9]

Process	Material	Phase Transformations	Application
SMAW	E6010 weld on C-Mn pipeline steel	Formation of PF(G), PF(I), FC(P), WF, FSP, FS(A), AF, FS(NA), B, M	CCT Diagrams
	E11018-MR multipass weld metal		Microconstituents identification
	HAZ of steel 23G2SAF		Operational window of heat inputs
	HAZ of steel 10ChSND		Development and testing of WPS
	Ni-Cu, Ni-Cu-Pd, and E308L-15 Welds in steel 304L	Solidification range and formation of Eutectic phases	Consumable development Solidification range control
GTAW	Weld metal and HAZ in steel P91	Solidification range, M_S, M_F	Selection of preheat / interpass temperature
	Weld metal and HAZ in steel 12Cr- 6.5Ni-2.5Mo and 410	Solidification range, δ -ferrite to Austenite, M_S, M_F	
	Weld metal in steels 2205 and 2304	Solidification range, δ -ferrite to Austenite, precipitation	Microstructure analysis and identification
	Weld metal in alloy 5454	Solidification range, formation of Eutectic phase	
	Weld metal and HAZ in steel A36	Formation of PF(G), FS(A), B, M	
FSW	*Stair zone and HAZ in HSLA 65	Formation of PF(G), FS(A), B	
ESW	HAZ in steel S355J2G3	Formation of PF(G), PF(I), FC(P), WF, FS(A), FS(NA)	Controlling HAZ microstructure and toughness by accelerated cooling
Casting	**Alloys 6060 and 6060 + 20% 4043	Solidification, formation of eutectic phases, precipitation	Study of simulated weld metal solidification

*FSW study conducted by Seth Norton, formal Graduate Research Associate at OSU, now America, Inc.

**Thermal data provided by Prof. Carl Cross from the Federal Institute for Material Research and Testing (BAM), Berlin, and processes b

