



การประเมินกระบวนการเชื่อมไฮบริดที่มีต่อพฤติกรรมเชิงกล ความเค้นตกค้าง และการบิดเสียรูป
สำหรับแผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP ในอุตสาหกรรมการต่อเรือ

ASSESSMENT OF HYBRID WELDING PROCESS ON MECHANICAL BEHAVIOUR,
RESIDUAL STRESS AND DISTORTION FOR TMCP STEEL PLATES IN THE
SHIPBUILDING INDUSTRY

สุเมธ หนูฉิม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2568

การประเมินกระบวนการเชื่อมไฮบริดที่มีต่อพฤติกรรมเชิงกล ความเค้นตกค้าง และการบิดเสียรูป
สำหรับแผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP ในอุตสาหกรรมการต่อเรือ



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ASSESSMENT OF HYBRID WELDING PROCESS ON MECHANICAL BEHAVIOUR,
RESIDUAL STRESS AND DISTORTION FOR TMCP STEEL PLATES IN THE
SHIPBUILDING INDUSTRY



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY
(Mechanical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2025

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การประเมินกระบวนการเชื่อมไฮบริดที่มีต่อพฤติกรรมเชิงกล ความเค้นตกค้าง และการบิดเสียรูป
สำหรับแผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP ในอุตสาหกรรมการต่อเรือ

ของ

สุเมธ หนูฉิม

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา นุณยวานิชกุล)	(รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์)
..... ที่ปรึกษาร่วม กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ณัฐชานันท์ อังสุเศรษฐี)	(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีर्मรีน)
 กรรมการ
	(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นาผล)

ชื่อเรื่อง	การประเมินกระบวนการเชื่อมไฮบริดที่มีต่อพฤติกรรมเชิงกล ความเค้นตกค้าง และการบิดเสียรูป สำหรับแผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP ในอุตสาหกรรมการต่อเรือ
ผู้วิจัย	สุเมธ หนูฉิม
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
ปีการศึกษา	2568
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ประชา นุณยวานิชกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี

งานวิจัยนี้พัฒนากระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW สำหรับเหล็ก TMCP EH36 โดยเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อม SMAW แบบดั้งเดิมในด้านความแข็งแรงทางกล การดูดซับแรงกระแทก ความเค้นตกค้าง โครงสร้างจุลภาค และการบิดตัว ผลการทดลองพบว่ากระบวนการไฮบริดมีความแข็งแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 524.35 MPa สูงกว่ากระบวนการ SMAW ประมาณร้อยละ 5.9 พลังงานดูดซับแรงกระแทกบริเวณโซนกระทบร้อน (HAZ) สูงถึง 256.57 J สูงกว่ากระบวนการ SMAW ร้อยละ 34.5 ความเค้นตกค้างสูงสุดในแนวเชื่อมของกระบวนการไฮบริดอยู่ที่ 193.4 MPa ลดลงเหลือ 39.1 MPa ที่ระยะ 30 มม. ขณะที่ SMAW มีความเค้นตกค้างสูงกว่าและการแจกแจงความเค้นแคบกว่า ส่วนการบิดตัวมุมเชิงมุมของกระบวนการไฮบริดวัดได้ 178.129° ซึ่งดีกว่าการบิดตัวจาก SMAW ที่มุมเสียรูปมากกว่า สอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วย เฟส Acicular ferrite เป็นหลัก ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความเหนียว ขณะที่ SMAW มีโครงสร้างจุลภาคหลากหลายแต่สมบัติเชิงกลโดยรวมต่ำกว่า สรุปได้ว่ากระบวนการไฮบริด GTAW-SMAW ให้คุณภาพแนวเชื่อมที่เหนือกว่า SMAW ดั้งเดิมในทุกด้าน เหมาะสมกับงานอุตสาหกรรมต่อเรือที่ต้องการความทนทานและความปลอดภัยสูงของโครงสร้างเหล็ก TMCP EH36

คำสำคัญ : กระบวนการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW, แผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP-EH36, พฤติกรรมทางกลของวัสดุ, ความเค้นตกค้าง, การบิดเสียรูป

Title	ASSESSMENT OF HYBRID WELDING PROCESS ON MECHANICAL BEHAVIOUR, RESIDUAL STRESS AND DISTORTION FOR TMCP STEEL PLATES IN THE SHIPBUILDING INDUSTRY
Author	SUMETH NUCHIM
Degree	DOCTOR OF PHILOSOPHY
Academic Year	2025
Thesis Advisor	Associate Professor Pracha Bunyawanichakul , Ph.D.
Co Advisor	Natchanun Angsuseranee

This research developed a hybrid welding process combining Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) and Shielded Metal Arc Welding (SMAW) for TMCP EH36 steel, and compared to the conventional SMAW process in terms of mechanical strength, impact energy absorption, residual stress, microstructure, and distortion. The experimental results showed that the hybrid process achieved an average ultimate tensile strength of 524.35 MPa, approximately 5.9% higher than that of SMAW. The impact energy absorption in the heat-affected zone (HAZ) reached 256.57 J, which is 34.5% greater than that of SMAW. The maximum residual stress at the weld center in the hybrid method was 193.4 MPa, decreasing to 39.1 MPa at 30 mm from the weld, while SMAW exhibited higher residual stress and narrower stress distribution. The angular distortion measured in the hybrid process was 178.129°, which is better than that of typical distortions observed in SMAW joints. This correlates with the microstructure of the hybrid welds predominantly consisting of acicular ferrite, enhancing strength and toughness, whereas SMAW welds had more diverse microstructures with overall lower mechanical properties. In conclusion, the hybrid GTAW-SMAW welding process provides superior weld quality in all aspects compared to conventional SMAW, making it well-suited for shipbuilding applications that require high durability and safety of TMCP EH36 steel structures.

Keyword : GTAW-SMAW Hybrid Welding, High Strength Steel Plate TMCP-EH36, Mechanical Behaviour, Residual Stress, Distortion

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ระดับปริญญาเอกเล่มนี้ สำเร็จสมบูรณ์ด้วยความอนุเคราะห์และร่วมมือจากท่านคณาจารย์ ผู้ทรงคุณวุฒิและบุคคลหลายฝ่ายซึ่งขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ระดับปริญญาเอกอันประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ อาจารย์ ดร.ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ที่ได้กรุณาแนะนำให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไข และปรับปรุงปริญญาานิพนธ์อย่างละเอียดรอบคอบ ตั้งแต่ต้นจนเสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาานิพนธ์

ที่ได้ช่วยพิจารณาและปรับแก้ปริญญาานิพนธ์ตลอดทั้งให้ข้อเสนอแนะงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณสถาบันการศึกษาและองค์กรต่างๆที่ได้ใช้เครื่องมือในการทดลองและบุคลากรในการทดลองต่างๆ ในปริญญาานิพนธ์ระดับปริญญาเอกเล่มนี้ อันประกอบด้วย สถาบันไทย-เยอรมัน (TGI) ศูนย์ชลบุรี, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC), สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, ศูนย์วิจัยโลหะวิทยา แอลพีเอ็น (ประเทศไทย), ศูนย์สอบเทียบเครื่องมือวัดสำหรับอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา,

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

สุดท้ายนี้ผู้เขียนหวังว่าปริญญาานิพนธ์ระดับปริญญาเอกเล่มนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมการต่อเรือ หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และผู้ที่สนใจศึกษาต่อไป

สุเมธ หนูฉิม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์.....	9
ขอบเขตของโครงการวิจัย	10
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	11
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
กรอบแนวคิดและสมมติฐาน	13
สมมติฐาน	13
กรอบแนวคิดเชิงทฤษฎี.....	13
ตัวแปรและสมมติฐาน	15
ช่องว่างของงานวิจัย	16
2.1 อุตสาหกรรมต่อเรือและซ่อมเรือ (Shipbuilding Industry)	16
2.3 การเชื่อมประสานตัวเรือ (Hull Welding)	25
2.6 การเชื่อมแบบไฮบริด TGAW-SMAW	32

2.7	วัสดุแผ่นเหล็กที่ร้อน TMCP ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่อเรือ	33
2.8	พฤติกรรมเชิงกลของวัสดุ (Mechanical Behavior)	34
2.9	โลหะวิทยางานเชื่อม (Welding Metallurgy)	48
2.10	ความเค้นตกค้าง (Residual Stress)	52
2.11	การบิดเสียรูป (Distortion)	54
2.12	การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis)	56
2.13	การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	56
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	100
3.1	การดำเนินการวิจัย.....	100
3.2	เครื่องมือวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	101
3.3	แผนการดำเนินการศึกษาวิจัยและงบประมาณโครงการวิจัย	133
3.4	การเตรียมชิ้นงานทดสอบ	133
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	135
4.1	ผลการทดลองหาปริมาณการกระจายความร้อนจากแนวเชื่อมเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อมโลหะฐาน	135
4.2	การทดสอบแรงดึง (Tensile test).....	140
4.3	การทดสอบการดัดโค้ง (Bending test)	149
4.4	การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact Test)	152
4.5	การทดสอบความแข็ง (Hardness test).....	153
4.6	การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา.....	155
4.7	การทดลองหาค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานหลังการเชื่อม	162
4.8	การทดลองหาค่าการบิดเสียรูปของชิ้นงานภายหลังการเชื่อม	164
บทที่ 5	สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	167

5.1 สรุปผล.....	167
5.2 อภิปรายผล	169
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	181
บรรณานุกรม	182
ประวัติผู้เขียน.....	193



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของงานเชื่อมแต่ละประเภท	6
ตาราง 2 เกรดเหล็ก TMCP ที่ใช้สำหรับการต่อเรือ	34
ตาราง 3 ตัวอย่างคุณสมบัติเหล็ก TMCP - ASTM EH36 เกรดเหล็กแผ่นต่อเรือ	34
ตาราง 4 ตัวอย่างค่าคงที่และของวัสดุชนิดต่าง ๆ	41
ตาราง 5 ผลการตรวจสอบทางเคมีของเหล็กแผ่น EH36 (%wt)	103
ตาราง 6 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง TMCP EH36 steel	104
ตาราง 7 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม TIG : ER 70S-2	104
ตาราง 8 คุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อม TIG : ER 70S-2	104
ตาราง 9 พารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมแบบ (GTAW)	105
ตาราง 10 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม SMAW : E7016	105
ตาราง 11 คุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อม SMAW : E7016	105
ตาราง 12 พารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม โดยการเชื่อมด้วยมือ (SMAW) ...	106
ตาราง 13 พารามิเตอร์สำหรับการตั้งของเครื่อง Xstress3000 ก่อนการวัดความเค้นตกค้าง ...	129
ตาราง 14 การเปรียบเทียบคุณสมบัติจากผลการทดสอบกับการจำลองด้วย FEM	139
ตาราง 15 ผลการทดสอบแรงดึงในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW..	141
ตาราง 16 ผลการทดสอบแรงดึงของแนวเชื่อมไฮบริด GTAW และ SMAW มีการเจียรในแนวเชื่อม	146
ตาราง 17 แสดงผลเปรียบเทียบความเค้น	148
ตาราง 18 ผลการทดสอบการดัดโค้งในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW	150

ตาราง 19 ผลการทดสอบแรงกระทำในชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW	153
ตาราง 20 ผลการตรวจสอบทางเคมีของเหล็กแผ่น EH36 (%wt)	156
ตาราง 21 ผลการตรวจสอบทางเคมีของบริเวณแนวเชื่อม Weld metal 1 (SMAW) (%wt)	159
ตาราง 22 ผลการตรวจสอบทางเคมีของบริเวณแนวเชื่อม Weld metal 2 (GTAW+SMAW) (% wt)	160
ตาราง 23 ผลการทดลองวัดความบิดเบี้ยวในการเชื่อมเหล็กกล้า EH36	165
ตาราง 24 ผลการเปรียบเทียบข้อดีของการเชื่อมแบบไฮบริดกับแบบ SMAW ปกติ	179



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 รูปตัวอย่างเรือที่ต่อจากคู้ต่อเรือขนาดใหญ่ในประเทศเกาหลีใต้	1
ภาพประกอบ 2 ตัวอย่างการประกอบสร้างตัวเรือในคู้ต่อเรือ	2
ภาพประกอบ 3 การประกอบต่อรวมกันเป็นบล็อกตัวเรือ (Hull Fabrication Block).....	2
ภาพประกอบ 4 ตัวอย่างการเชื่อมอาร์คในงานต่อเรือ	3
ภาพประกอบ 5 เรือ เอ็น พี สุราษฎร์ธานี 1 สร้างโดยคู้ต่อเรือในประเทศไทย.....	3
ภาพประกอบ 6 การเชื่อมประสานแผ่นเหล็กในการประกอบโครงสร้างเรือ	5
ภาพประกอบ 7 การเชื่อมประสานแผ่นเหล็กในการประกอบโครงสร้างเหล็ก.....	5
ภาพประกอบ 8 กระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคกลุ่ม GTAW.....	7
ภาพประกอบ 9 กระบวนการเชื่อมอาร์คอีเลคโตรดหุ้มฟลักซ์ SMAW	8
ภาพประกอบ 10 ลำดับขั้นตอนการเชื่อมแบบไฮบริด (Pass A - GTAW, Pass B,C,D - SMAW). 8	
ภาพประกอบ 11 รูปแบบของกระบวนการต่อเรือโดยทั่วไป.....	20
ภาพประกอบ 12 กระบวนการการสร้างเรือฟรีเกตของ DSME	21
ภาพประกอบ 13 ขั้นตอนการตัดแผ่นเหล็ก	22
ภาพประกอบ 14 การตัดแผ่นเหล็กให้โค้งตามแบบ	22
ภาพประกอบ 15 ขั้นตอนการประกอบ Component Assembly.....	23
ภาพประกอบ 16 ขั้นตอนการประกอบบล็อก (Block Fabrication).....	24
ภาพประกอบ 17 ขั้นตอนการติดตั้ง Outfitting และอุปกรณ์สำหรับระบบต่างๆ.....	24
ภาพประกอบ 18 วงจรไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมอาร์คโดยใช้เลคโตรดหุ้มฟลักซ์.....	26
ภาพประกอบ 19 บริเวณที่เกิดการอาร์คจากการเชื่อม SMAW.....	27
ภาพประกอบ 20 ค่าแรงดัน-กระแส (แรงดันคงที่, กระแสคงที่)	28
ภาพประกอบ 21 การเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคกลุ่ม (TIG-GTAW).....	31

ภาพประกอบ 22 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve)	37
ภาพประกอบ 23 เส้นโค้งความเค้น - ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก.....	38
ภาพประกอบ 24 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก..	39
ภาพประกอบ 25 ชิ้นงานทดสอบการดัดโค้ง	42
ภาพประกอบ 26 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำการทดสอบการดัดโค้ง แบบต่างๆ.....	43
ภาพประกอบ 27 วิธีการทดสอบการดัดโค้งแบบ Pressing bending method.....	44
ภาพประกอบ 28 วิธีการทดสอบการดัดโค้งแบบ Winding bending method	45
ภาพประกอบ 29 วิธีการทดสอบการดัดโค้งแบบ V-block bending method	45
ภาพประกอบ 30 Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียว (a) และวัสดุเปราะ (b)	46
ภาพประกอบ 31 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpyและ Izod	47
ภาพประกอบ 32 การสะท้อนของรังสีเอ็กซ์.....	54
ภาพประกอบ 33 ภาพการบิดตัวเมื่อเวลาผ่านไป.....	55
ภาพประกอบ 34 เครื่องเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสปกคลุม (GTAW).....	102
ภาพประกอบ 35 เครื่องเชื่อมอาร์คโดยใช้อิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์ (SMAW).....	102
ภาพประกอบ 36 ตัวอย่างแบบรูปตัดกึ่งกลางลำเรือบรรทุกสินค้า (Mid ship section)	103
ภาพประกอบ 37 แสดงการเชื่อมตามกระบวนการใช้แก๊สปกคลุมการเชื่อมด้วยมือโดยใช้ลวดเชื่อมชนิด AWS A5.18 ER 70S-6.....	107
ภาพประกอบ 38 Heat source model	108
ภาพประกอบ 39 การจำลอง FEM GTAW	110
ภาพประกอบ 40 การจำลอง FEM SMAW.....	110
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Hexahedral mesh ภาพประกอบ 41	111
ภาพประกอบ 42 Hexahedral mesh	112
ภาพประกอบ 43 Automatic mesh.....	115

ภาพประกอบ 44 ขนาดอิทธิพันธ์เล็กสุดที่ 0.25 mm.....	116
ภาพประกอบ 45 การทำ Mesh Independent Study.....	116
ภาพประกอบ 46 เครื่องเก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและเทอร์โมคัปเปิล K-type & R-type.....	117
ภาพประกอบ 47 การวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างการเชื่อมด้วยการติดตั้งเทอร์โมคัลป์เปิ้ล	118
ภาพประกอบ 48 ตำแหน่งในการติดตั้งเทอร์โมคัลป์เปิ้ล.....	118
ภาพประกอบ 49 แบบจำลองสามมิติของกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW ..	119
ภาพประกอบ 50 ลักษณะของรอยแตกที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข.....	119
ภาพประกอบ 51 ตำแหน่งที่ใช้วัดค่าการกระจายอุณหภูมิทั้ง 4 จุด	120
ภาพประกอบ 52 เครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Instron: UTM 2000 kn.....	120
ภาพประกอบ 53 ซึ่่งงานทดสอบแรงดึง (Tensile testing) มาตรฐาน ASTM E8M-22	121
ภาพประกอบ 54 ตัวอย่างการใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์ Total deformation (Tension)	121
ภาพประกอบ 55 เครื่องทดสอบการดัดโค้ง โดยวิธี Pressing Bend Method	122
ภาพประกอบ 56 ซึ่่งงานตัวอย่างทดสอบการดัด	122
ภาพประกอบ 57 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Tester)	123
ภาพประกอบ 58 ตัวอย่างทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E23-06	124
ภาพประกอบ 59 เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น HMV-G.....	124
ภาพประกอบ 60 บริเวณตำแหน่งกจุดทดสอบทั้ง 3 เส้น เส้นละ 14 จุด	125
ภาพประกอบ 61 โครงสร้างของโลหะบริเวณอิทธิพลทางความร้อน	126
ภาพประกอบ 62 กล้องจุลทรรศน์ลำแสงเลเซอร์แบบสามมิติ.....	127
ภาพประกอบ 63 ตำแหน่งของจุดที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา.....	127
ภาพประกอบ 64 การทดลองหาปริมาณความเค้นตกค้างโดยใช้เครื่อง Xstress3000.....	128
ภาพประกอบ 65 หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สำหรับการวัดความเค้นตกค้าง.....	129

ภาพประกอบ 66 การวัดการบิดเบี้ยวของแนวเชื่อมโดยใช้เครื่อง Coordinate Measuring Machine (CMM).....	131
ภาพประกอบ 67 ตัวอย่างการใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์ Total deformation	132
ภาพประกอบ 68 ตัวอย่างการใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์ Equivalent (von-Mises) Stress	132
ภาพประกอบ 69 แผนการดำเนินงานศึกษาวิจัย	133
ภาพประกอบ 70 ชี้นงานที่จัดเตรียม	134
ภาพประกอบ 71 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัลบเปิ้ล.....	136
ภาพประกอบ 72 การกระจายอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขบริเวณชี้นงาน(ไม่รวมรอยเชื่อม).....	137
ภาพประกอบ 73 การกระจายตัวอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อมรอบแรกด้วย GTAW	138
ภาพประกอบ 74 การกระจายตัวอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อมรอบที่สองด้วย SMAW	138
ภาพประกอบ 75 การกระจายตัวอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อมรอบที่สามด้วย SMAW.....	138
ภาพประกอบ 76 การกระจายตัวอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อมรอบที่สี่ด้วย SMAW	139
ภาพประกอบ 77 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิจากการทดลองและการจำลองด้วย FEM.....	139
ภาพประกอบ 78 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในชี้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW (a) ชี้นงานตัวอย่างที่ 1 (b) ชี้นงานตัวอย่างที่ 2.....	140
ภาพประกอบ 79 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในชี้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW (a) ชี้นงานตัวอย่างที่ 3 (b) ชี้นงานตัวอย่างที่ 4.....	141
ภาพประกอบ 80 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเฉลี่ย 4 ชี้น ในชี้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW	141
ภาพประกอบ 81 รอยแตกของชี้นงานทดสอบแรงดึงในชี้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW	142
ภาพประกอบ 82 ค่าความเค้นของ Middle principal stress สูงสุดเท่ากับ 486.36 MPa	143
ภาพประกอบ 83 ค่าความเค้นของ Maximum stress สูงสุดเท่ากับ 621.86 MPa.....	143

ภาพประกอบ 84 ค่าความเครียด Total deformation สูงสุดเท่ากับ 0.070594 mm	144
ภาพประกอบ 85 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW มีการเจียรในแนวเชื่อม (a) ชิ้นงานตัวอย่างที่ 1 (b) ชิ้นงานตัวอย่างที่ 2	145
ภาพประกอบ 86 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW มีการเจียรในแนวเชื่อม (a) ชิ้นงานตัวอย่างที่ 3 (b) ชิ้นงานตัวอย่างที่ 4	145
ภาพประกอบ 87 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเฉลี่ย 4 ชิ้น ในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW โดยมีการเจียรในแนวเชื่อม	146
ภาพประกอบ 88 รอยแตกของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของแนวเชื่อมไฮบริดโดยมีการเจียรในแนวเชื่อม	146
ภาพประกอบ 89 ค่าความเค้นของ Middle principal stress สูงสุดเท่ากับ 421.12 MPa	147
ภาพประกอบ 90 ค่าความเค้นของ Maximum shear stress สูงสุดเท่ากับ 530.49 MPa.....	147
ภาพประกอบ 91 ค่าความเครียด Total deformation สูงสุดเท่ากับ 0.025174 mm	148
ภาพประกอบ 92 เปรียบเทียบค่า UT และ YT ของชิ้นงานสี่รูปแบบ	149
ภาพประกอบ 93 ผลการทดสอบการดัดโค้ง (Side bend) ของการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW	151
ภาพประกอบ 94 ผลการทดสอบการดัดโค้ง (Face bend) ของการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW	151
ภาพประกอบ 95 ผลการทดสอบการดัดโค้ง (Root bend) ของการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW	151
ภาพประกอบ 96 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) ภายหลังจากการทดสอบแรงกระแทกในชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW	152
ภาพประกอบ 97 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ภายหลังจากการทดสอบแรงกระแทกในชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW	152

ภาพประกอบ 98 บริเวณตำแหน่งจุดทดสอบทั้ง 14 จุดของกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW	153
ภาพประกอบ 99 ผลการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ของกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW	154
ภาพประกอบ 100 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างมหภาค	157
ภาพประกอบ 101 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยเชื่อมเหล็กกล้า TMCP เกรด EH36 ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW.....	158
ภาพประกอบ 102 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณเนื้อโลหะฐานของเหล็กกล้า EH36 (Base metal)	158
ภาพประกอบ 103 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน HAZ1 (SMAW)	159
ภาพประกอบ 104 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมอาร์กอีเล็คโตรดหุ้มฟลักซ์ Weld metal 1 (SMAW)	160
ภาพประกอบ 105 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อมด้วยวิธีก๊าซทังสเตนอาร์ค Weld metal 2 (GTAW)และเชื่อมทับด้วย SMAW.....	161
ภาพประกอบ 106 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน HAZ 2 (GTAW).....	162
ภาพประกอบ 107 การจำลองความเค้นตกค้างของเหล็ก EH36 โดยใช้โปรแกรม Ansys.....	162
ภาพประกอบ 108 ความเค้นตกค้างในทิศทางตามขวางของแนวเชื่อม.....	163
ภาพประกอบ 109 ตำแหน่งจุดวัดค่าการบิดเสียรูปเชิงมุมของชิ้นงานภายหลังการเชื่อม	164
ภาพประกอบ 110 การจำลองความบิดเบี้ยวของการเชื่อมชนสำหรับแผ่นเหล็ก EH36	165
ภาพประกอบ 111 รูปเปรียบเทียบตำแหน่งการบิดเสียรูประหว่างผลการทดลองจากเครื่อง CMM และการจำลองเชิงตัวเลข	166

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมการต่อเรือขนาดใหญ่ (ภาพประกอบ 1) วัสดุที่ใช้ในการประกอบเชื่อมส่วนใหญ่นั้นคือแผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP เกรดต่างๆเช่น เกรด AH เกรด DH เกรด EH เกรด FH ที่นำมาประกอบเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างตัวเรือ (Hull Structure) โดยลำดับขั้นตอนหลักของการประกอบสร้างตัวเรือในคู้ต่อเรือ(ภาพประกอบ 2) เริ่มจากการตัดแผ่นเหล็กและประกอบขึ้นส่วนย่อย (Pre-Fabrication) และนำชิ้นส่วนย่อยมาประกอบต่อรวมกันเป็นบล็อก (Hull Fabrication) (ภาพประกอบ 3) หลังจากนั้นนำโครงสร้างบล็อกมาประกอบกันระหว่างบล็อกแต่ละบล็อกจนเป็นโครงสร้างตัวเรือทั้งลำ (Hull Erection) โดยทุกขั้นตอนในการประกอบแผ่นเหล็กเข้าด้วยกันจะต้องมีกระบวนการที่ทำให้โลหะแผ่นเหล็กหลอมละลายติดกันโดยอาศัยความร้อนจากการอาร์ค (Arc) ที่เกิดขึ้นระหว่างลวดเชื่อมกับแผ่นเหล็ก (ภาพประกอบ 4) หลังจากนั้นก็ทำการติดตั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่สำคัญในเรือ ระบบท่อทาง ระบบขับเคลื่อนซึ่งประกอบด้วยเครื่องจักรใหญ่ ชุดเกียร์ ไบจอร์ เครื่องจักรช่วย ระบบไฟฟ้า ระบบสื่อสารและเดินเรือ ระบบความปลอดภัย งานตกแต่งภายในเรือ งานสี ฯลฯ จนถึงการนำเรือลงน้ำและทดลองหน้าท่าและทดสอบทางทะเลจนถึงส่งมอบเรือเพื่อนำไปใช้งานต่อไป



ภาพประกอบ 1 รูปตัวอย่างเรือที่ต่อจากคู้ต่อเรือขนาดใหญ่ในประเทศเกาหลีใต้

ที่มา: Economy, Business And Markets, 20/11/2017, www.financialtribune.com



ภาพประกอบ 2 ตัวอย่างการประกอบสร้างตัวเรือในอุ้งต่อเรือ

ที่มา: www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=16346



ภาพประกอบ 3 การประกอบต่อรวมกันเป็นบล็อกตัวเรือ (Hull Fabrication Block)

ที่มา : www.thefabricator.com



ภาพประกอบ 4 ตัวอย่างการเชื่อมอาร์คในงานต่อเรือ

ที่มา : www.hgg-group.com

ตัวอย่างเรือ ที่สร้างจากบริษัทต่อเรือในประเทศไทย บริษัท อิตัลไทยมารีน จำกัด (ภาพประกอบ 5) เรือ เอ็น พี สุราษฎร์ธานี 2 (NP Suratthani 2) เป็นเรือบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ ขนาด 2,750 เดทเวทตัน) ขนาด: ความยาว 83.53 เมตร ความกว้าง 16 เมตร ความลึก 6.50 เมตร สามารถรองรับตู้คอนเทนเนอร์ได้ 156 ทีอียู



ภาพประกอบ 5 เรือ เอ็น พี สุราษฎร์ธานี 1 สร้างโดยอู่ต่อเรือในประเทศไทย

ที่มา : www.fleetmon.com

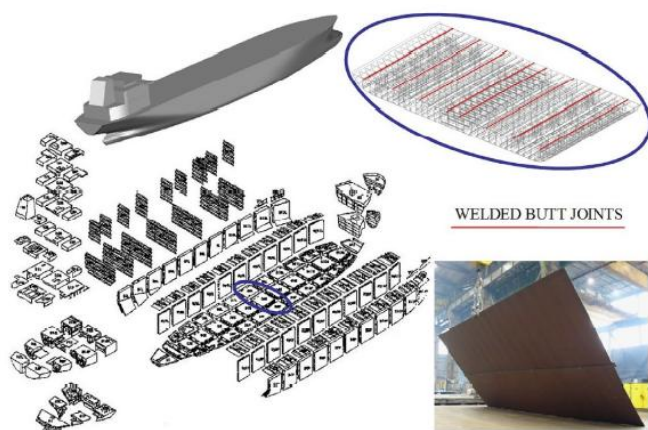
(Sirisatien et al., 2016) ปรากฏการณ์การบิดงอของชิ้นงาน (Workpiece Distortion) ถือเป็นความท้าทายเชิงวิศวกรรมที่สำคัญในกระบวนการเชื่อมโลหะ ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจาก

ปฏิสัมพันธ์อันซับซ้อนของปัจจัยหลายประการ ได้แก่ พลังงานความร้อนจำเพาะที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (Specific Heat Input), การกระจายตัวของสนามอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform Temperature Field Distribution), รูปทรงทางเรขาคณิตของรอยต่อ (Joint Geometry), และสมบัติเชิงกล-ความร้อนของวัสดุ (Thermo-mechanical Properties)

กลไกพื้นฐานของปรากฏการณ์นี้เกิดจากการที่ปัจจัยข้างต้นเหนี่ยวนำให้เกิดสนามความเค้นทางความร้อน (Thermal Stress Field) ขึ้นภายในโครงสร้าง เมื่อค่าความเค้นเฉพาะที่ (Local Stress) สูงเกินขีดจำกัดการครากของวัสดุ (Material's Yield Strength) จะส่งผลให้เกิดการเสียรูปถาวรในเชิงพลาสติก (Permanent Plastic Deformation) และทำที่ที่สุดจะทิ้งสถานะความเค้นตกค้าง (Residual Stress State) ไว้ในโครงสร้างภายหลังการเย็นตัวลงสู่สภาวะสมดุล

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทของอุตสาหกรรมการต่อเรือ ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นถือเป็นปัจจัยวิกฤตที่บั่นทอนบูรณภาพของโครงสร้าง (Structural Integrity) อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเป็นตัวเร่งให้เกิดการขยายตัวของรอยร้าวที่นำไปสู่การแตกหัก (Fracture Propagation) และยังลดทอนเสถียรภาพต่อการโก่งเดาะ (Buckling Stability) ของแผ่นเปลือกเรือและชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอื่นๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงทนทานและอายุการใช้งานของตัวเรือโดยรวม

ปัญหาดังกล่าวที่พบในขั้นตอนของงานประกอบเชื่อมโครงสร้างตัวเรือตัวเรือ โดยเฉพาะการเชื่อมประสานเหล็กแผ่น (Butt Joints) เพื่อประกอบเป็นตัวเรือ (ภาพประกอบ 6) และงานประกอบเชื่อมโครงสร้างเหล็กทั่วไป (ภาพประกอบ 7) คือการเกิดข้อบกพร่องในแนวเชื่อมและการบิดเสียรูปหลังจากจากการเชื่อมประกอบ (Welding and Fabrication) ที่อาจเกิดจากขั้นตอนการเชื่อมประกอบ โดยการใช้กระบวนการเชื่อมที่ใช้ในปัจจุบันนั้นยังอาจจะมีคุณสมบัติไม่เหมาะสม อันเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ถูกเชื่อม การเกิดความเค้นตกค้าง การบิดเบี้ยวเสียรูปของโครงสร้างที่เกิดจากความร้อน และสามารถส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางกลได้อีกด้วย



ภาพประกอบ 6 การเชื่อมประสานแผ่นเหล็กในการประกอบโครงสร้างเรือ

ที่มา : www.sciencedirect.com



ภาพประกอบ 7 การเชื่อมประสานแผ่นเหล็กในการประกอบโครงสร้างเหล็ก

ที่มา : www.advancetechengg.com

ในกระบวนการผลิตและประกอบวัสดุเข้าด้วยกันสำหรับโครงสร้างตัวเรือตัวเรือและโครงสร้างเหล็กทั่วไปนั้น มีหลายวิธีการ โดยส่วนใหญ่จะใช้กระบวนการเชื่อมประสาน (Welding Process) เป็นกรรมวิธีหลัก เนื่องจากสามารถให้ความร้อนเพื่อหลอมละลายกับเหล็กให้สามารถเชื่อมต่อประสานเป็นชิ้นส่วนตามรูปแบบได้อย่างสมบูรณ์และมีความแข็งแรงมากกว่ากระบวนการต่อประสานแบบอื่น ซึ่งในกระบวนการเชื่อมที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมปัจจุบันมีหลากหลายกระบวนการ โดยคู่ต่อเรือโดยทั่วไปนั้นปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้ กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) และกระบวนการเชื่อมอื่นๆรองลงมา เช่น กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW) กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะก๊าซปกคลุม (GMAW) หรือที่เรียกกันว่าการเชื่อม

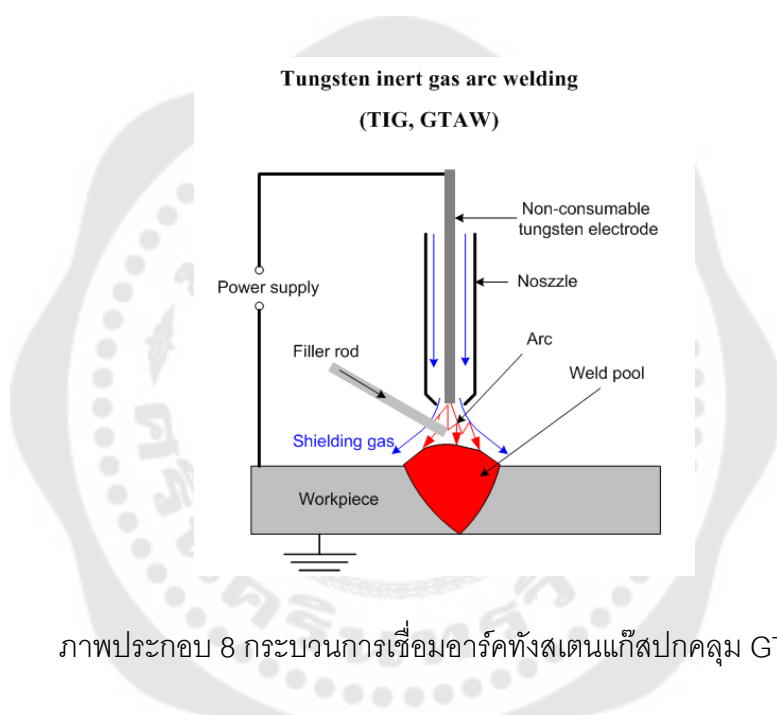
มิก (MIG) กระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสตีล (GTAW) หรือที่เรียกกันว่าการเชื่อมทิก (TIG) เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการเชื่อมต่างๆ นั้นมีข้อเด่นข้อด้อยของแต่ละกระบวนการแตกต่างกัน โดยในกระบวนการเชื่อมแต่ละกระบวนการเชื่อมนั้นก็จะมีจุดเด่นและจุดด้อยที่เหมือนกันและแตกต่างกัน ในปัจจุบันเริ่มมีการนำกระบวนการเชื่อมสองกระบวนการมารวมกันโดยใช้จุดเด่นและข้อดีของแต่ละกระบวนการทั้งนี้เพื่อการเพิ่มคุณภาพของงานเชื่อมและลดข้อบกพร่องในวัสดุงานที่นำมาเชื่อม ซึ่งการนำกระบวนการเชื่อมสองกระบวนการมารวมกันนี้ว่ากระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด (Hybrid Welding) และแนวโน้มในอนาคตกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริดจะเป็นที่นิยมในวงการอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้นโดยเฉพาะในการเชื่อมวัสดุประเภทเหล็กกล้าที่เป็นลักษณะแผ่นและท่อเพื่อผลทางด้านคุณภาพของงานเชื่อมและลดปัญหาและผลกระทบที่เกิดขึ้นภายหลังงานเชื่อม

แนวคิดในงานวิจัยนี้จึงเป็นการนำเสนอการเปลี่ยนกรรมวิธีการเชื่อม จากแบบเดิมคือกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ (SMAW) มาเป็นกรรมวิธีการเชื่อมแบบใหม่ ซึ่งกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสตีล GTAW ซึ่งมีข้อดีคือลดการบิดเบี้ยวเสียรูปของแผ่นเหล็กภายหลังการเชื่อม และคุณภาพงานเชื่อมที่ดีกว่ากระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ (SMAW) แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ที่ต้นทุนการเชื่อมของกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสตีล GTAW ที่มีค่าใช้จ่ายสูงกว่า SMAW (ตาราง 1) และไม่สามารถเชื่อมวัสดุเหล็กที่มีความหนาเกิน 4 มิลลิเมตรได้ จึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสตีล GTAW ในการเชื่อมสำหรับแนวเชื่อมแรกและแนวเชื่อมต่อมาใช้กระบวนการเชื่อมแบบเดิมคือกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ (SMAW)

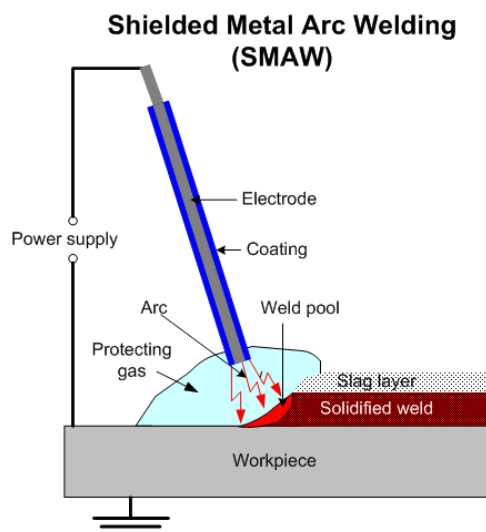
ตาราง 1 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของงานเชื่อมแต่ละประเภท

METHOD	EQUIPMENT COST	ENERGY COST (Gas and Power)	LABOR COST
GMAW	Medium	Medium	Medium
SMAW	Low / Medium	Low	Low / Medium
GTAW	Medium / High	High	Medium
FGW	Low	Medium	High
FCAW	Medium	Medium	Medium

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกกระบวนการเชื่อมไฮบริดโดยการเชื่อมผสมกันสำหรับสองกระบวนการในหนึ่งรอยต่อชนคือกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสปกคลุม GTAW (ภาพประกอบ 8) และกระบวนการเชื่อมอาร์คอิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์ SMAW (ภาพประกอบ 9) โดยลำดับขั้นตอนการเชื่อมแนวแรก (Pass A) เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสปกคลุม GTAW และแนวเชื่อมแนวต่อมา (Pass B,C,D) จะเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คอิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์ SMAW ซึ่งการเชื่อมประสานทั้งสองกระบวนการรวมกันเรียกว่ากระบวนการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW (ภาพประกอบ 10)

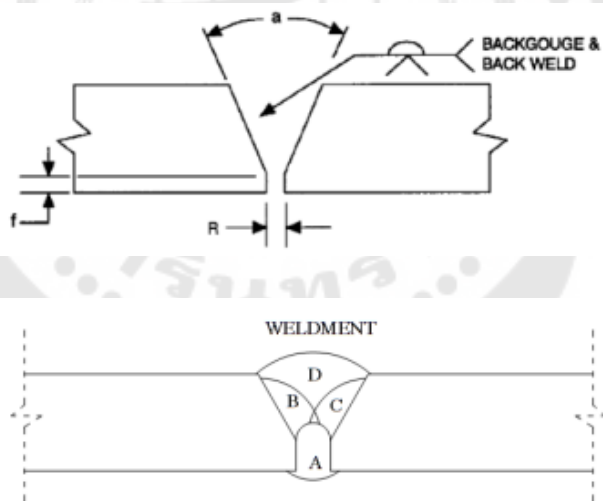


ที่มา : www.substech.com



ภาพประกอบ 9 กระบวนการเชื่อมอาร์คอิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์ SMAW

ที่มา : www.substech.com



ภาพประกอบ 10 ลำดับขั้นตอนการเชื่อมแบบไฮบริด (Pass A - GTAW, Pass B,C,D - SMAW)

ที่มา : P. P. Thakur, Dr. A. N. Chapgaon, "Effect of GTAW-SMAW hybrid welding process parameters on hardness of weld" , International Journal of Engineering Research and Technology. ISSN 0974-3154 Volume 10, Number 1 (2017)

โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบจากการเชื่อมบริเวณรอยต่อเชื่อมชิ้นงานที่เป็นวัสดุแผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP เกรด EH36 ที่นิยมใช้เป็นวัสดุที่สำคัญในส่วนของโครงสร้างตัวเรือ (Hull Structure) โดยการเชื่อมประสานด้วยกระบวนการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW เปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมแบบเดิมที่ใช้การเชื่อมกระบวนการเดียวคือกระบวนการเชื่อมอาร์กอีเลคโตรดหุ้มฟลักซ์ SMAW โดยศึกษาทดลองเปรียบเทียบทางด้านพฤติกรรมเชิงกลในการรับภาระโหลดและแรงกระทำต่างๆที่สำคัญเช่นค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength), ค่าความต้านทานการดัดโค้ง (Bending Strength), ค่าความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact), ความเค้นตกค้างหรือความเค้นที่เหลืออยู่ (Residual stress) และการบิดเสียรูป (Distortions) ตลอดจนโครงสร้างจุลภาค (Micro structure) ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากการเชื่อม โดยจะมุ่งเน้นผลการวิเคราะห์ไปที่บริเวณเนื้อวัสดุ (Base metal) บริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) บริเวณรอยเขตรอยต่อของชิ้นงานแนวเชื่อม (Fusion line) และบริเวณผลกระทบจากความร้อนจากการเชื่อม (HAZ) ให้เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบและวิเคราะห์ตามหลักมาตรฐานสากล ดังนั้นจากจุดเด่นของกระบวนการเชื่อมของทั้งสองกระบวนการเชื่อมที่นำมารวมกันเป็นกระบวนการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW นั้นคาดหวังว่าผลการวิจัยและทดลองที่ได้รับจะทำให้แนวเชื่อมที่ผ่านกระบวนการมีคุณภาพที่สูงขึ้น และสามารถใช้เป็นข้อมูลเพื่อประกอบในการพิจารณานำไปใช้งานในอุตสาหกรรมการเชื่อมประกอบโครงสร้างตัวเรือ เพื่อการพัฒนางานเชื่อมที่สอดคล้องและเหมาะสมกับการใช้งานในสถานะเฉพาะได้ดีกว่ากระบวนการเชื่อมที่ใช้งานในปัจจุบัน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเชื่อมโครงสร้างตัวเรือ (Hull Structure) โดยการเชื่อมประสานแผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP เกรด ASTM A131 EH36 ด้วยกระบวนการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการเชื่อมแบบไฮบริดที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของงานเชื่อมประสานแผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP เกรด EH36 ในด้านการลดการบิดเสียรูปและเพิ่มคุณสมบัติทางกล เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมแบบเดิมคือกระบวนการเชื่อมอาร์กอีเลคโตรดหุ้มฟลักซ์ SMAW
3. เพื่อวิเคราะห์ พฤติกรรมเชิงกล ความเค้นตกค้าง และการบิดเสียรูป สำหรับแผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP เกรด EH36 ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่อเรือ (Shipbuilding Industry) ที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW และประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ทดแทนกระบวนการเชื่อมแบบเดิม SMAW

ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้สำหรับงานวิจัยที่เป็นชิ้นงานทดสอบ คือ แผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP (Thermo Mechanical Control Process) ที่มีความหนาคงที่ 12 มิลลิเมตร โดยเชื่อมแบบรอยต่อชน (Butt Joint) ด้วยช่างเชื่อมที่ไปรับรองผ่านการทดสอบและรับรองตามมาตรฐานฝีมือแรงงาน สำหรับการเชื่อมท่าราบ (1G)

2. ชิ้นงานที่นำมาทดลองใช้กระบวนการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW และกระบวนการเชื่อมอาร์กอีเลคโตรดหุ้มฟลักซ์ SMAW โดยกำหนดปัจจัยหลักที่สำคัญสำหรับการเชื่อม 4 ปัจจัย คือ กระแสไฟเชื่อมสำหรับ GTAW (GTAW Welding Current ; A), กระแสไฟเชื่อมสำหรับ SMAW (SMAW Welding Current ; A), อัตราการไหลก๊าซคลุมสำหรับ GTAW (lpm) และอุณหภูมิในการเชื่อมแนวถัดไป (Interpass Temperature ; °C)

3. การทดสอบพฤติกรรมทางกล

3.1 การทดสอบด้วยแรงดึง (Tensile Testing) เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงดึง เช่น ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) และค่าความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent Elongation) ของชิ้นงานเชื่อม

3.2 การทดสอบการดัดโค้ง (Bending Testing) เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุหลังจากทำการดัดโค้ง โดยพิจารณาที่ผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบตรงบริเวณที่ทำการดัดโค้งว่าเกิดรอยแตกหรือไม่

3.3 การทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) เพื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการรับแรงกระแทกของชิ้นงานที่ถูกรเชื่อม

3.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) เพื่อเปรียบเทียบถึงค่าความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal: WM) และเขตบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ของชิ้นงานเชื่อม

3.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค จะพิจารณาถึงความแตกต่างของลักษณะเกรนบริเวณเนื้อเชื่อม (Weld Metal: WM) เขตบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) และบริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal: BM) และบริเวณรอยแตกหัก (Fracture)

4. การทดสอบความเค้นตกค้าง

4.1 การตรวจสอบวิเคราะห์ความเค้นตกค้างของวัสดุที่เกิดจากการเชื่อมด้วยการหักเหของเอ็กซ์เรย์ (Residual Stress Measurement Technique using X-ray Diffraction; XRD, for Industrial Component)

5. การทดสอบการบิดเสียรูป

5.1 การตรวจสอบการบิดเสียรูปโดยการวัดและบันทึกอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล ขณะเชื่อมชิ้นงานทดสอบตามพารามิเตอร์ที่กำหนดและวัดระยะการบิดตัวของชิ้นงานทดสอบหลังการเชื่อม

6. การจำลองเชิงตัวเลข

6.1 การจำลองเชิงตัวเลข (Finite element method) เพื่อเปรียบเทียบกับความร้อนของรอยเชื่อมจากการทดลอง การทดสอบแรงดึงจากการทดลอง การทดสอบความเค้นตกค้างจากการทดลอง การทดสอบการบิดเสียรูปจากการทดลอง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. เป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่ โดยการใช้กรรมวิธีการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW สำหรับการเชื่อมแผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่อเรือ ทดแทนการใช้กรรมวิธีการเชื่อมอาร์คอีเลคโตรดหุ้มฟลักซ์ SMAW ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาการเชื่อมประกอบโครงสร้างตัวเรือในอุตสาหกรรมต่อเรือทั้งในระดับประเทศและระดับสากล
2. ทราบถึงปัจจัยและอิทธิพลของการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW ที่มีผลต่อพฤติกรรมเชิงกล, ความเค้นตกค้างและการบิดเสียรูป สำหรับแผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่อเรือ
3. ได้กราฟความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่างตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อคุณภาพงานเชื่อมแผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP ในกระบวนการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. กระบวนการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW (GTAW-SMAW Hybrid Welding) คือ กระบวนการเชื่อมอาร์คแบบผสมระหว่างกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสปกคลุม GTAW สำหรับการเชื่อมแนวแรก (Root Pass) และกระบวนการเชื่อมอาร์คอีเลคโตรดหุ้มฟลักซ์ SMAW ในการเชื่อมแนวอื่นๆต่อมา (Interpass)
2. แผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP คือวัสดุเหล็กที่ผลิตด้วยเทคโนโลยี Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) เกรด EH36 ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการต่อเรือและงานนอกชายฝั่ง
3. พฤติกรรมทางกลของวัสดุ (Mechanical Behaviour) คือพฤติกรรมที่สามารถแสดงออกมาเมื่อมีแรงจากภายนอกกระทำเช่น ค่าความสามารถในการต้านทานแรงดึงสูงสุดที่จุด

แตกหักและจุดคลาก เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ค่าความสามารถในการต้านทานแรงดัด ค่าความสามารถในการทนรกระแทก ค่าความแข็ง และโครงสร้างจุลภาค เป็นต้น

4. ความเค้นตกค้าง (Residue Stress) คือ ความเค้น (Stress) ที่เหลืออยู่ในแนวเชื่อมและวัสดุเหล็กแผ่นหลังจากได้รับแรงและความร้อนภายนอกจากกรรมวิธีการเชื่อมมากระทำและสิ้นสุดลง

5. การบิดเสียรูป (Distortion) คือ การบิดเสียรูปของวัสดุเหล็กแผ่นหลังจากได้รับแรงและความร้อนภายนอกจากกรรมวิธีการเชื่อมมากระทำและสิ้นสุดลง



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กรอบแนวคิดและสมมติฐาน

สมมติฐาน

การเชื่อมแบบผสม GTAW+SMAW จะให้คุณภาพรอยเชื่อมที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วยกระบวนการเดียว โดยเฉพาะในด้านคุณสมบัติทางกลและความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม การใช้ลวดเชื่อม E7016 ในการเชื่อมเติมจะให้ความเหนียวที่ดีเยี่ยม และเหมาะสมกับเหล็กกล้า EH36 ที่ต้องการความแข็งแรงและทนทานต่อการแตกหัก

กรอบแนวคิดเชิงทฤษฎี

การเลือกวัสดุและกระบวนการ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่เหล็กกล้า EH36 ซึ่งเป็นเหล็กกล้ากำลังสูงสำหรับงานโครงสร้างเรือและแท่นขุดเจาะน้ำมัน เหล็กชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ต้องการความเหนียวสูงในอุณหภูมิ ต่ำ การเลือกกระบวนการเชื่อมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

กระบวนการ GTAW: เป็นกระบวนการที่มีความแม่นยำสูง ให้รอยเชื่อมรากที่สะอาด และมีคุณภาพดีเยี่ยม [AWS A5.1/A5.1M 2012],[AWS B2.1/B2.1M, 2014]ทำให้มั่นใจได้ว่าการหลอมรวมที่ฐานของรอยเชื่อมจะสมบูรณ์ ป้องกันการเกิดข้อบกพร่องที่มักเกิดขึ้นในรอบแรกของการเชื่อม

กระบวนการ SMAW: เป็นกระบวนการที่ให้ประสิทธิภาพการเชื่อมสูง เหมาะสำหรับการเชื่อมเติมในรอบถัดมา [Tusek, I., & Krizan, J, 2012] การใช้ลวดเชื่อม E7016 เป็นไปตามคำแนะนำของ AWS A5.1 ซึ่งเป็นลวดเชื่อมประเภทไฮโดรเจนต่ำ (Low-hydrogen) ที่ออกแบบมาเพื่อการเชื่อมเหล็กกล้ากำลังสูงที่ต้องการความเหนียวสูงในอุณหภูมิต่ำ [Lin, Y. C., & Hung, C. Y., 2014],[Deng, D., & Murakawa, H. 2006]

การเชื่อมแบบผสม (Hybrid Welding)

การเชื่อมแบบผสม GTAW+SMAW เป็นการรวมจุดเด่นของทั้งสองกระบวนการเข้าด้วยกัน [Kim, J. S., & Lee, J. S. 2009], [Lincoln Electric, ESAB, 2023]

GTAW สร้างรอยเชื่อมรากที่สมบูรณ์

SMAW เพิ่มประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการเชื่อมเติม

แนวคิดนี้สอดคล้องกับงานวิจัยหลายชิ้นที่พบว่า การเชื่อมแบบผสมสามารถลดความเสี่ยงของข้อบกพร่อง เช่น การแตกร้าวจากไฮโดรเจน (Hydrogen cracking) ที่อาจเกิดขึ้นในเหล็กกล้ากำลังสูง [Shi, Y., et al. 2017]

คำแนะนำจาก AWS และผู้ผลิตลวดเชื่อม

ตาม AWS A5.1, ลวดเชื่อม E7016 เป็นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่มีคุณสมบัติไฮโดรเจนต่ำ มีฟลักซ์เป็นด่าง (Basic Flux) [AWS D1.1/D1.1M:2020] ที่ช่วยเพิ่มความเหนียวของรอยเชื่อมและลดปริมาณไฮโดรเจนในรอยเชื่อม ซึ่งเป็นสาเหตุของการแตกร้าว คำแนะนำของผู้ผลิตลวดเชื่อมส่วนใหญ่จะระบุถึงการอบลวดเชื่อมก่อนใช้งานเพื่อไล่ความชื้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการลดปริมาณไฮโดรเจน [The Lincoln Electric Company, 2023]

ในงานวิจัยเรื่องการเชื่อมเหล็ก EH36 ด้วยการเชื่อมผสม GTAW+SMAW การคงที่ตัวแปรต้น (Independent Variables) มีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อ แยกแยะผลกระทบของตัวแปรที่ต้องการศึกษา และ สร้างความน่าเชื่อถือให้กับผลการวิจัย นี่คือเหตุผลหลักและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่สนับสนุนแนวคิดนี้

1. เพื่อให้สามารถแยกแยะผลของกระบวนการเชื่อมได้อย่างชัดเจน

การเชื่อมแบบผสม GTAW+SMAW มีตัวแปรที่ซับซ้อนจำนวนมาก ทั้งกระบวนการ GTAW และ SMAW แต่ละกระบวนการก็มีพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน (กระแสไฟ, แรงดันไฟ, ความเร็วในการเชื่อม, ชนิดและขนาดของลวดเชื่อม) การไม่ควบคุมหรือทำให้ตัวแปรเหล่านี้คงที่จะทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่าคุณสมบัติของรอยเชื่อมที่ได้นั้นมาจากตัวแปรใด [Lin, Y. C., & Hung, C. Y. (2014)], [AWS D1.1/D1.1M:2020]

ตัวอย่าง: หากต้องการศึกษาผลกระทบของการเชื่อมเติมด้วย SMAW เพียงอย่างเดียว การคงที่กระบวนการ GTAW (เช่น กระแสไฟ, ความเร็ว) ในการเชื่อมรากจึงจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้แน่ใจว่าความแตกต่างของผลลัพธ์ (เช่น ความแข็งแรงดึง) มาจากการเชื่อม SMAW เท่านั้น ไม่ใช่ความผันแปรของการเชื่อม GTAW .

อ้างอิง: งานวิจัยของ Lin et al. (2014) ได้ศึกษาผลกระทบของขั้นตอนการเชื่อม (welding procedures) ต่อคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้ากำลังสูง โดยระบุว่า การควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อมให้คงที่ในทุกขั้นตอนเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถเปรียบเทียบกันได้ [Shi, Y., et al. (2017)]

2. เพื่อสร้างความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) และความน่าเชื่อถือ

หลักการพื้นฐานของการวิจัยทางวิทยาศาสตร์คือการทดลองต้องสามารถทำซ้ำได้ (reproducible) โดยนักวิจัยคนอื่น ๆ และได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน [Tusek, I., & Krizan, J. (2012)] การบันทึกและควบคุมตัวแปรต้นทั้งหมดให้คงที่เป็นการสร้าง "สูตร" ที่ชัดเจนสำหรับกระบวนการเชื่อม ทำให้ผลการวิจัยที่ได้มีความน่าเชื่อถือสูง

อ้างอิง: มาตรฐานการเชื่อม เช่น AWS D1.1 กำหนดให้การจัดทำขั้นตอนการเชื่อม (Welding Procedure Specification - WPS) ต้องระบุพารามิเตอร์การเชื่อมที่สำคัญทั้งหมดให้ชัดเจนและคงที่ เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีคุณสมบัติสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นหลักการเดียวกันกับการควบคุมตัวแปรในงานวิจัย [AWS B2.1/B2.1M:2014]

3. เพื่อลดความผิดพลาดและข้อบกพร่องของรอยเชื่อม

การเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นโดยไม่ควบคุม เช่น กระแสไฟที่สูงเกินไปหรือความเร็วในการเชื่อมที่ต่ำเกินไป อาจนำไปสู่ข้อบกพร่องของรอยเชื่อม เช่น Undercut, Porosity, หรือ Lack of Fusion ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานต่ำลงและบิดเบือนผลการวิจัย [Kim, J. S., & Lee, J. S. (2009)] การคงที่ตัวแปรเหล่านี้จะช่วยลดความเสี่ยงดังกล่าวและทำให้รอยเชื่อมมีคุณภาพสม่ำเสมอ

อ้างอิง: Tusek and Krizan (2012) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมแบบผสม โดยเน้นย้ำว่าการควบคุมกระแสไฟและแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นในการลดการเกิดข้อบกพร่องและเพิ่มความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมแบบผสม [Deng, D., & Murakawa, H. (2006)]

การคงที่ตัวแปรต้นในการเชื่อมเหล็ก EH36 ด้วยกระบวนการผสม GTAW+SMAW จึงเป็นสิ่งสำคัญในการวิจัย เพื่อให้สามารถแยกแยะผลกระทบของตัวแปรที่สนใจได้อย่างแม่นยำ สร้างความน่าเชื่อถือให้กับผลลัพธ์ และลดความเสี่ยงที่จะเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน

ตัวแปรและสมมติฐาน

ตัวแปรต้น (Independent Variables):

กระบวนการเชื่อม: การเชื่อมแบบผสม GTAW+SMAW

ลำดับการเชื่อม

เชื่อมราก (Root Pass) ด้วย GTAW (1 รอบ)

เชื่อมเติม (Filler Passes) ด้วย SMAW (3 รอบ)

ชนิดลวดเชื่อม

ลวดเชื่อม GTAW: ER70S-6 (หรือเทียบเท่า)

ลวดเชื่อม SMAW: E7016

วัสดุชิ้นงาน: เหล็กกล้าเกรด EH36

ตัวแปรตาม (Dependent Variables):

คุณสมบัติทางกล:

ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)

ความแข็งแรงคราก (Yield Strength)

ความเหนียวและพลังงานการกระแทก (Toughness and Impact Energy)

ความแข็ง (Hardness)

โครงสร้างจุลภาค (Microstructure):

ขนาดเกรน (Grain Size)

องค์ประกอบเฟส (Phase Composition) เช่น Ferrite, Austenite, Pearlite

คุณสมบัติของรอยเชื่อม:

การหลอมรวม (Fusion) และการแทรกซึม (Penetration)

ความพรุน (Porosity) และรอยร้าว (Cracks)

ช่องว่างของงานวิจัย

จากการศึกษาค้นหางานวิจัยที่ทำมาในอดีตจนถึงปัจจุบันพบว่า เหล็ก EH36 นำไปทดสอบกระบวนการเชื่อมหลายครั้งแต่ทั้งหมดเป็นการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเดียวคือ SMAW, GTAW, GMAW และ Plasma, ยังไม่พบงานวิจัยที่ทำแบบผสมระหว่าง GTAW กับ SMAW จึงทำให้ผู้วิจัยสังเกตเห็นว่าถ้านำข้อดีของการเชื่อมแบบ GTAW มาผสมกับ SMAW จึงนำมาซึ่งผลลัพธ์ทางกลและโครงสร้างที่ดีเยี่ยม เป็นทางเลือกของอุตสาหกรรมต่อเรืออย่างยิ่ง

2.1 อุตสาหกรรมต่อเรือและซ่อมเรือ (Shipbuilding Industry)

(อุตสาหกรรมต่อเรือและซ่อมเรือ, 2021) ข้อมูลจากเว็บไซต์ ฐานข้อมูลความรู้ทางทะเล (Marine Knowledge Hub) จัดทำขึ้นภายใต้ โครงการจัดการความรู้เพื่อผลประโยชน์แห่งชาติทางทะเลได้กล่าวเกี่ยวกับอุตสาหกรรมต่อเรือและซ่อมเรือไว้ดังนี้

อุตสาหกรรมต่อเรือและซ่อมเรือเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานทางเศรษฐกิจที่สำคัญและมีส่วนเชื่อมโยงกับธุรกิจการขนส่งทางน้ำและกิจการพาณิชย์นาวี ตลอดจนเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรม

เกี่ยวเนื่องอื่นอีกมากมาย เช่น อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า อุตสาหกรรมเครื่องมือสื่อสาร อุปกรณ์เดินเรือ อุตสาหกรรมสีและเคมีภัณฑ์ อุตสาหกรรมเครื่องจักรกล เครื่องยนต์เรือ อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมไม้และเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น อุตสาหกรรมต่อเนื่อง นอกจากจะเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้เงินลงทุนสูงและคืนกำไรยากแล้ว ยังมีอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องอีกจำนวนมากหลายระดับ รวมทั้งต้องอาศัยเทคโนโลยีและองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมขั้นสูงจากหลายสาขาประกอบกัน

2.1.1 การพัฒนาอุตสาหกรรมเรือและซ่อมเรือของไทย

(อุตสาหกรรมต่อเรือและซ่อมเรือ, 2021)ความสำเร็จของอุตสาหกรรมต่อเรือในต่างประเทศ โดยเฉพาะกรณีของสาธารณรัฐประชาชนจีนและสาธารณรัฐเกาหลี แสดงให้เห็นถึงบทบาทของปัจจัยเชิงโครงสร้างและเชิงนโยบายที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับประเทศจีน ปัจจัยหลักที่สนับสนุนการเติบโตของอุตสาหกรรมต่อเรือ ได้แก่ การมีตลาดภายในประเทศขนาดใหญ่ซึ่งก่อให้เกิดอุปสงค์ต่อเนื่อง การขยายกำลังการผลิตอย่างเป็นระบบ ความสามารถในการเข้าถึงแหล่งทุนทั้งจากภาครัฐและภาคเอกชน ต้นทุนการจัดหาวัตถุดิบและแรงงานที่อยู่ในระดับแข่งขันได้ รวมถึงการมีอุตสาหกรรมต่อเนื่องที่ครอบคลุมห่วงโซ่อุปทานทั้งหมด ในบริบทของประเทศไทย การเสริมสร้างศักยภาพของอุตสาหกรรมต่อเรือและซ่อมเรือจำเป็นต้องอาศัยการประสานความร่วมมือทั้งในระดับภูมิภาคและนานาชาติ ผ่านพันธมิตรทางเทคโนโลยี การทำงานร่วมกับสมาคมจัดชั้นเรือและศูนย์วิจัยพัฒนาทางทะเล เพื่อถ่ายทอดและพัฒนานวัตกรรมและเทคนิคการผลิตที่เอื้อต่อการลดต้นทุน ลดระยะเวลาดำเนินการ และตอบสนองต่อมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะช่วยยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมต่อเรือไทยในระยะยาวอย่างยั่งยืน

2.1.2 ลักษณะงานในอุตสาหกรรมต่อเรือ

(อุตสาหกรรมต่อเรือและซ่อมเรือ, 2021)กิจกรรมในอุตสาหกรรมต่อเรือสามารถจำแนกออกได้เป็นสองประเภทหลัก ได้แก่ งานต่อเรือใหม่ และ งานซ่อมบำรุงเรือที่มีอยู่แล้ว ซึ่งมีลักษณะ วัตถุประสงค์ และขั้นตอนการปฏิบัติที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

1. งานต่อเรือใหม่ (New Shipbuilding)

กระบวนการต่อเรือใหม่เริ่มต้นจากการออกแบบเชิงวิศวกรรม (Engineering Design) ซึ่งครอบคลุมการวิเคราะห์และคำนวณด้านโครงสร้าง การจำลองสมรรถนะทางอุทกพลศาสตร์ผ่านการทดสอบโมเดลเรือในถังน้ำ (Towing Tank Test) รวมถึงการประเมินจากต้นแบบที่ได้รับการพัฒนาโดยสถาบันออกแบบที่มีความน่าเชื่อถือ ขั้นตอนการออกแบบยังต่อเนื่องไปถึงการกำหนดรายละเอียดโครงสร้างเรือ (Hull Structure Design) การออกแบบระบบขับเคลื่อน เช่น เพลลา ใบจักร เครื่องจักรใหญ่และเครื่องจักรช่วย การกำหนดระบบไฟฟ้า

อิเล็กทรอนิกส์ ระบบสื่อสาร และเทคโนโลยีดาวเทียมให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การใช้งาน เมื่อการออกแบบและการทดสอบผ่านเกณฑ์ที่กำหนดแล้ว จึงนำข้อมูลดังกล่าวไปสู่การออกแบบเชิงผลิต (Production Design) เพื่อใช้ในขั้นตอนการก่อสร้างจริง การต่อเรือเหล็กโดยทั่วไปต้องอาศัยแรงงานฝีมือจำนวนมาก โดยเฉพาะในกระบวนการประกอบติดตั้ง (Fabrication and Erection) และการเชื่อมประสานโลหะ (Welding) สำหรับเรือที่ไม่มีศักยภาพด้านการออกแบบทางวิศวกรรม สามารถจัดหาแบบเรือจากบริษัทหรือผู้ประกอบการภายนอกเพื่อนำมาปรับแก้ให้ตรงตามข้อกำหนดของลูกค้า ทั้งนี้ การออกแบบและก่อสร้างต้องเป็นไปตามข้อบังคับทางเทคนิคที่กำหนดในอนุสัญญาว่าด้วยความปลอดภัยแห่งชีวิตในทะเล (International Convention for the Safety of Life at Sea: SOLAS)

2. งานซ่อมบำรุงเรือที่มีอยู่แล้ว (Ship Repair and Maintenance)

งานประเภทนี้มุ่งเน้นการบำรุงรักษาและฟื้นฟูสมรรถนะของเรือให้กลับมาอยู่ในสภาพพร้อมปฏิบัติการ โดยครอบคลุมการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนชิ้นส่วนของเครื่องจักรหลัก กลจักรตัวเรือ รวมถึงระบบควบคุมและระบบสนับสนุนต่าง ๆ ในตัวเรือ การซ่อมบำรุงมักวางแผนล่วงหน้าร่วมกับเจ้าของเรือหรือผู้ดำเนินการเดินเรือ ยกเว้นกรณีซ่อมฉุกเฉิน เพื่อกำหนดช่วงเวลาการนำเรือเข้าคู่ ระยะเวลาการดำเนินงาน และการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่จำเป็น กระบวนการซ่อมเป็นไปภายหลังการตรวจสอบเรือเป็นระยะตามข้อกำหนดสากล (โดยทั่วไปทุก 2-3 ปี) หรือเมื่อพบความเสียหายที่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในการใช้งาน งานซ่อมที่พบได้บ่อยคือการตัดเปลี่ยน และเชื่อมซ่อมโครงสร้างตัวเรือ เพื่อแก้ไขความชำรุดสึกหรอจากการใช้งานยาวนาน หรือความเสียหายจากอุบัติเหตุ 2.2 กระบวนการต่อเรือ (Shipbuilding Process)

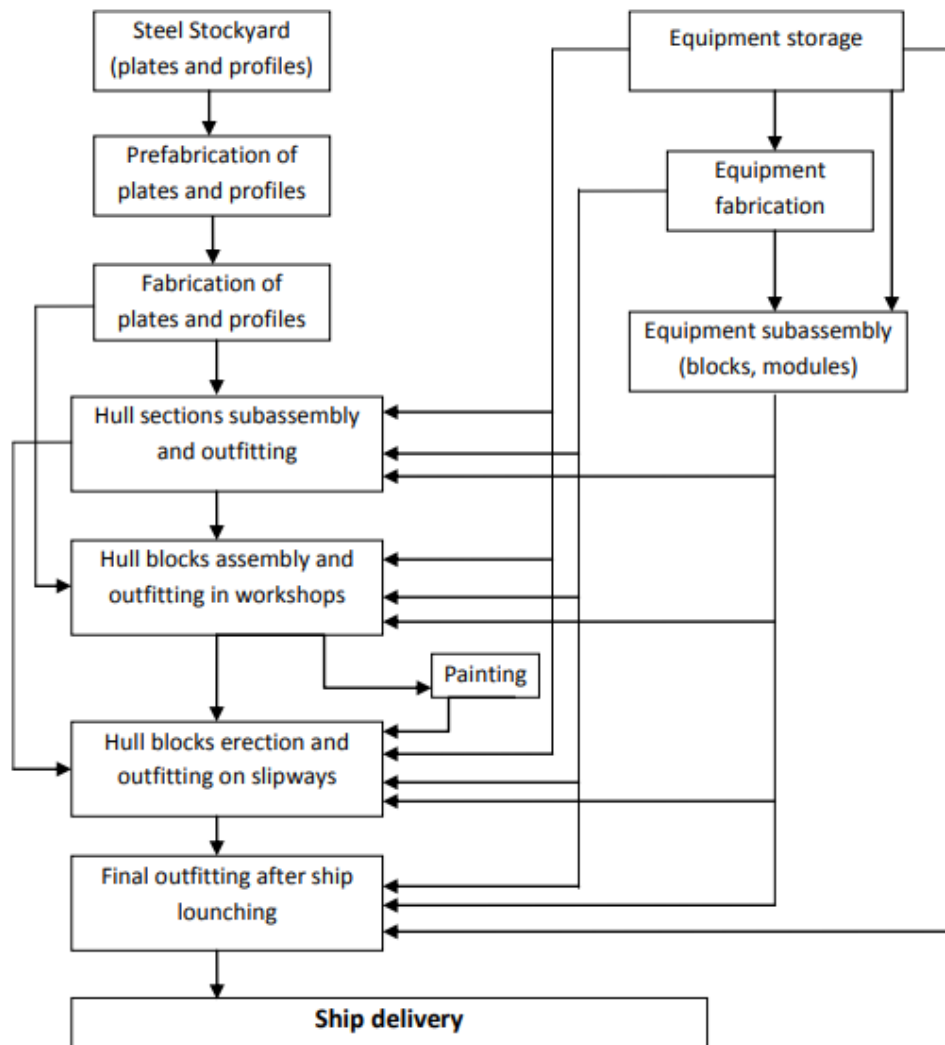
(Hadjina et al., 2015) ขั้นตอนกระบวนการต่อเรือโดยทั่วไป เริ่มตั้งแต่ การตัด การขึ้นรูป การเชื่อม การเจาะ การปรับแต่ง และประกอบติดตั้งตัวเรือ เครื่องยนต์และอุปกรณ์ระบบต่างๆ ทดสอบทดลอง จนแล้วเสร็จพร้อมส่งมอบ โดยมีกระบวนการหลักดังแสดงใน (ภาพประกอบ 11) ดังนี้คือ

ก. การบวนการเตรียมส่วนประกอบและติดตั้งตัวเรือ

- Steel Stockyard (plates and profiles)
- Prefabrication of plates and profiles
- Fabrication of plates and profiles
- Hull sections subassembly and outfitting

- Hull blocks assembly and outfitting in workshops
 - Hull blocks erection and outfitting on slipways
 - Final outfitting after ship launching
- ข. กระบวนการจัดเตรียมและประกอบติดตั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์
- Equipment storage
 - Equipment fabrication
 - Equipment subassembly (blocks, modules)
- ค. กระบวนการทำสีเรือ
- Painting
- จ. กระบวนการทดสอบขั้นสุดท้ายและส่งมอบ
- Basin Trial and Sea Trial
 - Ship delivery





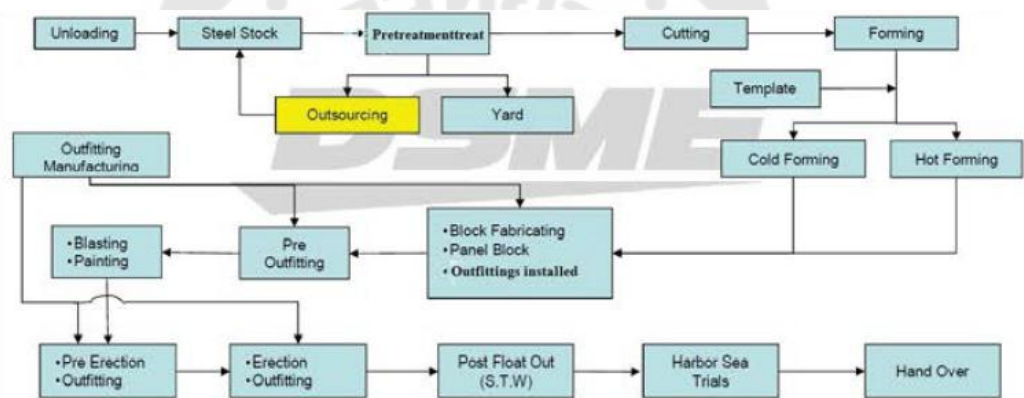
ภาพประกอบ 11 รูปแบบของกระบวนการต่อเรือโดยทั่วไป

ที่ ม ๑ : Marko Hadjina, Nikša Fafandjel, Tin Matulja, “ Shipbuilding Production Process Design Methodology Using Computer Simulation” , Brodogradnja/Shipbuilding, Volume 66 Number 2, 2015

(กลิ่นกุหลาบ) อธิบายให้เห็นภาพของกระบวนการต่อเรือได้จาก บทความเรื่อง Production Management ในการต่อเรือฟรีเกตของ DSME ของนาวาเอก อภิรัตน์ กลิ่นกุหลาบ กรมอุทกหารเรือ ซึ่งได้เขียนบรรยายกระบวนการต่อเรือฟรีเกตของบริษัทแดวูชิปปิลด์ดิ้งแอนด์มารีน เอ็นจิเนียริงจำกัด ประเทศเกาหลีใต้ไว้ดังนี้

(ก ลี น กุ ห ล า บ) คู่ ต่ อ เรื อ บ ริ ชั ้ ท Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering(DSME) เป็นคู่ต่อเรือเอกชนขนาดใหญ่ที่มีขีดความสามารถในการต่อเรือขนาดใหญ่ แม้ว่าเรือฟรีเกตซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่าเรือในภาคเอกชนในกระบวนการสร้างเรือก็ได้ นำแนวคิดและหลักการต่างๆ ของเรือในภาคเอกชนมาใช้ โดยมี Flow of building processes หลังจากที่มีการลงนามในสัญญาการสร้างเรือดังนี้

กระบวนการสร้าง (Production Process) ในการสร้างเรือฟรีเกตของ DSME (ภาพประกอบ 12) จะเริ่มด้วย กระบวนการแห้ง (ใช้ Dry Dock) จากนั้นจะปล่อยเรือลงน้ำ Horizontal Floating Dock แล้วเข้าสู่กระบวนการต่อไป (ใช้ Wet Dock) ซึ่งพอจะแยกเป็นขั้นตอนของกระบวนการผลิตหรือการสร้างเรือได้ประมาณ 12 ขั้นตอนดังนี้



ภาพประกอบ 12 กระบวนการการสร้างเรือฟรีเกตของ DSME

ที่มา : อภิรัตน์ กลิ่นกุหลาบ , Production Management ในการต่อเรือฟรีเกตของ DSME, กรมอุทหาเรือ

1. การขนส่งแผ่นเหล็กต่างๆ มายังคู่ DSME โดยทางเรือมายัง Stock Yard แผ่นเหล็กจะถูกนำขึ้นมายังลานเก็บแผ่นเหล็กโดยเครน จากนั้นจะใช้รถ Transporter ขนเข้าสู่บริเวณลานเก็บแผ่นเหล็ก เมื่อมีความต้องการใช้แผ่นเหล็กจะถูกลำเลียงโดนลูกกลิ้งเข้าโรงงาน Treatment เพื่อการเตรียมแผ่นเหล็กเข้าสู่การผลิต

2. การเตรียมแผ่นเหล็ก (Treatment) การให้ความร้อน เพื่อไล่ความชื้น การทำความสะอาด Blasting การสเปรย์ด้วยสี Primer หัวพ่นสี Primer แผ่นเหล็กทั้งด้านบนและด้านล่างพร้อมกัน ทำให้แห้ง Dry

3. ขั้นตอนการตัดแผ่นเหล็ก (ภาพประกอบ 13)



ภาพประกอบ 13 ขั้นตอนการตัดแผ่นเหล็ก

ที่มา : อภิรัตน์ กลิ่นกุหลาบ , Production Management ในการต่อเรือฟรีเกตของ DSME, กรมอุทหาเรือ

4. การตัดแผ่นเหล็ก เป็นการตัดแผ่นเหล็กให้โค้งตามแบบ (ภาพประกอบ 14) โดยมีไม้แบบเทียบประกอบ



ภาพประกอบ 14 การตัดแผ่นเหล็กให้โค้งตามแบบ

ที่มา : อภิรัตน์ กลิ่นกุหลาบ , Production Management ในการต่อเรือฟรีเกตของ DSME, กรมอุทหาเรือ

5. ขั้นตอนการประกอบ Component Assembly (ภาพประกอบ 15) ในขั้นตอนนี้จะเน้นการประกอบชิ้นส่วนเล็กๆ (Small Component) ได้แก่ Sub assembly, T-Bar ต่างๆ



ภาพประกอบ 15 ขั้นตอนการประกอบ Component Assembly

ที่มา : อภิรัตน์ กลิ่นกุหลาบ , Production Management ในการต่อเรือฟรีเกตของ DSME, กรมอุทหาเรือ

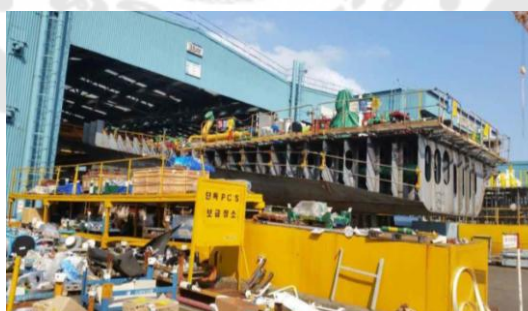
6. ขั้นตอนการประกอบบล็อก (Block Fabrication) (ภาพประกอบ 16) เป็นการนำชิ้นส่วน Small Component จากกระบวนการขั้นต้นมาประกอบ Block โดยอาจจะนำมาประกอบเป็น Block ที่มีขนาดใหญ่หลายๆ เรียกว่า Grand Block ซึ่งกระบวนการทั้งหมดเน้นการปฏิบัติงานในโรงงาน การต่อเรือของ DSME เน้นการประกอบ Block ต่างๆในโรงงาน โดยจะประกอบเป็น Block ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจาก Block ย่อยๆ เน้นการปฏิบัติงานที่สามารถทำได้ง่าย การเชื่อมทำในแนวระนาบและใช้เครื่องมือเป็นหลัก แล้วจึงพลิก Block (Turn over) เพื่อทำการติดตั้ง Outfitting ซึ่งอุปกรณ์ส่วนมากจะทำการติดตั้งในโรงงาน ดังนั้นในขั้นตอน Erection จึงใช้เวลาในอู่แห้ง หรือ Skid Way สั้น สามารถต่อเรือได้ในระยะเวลาสั้น จากการที่เน้นการประกอบ Block ที่มีขนาดใหญ่ การติดตั้ง Outfitting ส่วนมากภายในโรงงานทำให้ Block ต่างๆมีขนาดใหญ่ มีน้ำหนักมาก เช่น Facilities ต่างๆภายในอู่ต่อเรือจึงมีความจำเป็น เช่น Crane ที่มีขนาดใหญ่เพียงพอ Jig ที่ใช้ Support ภายในโรงงาน Transporter ที่ใช้ในการเคลื่อนย้าย Block



ภาพประกอบ 16 ขั้นตอนการประกอบบล็อก (Block Fabrication)

ที่มา : อภิรัตน์ กลิ่นกุหลาบ, Production Management ในการต่อเรือฟรีเกตของ DSME, กรมอุทหาเรือ

7. ขั้นตอน Pre-Outfitting (ภาพประกอบ 17) เป็นขั้นตอนที่ดำเนินการติดตั้ง Steel Outfitting ท่อทางในระบบต่างๆ ระบบ HVAC เครื่องจักร Machinery ต่างๆก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการต่อไป โดยในกรณีที่ Block ที่มีขนาดเล็ก หากทำการติดตั้ง Outfitting แล้วมีพื้นที่แคบจำกัด ทำให้มีระยะในการทำสีหรือปฏิบัติงานยาก ก็จะไม่ติดตั้งอุปกรณ์ Outfitting การประกอบ Small Component ต่างๆการประกอบชิ้นส่วนที่เป็นส่วนประกอบ Block มีการทำช่องทางของ Pipe Penetration, Duct ต่างๆ ในขั้นตอนนี้เลย ดังนั้นในขั้นตอนของการทำแบบต้องมีความแม่นยำมากและผ่านการตรวจสอบในขั้นตอนของการออกแบบมาแล้วอย่างดี



ภาพประกอบ 17 ขั้นตอนการติดตั้ง Outfitting และอุปกรณ์สำหรับระบบต่างๆ

ที่มา : อภิรัตน์ กลิ่นกุหลาบ, Production Management ในการต่อเรือฟรีเกตของ DSME, กรมอุทหาเรือ

8. ขั้นตอน Block Blasting & Painting ในขั้นตอนนี้ Block จะถูกทำความสะอาดล้างขนย้ายไปที่โรงงาน Blasting Shop แล้วเคลื่อนย้ายไปที่โรงงานทำสี

9. ขั้นตอน Pre-Erection เป็นขั้นตอนที่นำ Pre-Erection Block มาประกอบเป็น Block ที่มีขนาดใหญ่เป็น Pre-Erection Block

10. ขั้นตอน Erection สำหรับ DSME เรือฟรีเกตซึ่งถือว่ามีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับเรือในแบบอื่นๆที่ DSME ต่อ จะทำการ Erection ที่ Skid Way ซึ่งเรือฟรีเกตจะใช้เวลาในการ Erection ประมาณ 7 สัปดาห์ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะประกอบ Block ติดตั้ง Outfitting เพิ่มเติม การทำสีในขั้นตอนนี้สุดท้าย และการ Inspection ก่อนที่จะทำการ Launching

11. ขั้นตอน Final Outfitting ซึ่งจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ Outfitting ในขั้นตอนนี้สุดท้าย การ HAT, Dead Weight Measurement และ Inclining Test

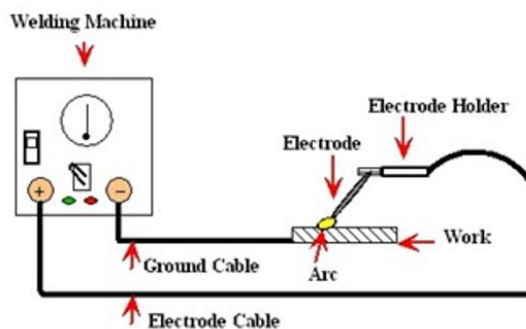
12. ขั้นตอน Sea Trial และ Delivery

2.3 การเชื่อมประสานตัวเรือ (Hull Welding)

เทคโนโลยีการเชื่อมในอุตสาหกรรมต่อเรือส่วนใหญ่ใช้กระบวนการเชื่อมอาร์ค (Arc Welding) เนื่องจากให้ประสิทธิภาพและความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่สอดคล้องกับมาตรฐานความปลอดภัย โดยมีกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ การเชื่อมอาร์คอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ (SMAW) ซึ่งเหมาะกับสภาพการทำงานที่หลากหลาย การเชื่อมอาร์คถวดเชื่อมใต้ฟลักซ์ (FCAW) ที่ให้ประสิทธิภาพสูงและการซึมลึกดี การเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (GMAW) ที่ได้รอยเชื่อมเรียบและแข็งแรง การเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สปกคลุม (GTAW) ซึ่งให้ความประณีตสูงเหมาะกับงานซับซ้อน และการเชื่อมอาร์คใต้ฟลักซ์ (SAW) ที่เหมาะสำหรับโครงสร้างขนาดใหญ่ กระบวนการเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในงานประกอบและซ่อมบำรุงเรือ เพื่อให้ได้โครงสร้างที่แข็งแรง ทนทาน และเป็นไปตามข้อกำหนดสากลของอุตสาหกรรมต่อเรือ

2.4 การประสานตัวเรือ (Mechanics) การเชื่อมอาร์คด้วยอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) เป็นกระบวนการเชื่อมโลหะที่อาศัยความร้อนจากการอาร์คไฟฟ้าระหว่างปลายอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานเพื่อหลอมโลหะและเชื่อมประสานเข้าด้วยกัน โดยอิเล็กโทรดจะถูกเคลือบด้วยฟลักซ์เพื่อสร้างแก๊สปกคลุมและตะกอนป้องกัน (slag) ซึ่งช่วยรักษาคุณภาพรอยเชื่อม ระบบวงจรไฟฟ้าที่ใช้ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟ สายเชื่อม อุปกรณ์จับอิเล็กโทรด จุดต่อสายดิน (ground clamp) และชิ้นงาน ซึ่งหัวจับอิเล็กโทรดจะต่อเข้ากับขั้วหนึ่งของแหล่งจ่ายไฟ ส่วนชิ้นงานจะต่อเข้ากับอีก

ขั้นหนึ่ง กระบวนการนี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากความยืดหยุ่นในการใช้งาน ไม่ซับซ้อน และสามารถเชื่อมโลหะได้หลากหลายประเภทและสภาพแวดล้อม (ภาพประกอบ 18)



ภาพประกอบ 18 วงจรไฟฟ้าสำหรับการเชื่อมอาร์คโดยใช้เลคโตรดหุ้มฟลักซ์

ที่มา : www.thermal-mech.com

ในกระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยอิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์ (SMAW) จะเกิดความร้อนสูงมากที่บริเวณปลายอิเล็กโตรดและผิวชิ้นงาน โดยโลหะเม็ดเล็ก ๆ ที่ปลายอิเล็กโตรดจะหลอมเหลวและไหลเข้าสู่บ่อหลอมโลหะ (weld pool) ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุดของอาร์คประมาณ 5,000 องศาเซลเซียส กระบวนการนี้ต้องอาศัยกระแสไฟฟ้าที่สูงพอสมควรเพื่อให้ทั้งอิเล็กโตรดและชิ้นงานหลอมรวมกัน โดยมีแรงดันไฟฟ้ากระแสอาร์คอยู่ในช่วงประมาณ 16-40 โวลต์ และค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 20-550 แอมแปร์ ซึ่งอาจใช้ได้ทั้งกระแสตรง (DC) หรือกระแสสลับ (AC) ขึ้นอยู่กับชนิดของอิเล็กโตรดที่เลือกใช้ ความสำคัญอีกประการหนึ่งคือการควบคุมระยะห่างระหว่างปลายอิเล็กโตรดกับบ่อหลอมโลหะให้เหมาะสม เพื่อรักษาความเสถียรของอาร์คและประสิทธิภาพของการเชื่อม ในระหว่างที่เกิดการอาร์ค ความร้อนจะทำให้สารที่เคลือบอิเล็กโตรดเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊สและก่อตัวเป็นชั้นตะกอน (slag) ซึ่งช่วยปกป้องรอยเชื่อมจากการปนเปื้อน ขนาดและชนิดของฟลักซ์บนอิเล็กโตรดมีผลต่อการใช้กระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิของอาร์ค โดยอิเล็กโตรดที่มีการเคลือบหนาจะต้องใช้กระแสไฟฟ้าสูงกว่าและมีอัตราการสิ้นเปลืองมากกว่าอิเล็กโตรดที่เคลือบผิวบาง แต่จะให้ความร้อนในการเชื่อมสูงกว่า ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการหลอมและคุณภาพของรอยเชื่อมโดยตรง.

ความสามารถและข้อจำกัดของกระบวนการ

ข้อดีของกระบวนการเชื่อมอาร์คคือเลคโตรดหุ้มฟลักซ์ SMAW ได้แก่

1. อุปกรณ์มีราคาถูก โครงสร้างไม่ซับซ้อนและเคลื่อนย้ายง่าย

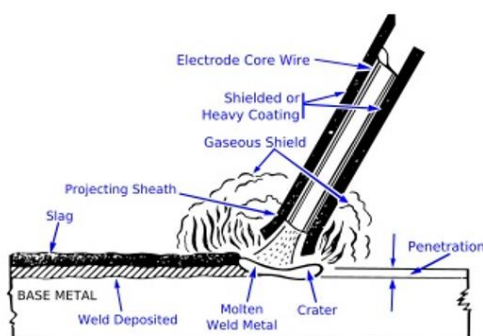
2. สามารถใช้โอเลคโตรด ชนิดที่มีการเคลือบในการเติมเนื้อโลหะและป้องกันการเกิดออกซิไดซ์ ในระหว่างการเชื่อม

3. ไม่จำเป็นต้องใช้ แก๊สและFlux

4. ลมที่พัดผ่านบริเวณที่ทำการเชื่อมมีผลไม่มากเมื่อเทียบกับ GSAW

5. สามารถใช้ได้ในพื้นที่จำกัด

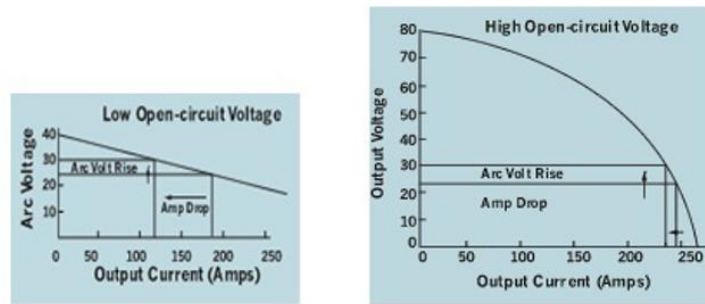
6. ใช้ได้กับโลหะหลายชนิด



ภาพประกอบ 19 บริเวณที่เกิดการอาร์คจากการเชื่อม SMAW

ที่มา : www.thermal-mech.com

ในกระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยอิเล็กโทรดหุ้มฟลักซ์ (SMAW) สามารถใช้กระแสไฟฟ้าได้ทั้งแบบกระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC) โดยทั่วไปการใช้กระแส DC จะเหมาะสมกว่าเมื่อต้องเชื่อมโลหะที่มีความหนามาก เนื่องจากกระแส DC สามารถให้ค่ากระแสที่สูงและเสถียรกว่า ซึ่งช่วยให้ได้รอยเชื่อมที่ลึกและมีคุณภาพดีกว่า นอกจากนี้ แหล่งจ่ายไฟสำหรับ SMAW มักจะเป็นแบบกระแสคงที่ (Constant Current) มากกว่าแบบแรงดันคงที่ (Constant Voltage) เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟแบบกระแสคงที่มีความสามารถในการรักษากระแสที่เสถียรแม้ความยาวของอาร์คจะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการทำงานของช่างเชื่อมที่ต้องควบคุมความยาวอาร์คด้วยมือ โดยเมื่อแรงดันเปลี่ยนแปลง กระแสจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ทำให้เสถียรภาพของอาร์คดีขึ้น ต่างจากแหล่งจ่ายไฟแบบแรงดันคงที่ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงค่ากระแสอย่างมากเมื่อความยาวอาร์คเปลี่ยน เลยทำให้ไม่เหมาะสมกับ SMAW ดังนั้นแหล่งจ่ายไฟแบบกระแสคงที่จึงเป็นที่นิยมใช้เพื่อให้ได้การเชื่อมที่มีคุณภาพและเสถียรภาพสูง(ภาพประกอบ 20)



ภาพประกอบ 20 ค่าแรงดัน-กระแส (แรงดันคงที่, กระแสคงที่)

ที่มา : www.thermal-mech.com

การเลือกใช้กราฟแรงดัน-กระแสในการเชื่อมอาร์คด้วยอิเล็กโตรดจะขึ้นอยู่กับลักษณะงานและขนาดของอิเล็กโตรด โดยสำหรับอิเล็กโตรดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่และใช้กระแสไฟสูง จะนิยมใช้กราฟที่มีความชันมากกว่า เพื่อรองรับการไหลของกระแสที่สูงและให้ความร้อนเพียงพอในการหลอมโลหะ ขณะที่งานที่ต้องการความแม่นยำสูง มักเลือกใช้กราฟที่มีความชันต่ำกว่าเพื่อควบคุมระยะอาร์คและความร้อนอย่างละเอียด ส่วนแรงดันเปิดวงจร (Open Circuit Voltage) ในกระบวนการเชื่อมอาร์ค จะหมายถึงค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อเครื่องเชื่อมเปิดทำงานแต่ยังไม่เริ่มอาร์ค โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 50-100 โวลต์ ส่วนแรงดันขณะทำการอาร์คจะลดลงมาอยู่ในช่วงประมาณ 17-40 โวลต์ ซึ่งแรงดันนี้จะขึ้นอยู่กับความยาวของอาร์คและชนิดของอิเล็กโตรดที่ใช้ กล่าวคือ เมื่อความยาวของอาร์คเพิ่มขึ้น แรงดันอาร์คจะสูงขึ้นแต่กระแสจะลดลง นอกจากนี้ การเลือกชนิดอิเล็กโตรดยังต้องคำนึงถึงวัสดุพื้นฐานของชิ้นงานเชื่อม โดยควรเลือกอิเล็กโตรดที่มีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกลไกที่สอดคล้องกับโลหะฐาน (Base Metal) เพื่อให้การเชื่อมมีความแข็งแรงและลดปัญหาการร้าวหรือข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นในรอยเชื่อมได้อย่างเหมาะสมตามลักษณะงานและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. โลหะคาร์บอน (Carbon Steel)
2. โลหะผสมต่ำ (Low Alloy Steel)
3. โลหะที่ต้านทานการกัดกร่อน
4. เหล็กหล่อ
5. อลูมิเนียมและอลูมิเนียมอัลลอยด์
6. Copper และ Copper Alloy
7. Nital และ Nickel Alloy

2.4.1 การออกแบบและเตรียมรอยเชื่อม ในการออกแบบชนิดของรอยเชื่อม จะต้องให้ความสำคัญเป็นหลักกับความแข็งแรงของรอยเชื่อมเพื่อให้รองรับภาระโหลดในการใช้งานได้อย่างปลอดภัย นอกจากนี้ ยังต้องพิจารณาถึงลักษณะของสภาพการใช้งานและอุณหภูมิที่ชิ้นงานจะต้องเผชิญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องรับภาระแบบไดนามิก (Dynamic Load) ซึ่งมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงและทิศทางที่รวดเร็วและทำให้เกิดความล้า (Fatigue) ในวัสดุ การออกแบบรอยเชื่อมสำหรับโหลดไดนามิกจึงแตกต่างจากการออกแบบสำหรับโหลดสถิต (Static Load) อย่างมาก เพราะจำเป็นต้องควบคุมให้อัตราการรวมตัวของความเค้น (Stress Concentration) ต่ำที่สุดเพื่อป้องกันการเกิดจุดอ่อนที่เป็นต้นเหตุของการแตกหัก อันเนื่องจากความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ที่ต้องถูกออกแบบมาให้มีค่าน้อยที่สุดด้วย นอกจากนี้ในการเลือกชนิดรอยเชื่อมยังต้องคำนึงถึงต้นทุนและความยากง่ายในการปฏิบัติงานจริง เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงตามข้อกำหนดในขณะเดียวกันยังประหยัดและมีประสิทธิภาพด้านการผลิตด้วย โดยชนิดและรูปแบบของรอยต่อ (Weld Joint Design) จะส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงและคุณสมบัติทั้งในด้านการรับแรงสถิตและความล้าของรอยเชื่อม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่วิศวกรต้องวิเคราะห์และเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของงานและเงื่อนไขการใช้งานเพื่อความปลอดภัยและความคงทนของโครงสร้างโดยรวมดังนี้

1. การต่อเชื่อมที่มีร่อง (Groove Welds)

2. การเลือกใช้ร่องสำหรับการเชื่อมต้องพิจารณาความเหมาะสมกับโครงสร้างที่ใช้ งาน ความง่ายในการเข้าถึงรอยเชื่อม ค่าใช้จ่าย และตำแหน่งที่ใช้ ในส่วนของ การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานช่วงเริ่มต้น (Preheating) มีบทบาทสำคัญในการปรับสภาพโลหะบริเวณรอยเชื่อมให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ โดยเฉพาะกับวัสดุที่มีการนำความร้อนสูง เช่น ทองแดง หรืออลูมิเนียมอัลลอยด์ การให้ความร้อนที่เหมาะสมจะช่วยลดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม ปรับปรุงการแทรกตัวและการรวมตัวของโลหะเติม ส่วนน้อยการให้ความร้อนมากเกินไปอาจทำให้สูญเสียพลังงานและลดคุณภาพของโลหะและรอยเชื่อมได้

การเชื่อมต่อชิ้นงานโดยเฉพาะการใช้กระแสดตรงหากปลายชิ้นงานไม่มีการสัมผัสกันดีจะทำให้เกิดปัญหา Arc Blow ซึ่งทำให้ควบคุมอาร์คได้ยากและเกิดความร้อนสูงจนนำไปสู่การลัดวงจร จึงแนะนำให้ใช้แผ่นทองแดงกดชิ้นงานด้วย C-Clamp เพื่อให้การสัมผัสแน่นหนาและเสถียรภาพในการเชื่อมสูงขึ้น

ความสม่ำเสมอของการอาร์ค (Arc Stability) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม โดยปัจจัยที่มีผล ได้แก่ แรงดันเปิดวงจร, ลักษณะ Transient Voltage

Recovery ของแหล่งจ่ายไฟ, ขนาดเม็ดโลหะเติมและตะกอน (slag) จากการอาร์ค, การแตกตัวของอาร์คระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน รวมถึงทักษะการจัดการอิเล็กโทรดของผู้เชื่อม การอาร์คที่ไม่มั่นคงจะทำให้เกิดปัญหาโลหะไม่รวมตัวดี เกิดสะเก็ด และโพรงอากาศในรอยเชื่อม

ในเรื่องของข้อบกพร่องในการเชื่อมที่มักพบ ได้แก่

โพรงอากาศที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างเชื่อม สามารถป้องกันได้โดยควบคุมกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสม รักษาระยะห่างอาร์คให้ถูกต้อง และใช้อิเล็กโทรดที่แห้ง

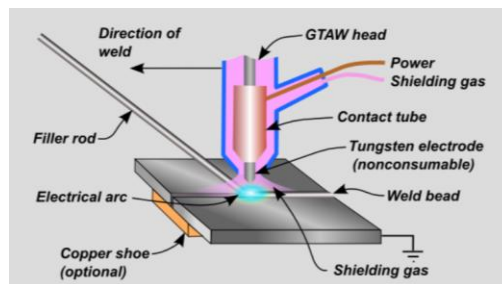
สารมลทินฝังใน (Slag Inclusion) ซึ่งเป็นออกไซด์และของแข็งที่ไม่ใช่โลหะเกิดขึ้นขณะรอยเชื่อมแข็งตัวและเย็นตัวลง มักเกิดจากสารเคลือบอิเล็กโทรด ต้องขจัดสารมลทินก่อนเชื่อมรอยถัดไปและเตรียมรอยต่ออย่างเหมาะสม

การหลอมละลายที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Fusion) คือการที่รอยเชื่อมแต่ละแนวไม่เชื่อมติดหรือไม่หลอมรวมกับชิ้นงาน อาจเกิดจากการให้ความร้อนไม่สม่ำเสมอหรือมีออกไซด์ขณะหลอมเหลว

การควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้อย่างเคร่งครัดและการฝึกทักษะของผู้เชื่อมเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงและคุณภาพสูง สามารถรองรับการใช้งานภายใต้สภาวะต่าง ๆ ได้อย่างปลอดภัยและทนทานในระยะยาว

2.5 การเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW)

(การเชื่อมโลหะแบบทิก) การเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสปกคลุม หรือที่เรียกในชื่อการเชื่อม TIG (Tungsten Inert Gas) หรือ GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ใช้ความร้อนจากการเกิดอาร์คไฟฟ้าระหว่างแท่งทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรดที่ไม่ละลาย (non-consumable tungsten electrode) กับชิ้นงาน โลหะบริเวณรอยเชื่อมจะถูกหลอมเหลวโดยการให้ความร้อนจากอาร์คนี้พร้อมกับมีแก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอน หรือฮีเลียม ปกคลุมบริเวณรอยเชื่อมเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากออกซิเจน ไนโตรเจน และความชื้นในบรรยากาศที่อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือความเสียหายต่อรอยเชื่อม โดยแท่งทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรดนี้มีคุณสมบัติทนความร้อนสูงและไม่ละลายขณะทำงาน ทำให้ต้องเติมโลหะลวดเชื่อม (filler metal) เพิ่มเติมเพื่อเสริมวัสดุในรอยหลอมเหลว เว้นแต่ในกรณีเชื่อมชิ้นงานที่มีความบางมากซึ่งอาจไม่ต้องใช้โลหะเติมก็ได้ โดยกระบวนการเชื่อม TIG มีความเหมาะสมสำหรับการเชื่อมเหล็กที่มีความหนาตั้งแต่ประมาณ 0.79 มิลลิเมตร จนถึง 4 มิลลิเมตร ด้วยความแม่นยำและคุณภาพรอยเชื่อมที่สูง ทำให้ TIG เป็นวิธีที่นิยมในงานเชื่อมที่ต้องการความละเอียดและความทนทานสูงในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การต่อเรือ อากาศยาน และยานยนต์ เป็นต้น



ภาพประกอบ 21 การเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สปกคลุม (TIG-GTAW)

ที่มา : www./pte53201523.blogspot.com

2.5.1 ข้อดีของการเชื่อมแบบทิก (TIG - GTAW)

(TIG (Tungsten Inert Gas) การเชื่อมโลหะแบบใช้ก๊าซอาร์กอน, 2014) ข้อดีและ

ข้อเสียของการเชื่อมแบบทิก มีดังนี้

1. ในการเชื่อมไม่มีฟลักซ์ที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อม จึงหมดปัญหาเกี่ยวกับสแลคฝังในแนวเชื่อม
2. รอยเชื่อมและแนวเชื่อมมีคุณภาพสูง ทนต่อการสึกกร่อนได้ดีกว่าการเชื่อมด้วยวิธีอื่น
3. สามารถเชื่อมได้ทุกตำแหน่งในช่างเชื่อม
4. ขณะทำงานเชื่อมสามารถมองเห็นระยะอาร์คและป้อหลอมได้ชัดเจน ทำให้ควบคุมการเชื่อมได้ตามต้องการ
5. การบิดงอของชิ้นงานมีน้อย
6. ขณะทำการเชื่อมจะปราศจากสะเก็ดประกายไฟและควันแนวเชื่อมทำให้รอยเชื่อมสะอาด เพราะไม่มี Slag และ Spatter
7. เกิดควันพิษน้อยกว่ากระบวนการเชื่อมแบบอื่น ๆ
8. แนวเชื่อมมีคุณภาพสูง

2.5.2 ข้อเสียของการเชื่อมแบบทิก (TIG-GTAW)

1. อุปกรณ์มีราคาแพง
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมมาก
3. ต้องใช้เวลาในการเตรียมก่อนที่จะเชื่อมนานกว่าเมื่อเทียบกับการเชื่อมไฟฟ้า

5. อุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการเชื่อมด้วยวิธีทิก (TIG-GTAW)

- เครื่องเชื่อม (Power Source)
- ระบบระบายความร้อน (Cooling System)
- แก๊สปกคลุม (Shielding gas)
- หัวเชื่อมและอุปกรณ์ประกอบ (Welding Torch & Equipment)

2.6 การเชื่อมแบบไฮบริด TGAW-SMAW

การเชื่อมแบบไฮบริดเป็นการเชื่อมแบบผสมกันของกระบวนการเชื่อมสองกระบวนการ โดยมีจุดประสงค์เพื่อนำจุดเด่นข้อดีหรือข้อได้เปรียบของกระบวนการเชื่อมที่เลือกใช้เพื่อผลของคุณภาพงานเชื่อมที่ดีกว่าใช้การเชื่อมแบบกระบวนการเดียว โดยกระบวนการเชื่อมสองกระบวนการที่นำมาผสมกันในหนึ่งรอยต่อเชื่อมที่ใช้กันมีดังต่อไปนี้

1. Hybrid Laser – GMAW
2. Hybrid Laser – FCAW
3. Hybrid GTAW-SMAW
4. Hybrid GTAW-GMAW
5. Hybrid FCAW-GMAW

(Jayant & Dhillon, 2015) การเชื่อมแบบไฮบริด TGAW-SMAW การเชื่อมทั้งสองกระบวนการ คือ SMAW และ GTAW เป็นกระบวนการเชื่อมอาร์กทั่วไปซึ่งทำให้เกิดความร้อนที่จำเป็นในการหลอมวัสดุชิ้นงานและวัสดุตัวเติมหรือลวดเชื่อมหรืออิเล็กโทรดโดยจะเกิดขึ้นขณะการอาร์กระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ใน SMAW จะใช้อิเล็กโทรดที่หุ้มฟลักซ์โดยอิเล็กโทรดจะหลอมละลายรวมกับวัสดุ ในขณะที่อิเล็กโทรดของ GTAW จะเป็นชนิดทังสเตนที่ไม่หลอมละลายและไม่สิ้นเปลืองในการใช้งาน แต่ GTAW จะใช้ลวดเติมเป็นวัสดุสิ้นเปลืองที่หลอมละลายไปกับชิ้นงาน ในกรณีของการเชื่อมแบบผสมหรือการเชื่อมแบบไฮบริด ที่เป็นการเชื่อมรวมกันระหว่าง GTAW และ SMAW นั้น ทั้งสองกระบวนการจะทำการกำหนดลำดับในการเชื่อมจนเสร็จสมบูรณ์ การเชื่อมแนวแรกจะทำการเชื่อมโดยกระบวนการ GTAW และการเชื่อมแนวต่อมาจะทำการเชื่อมโดยกระบวนการ SMAW โดยผลของการเชื่อมนั้นจะได้ข้อดีและข้อได้เปรียบของแต่ละกระบวนการที่เชื่อมจาก GTAW และ SMAW และโดยรวมแล้วประโยชน์ของการเชื่อมแบบไฮบริดคือการรวมข้อดีของทั้งสองกระบวนการในการเพิ่มประสิทธิภาพงานเชื่อมและคุณภาพงานเชื่อม

2.7 วัสดุแผ่นเหล็กที่ร้อน TMCP ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่อเรือ

(Total Materia) จากข้อกำหนดการพัฒนาคุณภาพของการต่อเรือในด้านการประกอบ และเชื่อมแผ่นเหล็กตัวเรือ เช่น การลดเวลาทำงานในการเชื่อม การเพิ่มคุณภาพงานเชื่อม ได้รับการพัฒนาโดยการใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง TMCP (Thermo-mechanically Controlled Processed) ที่ไม่ต้องทำการให้ความร้อนหรือการอุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อม (Preheating) และความต้องการแผ่นวัสดุเหล็กต่อเรือที่มีหนา ความแข็งแรงสูง ความเหนียว และความสามารถในการเชื่อมได้ดีมากสำหรับการสร้างเรือและต่อเรือขนาดใหญ่ ด้วยเหตุนี้ TMCP เหล็กแปรรูปที่มีความแข็งแรงสูงจึงได้รับการพัฒนาให้เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการต่อเรือมากกว่าเหล็กกล้าแบบดั้งเดิม

กระบวนการผลิตที่สำคัญขึ้นอยู่กับกระบวนการรีด หรือการปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะด้วยกระบวนการเชิงกล - ความร้อน (thermomechanical treatment) ซึ่งที่ช่วยลดความจำเป็นในการเติมธาตุผสมองค์ประกอบในโลหะที่มากเกินไปเพื่อเสริมความแข็งแรงของเหล็กแผ่นเหล็ก TMCP ถูกรีดด้วยการควบคุมกระบวนการเชิงกล - ความร้อน (thermomechanically controlled) และด้วยความหนาของเพลตที่มากขึ้น ทำให้เย็นเร็วขึ้นหลังจากการรีด

โดยทั่วไปแล้ว เหล็กกล้า TMCP เกรตต่างๆ (ตาราง 2) จะมีจำหน่ายในรูปแบบแผ่นหนา แผ่นเคลือบพื้นผิว และส่วนประกอบแผ่น เนื่องจากเหล็กกล้า TMCP มีค่าเทียบเท่าคาร์บอนต่ำมาก จึงสามารถเชื่อมได้อย่างง่ายโดยใช้กระบวนการเชื่อมทั่วไปทั้งหมด นอกจากนี้ยังง่ายต่อการขึ้นรูปและตัดโค้งสำหรับแผ่นเหล็กเปลือกเรือ โดยเกรดที่นิยมนำไปใช้ในการเชื่อมประกอบตัวเรือคือ ASTM EH36 (ตาราง 3)

ข้อดีหรือข้อได้เปรียบของการนำเหล็กกล้า TMCP มาใช้ในการต่อเรือ

- ลดความหนาของแผ่น
- ประหยัดน้ำหนักในโครงสร้างขั้นสุดท้าย
- โหลดที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นระหว่างการใช้งาน
- ประหยัดค่าใช้จ่ายในการเชื่อมและการประกอบผลิต

ตาราง 2 เกรตเหล็ก TMCP ทั่วไปสำหรับการต่อเรือ

Lloyds	Norske Veritas	Germanischer Lloyds	Bureau Veritas	American Bureau of Shipping	USSR Register	Nippon Kaigi Kyoka
A	A	A	A	A	A	A
B	B	B	B	B	B	B
D	D	D	D	SS	D	D
				CD/DS		
	NV A27S					
	NV D27S					
AH 32	NV A32	A 32	AH 32	AH 32	A 32	
DH 32	NV 32	D 32	DH 32	DH 32	D 32	
EH 32	NV E32	E 32	EH 32	EH 32	E 32	
AH 34S						
DH 34S						
EH 34S						
AH 35	NV A36	A 36	AH 36	AH 36	A 36	
DH 36	NV D36	D 36	DH 36	DH 36	D 36	
EH 36	NV E36	E 36	EH 36	EH 36	E 36	
	NV A40					
	NV D40					
	NV E40					
	NV A420					
	NV D420					
	NV E420					

ที่มา www.totalmateria.com

ตาราง 3 ตัวอย่างคุณสมบัติเหล็ก TMCP - ASTM EH36 เกรตเหล็กแผ่นต่อเรือ

ASTM EH36 การต่อเรือทางทะเลเกรดแผ่นเหล็กองค์ประกอบทางเคมี:

เกรด	C%	Si%	ลัน%	P%	S%	Al (ละลายในเกรด), min%	cb	V	Ti	ลูกบาศก์	Cr	Ni	Mo
EH36	0.18	0.10-0.50	0.90-1.60	0.035	0.035	0.015	0.02-0.05	0.05-0.10	0.02	0.35	0.2	0.4	0.08

ASTM EH36 เกรตทะเลต่อเรือเหล็กแผ่นสมบัติเชิงกล:

เกรด	ความหนา (mm)	MinYield (Mpa)	แรงดึง (Mpa)	การยืดตัว (%)	พลังงานกระแทกขั้นต่ำ
EH36	8mm-50mm	ต่ำสุด 355Mpa	490-620Mpa	21%	-40 [34J]
	51mm-70mm	ต่ำสุด 355Mpa	490-620Mpa	21%	-40 [41J]
	71mm-100mm	ต่ำสุด 355Mpa	490-620Mpa	21%	-40 [50J]

พลังงานกระแทกต่ำสุดเป็นพลังงานระยะยาว

ที่มา : [/m.th.marinesteels.com](http://m.th.marinesteels.com)

2.8 พฤติกรรมเชิงกลของวัสดุ (Mechanical Behavior)

(ศูนย์สารสนเทศยานยนต์, 2553) พฤติกรรมเชิงกลของวัสดุในงานเชื่อม (Mechanical Behavior of Welded Materials)

พฤติกรรมเชิงกล (Mechanical Behavior) ของวัสดุ หมายถึง ลักษณะการตอบสนองของวัสดุต่อแรงภายนอก ซึ่งสามารถประเมินได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical

Properties) เช่น การทดสอบแรงดึง (Tensile Test), การทดสอบแรงดัด (Bending Test), การทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness Test) และ การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructural Analysis) โดยผลการทดสอบจะถูกวิเคราะห์ในบริเวณ วัสดุพื้นฐาน (Base Material: BM), เขตได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat-Affected Zone: HAZ) และแนวเชื่อม เพื่อระบุคุณสมบัติเชิงกลสำคัญ ดังนี้

ความเค้น (Stress) — แรงต่อต้านภายในเนื้อวัสดุต่อแรงภายนอก แบ่งเป็น

Tensile Stress: ความเค้นแรงดึง

Compressive Stress: ความเค้นแรงอัด

Shear Stress: ความเค้นแรงเฉือน

Bending Stress: ความเค้นแรงดัด

Torsional Stress: ความเค้นแรงบิด

ความเครียด (Strain) — การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดของวัสดุภายใต้แรงกระทำ
แบ่งเป็น

Tensile Strain: ความเครียดแรงดึง

Compressive Strain: ความเครียดแรงอัด

Shear Strain: ความเครียดแรงเฉือน

ความยืดหยุ่น (Elasticity) — ความสามารถของวัสดุในการคืนรูปสู่สภาพเดิมหลังจากรับแรงและเกิดการเปลี่ยนรูปชั่วคราว (Elastic Deformation)

ความอ่อนตัว (Ductility) — ความสามารถของวัสดุในการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรภายใต้แรงดึงหรือแรงอัด เช่น การยืดเป็นเส้นลวดหรือรีดเป็นแผ่นบางได้โดยไม่แตกหัก (เช่น ทองคำ)

ความเปราะ (Brittleness) — สมบัติของวัสดุที่แตกหักได้ง่ายเมื่อรับแรงเพียงเล็กน้อย โดยมักเกิดการแตกหักก่อนค่าความเครียด 5%

ความเหนียว (Toughness) — ความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานและเปลี่ยนรูปอย่างถาวรโดยไม่แตกหัก

ความแข็งแรง (Strength) — ค่าความต้านทานแรงสูงสุดก่อนวัสดุจะแตกหัก เช่น Ultimate Tensile Strength และ Ultimate Compressive Strength ซึ่งสามารถอ่านได้จากกราฟ ความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve)

ความแข็งเกร็ง (Stiffness) — ความสามารถของวัสดุในการต้านทานการเปลี่ยนรูปภายใต้แรงภายในช่วงยืดหยุ่น ขึ้นกับค่า Modulus of Elasticity และ Rigidity

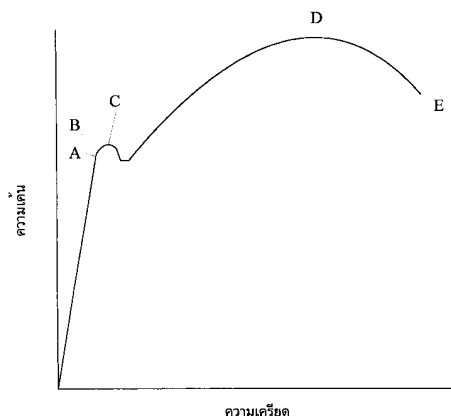
พลาสติกซีตี (Plasticity) — ความสามารถของวัสดุในการเปลี่ยนรูปร่างถาวรโดยไม่แตกหัก มีความสำคัญในกระบวนการผลิตโลหะ เช่น การรีด (Rolling), การอัดขึ้นรูป (Extruding) และการดึงลวด (Drawing)

ความล้า (Fatigue) — การเสื่อมสภาพและแตกหักของวัสดุภายใต้แรงที่กระทำซ้ำๆ หรือเป็นจังหวะต่อเนื่อง

การคืบ (Creep) — การเกิดความเครียดถาวรอย่างช้าๆ เมื่อวัสดุรับแรงต่อเนื่องเป็นเวลานานภายใต้อุณหภูมิสูง จนเกิดการเคลื่อนตัวของอะตอมและในที่สุดแตกหัก

ฮิสเทอรีซิสทางกล (Mechanical Hysteresis) — การสูญเสียพลังงานเนื่องจากวัสดุไม่สามารถคืนพลังงานที่รับไว้ได้ทั้งหมด โดยพลังงานส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อน 2.8.1 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

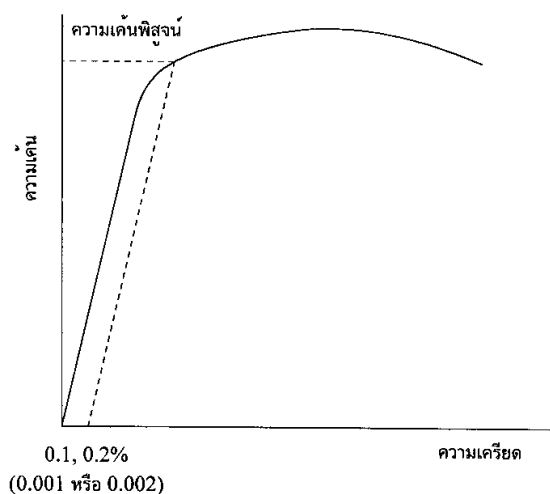
(ฟิลิกส์ราชมงคล) เป็นกระบวนการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุที่มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดค่าความเค้นและความเครียดที่วัสดุเกิดขึ้นเมื่อถูกดึงด้วยแรงในแนวยาว โดยจะนำตัวอย่างวัสดุที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐานสากล เช่น ASTM, BS, JIS หรือ มอก. ซึ่งกำหนดไว้เพื่อให้การทดสอบมีความน่าเชื่อถือและเปรียบเทียบผลได้ ตัวอย่างทดสอบจะถูกติดตั้งในเครื่องทดสอบแรงดึงซึ่งจะดึงวัสดุอย่างช้า ๆ และบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ระหว่างการทดสอบ ได้แก่ แรงที่กระทำและการยืดตัว จากนั้นนำข้อมูลเหล่านี้มาพลอตเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งช่วยวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ เช่น ความแข็งแรงจุดคราก (Yield Strength), ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) และความยืดหยุ่น (Elongation) อีกทั้งมาตรฐานที่ใช้ยังระบุความเร็วในการเพิ่มแรงดึงที่เหมาะสมเพื่อป้องกันผลผิดพลาดจากการทดสอบที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้การทดสอบแรงดึงเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการประเมินคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุในหลากหลายอุตสาหกรรม.



ภาพประกอบ 22 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve)

ที่มา: www.electron.rmutphysics.com

จากการศึกษากราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) พบว่า ในระยะเริ่มต้นเมื่อแรงดึงถูกเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ชิ้นทดสอบจะยึดตัวในสัดส่วนที่เป็นเชิงเส้น จนถึงจุดพิกัดสัดส่วน (Proportional Limit; จุด A) ซึ่งเป็นช่วงที่ความเค้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเครียด ตามกฎของฮุค (Hooke's Law) และวัสดุจะแสดงพฤติกรรมคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) คือสามารถคืนสู่ขนาดเดิมเมื่อยกเลิกแรงกระทำ เมื่อแรงดึงเกินพิกัดสัดส่วน เส้นกราฟจะโค้งออกจากเส้นตรงและวัสดุยังคงคืนรูปได้เล็กน้อยจนถึงพิกัดยืดหยุ่น (Elastic Limit; จุด B) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent Deformation) เกินจุดนี้ วัสดุจะเข้าสู่ระยะเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) โดยในโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะเกิดขึ้นอย่างฉับพลันที่จุดคราก (Yield Point; จุด C) โดยค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Strength) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้กำหนดขีดจำกัดการใช้งานของวัสดุได้อย่างปลอดภัย สำหรับวัสดุที่ไม่แสดงจุดครากชัดเจน เช่น อะลูมิเนียมและทองแดง สามารถหาค่า Yield Strength ได้ด้วยวิธี Offset โดยลากเส้นขนานกับช่วงเชิงเส้นของกราฟที่ระดับความเครียด 0.1% หรือ 0.2% ของความยาวเกจเดิม (Original Gauge Length) จนตัดกราฟในเขตพลาสติก ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น Offset ซึ่งใช้แทนค่า Yield Strength ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ภาพประกอบ 23)

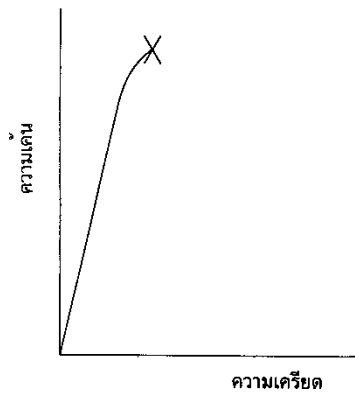


ภาพประกอบ 23 เส้นโค้งความเค้น - ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก

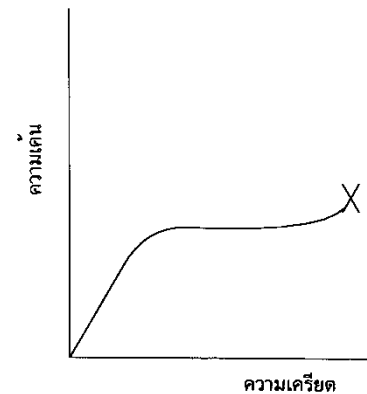
ที่มา: www.electron.rmutphysics.com

หลังจากวัสดุผ่านจุดคราก (Yield Point) ไปแล้ว จะเข้าสู่ระยะการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation Zone) ซึ่งค่าความเค้นอาจเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หรือคงที่จนถึงค่ามากที่สุดที่เรียกว่า จุดความเค้นสูงสุด (Ultimate Tensile Strength; จุด D) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้ก่อนการแตกหัก (Fracture) ค่านี้ถือเป็นตัวบ่งชี้สำคัญของ ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ และมักใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบทางวิศวกรรม รวมถึงใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุประเภทต่าง ๆ

ที่ จุดแตกหัก (Fracture Point; จุด E) วัสดุจะขาดออกจากกันอย่างสมบูรณ์ สำหรับโลหะเหนียว เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ค่า ความเค้นแตกหัก (Rupture Strength) มักต่ำกว่าค่า Ultimate Tensile Strength เนื่องจากหลังจุด D พื้นที่หน้าตัดที่มีผลรับแรงดึง (Effective Cross-sectional Area) ของชิ้นทดสอบลดลงจากการคอดตัว (Necking) แม้การคำนวณค่าความเค้นจะยังใช้พื้นที่หน้าตัดเดิมก่อนการทดสอบก็ตาม ส่งผลให้ค่าความเค้นที่วัดได้ลดลง ในทางตรงกันข้ามวัสดุที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold-worked Metals) หรือวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก และแก้ว มักแตกหักทันทีที่ค่าความเค้นถึงจุดสูงสุด (Ultimate Strength) โดยไม่เกิดการลดหน้าตัดหรือการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ วัสดุพลาสติกจะมีการยืดตัวและคอดตัวก่อนแตกหัก ขณะที่วัสดุเปราะจะแตกหักอย่างฉับพลันโดยเกือบไม่มีการเสียรูปถาวร (ภาพประกอบ 24)



(a) วัสดุเปราะ



(b) วัสดุพลาสติก

ภาพประกอบ 24 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก

ที่มา: www.electron.rmutphysics.com

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่าง ๆ ได้อีกดังนี้ คือ

1. **ความเหนียว (Ductility)** ความเหนียวเป็นสมบัติเชิงกลที่แสดงความสามารถของวัสดุในการเปลี่ยนรูปถาวรภายใต้แรงดึงโดยไม่เกิดการแตกหัก ซึ่งสามารถวัดได้จากสองตัวชี้วัดหลัก ได้แก่ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation; %EI) และ เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัด (Reduction of Area; %R.A.) โดยที่

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (\%EI)} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\%$$

โดยที่ L_f คือ ความยาวเกจหลังการทดสอบแรงดึงจนถึงงานขาด และ L_0 คือ ความยาวเกจเริ่มต้นก่อนการทดสอบ

เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัด (%R.A.) คำนวณจากสมการ

$$\text{การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (\%R.A.)} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\%$$

เมื่อ A_o = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง
 A_f = พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงขาด

ในทางปฏิบัติ ค่าร้อยละการยืดตัว (%EI) นิยมใช้มากกว่า เนื่องจากวัดได้สะดวกกว่าและต้องใช้เพียงการวัดความยาวเกจก่อนและหลังการทดสอบ ความเหนียวในค่านี้สะท้อนถึงศักยภาพของวัสดุในการขึ้นรูป (Formability) กล่าวคือ วัสดุที่มีค่า %EI สูงสามารถผ่านกระบวนการขึ้นรูป เช่น การรีด (Rolling) การตีขึ้นรูป (Forging) หรือการดึงเป็นเส้นลวด (Wire Drawing) ได้ง่าย ขณะที่วัสดุที่มีค่า %EI ต่ำจะมีแนวโน้มเปราะ (Brittle) และไม่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปเชิงพลาสติกในกระบวนการผลิต

2. Modulus of Elasticity or Stiffness หรือที่เรียกกันว่า Young's Modulus หรือ Stiffness, คือค่าคงที่ซึ่งแสดงอัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียดในวัสดุภายใต้พิภักต์สัดส่วนที่วัสดุแสดงพฤติกรรมแบบอีลาสติก โดยมีหน่วยวัดเป็น เช่น ksi (1 ksi = 1000 psi), kgf/mm² หรือ GPa ซึ่งเป็นหน่วยเดียวกับความเค้น แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น เมื่อตัวเลขของค่า Modulus of Elasticity สูง หมายความว่า วัสดุจะแสดงความแข็งแรงและเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติกได้ยาก หรือมีความแข็งแกร่ง (Stiffness) สูง ในทางตรงกันข้าม ค่า Modulus ต่ำจะบ่งชี้ว่าวัสดุสามารถเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติกได้มากขึ้น

หากแรงที่ใช้งานกระทำในลักษณะของแรงเฉือน ค่าคงที่ที่จะใช้แทน Modulus of Elasticity คือ Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเฉือนกับความเครียดเฉือนในวัสดุเช่นเดียวกับ Young's Modulus โดยค่าของ E และ G สำหรับวัสดุต่าง ๆ มีค่าเฉลี่ยคงที่และสำคัญสำหรับการออกแบบโครงสร้างและวัสดุที่ต้องรับแรงทางกล เช่น เหล็กทั่วไปจะมีค่า E ประมาณ 200 GPa และ G ประมาณ 80 GPa ซึ่งสามารถใช้เพื่อประเมินความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุภายใต้แรงที่แตกต่างกันได้ อย่างแม่นยำ โดยตารางค่าคงที่เหล่านี้เป็นเครื่องมือสำคัญในงานวิศวกรรมและการเลือกใช้วัสดุอย่างเหมาะสมตามลักษณะและวัตถุประสงค์ของการทำงาน

ตาราง 4 ตัวอย่างค่าคงที่และของวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	Modulus of elasticity 10 ⁶ psi	Shear Modulus 10 ⁶ psi
Aluminium alloy	10.5	4.0
Copper	16.0	6.0
Steel (plain carbon and low alloys)	29.0	11.0
Stainless Steel (18.8)	28.0	9.5
Titanium	17.0	6.5
Tungsten	58.0	22.8

ที่มา: www.electron.rmutphysics.com

2.8.2 การทดสอบแรงดัด (Bending Testing)

การทดสอบการดัดโค้ง (Bending Test)

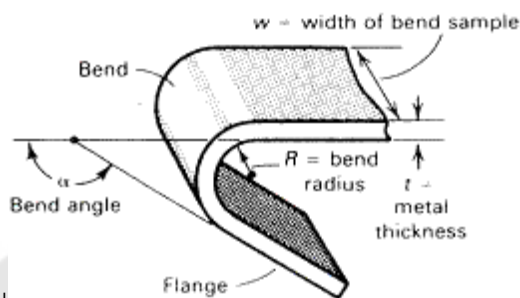
(สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, 2016) สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ได้กล่าวถึงการทดสอบการดัดโค้งไว้ดังนี้ การทดสอบการดัดโค้ง เป็นการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมการแปรรูปของวัสดุหลังจากทำการดัดโค้ง โดยพิจารณาดูว่าที่ผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบตรงบริเวณที่ทำการดัดโค้งเกิดรอยแตกขึ้นหรือไม่หลังจากทำการดัดโค้งขึ้นทดสอบด้วยรัศมีความโค้งที่กำหนด จนได้มุมตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการทดสอบ

การทดสอบการดัดโค้งเป็นการประเมินสมรรถนะของวัสดุในการต้านทานการแตกร้าวภายใต้แรงดัด โดยขึ้นทดสอบซึ่งอาจมีหน้าตัดเป็นรูปทรงวงกลม สี่เหลี่ยม หรือหลายเหลี่ยม จะถูกดัดให้ได้รัศมีความโค้งหรือมุมดัดตามที่กำหนดในมาตรฐานการทดสอบ ทั้งนี้ ทิศทางการออกแรงต้องคงที่ และการเพิ่มแรงดัดต้องทำอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวด้านข้างของชิ้นงาน (Lateral Movement) หลังจากขึ้นทดสอบถูกดัดตามเงื่อนไขที่กำหนด จะทำการตรวจสอบบริเวณผิวด้านนอกบริเวณรอยดัด ซึ่งเป็นตำแหน่งที่รับความเค้นแรงดึงสูงสุด เพื่อตรวจหาการเกิดรอยแตก

ลักษณะการประเมินผลแตกต่างจากการทดสอบสมบัติเชิงกลทั่วไป เช่น การทดสอบความแข็งหรือความเค้นจุดคราก ซึ่งให้ผลเชิงปริมาณเป็นค่าตัวเลข ขณะที่การทดสอบการดัดโค้งจะให้ผลในเชิงคุณภาพ โดยพิจารณาว่าชิ้นงาน ผ่าน หรือไม่ผ่าน เกณฑ์การทดสอบ เกณฑ์

การผ่านคือ ชิ้นงานสามารถดัดโค้งได้ตามที่กำหนด โดยไม่พบรอยแตกบนผิวด้านนอกเนื่องจากความเค้นดึง

การตรวจสอบสามารถทำได้ด้วยตาเปล่าหรือด้วยกล้องขยายที่มีกำลังขยายไม่เกิน 20 เท่า (โดยทั่วไปนิยมใช้ตาเปล่า) สำหรับกรณีชิ้นงานที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนา มากกว่า 8 หากพบรอยแตกที่ขอบ (Edge Crack) ให้ขัดขอบให้เรียบ แล้วทำการทดสอบซ้ำอีกครั้ง



ตามขั้นตอนมาตรฐาน

ภาพประกอบ 25 ชิ้นงานทดสอบการดัดโค้ง

ที่มา : www.tmaxtech.co.th

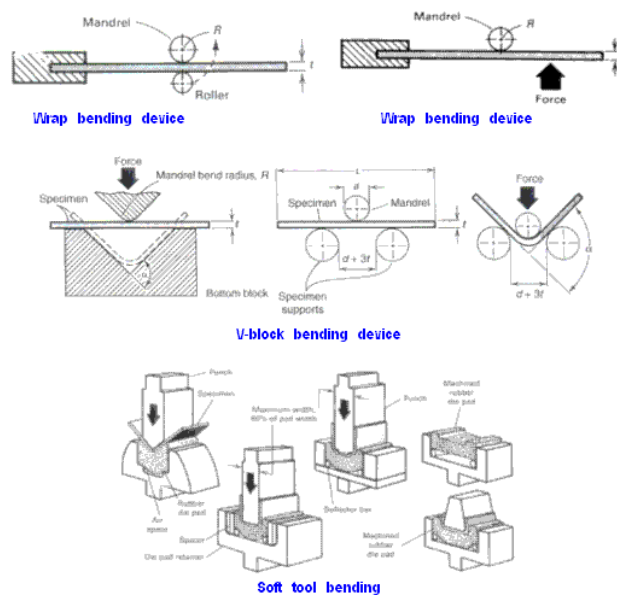
หลักการและเงื่อนไขของรัศมีการดัดโค้งต่ำสุด (Minimum Bend Radius) ในการทดสอบการดัดโค้ง

ในกระบวนการทดสอบการดัดโค้ง วัสดุที่มีความสามารถในการดัดโค้งสูง (High Bendability) จะสามารถดัดโค้งให้ได้มุมดัด (Bending Angle) ที่เท่ากันภายใต้รัศมีการดัด (Bending Radius) ที่เล็กกว่าโดยไม่เกิดรอยแตกร้าวที่ผิว ในทางกลับกัน หากกำหนดรัศมีการดัดเป็นค่าคงที่ วัสดุที่มีความสามารถในการดัดโค้งดีกว่าจะสามารถดัดโค้งได้ที่มุมมากกว่า จึงจะเริ่มเกิดรอยแตก

รัศมีการดัดโค้งต่ำสุด (Minimum Bend Radius) หมายถึง ค่ารัศมีการดัดที่เล็กที่สุดซึ่งวัสดุสามารถทนได้โดยไม่เกิดรอยแตกบนผิวด้านนอก ปกติแล้วค่า Minimum Bend Radius จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาชิ้นงาน (t) และมักรายงานในรูปจำนวนเท่าของความหนา เช่น ค่ารัศมีการดัดต่ำสุด $3t$ หมายถึง วัสดุสามารถดัดด้วยรัศมีมากกว่าหรือเท่ากับ 3 เท่าของความหนาได้โดยไม่แตก ทั้งนี้ ค่าดังกล่าวไม่ถือเป็นค่าคงที่ของวัสดุ เนื่องจากขึ้นอยู่กับความสามารถในการตรวจพบรอยแตกของผู้ทดสอบ, ความละเอียดของชิ้นการปรับรัศมีในการทดสอบ (ซึ่งจำกัดด้วยรัศมีของ mandrel ที่ใช้) และความต่อเนื่องของวิธีการทดสอบ

เพื่อให้การเปรียบเทียบสมรรถนะในการตัดโค้งระหว่างวัสดุมีความถูกต้อง ข้อมูลต้องได้จาก การทดสอบภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ได้แก่ วิธีการทดสอบเหมือนกัน, ผู้ตรวจสอบรอยแตกเป็นบุคคลเดียวกัน, ชิ้นทดสอบมีขนาดเท่ากัน และใช้รัศมีและมุมตัดโค้งที่เท่ากันทุกประการ

อุปกรณ์สำหรับการทดสอบการตัดโค้งไม่มีข้อกำหนดที่ตายตัว เนื่องจากเป็นการทดสอบที่ไม่ซับซ้อนและไม่ต้องการเครื่องมือความแม่นยำสูง สิ่งสำคัญเพียงพอคือต้องสามารถตัดชิ้นทดสอบให้ได้รัศมีหรือมุมตัดตามที่กำหนด โดยทั่วไป อุปกรณ์เช่น pin, roller และ mandrel ควรมีความยาวมากกว่าความกว้างชิ้นงาน และต้องมีความแข็งแรงและความแข็งแกร่งเพียงพอเพื่อทนต่อแรงตัด การเปลี่ยนรูป และการสึกหรอในระหว่างการทดสอบ



ภาพประกอบ 26 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำการทดสอบการตัดโค้ง แบบต่างๆ

ที่มา : www.tmaxtech.co.th

2.8.2.1 วิธีการทดสอบการตัดโค้ง

วิธีการทดสอบการตัดโค้งที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปมีหลักการพื้นฐานเหมือนกัน แต่จะแตกต่างกันในรายละเอียดของขั้นตอนและอุปกรณ์ที่ใช้ โดยวิธีที่ได้รับความนิยมและแพร่หลายอย่างมากที่สุดมี 3 วิธีหลัก ได้แก่

2.8.2.1.1 แบบ pressing bend

วิธีการทดสอบการดัดโค้งแบบสามจุด (Three-Point Bend Test) – การกำหนดรัศมีและระยะตั้งฐานรองรับการทดสอบจะดำเนินการโดยวางชิ้นทดสอบบนฐานรองรับสองด้าน โดยฐานรองรับควรมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีรัศมีความโค้งไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการก่อให้เกิดความเค้นเฉพาะจุด (Stress Concentration) ที่ผิวชิ้นงาน จากนั้นจึงเพิ่มแรงกดอย่างช้า ๆ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นทดสอบ เพื่อให้เกิดการดัดโค้งตามรัศมีที่กำหนด

ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสอง (Support Span) คำนวณจากสมการ:

$$S=2r+3t$$

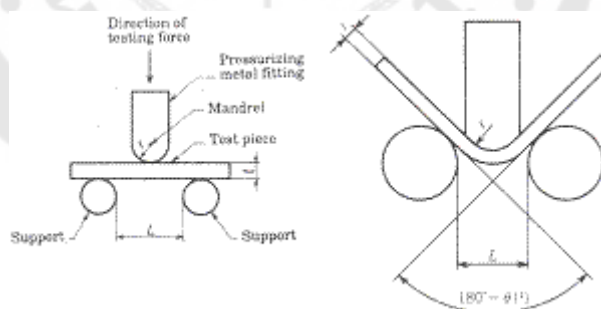
โดยที่

r = รัศมีการดัดโค้งที่ต้องการทดสอบ (Bending Radius)

t = ความหนาหรือเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ

(Thickness/Diameter)

สำหรับหัวกด (Mandrel) ส่วนปลายต้องมีลักษณะเป็นทรงกระบอก โดยมีรัศมีความโค้งเท่ากับรัศมีการดัดโค้งที่ต้องการทดสอบ เพื่อให้การรับแรงและการกระจายความเค้นเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ลดความเสี่ยงต่อการเกิดรอยแตกก่อนถึงค่ารัศมีดัดที่ต้องการวัด (ภาพประกอบ 27)



ภาพประกอบ 27 วิธีการทดสอบการดัดโค้งแบบ Pressing bending method

ที่มา : www.tmaxtech.co.th

2.8.2.1.2 แบบ Winding bend

การทดสอบทำโดย ค่อยๆเพิ่มแรงที่ใช้ในการม้วนขึ้นทดสอบรอบๆ mandrel ตามที่กำหนดไว้ โดยการที่กดยึดปลายด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบไว้ และทำการดัดโค้งที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ทำให้เกิดการดัดโค้งรอบ mandrel (ภาพประกอบ 28)

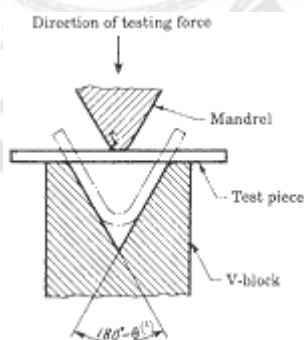


ภาพประกอบ 28 วิธีการทดสอบการดัดโค้งแบบ Winding bending method

ที่มา : www.tmaxtech.co.th

2.8.2.1.3 แบบ V-block bend

การทดสอบทำโดย นำชิ้นทดสอบมาวางอยู่บนฐานรูปตัววี แล้วค่อยๆเพิ่มแรงกดผ่าน mandrel ลงตรงกลางของชิ้นงานทดสอบ เพื่อทำการดัดโค้งชิ้นงานให้ได้ตามที่กำหนดไว้ (ภาพประกอบ 29)

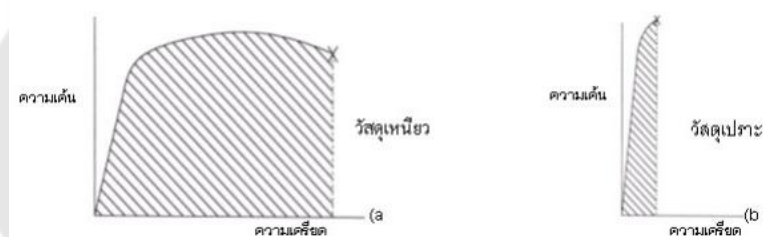


ภาพประกอบ 29 วิธีการทดสอบการดัดโค้งแบบ V-block bending method

ที่มา : www.tmaxtech.co.th

2.8.3 การทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing)

(อนุวัฒน์) การทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) เป็นกระบวนการประเมินความเหนียว (Toughness) ของวัสดุเพื่อวัดความสามารถในการดูดซับพลังงานก่อนถึงจุดแตกหัก ซึ่งมีความสำคัญในการเลือกใช้วัสดุสำหรับงานที่ต้องรับแรงกระแทกในสภาวะต่างๆ ความเหนียวเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของวัสดุ โดยทั่วไปจะประเมินจากค่า Modulus of Toughness ซึ่งหมายถึงพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ค่านี้แสดงพลังงานต่อปริมาตรต่อหน่วยปริมาตรที่วัสดุต้องใช้เพื่อให้เกิดการแตกหัก วัสดุที่มีความเหนียวสูงจะสามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าและมีความต้านทานต่อการเสียหายจากแรงกระแทกสูงกว่า ซึ่งข้อมูลนี้มีความสำคัญต่อการประเมินความปลอดภัยและความทนทานของวัสดุในงานวิศวกรรมและอุตสาหกรรมต่างๆ



ภาพประกอบ 30 Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียว (a) และวัสดุเปราะ (b)

ที่มา : อนุวัฒน์, และคณะ , “เอกสารประกอบการเรียนวิชา InE191 Engineering Material” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การทดสอบความเหนียวที่นิยมใช้ในงานวิศวกรรมวัสดุคือการทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อวัดพลังงานที่วัสดุดูดซับได้จนเกิดการแตกหัก (Impact Energy) และศึกษาคุณสมบัติการแตกของวัสดุที่ผิวรอยแตก (Fracture Surface) รวมทั้งการวัดอุณหภูมิช่วงเปลี่ยนผ่าน (Impact Transition Temperature; ITT) ที่วัสดุเปลี่ยนพฤติกรรมจากเหนียวเป็นเปราะ การทดสอบนี้เป็นการวิเคราะห์ความสามารถในการทนต่อแรงกระแทกแบบไดนามิก (Dynamic Load) ของวัสดุโดยใช้ขั้นตอนที่จัดเตรียมตามมาตรฐาน ขนาดและรูปทรงของชิ้นทดสอบถูกกำหนดเพื่อความเที่ยงตรงของผลลัพธ์ วิธีการทดสอบแรงกระแทกหลัก ๆ มีอยู่สองแบบ ได้แก่ การทดสอบ Charpy Impact Test ซึ่งขั้นตอนจะวางแนวนอนและถูกตีด้วยตุ้ม

วงโยง (pendulum) ที่ปล่อยจากความสูงกำหนดให้กระแทกรอยบาก และการทดสอบ Izod Impact Test ซึ่งขึ้นทดสอบจะถูกยึดในแนวตั้ง (cantilevered) และถูกตีโค้งที่รอยบากด้วยตุ้มตีกระแทกเหมือนกัน ทั้งสองวิธีนี้วัดพลังงานที่วัสดุดูดซับจนแตกหัก และใช้เป็นเกณฑ์วัดความเหนียวหรือความต้านทานต่อแรงกระแทกที่แตกต่างกันในรูปแบบของพลังงานกิโลจูลหรือจูล การเลือกใช้แต่ละวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะวัสดุและมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงในการทดสอบ เพื่อนำผลไปประเมินและออกแบบวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะที่มีแรงกระแทกสูงหรือแกว่งอย่างรวดเร็วในงานวิศวกรรมและอุตสาหกรรมต่างๆ(ภาพประกอบ 31)



ภาพประกอบ 31 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod

ที่มา : อนุวัฒน์, และคณะ , “เอกสารประกอบการเรียนวิชา InE191 Engineering Material” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2.8.4 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

(*Mechanical Properties of Materials*)ความแข็ง (Hardness) ของวัสดุหมายถึงความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุ (penetration) หรือการเสียดสี (abrasion) ซึ่งสัมพันธ์กับความแข็งแรงของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับการจับตัวของอะตอมและโมเลกุลภายในเนื้อวัสดุ เช่นเดียวกับความแข็งแรงที่วัสดุมี ความแข็งมักพบมากในวัสดุประเภทโลหะและเซรามิกซึ่งแข็ง

กว่าพลาสติกหรือโพลีเมอร์ การทดสอบความแข็งมีหลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมี 3 วิธีหลัก ได้แก่

2.8.4.1 การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Test) ซึ่งวัดความลึกของรอยที่อุปกรณ์กดลงบนวัสดุภายใต้แรงกดที่กำหนด สามารถให้ผลรวดเร็วและเหมาะสมสำหรับวัสดุหลายชนิด โดยเฉพาะโลหะและพลาสติก

2.8.4.2 การทดสอบแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) ใช้ลูกบอลเหล็กหรือคาร์ไบด์กดลงบนวัสดุ และวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดเพื่อคำนวณค่าความแข็ง เหมาะกับวัสดุที่มีโครงสร้างหยาบ เช่น เหล็กหล่อ หรืองานตีขึ้นรูป

2.8.4.3 การทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) ใช้หัวเพชรทรงปิรามิดขนาดเล็กกดบนพื้นผิวและวัดความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกด เหมาะอย่างยิ่งกับการวัดความแข็งของวัสดุที่บางหรือเปราะ รวมถึงเซรามิกและชิ้นงานที่ต้องการความแม่นยำสูง

ทั้งสามวิธีนี้ล้วนเป็นการทดสอบด้วยการกดให้เกิดรอยบุ๋มที่ผิววัสดุ (indentation hardness testing) โดยวัดได้จากความลึกหรือขนาดรอยบุ๋มหรือผลกระทบจากแรงกดที่อุปกรณ์กด ทั้งนี้ การเลือกใช้วิธีขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ ลักษณะงาน และความแม่นยำที่ต้องการในแต่ละกรณี.

2.9 โลหะวิทยาการเชื่อม (Welding Metallurgy)

(ไสแสง et al., 2556) การเชื่อมโลหะ (Welding) เป็นกระบวนการยึดเหนี่ยวทางโลหะวิทยา ส่วนมากมีหลักการที่เหมือนกันคือ ต้องให้โลหะงานได้รับอุณหภูมิสูงจนถึงจุดหลอมเหลวโลหะนั้นก่อน ดังนั้นโลหะวิทยาการเชื่อมจึงต้องอาศัยพื้นฐานทางโลหะวิทยากายภาพ การอบชุบโลหะ และการเปลี่ยนรูปถาวร ซึ่งพื้นฐานทั้งหมดสามารถนำไปใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมได้ทั้งสิ้น เพราะคุณภาพของงานเชื่อมต้องขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมที่สะท้อนออกมา

กระบวนการเชื่อมแบบหลอมเหลว (Fusion Welding) โลหะงานจะหลอมเหลวตรงบริเวณที่เราจะเชื่อม แล้วกลับมาแข็งตัวใหม่อีกครั้งหนึ่งเมื่อบริเวณจุดที่หลอมเหลวเย็นตัว ดังนั้นตำหนิที่พบในงานหล่อ เช่น โพรงอากาศ โครงสร้างเสาค้ำ การแยกตัวของธาตุ การฉีกขาดขณะร้อน และปัญหาอื่น ๆ จึงมีโอกาสเกิดขึ้นได้ในงานเชื่อม

ความแตกต่างระหว่างพลังงานที่กระบวนการเชื่อมปล่อยออกมา ล้วนกระทบต่อสมบัติทางกลของโลหะงาน (Base Metal) และรอยเชื่อม (Weld Metal) เช่น การปรับเปลี่ยนส่วนผสมของธาตุ การปรับเปลี่ยนขนาดของโครงสร้างเกรน อัตราการแข็งตัวของลวดเชื่อมกับโลหะงาน

(Dilution Ratio) อัตราการซึมลึก และอัตราความเร็วในการเชื่อม สำหรับคุณภาพของงานเชื่อม และต้นทุน ค่าใช้จ่ายของการดำเนินงานในแต่ละกระบวนการ ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของแหล่งพลังงานที่ใช้ในการปล่อยความร้อนเข้าสู่โลหะงาน

โลหะวิทยาการเชื่อม (Welding Metallurgy) เป็นการศึกษาทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อม และบริเวณใกล้เคียงที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนที่เกิดจากการเชื่อม การเปลี่ยนแปลงทางโลหะวิทยาในแนวเชื่อม อาจแบ่งศึกษาออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนแรกเป็นบริเวณที่เกิดการหลอมละลายซึ่งประกอบด้วย การหลอม การแข็งตัว ปฏิกริยาระหว่างก๊าซกับโลหะหลอมเหลวและปฏิกริยาโลหะหลอมเหลวกับสแลก ถัดมาเป็นบริเวณเชื่อมต่อระหว่างบริเวณหลอมเหลวกับส่วนที่ไม่หลอมละลาย สุดท้ายเป็นส่วนที่ไม่เกิดการหลอมละลายแต่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในขึ้น ดังนั้นการศึกษาโลหะวิทยาการเชื่อมจึงเป็นการศึกษาทางโลหะวิทยาการหลอม การแข็งตัว และการเปลี่ยนแปลงเฟสของโลหะไว้ในที่เดียวกัน

2.9.1 โครงสร้างของแนวเชื่อม

ขณะทำการเชื่อมจะเกิดการอาร์คและทำให้เกิดการหลอมละลายระหว่างลวดเชื่อมและชิ้นงานหรือระหว่างชิ้นงานด้วยกันตรงบ่อหลอมละลายและเมื่อเดินลวดเชื่อมต่อไปข้างหน้า บริเวณบ่อหลอมละลายอุณหภูมิจะลดลงและเกิดการแข็งตัวขึ้น จากการขยายตัวของผลึกและเกรนส่วนบริเวณที่ไม่หลอมละลายแต่ได้รับอิทธิพลของความร้อนจากการอาร์คจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส ในขณะเดียวกันอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้โลหะขยายตัวส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานบริเวณแนวเชื่อม และเมื่ออุณหภูมิลดลงโลหะจะเกิดการหดตัวปรากฏการณ์ต่างๆเหล่านี้จะเกิดขึ้นแตกต่างกันไปตามชนิดของกระบวนการเชื่อมและชนิดของโลหะที่ถูกเชื่อม

ในกระบวนการเชื่อมอาร์คเมื่อลวดเชื่อมและชิ้นงานถูกอาร์คจากกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิซูเปอร์ฮีตที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเหล็ก ลวดเชื่อมและแนวเชื่อมจะหลอมละลายเข้าด้วยกันอยู่ในสถานะเฟสของเหลวและจากนั้นจะเกิดการแข็งตัวลงทันที ความร้อนที่มีอยู่ในแนวเชื่อมจะถูกถ่ายเทไปสู่ชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยเฉพาะบริเวณเชื่อมต่อระหว่างบ่อหลอมละลายกับเนื้อของชิ้นงาน อุณหภูมิจะสูงขึ้นจนถึงจุดหลอมละลายเกิดเป็นบริเวณที่หลอมรวม (fusion zone) ขึ้น ถัดจากบริเวณนี้ไปจะไม่เกิดการหลอมละลายแต่ความร้อนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส และเมื่อการอาร์คผ่านไปจะเกิดการเย็นตัวลงทำให้เกิดผลึกและเกรนเกิดขึ้น ด้วยอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วจะมีสภาพเป็นของแข็ง

ทั้งหมด อัตราการเย็นตัวที่เกิดขึ้นนี้จะเร็วกว่าอัตราการแข็งตัวของโลหะในงานหล่อหรือในอินกอต ดังนั้นลักษณะโครงสร้างที่ได้จะไม่เป็นไปตามแบบแผนเฟสของเหล็ก-คาร์บอนในสภาวะสมดุล

แนวเชื่อมนอกจากจะมีการเย็นตัวที่ซับซ้อนและแตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งแล้ว ส่วนผสมทางเคมีในแนวเชื่อมยังเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย โดยขณะที่ลวดเชื่อมหลอมละลายลงไป ในบ่อหลอมละลายบนชิ้นงานจะเกิดการผสมกันระหว่างเนื้อชิ้นงานและลวดเชื่อมทำให้มีส่วนผสมที่เจือจางลงและยิ่งในกรณีที่แนวเชื่อมมีการเดินแนวซ้ำหลายครั้ง จะยิ่งทำให้เกิดความเข้มข้นของส่วนผสมที่แตกต่างกันยิ่งขึ้น โดยแนวเชื่อมที่เดินครั้งที่ 1 จะมีความเข้มข้นกว่าแนวเชื่อมที่เดินซ้ำครั้งที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ส่วนผสมที่แตกต่างและอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างจะทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันด้วย โครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันจะให้สมบัติที่แตกต่างกันไป

2.9.2 การแข็งตัวของแนวเชื่อม

การแข็งตัวของแนวเชื่อมจะมีลักษณะแตกต่างจากการแข็งตัวของโลหะในแบบหล่อ โดยการแข็งตัวในแบบหล่อจะเริ่มจากการเกิดนิวเคลียสที่ผนังของโพรงแบบหล่อ จากนั้นจึงเติบโตและขยายตัวขึ้นโดยมีทิศทางตั้งฉากกับผนังของโพรงแบบหล่อ ส่วนการแข็งตัวของแนวเชื่อม ไม่ต้องการการเกิดนิวเคลียสแรกเริ่มเหมือนงานหล่อทั้งนี้เพราะที่ผิวรอยเชื่อมต่อระหว่างน้ำโลหะหลอมเหลวกับส่วนที่ไม่หลอมเหลว (ของแข็ง) ของโลหะที่ถูกเชื่อม จะเกิดพันธะระหว่างอะตอมของกันและกันและขยายตัวเป็นเกรนได้ในที่สุด ระดับความเชื่อมต่อกันระหว่างเนื้อของแนวเชื่อมโลหะที่ถูกเชื่อมจะมีมากน้อยเพียงไรขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของโลหะทั้งสองว่ามีความแตกต่างกันเพียงใด อีกทั้งยังรวมไปถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของโลหะทั้งสองด้วย การเติบโตของเกรนในแนวเชื่อมอาจจำแนกตามลักษณะการแข็งตัวได้เป็น 4 ลักษณะ การเติบโตของเกรนในแนวเชื่อมเริ่มต้นจากการแข็งตัวที่ผิวสัมผัสระหว่างส่วนที่เป็นโลหะหลอมเหลวกับส่วนที่เป็นผิวแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ไม่หลอมละลาย โดยชิ้นของโลหะหลอมเหลวที่เริ่มต้นแข็งตัวจะมีรูปแบบโครงสร้างการแข็งตัวเป็น (1) แบบพลาแนร์ (planar) (2) แบบเซลลูลาร์ (cellular) (3) แบบเดนดริติก เซลลูลาร์ (cellular dendritic) และ (4) แบบเดนดริติก คอลัมน์นาร์ (dendritic columnar) รูปแบบการแข็งตัวแบบพลาแนร์จะเกิดขึ้นในกรณีที่แนวเชื่อมหลอมเหลวไม่เกิดการแยกตัวขององค์ประกอบทางเคมีระดับจุลภาค (microsegregation) ส่วนแบบเซลลูลาร์และเดนดริติกจะเกิดขึ้นในแนวเชื่อมหลอมเหลวที่ส่วนผสมทางเคมีของอะตอมของตัวถูกละลายมีปริมาณมากพอที่จะทำให้เกิดกลไกการแยกตัวขององค์ประกอบทางเคมีระดับจุลภาคขึ้นและการแข็งตัวที่เกิดต่ำกว่าจุดแข็งตัวมากๆ (subcooling) โดยทั่วไปแล้วนอกจากโลหะบริสุทธิ์และเหล็กกล้าพิเศษ

บางชนิดเท่านั้นที่ขณะเกิดการแข็งตัวแล้วจะไม่เกิดการแยกตัวขององค์ประกอบเคมีระดับจุลภาคขึ้นที่บริเวณแนวเชื่อม

โครงสร้างบริเวณต่างๆที่ได้รับอิทธิพลจากการเชื่อม

ความร้อนที่ได้การเชื่อมนอกจากจะทำให้เกิดการหลอมเหลวแล้วยังมีอิทธิพลต่อบริเวณขอบเขตของแนวเชื่อมที่ไม่หลอมละลายด้วยเช่นกัน โดยแบ่งออกเป็น 5 บริเวณด้วยกัน คือ

บริเวณ 1 บริเวณแนวเชื่อม (บริเวณที่มีการผสมของลวดเชื่อมกับชิ้นงาน)
(weld zone; mixed zone)

บริเวณ 2 บริเวณที่ไม่มีการผสม (unmixed zone)

บริเวณ 3 บริเวณที่มีการหลอมละลายบางส่วน (partially-melted zone)

บริเวณ 4 บริเวณกระทบร้อน (heat-affected zone; HAZ)

บริเวณ 5 โลหะฐานที่ไม่มีผลกระทบบ (unaffected base metal)

บริเวณ 1 บริเวณแนวเชื่อมหรือบริเวณที่มีการผสมกันของลวดเชื่อมและชิ้นงาน บริเวณนี้ขณะเกิดการอาร์กจะเกิดการกวน (stir) จากแรงของการอาร์กที่ไม่สม่ำเสมอทำให้เนื้อโลหะอาจมีการผสมรวมกันบางส่วนเป็นเนื้อเดียวกันสมบูรณ์ แต่อีกบางส่วนอาจไม่สมบูรณ์ ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคจะเป็นอย่างไรขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ ส่วนผสมทางเคมีความเป็นเนื้อเดียวกัน กลไกการแข็งตัว และโครงสร้างจุลภาคแรกเริ่ม

บริเวณ 2 บริเวณที่ไม่มีการผสมกันระหว่างเนื้อชิ้นงานกับลวดเชื่อม แต่มีการหลอมละลายของเนื้อชิ้นงานเกิดขึ้นและเป็นแนวเชื่อมต่อกับบริเวณแนวเชื่อมหรือบริเวณ 1 การขยายตัวของเกรนจากการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวจะเริ่มจากบริเวณ 2 นี้ ชั้นความหนาของบริเวณ 2 นี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระบวนการเชื่อม เช่นในการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (submerged arc welding) ความหนาบริเวณนี้จะอยู่ระหว่าง 0.05 ถึง 2.5 มม. อุณหภูมิที่เกิดจากการเชื่อมบริเวณนี้จะอยู่ระหว่าง $1,600-1,700^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมินี้จะสูงกว่าอุณหภูมิของเส้นลิววิตต์ หากพิจารณาจากแผนภาพเฟสเหล็กกับคาร์บอน การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของบริเวณนี้จะต้องใช้วิธีการกัดกรดหรือกัดขึ้นรอยที่พิเศษกว่าปกติ จึงจะสามารถตรวจสอบโครงสร้างได้เพราะส่วนผสมทางเคมีจะเป็นส่วนผสมเดียวกันกับชิ้นงานเชื่อม ทำให้ยากที่จะแยกแยะขอบเขตโครงสร้างได้อย่างชัดเจน

บริเวณ 3 บริเวณที่มีการหลอมละลายบางส่วน บริเวณนี้จะไม่ได้เกิดขึ้นกับทุกๆ การเชื่อมแบบหลอมละลายในเหล็กกล้า แต่จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่ทำการเชื่อม และโครงสร้างจุลภาคในพื้นที่เล็กๆที่สามารถเกิดการหลอมละลายได้ที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับ ลิววิตต์

(ประมาณ $1,525^{\circ}\text{C}$) และขึ้นอยู่กับเวลาที่ทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ด้วยว่ายาวนานเพียงใด เพราะถ้ามีเวลาน้อยการรื้อร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วจะไม่เกิดการหลอมละลายขึ้นแต่อย่างใด บริเวณ 3 นี้บางครั้งเรียกว่า “ลิกวชัน” (liquation) เพราะการหลอมละลายจะเกิดขึ้นตามขอบเกรนของโครงสร้างจุลภาคที่มีคุณลักษณะของการแยกตัวขององค์ประกอบทางเคมีที่มีจุดหลอมละลายต่ำอยู่ที่ขอบเกรน

บริเวณ 4 บริเวณกระทบร้อน (HAZ) เป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนของการเชื่อมทำให้สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะที่ถูกเชื่อมเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ในที่นี้บริเวณ HAZ อาจรวมไปถึงบริเวณที่มีการหลอมละลายบางส่วนด้วย ช่วงของบริเวณ HAZ มีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 727°C นั้นเป็นอุณหภูมิวิกฤตต่ำ A_c ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเกิดขึ้น ส่วนจะเปลี่ยนโครงสร้างหรือเฟสใดบ้างขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีและอัตราการได้รับความร้อนขณะเชื่อมที่เพิ่มขึ้นว่าช้าหรือเร็ว และมีอัตราการเย็นตัวช้าเร็วมากเพียงใด

บริเวณ 5 โลหะฐานที่ไม่มีผลกระบบใดๆ บริเวณนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคหรือสมบัติทางกลใดๆ

2.9.3 การเปลี่ยนเฟสในแนวเชื่อม

ความร้อนที่เกิดจากการเชื่อมจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสหลายรูปแบบ ทั้งนี้เพราะแต่ละจุดจะได้รับความร้อนจากการเชื่อมไม่เท่ากัน อัตราการถ่ายเทความร้อนในแต่ละตำแหน่งที่ไม่เท่ากันนั้นจะมีลักษณะเหมือนการเปลี่ยนเฟสในกระบวนการอบชุบความร้อน

แนวเชื่อมของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ในแนวเชื่อมจุดที่มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์หรือเบนไนต์ ส่วนบริเวณที่มีการเย็นตัวช้าจะทำให้เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพอร์ไลต์ หากมีการเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวปานกลางจะทำให้เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์แบบเข็มขึ้น (acicular ferrite; AF) แต่บางครั้งจะมีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ตามขอบเกรน (grain-boundary ferrite; GB) และเฟอร์ไรต์ที่จัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (aligned ferrite; AC) เกิดขึ้นด้วย

2.10 ความเค้นตกค้าง (Residual Stress)

(สุข) ความเค้นตกค้าง (Residual Stress) หมายถึงความเค้นภายในที่คงเหลืออยู่ในชิ้นงานโลหะ แม้ว่าวัสดุชิ้นนั้นจะไม่มีแรงภายนอกมากระทำ โดยเกิดขึ้นจากความบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึกภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งอาจเกิดจากความไม่สมดุลของอุณหภูมิ การเปลี่ยนรูปพลาสติกที่ไม่สม่ำเสมอ หรือการเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุในกระบวนการผลิต เช่น การเชื่อมและการขึ้นรูป โลหะจะเกิดความเค้นตกค้างในรูปของแรงดึงหรือแรงกดภายในชิ้นงาน โดยแบ่งสาเหตุหลักของความเค้นตกค้างออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ (1) ภาวะทางกลภายนอก เช่น การขัดผิวด้วยการยิง

อนุภาค (Shot Peening) (2) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลของการขยายตัวระหว่างเฟสวัสดุต่าง ๆ (Thermal Residual Stress) และ (3) การเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและปริมาตรภายในวัสดุเอง

การวัดค่าความเค้นตกค้างไม่สามารถวัดได้โดยตรงด้วยวิธีการทั่วไป จึงต้องอาศัยเทคนิคทางอ้อมหลากหลายประเภท ซึ่งแบ่งเป็นการวัดด้วยวิธีทางกล (Mechanical methods) การวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสี (Diffraction methods) รวมถึงการวัดโดยสนามแม่เหล็กและไฟฟ้า (Magnetic and Electrical Field methods)

ตัวอย่างเทคนิคที่นิยม ได้แก่

วิธีการเจาะหลุม (Hole Drilling Method) ซึ่งเป็นวิธีแบบกึ่งทำลายโดยการเจาะรูเล็ก ๆ บริเวณที่ต้องการวัดความเค้นตกค้าง จากนั้นวัดการคลายตัวของความเครียดที่เกิดขึ้นโดยใช้เกจวัดความเครียด (strain gauge) เพื่อคำนวณแรงเค้นตกค้างในระดับลึกเฉพาะจุด

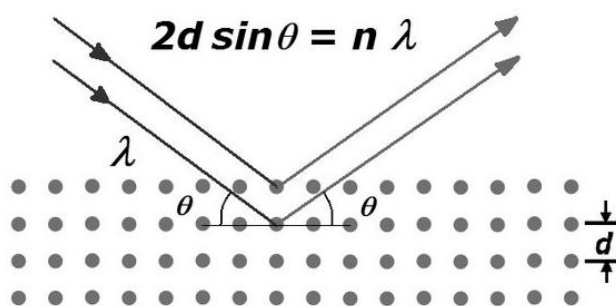
การวัดความโค้ง (Curvature measurement) ใช้เพื่อประเมินความเค้นในชั้นผิวของวัสดุหรือชั้นเคลือบ โดยวัดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงโค้งของชิ้นงานด้วยเครื่องมือสัมผัสหรือไม่สัมผัส เช่น โปรไฟล์มิเตอร์ (profilometer), สเตรนเกจ (strain gauge), หรือเลเซอร์สแกน

วิธีเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) เป็นวิธีไม่ทำลายที่ใช้หลักการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เมื่อรังสีเอ็กซ์ถูกยิงไปยังผลึกในวัสดุและเกิดเลี้ยวเบนที่มุมต่าง ๆ การเปลี่ยนแปลงระยะชั้นผลึก (lattice spacing) ซึ่งสัมพันธ์กับความเค้นตกค้างภายในวัสดุจะถูกตรวจวัดผ่านการวิเคราะห์ตำแหน่งมุมเลี้ยวเบน ช่วยให้สามารถวัดความเค้นตกค้างบนพื้นผิวหรือบริเวณใกล้ผิวด้วยความแม่นยำสูง โดยเฉพาะในวัสดุผลึก เช่น โลหะและเซรามิก แม้ว่าวิธีนี้จะไม่เหมาะกับวัสดุที่มีโครงสร้างเกรนละเอียดมากหรือผิวไม่เรียบ โดยทั่วไปจะใช้เครื่อง X-ray Diffractometer ยิงรังสีและวัดมุมเลี้ยวเบนพร้อมทั้งความเข้มของรังสีที่เลี้ยวเบนออกมา ซึ่งนำไปสู่การคำนวณค่าความเค้นตกค้างอย่างละเอียดตามมาตรฐาน เช่น SAE J784a

เทคนิคอัลตราโซนิก (Ultrasonic Techniques) ใช้การวัดความเร็วของคลื่นเสียงอัลตราโซนิกในวัสดุที่เปลี่ยนแปลงตามความเค้นตกค้าง ซึ่งเหมาะกับการวัดความเค้นตกค้างในวัสดุที่มีความลึกมาก แต่ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่บางมาก

วิธีแม่เหล็ก (Magnetic Methods) ใช้สมบัติแม่เหล็กของวัสดุเพื่อตรวจวัดความเค้นตกค้าง โดยต้องใช้วัสดุที่มีสมบัติแม่เหล็ก เช่น เหล็กกล้า วิธีนี้สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นตกค้างได้จากการตอบสนองของแม่เหล็กที่แตกต่างกันในวัสดุภายใต้แรงเค้น

โดยรวมแล้ว ความเค้นตกค้างเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและความทนทานของชิ้นงานโลหะ การทำความเข้าใจและวัดค่าความเค้นตกค้างจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบชิ้นงาน การผลิต และการประเมินความปลอดภัยในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องอย่างกว้างขวาง.



ภาพประกอบ 32 การสะท้อนของรังสีเอ็กซ์

ที่มา : www.nuc2011.wordpress.com

2.11 การบิดเสียรูป (Distortion)

(สุวรรณทัศน์ & อุตมะพันธ์, 2559) การเชื่อมเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการประกอบโครงสร้างหลายชนิด โดยทั่วไป ชิ้นงานเชื่อมจะทำให้เกิดความร้อนเฉพาะบริเวณที่ทำการเชื่อมจากแหล่งกำเนิดความร้อนของการเชื่อม ดังนั้นการกระจายของอุณหภูมิในชิ้นงานจะไม่เท่ากันและเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่บริเวณที่ไม่ได้รับความร้อนจะพยายามต้านทานการขยายตัว จึงทำให้เกิดความเครียดในหลายทิศทาง ความเครียดดังกล่าวจะเกิดขึ้นพร้อมความบกพร่องในช่วงที่เป็นสภาพพลาสติกของเนื้อโลหะจากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เกิดความเค้นภายในโลหะและทำให้เกิดการบิดตัวซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการเชื่อมทำให้ชิ้นงานเสียรูปร่างเปลี่ยนไปจากเดิม ปัญหาเหล่านี้ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้

การเสียรูปหรือการหดตัวคือการที่ส่วนต่างๆ เคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิม ซึ่งความเค้น คือ เกิดแรงภายในที่ทำให้เสียรูปร่าง ในขณะที่เกิดอาร์กจะเกิดความร้อนสูงมากจนทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมละลาย ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลทำให้ชิ้นงานเกิดการขยายตัวหรือหดตัวทำให้ชิ้นงานเกิดความเค้นขึ้น ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอและเสียรูป

2.11.1 การขยายตัวและการหดตัว(Expansion and Contraction)

เมื่อวัสดุรับภาระหรือถูกกดอัดจะมีการเปลี่ยนรูปร่างหดหรือยืดและยังเกิดความเค้นจากระบวนการเชื่อมด้วยการเชื่อมระหว่างความร้อนจากเปลวแก๊สหรือประกายไฟอาร์กจะทำให้

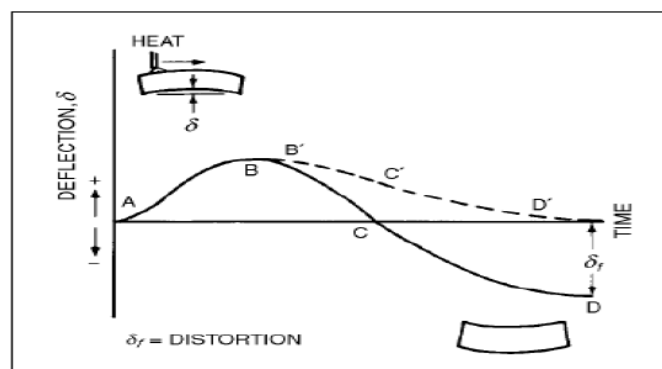
โลหะขยายตัว ทำให้เกิดความเครียดบนโลหะ โลหะที่ขยายตัวจะถูกการขยายตัวด้วยรอยเชื่อมอื่น ถูกตรึง ถูกยึดโดยจิ๊กและการออกแบบของการเชื่อมโลหะจะหดเมื่อเย็นตัวและการขยายตัวเมื่อรับ ความร้อน หดตัวเนื่องจากความเย็นและสถานการณ์ดึงรั้งเหล่านี้ทำให้เกิดความเค้นต่างๆ เกิดขึ้น ในงานเชื่อม

2.11.2 การบิดเบี้ยวและความเค้นในการเชื่อม (Distortion and Stress in Welding)

ในงานเชื่อมทุกแบบมีการเกร็งตัวของเนื้อโลหะมักเกิดขึ้น 2 ประการใหญ่ๆ ที่ทำให้เกิดความเสียหาย คือ การเสียรูปและเกิดความเค้นการเสียรูปอาจเรียกอีกอย่างว่าการหดตัว โดยปกติ หมายถึง การเคลื่อนไหวของส่วนต่างๆ ทั้งหมดของชิ้นส่วนที่เชื่อมจากตำแหน่งเดิมก่อนเชื่อม ไป หลังเชื่อม ความเค้นกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ แรงภายในที่ทำให้เกิดการเสียรูปร่าง

2.11.3 การบิดตัวเนื่องจากการเชื่อม

การแบ่งประเภทของการบิดตัวเนื่องจากการเชื่อม การเชื่อมเป็นขบวนการต่อโลหะ โดยการให้ความร้อนเป็นจำนวนมากแก่เนื้อโลหะในเฉพาะแห่งจนเนื้อโลหะหลอมละลาย แล้วจึงปล่อยให้แข็งตัวโดยการเย็นตัวลง ในการกระทำดังนี้เนื้อโลหะที่บริเวณต่างๆ ของชิ้นงานจะมี อุณหภูมิแตกต่างกันมากในขณะเมื่อทำการเชื่อมสิ่งที่เกิดตามมา คือ การบิดตัวในสภาพพลาสติก และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเนื้อโลหะเนื่องจากการเปลี่ยนสภาพ (Transformation) ในจุดที่ได้รับ ความร้อนสูงในบริเวณแนวเชื่อมนี้ทำให้เกิดความเค้นหรือการบิดตัวเกิดขึ้นในรอยต่อโดยมีผล เกี่ยวเนื่องมาจากการหดตัวของเนื้อโลหะเดิม (Deposited Metal) การหดตัวดังกล่าวเป็นไปอย่าง ซับซ้อน (Complex) การเย็นตัวเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้วัสดุบิดตัวลงซึ่งขนาดการบิดตัวนี้เรียกว่า Distortion (ภาพประกอบ 33)



ภาพประกอบ 33 ภาพการบิดตัวเมื่อเวลาผ่านไป

ที่มา : รุ่งเรืองสุวรรณทัศน์ และคณะ, การศึกษาผลกระทบของกระแสไฟฟ้าต่อขนาดแนวเชื่อมและการบิดตัวของชิ้นงานอลูมิเนียมที่มีความหนาต่างกัน, ปริญญาานิพนธ์สาขาเทคโนโลยีการเชื่อม ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ 2559

2.12 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis: FEA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) ที่ใช้หาคำตอบเชิงประมาณสำหรับปัญหาทางวิศวกรรมซึ่งมีความซับซ้อน โดยการกำหนดสมการควบคุมระบบ (Governing Equations) ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) แล้วแก้สมการดังกล่าวในเชิงประมาณ วิธีนี้อาศัยการแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นองค์ประกอบย่อย (Element) ที่เชื่อมต่อกันด้วยจุดโหนด (Node) จากนั้นจึงสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละองค์ประกอบ และรวมระบบสมการเพื่อหาผลเฉลยที่ตำแหน่งโหนดบนโดเมนทั้งหมด

แม้ในระยะแรก FEA จะถูกพัฒนาสำหรับการวิเคราะห์ความเค้น (Stress Analysis) ในโครงสร้างที่มีรูปทรงซับซ้อน แต่ปัจจุบันได้ถูกประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในสาขาที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงและสามารถรองรับการแก้ปัญหาที่หลากหลาย การประยุกต์ใช้งานครอบคลุมทั้ง การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง (Structural Analysis), การวิเคราะห์ระบบความร้อน (Thermal System Analysis), การวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (Flow and Convective Heat Transfer Analysis) ตลอดจน การวิเคราะห์กระบวนการแปรรูปวัสดุด้วยความร้อน (Thermo-Mechanical Process Analysis) เช่น กระบวนการตีขึ้นรูป (Forging), การรีดขึ้นรูป (Rolling) และการเชื่อมขึ้นรูป (Welding) เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติด้านความแม่นยำและความหลากหลายของ FEA ทำให้ได้รับการยอมรับและนำไปใช้ทั้งในแวดวงวิชาการด้านวิศวกรรมและในภาคอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย (Roland et al., 2004)

2.13 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tumuluru(1981) ระบุว่าปริมาณของ acicular ferrite สูงในแนวเชื่อมเป็นตัวแปรสำคัญที่ช่วยเพิ่ม impact toughness ของ weld metal อย่างมีนัยสำคัญ โดย acicular ferrite มีโครงสร้างที่มีขอบเขตเกรนแบบ high-angle grain boundaries ซึ่งช่วยเพิ่มความเหนียวและความต้านทานแรงกระแทกของรอยเชื่อม นอกจากนี้ โครงสร้างแบบ grain boundary allotriomorphic ferrite (PF) และ Widmanstatten ferrite ที่พบในปริมาณน้อย จะช่วยป้องกันการร้าวตัวของ

microcrack ภายในรอยเชื่อม ทำให้ลดความเปราะและเพิ่มความทนทานทางกลของ weld metal ได้ดีขึ้น

กล่าวโดยสรุปคือ มีปริมาณ acicular ferrite ที่สูงใน weld metal ช่วยสร้างโครงสร้างที่ interlocking และมีขอบเขตเกรนที่เหมาะสม ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ weld metal มี impact toughness สูงและลดโอกาสการเกิด microcrack จากโครงสร้าง PF และ Widmanstatten ferrite ที่น้อยลง ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดจุดอ่อนภายในรอยเชื่อม ส่งผลให้รอยเชื่อมแข็งแรงและทนทานต่อแรงกระแทกมากขึ้น

ดังนั้น การควบคุมกระบวนการเชื่อมเพื่อเพิ่มปริมาณ acicular ferrite และลดการเกิด PF กับ Widmanstatten ferrite ที่มากเกินไปจึงเป็นเทคนิคสำคัญในการพัฒนา weld metal ที่มีคุณสมบัติทางกลดีเยี่ยมและมีความน่าเชื่อถือสูงในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะที่ต้องการคุณสมบัติ toughness สูงและการป้องกันการแตกหักของรอยเชื่อม

CANMET Minerals and Metals (1997) และ Xu et al. รายงานเกี่ยวกับเหล็กความแข็งแรงสูง TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) ในสถานะอุณหภูมิต่ำ พบว่าบริเวณ intercritical Heat Affected Zone (ICHAZ) มีค่าความเหนียว (impact toughness) สูงและผ่านเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมได้ดีมาก โดยเฉพาะในวัสดุ TMCP ซึ่งมีโครงสร้างจุลภาคของ ferrite ที่ละเอียดและการกระจายโครงสร้างรองที่ไม่ส่งผลเสียต่อความเหนียวมากนัก ในทางตรงกันข้าม บริเวณ grain-coarsened Heat Affected Zone (GCHAZ) จะแสดงค่าความเหนียวต่ำกว่า ICHAZ ซึ่งเป็นข้อด้อยหลักของบริเวณนี้ อย่างไรก็ตาม หากมีการควบคุม inclusion (สิ่งแปลกปลอมในเนื้อวัสดุ) และโครงสร้างจุลภาคดี เช่น การควบคุมเม็ดผลึกและลดสิ่งเจือปนที่เป็นอันตราย เช่น ซัลไฟด์และออกไซด์ได้ดี GCHAZ ก็ยังคงอยู่ในขีดจำกัดความปลอดภัยและคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการใช้งาน โดยรวมแล้ว Heat Affected Zone (HAZ) ของเหล็ก TMCP สามารถรักษาคุณสมบัติ impact toughness ได้ดีกว่าแนวเชื่อมของเหล็กที่ผ่านกระบวนการ normalized ทั่วไป ซึ่งเป็นข้อดีสำคัญของเหล็ก TMCP ที่ทำให้เหมาะกับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ต้องการความทนทานและรับแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ เช่น งานต่อเรือและโครงสร้างหนักในสภาพอากาศหนาวเย็น สาเหตุสำคัญมาจากการที่ TMCP ช่วยให้โครงสร้างจุลภาคใน HAZ โดยเฉพาะ ICHAZ มีเม็ดผลึก ferrite ที่ละเอียดและกระจายตัวดี รวมทั้งลดการเจริญเติบโตของ grain ขนาดใหญ่ใน GCHAZ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความเหนียวและการต้านทานการแตกร้าวที่ดีขึ้น

สรุปคือ เหล็ก TMCP ที่มีการควบคุม inclusion และโครงสร้างจุลภาคอย่างเหมาะสมในระหว่างการเชื่อม จะมี Heat Affected Zone ที่สามารถรักษาคุณสมบัติ impact toughness ได้สูง โดยเฉพาะใน ICHAZ และแม้ใน GHAZ ก็ยังอยู่ในขอบเขตความปลอดภัยตามมาตรฐานอุตสาหกรรม อีกทั้งมีคุณสมบัติที่ดีกว่าเหล็กที่ผ่านกระบวนการ normalized ทั่วไปอย่างชัดเจน.

Ahmet Durgutlu,(2004) ได้ศึกษาพารามิเตอร์การเติมไฮโดรเจนไปในอาร์กอนเพิ่มประสิทธิภาพการหลอมของอาร์พลาสติกมาในกระบวนการเชื่อม GTAW(TIG) โดยผลการศึกษาดทดลองสรุปได้ว่าการทดลองการเติมไฮโดรเจนไปในอาร์กอนส่งผลให้ความลึกของรอยเชื่อมซึมลึก (Full Penetration) เพิ่มขึ้น, ความกว้างของแนวเชื่อม, ความแข็ง(Hardness)ของแนวเชื่อมลดลง, การทดสอบความแข็ง(Hardness Test)ทำให้ทราบได้ว่าการเติมไฮโดรเจนไปในอาร์กอนทำให้คุณสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็งลดลง (Durgutlu, 2004)

Dunbar TE, Pegg N, Taheri F, Jiang L (2004) การตรวจสอบเชิงคำนวณเกี่ยวกับผลกระทบของการกักความร้อนเฉพาะที่บนแผ่นเหล็กและพาเนลที่เสริมความแข็ง(Stiffened Panel) ศึกษาการกักความร้อนเฉพาะที่บนความสามารถในการรับน้ำหนักของพาเนลที่เสริมความแข็ง โดยพิจารณาถึงความเค้นที่เกิดจากการเชื่อมที่เกิดการกักความร้อน และแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของตำแหน่งการกักความร้อนในแง่ของความสามารถในการรับน้ำหนักของพาเนลที่เสริมความแข็ง ซึ่งการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกักความร้อนในช่วงกลางเป็นสิ่งที่มีความสัมพันธ์ต่อความแข็งแรงมากที่สุด (Dunbar et al., 2004)

งานวิจัยของ Park et al.(2005) รายงานเกี่ยวกับค่าความแข็ง (hardness) ในเหล็กกล้า TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) ดังนี้

ค่าความแข็งบริเวณ weld metal (WM) มักจะสูงกว่า base metal (BM) เมื่อใช้ลวดเชื่อมที่มีความแข็งสูง ซึ่งส่งผลให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงและทนทานในระดับสูง

ในเขต Heat Affected Zone (HAZ) ค่าความแข็งจะใกล้เคียงกับแนวเชื่อม และมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างจากฐานโลหะตามกระบวนการเชื่อมและการควบคุมพารามิเตอร์เชื่อม

สำหรับเหล็ก TMCP จะพบว่ามีพื้นที่ softened zone (บริเวณที่ค่าความแข็งลดลงจาก base metal) ขนาดเล็กเฉพาะเจาะจง ในขณะที่เหล็กที่ผ่านกระบวนการ normalized มักจะเกิด softened zone ที่มีขนาดใหญ่กว่า

การมี softened zone ขนาดเล็กใน TMCP steel ช่วยรักษาคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมและบริเวณ HAZ ได้ดีขึ้น ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงและความทนทานสูงกว่าการใช้เหล็ก normalized ที่ softened zone กว้างกว่าส่งผลต่อความเปราะบางได้มากกว่า

สรุปคือ งานวิจัยของ Park et al. ชี้ให้เห็นว่า การใช้ลวดเชื่อมที่มีความแข็งสูงในเหล็ก TMCP ทำให้ weld metal มีความแข็งสูงกว่า base metal และ HAZ มีความแข็งใกล้เคียงแนวเชื่อม พร้อมกับลักษณะ softened zone ที่เล็กกว่ากระบวนการ normalized ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในการรักษาคุณสมบัติทางกลและความทนทานของรอยเชื่อมในงานโครงสร้างหนักและอุตสาหกรรมที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูง.

Deng, D. และ Murakawa, H. (2006) มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อทำนายสนามอุณหภูมิและความเค้นตกค้างในกระบวนการเชื่อมแบบหลายพาส โดยเฉพาะในท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ผ่านการผสมผสานการวิเคราะห์ด้านความร้อน โลหะวิทยา และกลศาสตร์ ภายใต้กรอบ CFD-FEM ประเด็นสำคัญได้แก่

การรวมเอาปรากฏการณ์การแปรสภาพของโครงสร้างเฟส (phase transformation) และผลของการเปลี่ยนเฟสแบบ TRIP เข้าในแบบจำลองเพื่อความแม่นยำที่สูงขึ้น

การใช้วิธี inverse analysis เพื่อประมาณค่าการเปลี่ยนรูปถาวร เช่น การหดตัวและการโก่งตัวของโครงสร้างเชื่อม

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผลลัพธ์กับข้อมูลทดลอง ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องกันดี

แบบจำลองช่วยในการวางแผนและปรับปรุงกระบวนการเชื่อมเพื่อลดการบิดเบี้ยวและความเค้นตกค้างในชิ้นงาน

สรุปคือ งานของ Deng และ Murakawa (2006) เป็นการพัฒนาแบบจำลองที่ครอบคลุมทั้งความร้อน การเปลี่ยนเฟส และพฤติกรรมทางกลในกระบวนการเชื่อมหลายพาส เพื่อให้การทำนายความเค้นตกค้างและความเสียหายเกิดความแม่นยำและลดการทำซ้ำในการทดลองจริงในอุตสาหกรรมได้อย่างมากมาย เป็นผลงานสำคัญที่ช่วยเสริมความเข้าใจและการควบคุมคุณภาพงานเชื่อมในสภาพแวดล้อมจริง.

Abson(2006) ระบุว่า การออกแบบฟลักซ์ (flux) และลวดเชื่อม (filler) ให้เอื้อต่อการเกิดโครงสร้าง acicular ferrite (AF) ในเนื้อเชื่อม เป็นกลยุทธ์สำคัญที่จะช่วยลดความเสี่ยงการแตกหักแบบเปราะ (brittle fracture) และสามารถปรับแต่งสมบัติทางกลของแนวเชื่อมให้ตรงตามวัตถุประสงค์การใช้งานได้

Acicular ferrite เป็นโครงสร้างจุลภาคที่มีเกรนละเอียดแบบ intragranular ซึ่งช่วยเพิ่มทั้งความเหนียวและความแข็งแรงของรอยเชื่อม การส่งเสริมให้เกิด AF จะช่วยให้รอยเชื่อมมีความเหนียว (impact toughness) สูงขึ้น และต้านทานการเกิดและการขยายตัวของรอยร้าว ทำให้ลดโอกาสการแตกหักแบบเปราะประเด็นสำคัญจากคำแนะนำของ Abson ได้แก่

องค์ประกอบทางเคมีของฟลักซ์ (เช่น CaO, MgO, CaF₂, Al₂O₃) จะทำงานร่วมกับองค์ประกอบของลวดเชื่อม เพื่อมีผลต่อการเกิด inclusion และควบคุมโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อม การปรับสัดส่วนอย่างเหมาะสมสามารถเพิ่มปริมาณ AF ได้

การออกแบบฟลักซ์สามารถควบคุมขนาด การกระจายตัว และคุณสมบัติทางเคมีของสิ่งเจือปน (non-metallic inclusions) ซึ่งมักทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นการเกิด AF โดย inclusion ที่มี Ti หรือ Al จะช่วยกระตุ้นการเกิด AF ได้ดี

การเพิ่มปริมาณ AF จะช่วยสร้างโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่ละเอียดและเชื่อมโยงกัน (interlocking) ซึ่งขัดขวางการลุกลามของรอยร้าวและเพิ่มความเหนียวของรอยเชื่อม

การควบคุมโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธีนี้ ทำให้สามารถปรับสมดุลระหว่างความแข็งแรง ความเหนียวได้ตรงตามความต้องการใช้งาน

การส่งเสริม AF จะช่วยลดการเกิดโครงสร้างที่เปราะกว่า เช่น grain boundary ferrite หรือ martensite ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้รอยเชื่อมแตกหักง่าย

สรุป: Abson แนะนำให้ใส่ใจการออกแบบฟลักซ์และลวดเชื่อมเพื่อเพิ่มการเกิด acicular ferrite ในเนื้อเชื่อม ซึ่งจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกล ลดความเสี่ยง brittle fracture และสามารถ "ปรับวิศวกรรม" รอยเชื่อมให้เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความนำเชื่อถือสูง เช่น โครงสร้างกำลังสูงและงานที่มีความสำคัญด้านความปลอดภัย.

Jain, E. K., (2008) กล่าวไว้ในหนังสือ Production Technology, Sixteenth Edition การเชื่อมเป็นหนึ่งในเทคนิคการต่อประสานวัสดุที่เก่าแก่ที่สุดและพบบ่อยที่สุดสำหรับโครงสร้างโลหะ สมาคมการเชื่อมประเทศสหรัฐอเมริกา (American Welding Society (AWS)) ได้กำหนดให้การเชื่อมเป็นกระบวนการเชื่อมต่อประสานวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมโลหะ โดยที่รอยเชื่อมหมายถึง "การรวมตัวกันของโลหะหรือโลหะที่เกิดจากการให้ความร้อนแก่วัสดุจนถึงอุณหภูมิหลอมละลาย โดยจะใช้ความดันและ/หรือวัสดุตัวเติมหรือไม่ก็ได้" เทคโนโลยีการเชื่อมแบ่งออกเป็นสองประเภทกว้างๆ การเชื่อมแบบไซลิคเตตและการเชื่อมแบบฟิวชั่น ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาโลหะได้มีการเชื่อมโดยการรวมกันของกระบวนการเชื่อมมากกว่าหนึ่งกระบวนการโดยทั่วไปเรียกว่ากระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด และหนึ่งในกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด คือการเชื่อมแบบผสมระหว่าง Tungsten

Inert Gas และ Metal Inert Gas (TIG / MIG) เป็นเทคนิคการเชื่อมแบบใหม่ การเชื่อมแบบไฮบริด TIG / MIG คือการเชื่อมโลหะโดยการรวมกันของ TIG และกระบวนการเชื่อมอาร์ค MIG ในตะเข็บเชื่อมเดียว ทำได้โดยการตั้งค่าการอาร์ค TIG ที่นำหน้าในขณะที่การอาร์ค MIG ต่อท้าย (เรียกว่าไฮบริด TIG / MIG) หรือโดยการตั้งค่าการอาร์ค MIG นำหน้าในขณะที่การตั้งค่าการอาร์ค TIG จะต่อท้าย (เรียกว่าไฮบริด MIG / TIG) (Jain, 2008)

C.S. Wu. (2009) ศึกษาการวิเคราะห์รูปแบบความร้อนและองค์ประกอบสำหรับ keyhole ในสแตนเลสเกรด 304 โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยการเปรียบเทียบกับการคำนวณ ผลที่ได้ใกล้เคียงกัน (Wu et al., 2009)

JIA Chuan-bao (2009) ได้ทำการการตรวจวัดและควบคุม keyhole ในการเชื่อมอาร์คพลาสมา สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม 1Cr18Ni9Ti (Jia et al., 2009)

Kim, J. S. และ Lee, J. S. (2009) เน้นการวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง (residual stress) ที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมโดยเฉพาะในงานเชื่อมที่เป็นโลหะต่างชนิดกัน (dissimilar metal welds) งานนี้ใช้วิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (finite element method - FEM) เพื่อทำนายและประเมินความเค้นตกค้างโดยไม่ต้องพึ่งการทดสอบจริงที่มีค่าใช้จ่ายสูง

ประเด็นสำคัญของงานวิจัยนี้ได้แก่

การพัฒนาแบบจำลอง FEM ที่เหมาะสมสำหรับการประเมินความเค้นตกค้างในรอยเชื่อมโลหะต่างชนิด

การศึกษาสภาพความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อม เพื่อเข้าใจพฤติกรรมและลักษณะของความเค้นที่อาจก่อให้เกิดปัญหาความเสียหายได้

เน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมที่มีต่อการกระจายและความเข้มข้นของความเค้นตกค้างในชิ้นงาน

โดยสรุป งานของ Kim และ Lee (2009) มีส่วนช่วยสำคัญในการสร้างความเข้าใจและการทำนายความเค้นตกค้างในงานเชื่อม ซึ่งช่วยให้การควบคุมและปรับปรุงกระบวนการเชื่อมเพื่อเพิ่มความทนทานและความน่าเชื่อถือของชิ้นงานดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับวิศวกรและนักวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานเชื่อมและการประเมินคุณภาพเชิงกลของวัสดุเชื่อม.

งานวิจัยของ Naffakh et al.(2009) รายงานว่าในกระบวนการเชื่อมด้วยวิธี Shielded Metal Arc Welding (SMAW) บนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ปริมาณและโครงสร้างของ acicular

ferrite (AF) และ polygonal ferrite (PF) ในแนวเชื่อมมีความสัมพันธ์อย่างมากกับความเหนียว (toughness) สูงและอายุการใช้งานที่ยาวนานในสภาวะใช้งานจริงโดยรายละเอียดสำคัญคือ

ปริมาณ acicular ferrite ที่สูงทำให้แนวเชื่อมมีโครงสร้างจุลภาคที่มีขอบเขตเกรนแบบ high-angle grain boundaries ซึ่งช่วยเพิ่มความเหนียวและความต้านทานต่อการแตกร้าวจากแรงกระแทกได้ดี

โครงสร้าง polygonal ferrite ที่เหมาะสมร่วมกับ acicular ferrite ยังช่วยป้องกันการเกิดรอยร้าวเล็กๆ (microcracks) ภายในแนวเชื่อม ทำให้ความเหนียวโดยรวมดีขึ้นและเสถียรต่อการใช้งานระยะยาว

การรักษาสมดุลระหว่างโครงสร้าง AF และ PF ในแนวเชื่อมยังช่วยเพิ่มความทนทานในงานที่มีแรงกระแทกและรับภาระซ้ำ (cyclic loading) ทำให้อายุการใช้งานของชิ้นงานเชื่อมยาวนานขึ้นตามไปด้วย

งานวิจัยชี้ให้เห็นชัดเจนว่าโครงสร้าง microstructure โดยเฉพาะการเพิ่ม acicular ferrite ใน SMAW weld metal เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งเสริมความเหนียวสูงและลดความเปราะของรอยเชื่อมใน low carbon steels

ดังนั้น การควบคุมกระบวนการเชื่อมและองค์ประกอบโลหะเติมเพื่อเพิ่ม acicular ferrite และรักษา polygonal ferrite ในแนวเชื่อมจึงเป็นเทคนิคสำคัญในการพัฒนาคุณภาพรอยเชื่อมที่มีความเหนียวสูงและอายุการใช้งานที่ยาวนานในงานอุตสาหกรรมที่ใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิดนี้

งานวิจัยของ Ramirez et al.(2009) วิเคราะห์ผลของการควบคุมอัตราการเย็นตัว (cooling rate) ระหว่างกระบวนการ solidification ในรอยเชื่อม โดยเฉพาะในกระบวนการ Shielded Metal Arc Welding (SMAW) พบว่าอัตราการเย็นตัวมีผลสำคัญต่อปริมาณและลักษณะของโครงสร้างจุลภาคภายใน weld metal ได้แก่ acicular ferrite (AF) และ polygonal ferrite (PF) รายละเอียดสำคัญได้แก่

อัตราการเย็นตัวที่เหมาะสมจะช่วยส่งเสริมการเกิดโครงสร้าง acicular ferrite ที่มีลักษณะเกรนละเอียดและขอบเขต grain boundary สูง ซึ่งช่วยเพิ่มความเหนียว (impact toughness) และลดความเปราะของรอยเชื่อม

เมื่ออัตราการเย็นตัวสูงเกินไป อาจทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความแข็งแรงแต่เปราะ เช่น martensite หรือ grain ที่หยาบ และลดปริมาณ acicular ferrite ส่งผลให้ความเหนียวน้อยลง

โครงสร้าง polygonal ferrite ที่พบในปริมาณเหมาะสมจะช่วยป้องกันการก่อตัวของรอยแตกร้าวและเพิ่มความทนทานของรอยเชื่อม

การควบคุม cooling rate ผ่านพารามิเตอร์การเชื่อม เช่น heat input, welding current และเวลาระหว่างการเชื่อม (interpass time) จึงเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของรอยเชื่อม

โดยสรุป งานวิจัยของ Ramirez et al. แสดงให้เห็นว่า การควบคุมอัตราการเย็นตัวในการเชื่อม SMAW สามารถปรับแต่งปริมาณ acicular ferrite และ polygonal ferrite ใน weld metal ได้ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติความแข็งแรงและความเหนียวของรอยเชื่อม การจัดการพารามิเตอร์เชื่อมเพื่อให้มี cooling rate เหมาะสมจึงมีความสำคัญในการผลิตรอยเชื่อมที่มีคุณภาพสูงและสมรรถนะดีในงานโครงสร้างอุตสาหกรรมต่าง ๆ

Colegrove et al.(2009) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการเชื่อม ขนาดของ heat input, พื้นที่ fusion area, residual stress และการบิดงอ (distortion) ในแผ่นเหล็ก DH36 สำหรับงานต่อเรือ พบว่า

ค่าสูงสุดของแรงบิดเสี้ยวรูปและความเค้นตกค้างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามขนาดของ heat input และความกว้างของแนวเชื่อม (fusion area)

กระบวนการเชื่อมแบบ Submerged Arc Welding (SAW) ที่ใช้พลังงานความร้อนสูง มีค่าสูงสุดของ residual stress และ distortion สูงกว่ากระบวนการเชื่อมแบบ Hybrid Laser หรือ Pulsed Gas Metal Arc Welding (Pulsed GMAW) ที่ใช้ heat input ต่ำกว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างพื้นที่ fusion zone กับ heat input ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปริมาณ deformation และ residual stress ที่เกิดขึ้น

กระบวนการเชื่อมด้วย Hybrid Laser และ Pulsed GMAW มีข้อดีในด้านการลด distortion เนื่องจากใช้ heat input ต่ำ ทำให้เกิดพื้นที่ fusion zone แคบกว่าและการกระจายความร้อนไม่กว้างเหมือน SAW

ผลการศึกษายังได้สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขที่สามารถทำนาย residual stress และยืนยันผลด้วยข้อมูลเชิงทดลองได้อย่างดี

สรุปคือ การเลือกวิธีการเชื่อมที่ใช้ heat input ต่ำ เช่น Hybrid Laser หรือ Pulsed GMAW จะช่วยลดความเค้นตกค้างและการบิดงอของแผ่นเหล็ก DH36 ได้ดีกว่าการใช้กระบวนการเชื่อมที่มี heat input สูง เช่น SAW ซึ่งมีข้อดีในการลดปัญหาความบิดงอและความเค้นตกค้าง ส่งผลให้คุณภาพของรอยเชื่อมและความน่าเชื่อถือของโครงสร้างในงานต่อเรือสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

Li, C., และคณะ (2010) ได้ทำการทดสอบผลของพารามิเตอร์เชื่อมกระบวนการไฟเบอร์ เลเซอร์-มิกไฮบริดที่มีต่อรูปทรงของการเชื่อมและคุณสมบัติการต้านทานแรงดึงของไทเทเนียมบริสุทธิ์ โดยได้ศึกษาผลกระทบของการเชื่อมแบบไฮบริดที่มีต่อความเร็วในการเชื่อมการเชื่อม MIG เข้ากับไฟเบอร์เลเซอร์ รวมเป็นไฮบริดของ TIG-MIG โดยจากการสังเกตพบว่าการเชื่อมไฮบริดด้วยก๊าซเฉื่อยของเลเซอร์ไฟเบอร์มีประสิทธิภาพมากกว่ากระบวนการเชื่อม MIG ทั่วไป ประมาณเจ็ดเท่า การเชื่อมแบบไฮบริดของ TIG-MIG ยังถูกนำมาใช้เพื่อลดการกระเด็นของสะเก็ดเชื่อมซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของกระบวนการเชื่อม (Li et al., 2010)

Saad-Eldeen S, และคณะ (2010) การทดลองประเมินความแข็งแรงสูงสุดของ โครงสร้างย่อยตัวเรือ box girder ซึ่งอยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดสูงสุด โดยได้ทำการทดสอบเชิงทดลอง บนคานโครงสร้างย่อยตัวเรือในส่วนของช่วงกลางลำเรือ เพื่อให้ได้พฤติกรรมโหมดของความเสียหายและความสามารถในการรับน้ำหนักภายใต้โมเมนต์ดัด bending moment โดยการทดสอบสามครั้ง การทดสอบสองครั้งแรกถูกใช้เพื่อลดคลายความเค้นตกค้างที่เกิดจากการเชื่อม และการทดสอบสองครั้งที่สามเพื่อประเมินความแข็งแรงสูงสุดที่การกระจายพลังงานอยู่ที่ 36.16% และ 17.25% สำหรับการทดสอบรอบแรกและรอบที่สองตามลำดับ การปลดปล่อยความเค้นตกค้างที่เกิดจากการเชื่อม จากการทดสอบได้สรุปโหมดความเสียหายหลายประการเช่น การให้ผลของแรงดึงที่จุดคานาก tension field yielding การสะดุดของเหล็กเสริมแผ่นแนวนอน longitudinal stiffeners และการบิดเบี้ยวของแผ่นเหล็กประกอบเรือ plate deformations พวกเขาเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของของโครงสร้างย่อยตัวเรือ box girder ที่ได้จากการทดสอบกับสูตรพื้นฐานเอมพิริคัล (empirical formula) และผลสรุปมีความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกัน (Saad-Eldeen et al., 2010)

Anthony B. (2010) ศึกษาสร้างแบบจำลองของการเชื่อมแผ่นสแตนเลส โดยเน้นความสำคัญของการเชื่อมอาร์พลาสมาโดยสมการ มวล, โมเมนตัม, พลังงาน โดยใช้วิธี the finite volume method of Patankar (Murphy et al., 2010)

Pankaj Biswasa (2010) ศึกษาและวิเคราะห์การบิดงอของแนวเชื่อม narrow gap โดยเปรียบเทียบกับ FE analysis โดยใช้วิธีเชื่อม GTAW (Biswas et al., 2010)

Tewari etal (2010) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความเร็ว(Welding Speed mm/min) ในการเชื่อมที่แตกต่างกันต่อรูปทรงเรขาคณิตของแนวเชื่อม ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบ การเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) ผลการทดลองพบว่า

ความลึกและการซึมลึกเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่เหมาะสมจากนั้นเริ่มลดลงเมื่อความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นดังแสดงในตาราง (Tewari et al., 2010)

HIROSHI KOGA และคณะ (2010) ได้ทำการทดลองกรรมวิธีการเชื่อมแบบอาร์คเลเซอร์แบบไฮบริดที่ต้องการความร้อนต่ำและลดความผิดปกติที่อาจเกิดจากการเชื่อม โดยได้พัฒนาระบวนการที่ต้องใช้อุปกรณ์ง่าย ๆ และสามารถใช้งานได้โดยใช้ขั้นตอนการเชื่อมแบบการเชื่อมประกอบตัวเรือทั่วไป ในการเชื่อมแบบอาร์คเลเซอร์แบบไฮบริดปริมาณความร้อนในการเชื่อมจะถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์สี่ตัวคือ กระแสเชื่อม, แรงดันเชื่อม, ความเร็วในการเชื่อมและเอาต์พุตเลเซอร์ วิธีการเชื่อมนี้ถูกนำไปใช้กับเรือพาณิชย์ทั่วไปตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2010 เช่นเรือบรรทุกน้ำมันดิบขนาดใหญ่ (VLCCs), เรือคอนเทนเนอร์และเรือขนส่งก๊าซเป็นต้น วิธีการเชื่อมจะเชื่อมแผ่นเหล็กแบบเชื่อมต่อชน ที่ใช้ในโครงสร้างส่วนบนของตัวเรือและผนังห้องเครื่องยนต์และมีความหนา 13 มม. หรือน้อยกว่าหลังจากพิจารณาความหนาของแผ่นเหล็กและเกรดเหล็ก ผลจากการทดลองการเชื่อมอาร์คด้วยเลเซอร์แบบไฮบริดได้รับการยืนยันว่าเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสำหรับการต่อเรือ และสามารถยืนยันได้ว่าการเชื่อมอาร์คด้วยเลเซอร์แบบไฮบริดมีความจำเป็นสำหรับการผลิตบล็อกตัวเรือที่มีข้อดีคือสามารถทำได้โดยวิธีการเชื่อมแบบความร้อนต่ำและลดการบิดงอของแผ่นเหล็กประกอบตัวเรือหลังจากการเชื่อม ซึ่งจะทำให้ความถูกต้องของการสร้างประกอบบล็อกในการต่อเรือมีคุณภาพและความแม่นยำสูง (Welding, 2010)

A. Moarrefzadeh, (2011) ได้ทดลองหาการเลือกพารามิเตอร์แก๊สปกคลุมที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ GTAW ผลการทดลองสรุปได้ว่าการนำความร้อนพลาสมาอาร์คปกคลุมของก๊าซปกคลุมแนวเชื่อมประเภทอาร์กอนสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเติมไฮโดรเจนในอาร์กอน (Moarrefzadeh, 2010)

Gharibshahianet และคณะ, (2011) ได้ทำการศึกษาผลของโครงสร้างทางจุลภาคต่อความแข็งแรงและความเหนียวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยใช้กรรมวิธีการเชื่อมแบบการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) หรือการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas welding, TIG) ผลทดลองสรุปว่าเมื่อให้กระแสเชื่อม (Welding Current) เพิ่มขึ้นรูปแบบเกรนของวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงและความแข็งแรงของวัสดุจะลดลง (Gharibshahian et al., 2011)

Pankaj Biswasa (2011) ศึกษาและวิเคราะห์การบิดงอของแนวเชื่อม narrow-gap โดยเปรียบเทียบกับ FE analysis วิธีเชื่อม GTAW กับ SMAW (Biswas et al., 2011)

CHEN Jian-chun (2011) ศึกษาการเชื่อม hot rolled Ti-6Al-4V alloy plate โดยการควบคุมแบบไดนามิกของกระแสไฟฟ้าใน กระบวนการเชื่อมอาร์คพลาสมา และหาความเหมาะสม

โดยการทดสอบแรงดึงและโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (Chen & Pan, 2011)

Junhua San. (2011) ศึกษาการสร้างแบบจำลองของสภาวะชั่วคราวของจังหวะการควบคุมถ่ายเทความร้อนในกระบวนการเชื่อมพลาสมา โดยเปรียบเทียบจากการคำนวณและการทดลอง สำหรับ Keyhole boundary และ Fusion line (Sun et al., 2011)

T.Q. Li 2012 ศึกษาสร้างแบบจำลองการไหลจากป้อหลอมละลายและkeyholeในการเชื่อมพลาสมา โดยการเชื่อม แผ่นสแตนเลส เกรด304 ที่ความหนา 6 มม. (Li et al., 2012)

Trivedi et และคณะ, (2012) ได้ทำการศึกษารูปทรงเรขาคณิตของแนวเชื่อมสำหรับการเชื่อมอลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) ผลการทดลองสรุปว่าความสูงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสที่ใช้ในการเชื่อมเพิ่มขึ้น การซึมลึกของแนวเชื่อมยังคงที่ และความกว้างของแนวเชื่อมลดลงตามความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น (Trivedi & Bhabhor, 2014)

Jie Xuebao, (2012) ได้ศึกษาผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของการเชื่อมความร้อนสูงสำหรับแนวเชื่อมเหล็กต่อเรือ EH36 เหล็กกล้าแผ่นต่อเรือความแข็งแรงสูง EH36 การเชื่อมซึ่งมีผลกระทบของความร้อนที่มีต่อสมบัติเชิงกลโดยการทดสอบแรงดึงและแรงกระแทกในกระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์หรือการเชื่อมซับเมอร์จ (Submerged Arc Welding) สำหรับเหล็กกล้าแผ่นต่อเรือความแข็งแรงสูง EH36 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อวิเคราะห์การแตกหัก ผลการทดลองสรุปว่าการแตกหักทั้งหมดเกิดขึ้นในโลหะฐาน จากการให้ความร้อนสูงในงานเชื่อม (Heat Input) ความแข็งแรงของแนวเชื่อมและโซนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนนั้นดีกว่าของโลหะฐาน ความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact Toughness) ลดลงเมื่อมีแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าแรงกระแทกใกล้เคียงกับค่าของวัสดุฐานที่ระยะห่าง 4 มม. จากเส้นพิวซ์ซึ่งบ่งชี้ว่าความทนทานของตำแหน่งนี้ไม่ได้รับผลกระทบจากความร้อนการเชื่อม (Wu et al., 2012)

Tusek, I., และ Krizan, J. (2012) มีเนื้อหาเกี่ยวกับการทดสอบการดัดโค้งในงานเชื่อม (weld bend testing) โดยเน้นเรื่องการประเมินคุณภาพและความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมผ่านการทดสอบการดัดขึ้นทดสอบเชื่อม เพื่อหาข้อบกพร่อง เช่น รอยแตก หรือการเชื่อมไม่เต็มที่ การทดสอบนี้ประกอบด้วยการดัดขึ้นทดสอบตามมุมหรือความเครียดที่กำหนด และการตรวจสอบความเสียหายบนพื้นผิวของขึ้นทดสอบด้วยวิธีตรวจสอบด้วยสายตาเพื่อประเมินผล งานวิจัยของทั้งสองได้เน้นย้ำว่าการเตรียมตัวอย่าง การดำเนินการทดสอบ และเกณฑ์การประเมินข้อบกพร่องมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อผลลัพธ์ที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ยังสนับสนุนให้ใช้การ

ตรวจสอบด้วยสายตาหลังการทดสอบตัดโค้งเป็นขั้นตอนหลักในการประเมินความเสียหายของรอยเชื่อม กล่าวโดยสรุป งานของ Tusek และ Krizan (2012) ให้ข้อมูลเชิงลึกที่สำคัญเกี่ยวกับวิธีการและการตีความผลการทดสอบตัดโค้งของรอยเชื่อม ซึ่งถือเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับและมีประสิทธิภาพในการควบคุมคุณภาพงานเชื่อมและประเมินความเสียหายของรอยเชื่อมอย่างครอบคลุมและชัดเจน.

งานวิจัยของ Kim et al.(2012) ศึกษาผลของสภาพรอยต่อและกระบวนการเชื่อมแบบ FCAW (Flux Cored Arc Welding) และ EGW (Electrogas Welding) ในเหล็ก EH36-TMCP พบว่าค่า tensile strength ของรอยเชื่อมลดลงเพียงประมาณ 4% จากค่า tensile strength ของเนื้อโลหะฐาน (base metal) ซึ่งถือว่าการลดลงในระดับที่น้อยมากสมบัติทางกล (mechanical properties) ของแนวเชื่อมที่ได้จากทั้งสองกระบวนการเชื่อมยังคงผ่านเกณฑ์มาตรฐานและยอมรับได้ในทุกกรณี การออกแบบรอยตัดลบบมุม (bevel) ที่แตกต่างกันระหว่าง single-V กับ double-V มีผลต่อค่าความแข็ง (hardness) และความเหนียว (toughness) บ้าง แต่เมื่อเทียบกับฐานโลหะแล้ว ความแตกต่างนี้ไม่มากนัก โดยรวมแล้ว ทั้งกระบวนการ FCAW และ EGW สามารถสร้างรอยเชื่อมที่มีสมรรถนะสูงและเชื่อถือได้เหมาะสำหรับงานโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น ในการต่อเรือหรือโครงสร้างหนัก

สรุปได้ว่า งานวิจัยนี้ชี้ว่าการเลือกใช้กระบวนการเชื่อม FCAW และ EGW ร่วมกับการออกแบบ bevel ที่เหมาะสม สามารถควบคุมคุณสมบัติของรอยเชื่อมให้ใกล้เคียงกับฐานโลหะได้ดี และได้รอยเชื่อมที่มีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมโครงสร้าง

งานวิจัยของ Radhakrishna et al.(2012) ศึกษาผลขององค์ประกอบโลหะเติมในลวดเชื่อมต่อ microstructure ของรอยเชื่อมชนิด SMAW ในเหล็กกล้า High Strength Low Alloy (HSLA) พบว่าองค์ประกอบสำคัญอย่างแมงกานีส (Mn), ไทเทเนียม (Ti) และโบรอน (B) ในลวดเชื่อมมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการเกิดโครงสร้าง acicular ferrite ในแนวเชื่อมโดยรายละเอียดที่สำคัญได้แก่

Mn, Ti และ B ช่วยกระตุ้นการสร้าง acicular ferrite ที่เป็นโครงสร้างจุลภาคที่มีคุณสมบัติทางกลดีเยี่ยม โดยเฉพาะความเหนียวสูงและความสามารถในการรับแรงกระแทก (impact toughness) ที่ดี โครงสร้าง acicular ferrite ทำให้แนวเชื่อมมีความทนทานต่อการแตกร้าวและความเปราะ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มคุณภาพและสมรรถนะของรอยเชื่อมในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง

การเติม Ti มักจะช่วยให้มี nucleation sites เป็น Ti-oxide ที่ช่วยเนื้อเชื่อมสร้าง acicular ferrite ได้ดีขึ้น ขณะที่ B ช่วยเพิ่ม hardenability และช่วยควบคุมโครงสร้างจุลภาค ส่งผลให้ลดโครงสร้างที่ไม่พึงประสงค์และเพิ่ม toughness

Mn มีบทบาทเพิ่มความแข็งแรงและความเหนียวของรอยเชื่อมผ่านการกระตุ้นการเกิด acicular ferrite และเพิ่มความสมดุลของโครงสร้างจุลภาคในแนวเชื่อม

สรุปว่าองค์ประกอบ Mn, Ti และ B ในนลวดเชื่อม SMAW เป็นตัวเสริมสำคัญที่ช่วยเพิ่มปริมาณ acicular ferrite ในแนวเชื่อมของเหล็ก HSLA ซึ่งส่งผลดีต่อความเหนียวและค่ารับแรงกระแทกของรอยเชื่อม งานวิจัยนี้ยืนยันถึงบทบาทสำคัญของการออกแบบองค์ประกอบลวดเชื่อมเพื่อปรับปรุงคุณภาพของรอยเชื่อมในงานโครงสร้างที่ต้องการความทนทานสูงโดยเฉพาะ

J. Klæstrup Kristensen (2013) ได้ทำการศึกษาการใช้งานการเชื่อมด้วยเลเซอร์ในอุตสาหกรรมการต่อเรือ การเชื่อมด้วยเลเซอร์โดยเฉพาะการเชื่อมด้วยเลเซอร์ MAG แบบไฮบริดแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่ดีในการเชื่อมเหล็กโครงสร้างในอุตสาหกรรมการต่อเรือ คุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ ได้แก่ ความผิดพลาดต่ำ ความเร็วในการเชื่อมสูงและใช้เชื่อมแบบระบบอัตโนมัติง่าย อุตสาหกรรมการต่อเรือเป็นหนึ่งในกลุ่มแรก ๆ ที่นำเสนอเลเซอร์กำลังสูงและการเชื่อมด้วยเลเซอร์ไฮบริดสำหรับการใช้งานโครงสร้างตัวเรือ โดยลดการบิดเบี้ยวของโครงสร้างภายหลังจากการเชื่อมได้เป็นอย่างดี และคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น จึงสามารถพัฒนาและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการต่อเรือได้ (Kristensen, 2013)

Xu S-H, Qiu B (2013) ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรมคร่าของการกัดกร่อนของสแตนเลส โดยแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติเชิงกลโครงสร้างจุลภาคและการกัดกร่อนของสแตนเลส 316L ภายใต้อุณหภูมิเชื่อมซ้ำๆ (Xu & Qiu, 2013)

Zuming Liu. (2013) ศึกษาพฤติกรรมทางด้านเทอร์โมฟิสิกส์จากบ่อหลอมละลาย Weld pool และ keyhole ในการเชื่อมพลาสมาสำหรับเชื่อมต่อสนแตนเลสเกรด 304 โดยใช้ CCD camera ช่วยในการถ่ายภาพวิเคราะห์ (Liu et al., 2013)

Chin-Hyung Lee (2013) ศึกษาความเค้นตกค้างในการเชื่อมท่อสแตนเลสภายใต้ภายใต้แรงดันภายใน สำหรับการเชื่อมท่อสแตนเลสออกเทนนิติกและท่อเหล็กคาร์บอน (Lee & Chang, 2013)

Meng X., และคณะ, (2014) ได้ทำการศึกษาการเชื่อมอาร์กไฮบริด TIG-MIG แบบความเร็วสูงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ผลจากการทดลองพบว่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งแรงของกระบวนการ MIG-TIG นั้นสูงกว่ากระบวนการ MIG และ TIG แบบดั้งเดิมที่ดำเนินการอย่างอิสระ

นอกจากนี้ HAZ ของกระบวนการไฮบริดก็ยังคงคง และสามารถเพิ่มผลผลิตได้มากกว่าด้วยการเชื่อมแบบไฮบริด TIG-MIG เมื่อเทียบกับกระบวนการเชื่อมแบบเดิมเนื่องจากแนวเชื่อมเชื่อมลึกกว่า และเพิ่มความเร็วในการเชื่อมและสามารถควบคุมความกว้างของพื้นที่รับความร้อนได้ดี (Meng et al., 2014).

งานวิจัยของ Brewer et al. (2013) พบว่า ในการวัดอุณหภูมิระหว่างกระบวนการเชื่อม โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลที่มีขนาดเส้นลวดแตกต่างกันและวิธีการติดตั้งที่หลากหลาย มีข้อสรุปสำคัญ ดังนี้

เทอร์โมคัปเปิลที่มีเส้นลวดขนาดเล็ก (เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.025 มม. หรือ 0.001 นิ้ว) ให้ค่าการวัดอุณหภูมิที่แม่นยำที่สุดเมื่อเทียบกับค่าควบคุม เนื่องจากการนำความร้อนออกจากจุดวัดน้อย ทำให้ค่าที่วัดได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิจริงของพื้นที่เชื่อมมากขึ้น

วิธีการติดตั้ง มีผลอย่างมากต่อความแม่นยำ โดยการติดตั้งแบบเชื่อมเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับชิ้นงาน (welded thermocouple) ให้ความแม่นยำสูงที่สุด เพราะทำให้หน้าสัมผัสมีความร้อนดี และลดการสูญเสียความร้อนที่จุดวัด

เทคนิคการวัดที่ได้ค่าถูกต้องที่สุดคือ การเชื่อมและกดให้หัววัดและเส้นลวดติดแนบกับผิวชิ้นงาน เพื่อลดการสูญเสียความร้อนและรักษาความแม่นยำของข้อมูลอุณหภูมิ

แม้เทอร์โมคัปเปิลขนาดเล็กที่ติดตั้งแบบเชื่อมจะให้ค่าที่แม่นยำ แต่ก็มีความเสี่ยงและเสียหายได้ง่าย จึงต้องมีการทดสอบความซ้ำ (repeatability) ระหว่างหัววัดที่สร้างเหมือนกัน เพื่อให้มั่นใจในความสม่ำเสมอของข้อมูล

วิธีนี้มีประโยชน์อย่างมากต่อการทดสอบที่อุณหภูมิสูงในงานเชื่อม ซึ่งต้องการข้อมูลประวัติความร้อนที่แม่นยำ เพื่อใช้ประเมินพฤติกรรมการคืบตัว (creep) และการเสียรูปของวัสดุ

สรุป: Brewer et al. (2013) แสดงให้เห็นว่า การใช้เทอร์โมคัปเปิลเส้นลวดขนาดเล็กและติดตั้งด้วยการเชื่อมตรงกับชิ้นงาน เป็นวิธีที่ให้ค่าการวัดอุณหภูมิแม่นยำที่สุดในกระบวนการเชื่อม โดยเฉพาะในงานที่มีอุณหภูมิสูง เนื่องจากลดการสูญเสียความร้อนและสะท้อนค่าที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิจริงได้ดีที่สุด

Xu MC, และคณะ, (2014) การประเมินความแข็งแรงสูงสุดที่เหลือของพานอลที่เสริมความแข็งแรง stiffened panel พร้อมรอยแตกที่ถูกล็อก โดยการวิเคราะห์ความแข็งแรงตกค้างสูงสุดของพานอลที่เสริมความแข็งแรงด้วยรอยแตกที่ถูกล็อกภายใต้แรงอัดตามแนวแกน และการตรวจสอบอิทธิพลของลักษณะทางเรขาคณิตต่างๆของรอยแตกและพานอล สรุปได้ว่าผลกระทบของความยาวของรอยแตกต่อความแข็งแรงตกค้างสูงสุดขึ้นอยู่กับการวางแนวรอยแตกซึ่งผลกระทบเล็กน้อย

เกิดขึ้นสำหรับรอยแตกในแนวยาวและผลกระทบที่มีนัยสำคัญสำหรับรอยแตกในแนวขวาง (Xu et al., 2014)

Guokai Zhang (2014) ศึกษาเกี่ยวกับ Thermal ของ Keyhole และ Weld pool โดยการดูภาพขนาดของพิกเซลที่กระแสร่วมที่แตกต่างกันซึ่งเป็นผลกับอุณหภูมิและการหลอมละลายในการเชื่อมต่อชนสแตนเลสเกรด 304 หนา 8 มิลลิเมตร (Zhang et al., 2014)

Martin BORLAUG MATHISEN (2014) ศึกษาคุณลักษณะของโครงสร้างจุลภาคและการตอบสนองของความเครียดของโลหะTi-6Al-4V โดยการทดสอบแรงดึงจากกระบวนการเชื่อมพลาสมา (MATHISEN et al., 2014)

Long Tana (2014) ศึกษาความเค้นตกค้างของงานเชื่อมท่อนิวเคลียร์โรเตอร์ก่อนและหลังการให้ความร้อนheattreatmentในงานเชื่อมของรอยต่อเชื่อมแบบ Narrow Gap (Tan, Zhang, Zhuang, et al., 2014)

Ruoyang Li. (2014) ศึกษาแต่ละชั้น cross-section ของแนวเชื่อมเลเซอร์ ที่ขนาด Gap 0.5 mm ที่มุมปากต่างกัน (Li et al., 2014)

Feng-yuan Shu (2014) ศึกษาโดยใช้ finite element method สำหรับวิเคราะห์งานเชื่อมที่มีแนวเชื่อมแบบ narrow gap (F.-y. Shu et al., 2014)

Ahmed Elmesalamy (2014) ศึกษาความเค้นตกค้างในแนวเชื่อมแต่ละแนวโดยระยะห่างแนวเชื่อมแบบ Narrow Gap (Elmesalamy et al., 2014)

Long Tan (2014) ผลกระทบของรูปทรงทางเรขาคณิตที่มีต่อความเค้นตกค้างของท่อนิวเคลียร์โรเตอร์โดยเชื่อมหลายชั้นแบบ Narrow Gap (Tan, Zhang, Zhang, et al., 2014)

Fengyuan Shu (2014) ศึกษาความเค้นตกค้างในงานเชื่อมต่อชนที่มีระยะห่างแนวเชื่อมแบบ narrow gap ในวัสดุอลูมิเนียมโดยวิธี cold metal transferring (F. Shu et al., 2014)

V. Schultza (2014) ศึกษาความสามารถในการเชื่อมโยงช่องว่าง Gap bridging ในการเชื่อมอลูมิเนียมแผ่นบางด้วยการเชื่อมเลเซอร์ (Schultz et al., 2014)

Ji-Sun Kima (2014) ศึกษาผลกระทบจากตัวแปรการเชื่อมและที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมท่อนแนวแรกในการเชื่อมแบบGMA สำหรับงานเชื่อมท่อเหล็ก (Kim et al., 2014)

Parvinder Singhet และคณะ, (2014) ได้ทำการศึกษาการศึกษาผลของกระแสร่วมกับปริมาณของลวดเชื่อมที่ทำให้เกิดแนวเชื่อม(Deposition Rate) ของการเชื่อมแบบ TIG ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ผลการศึกษาทดลองสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณของลวดเชื่อมที่ทำให้เกิดแนวเชื่อมนั้นต้องการความร้อนมากขึ้นในการหลอมโลหะในปริมาณที่กำหนด ตาม

ผลกระทบของความร้อน (Joule's Effect) เป็นสัดส่วน โดยตรงกับกระแสและเวลาที่กำหนดให้ $H = I^2Rt$ (โดยที่ H คือความร้อน, I คือกระแสเชื่อม, R คือความต้านทาน, t คือเวลา) (Singh, 2014)

Tadeu Messias และคณะ, (2014) ได้ทำการประเมินความสามารถในการเชื่อมได้ของเหล็กต่อเรือ EH36 TMCP ซึ่งเชื่อมโดยการเชื่อมอาร์คเชื่อมซบเมิร์จความร้อนสูง ซึ่งการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคที่เป็นผลเสียต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ และความเหนียวในเขตที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาทดลองคือการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคและการประเมินสมบัติเชิงกลของ HAZ ของเหล็กต่อเรือ EH36 ที่ผลิตโดย กระบวนการควบคุมเชิงกลด้วยความร้อน (Thermo-Mechanical Control Process : TMCP) – เปรียบเทียบกับเหล็กเกรดเดียวกันที่ผลิตโดยการรีดแบบธรรมดา แล้วนำมาเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์หรือการเชื่อมซบเมิร์จ (Submerged Arc Welding) โดยให้ระดับความร้อนสองระดับคือ 76 และ 130 kJ / cm ผลทดลองพบว่ากรณีที่มีโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานมีความละเอียดขึ้น(ดังรูป) ในเขตต่างๆ ของ HAZ ซึ่งเกี่ยวข้องกับขนาดเกรนเล็กของโลหะฐานและเทียบเท่าคาร์บอนต่ำกว่าเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เหล็ก TMCP เกิดความเหนียวของชิ้นงานที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับเหล็กธรรมดา (Donizete Borba et al., 2017)

Prabaharan และคณะ, (2014) จากการศึกษากรรมวิธีการเชื่อมแบบการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) โดยใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียล ผลการทดลองสรุปได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เชื่อมมีผลต่อ weld deposit area พื้นที่แนวเชื่อม การเพิ่มแรงดันเชื่อมจึงลดปริมาณของอัตราการบ้วนลวดของลวดเชื่อมที่ทำให้เกิดแนวเชื่อม (Deposition Rate) (Prabaharan et al., 2014)

Lin, Y. C. และ Hung, C. Y. (2014) มุ่งเน้นศึกษาเรื่องการเชื่อมแบบ heterogeneous lap welding ระหว่างแผ่นเหล็กชุบด้วยนิกเกิลกับแผ่นทองแดงโดยใช้เลเซอร์ ความท้าทายหลักในการเชื่อมมาจากคุณสมบัติของวัสดุที่มีค่าการดูดซับพลังงานเลเซอร์แตกต่างกันมาก โดยเฉพาะการใช้เลเซอร์ YAG ไม่สามารถเจาะทะลุแผ่นทองแดงเนื่องจากค่าการดูดซับต่ำงานวิจัยได้ทดลองใช้เลเซอร์แบบ fiber/blue-light coaxial laser ในการเชื่อมซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้โดยเลเซอร์ไฟเบอร์สามารถเจาะทะลุแผ่นเหล็กชุบและเลเซอร์แสงน้ำเงินสามารถละลายแผ่นทองแดงได้ ทำให้ชิ้นงานเชื่อมมีความสมบูรณ์และไม่มีตำหนิ เช่น รอยแตกหรือรอยแห้ว นอกจากนี้ยังพบว่าในโซนเชื่อมมีการผสมตัวของเหล็กกับทองแดง และมีการกระจายตัวของความเครียดที่เหมาะสม ซึ่งช่วยลดความเครียดตกค้าง สรุปผลสำคัญคือ การใช้เลเซอร์ coaxial fiber/blue-light

สามารถเพิ่มคุณภาพของรอยเชื่อม heterogeneous lap welding ระหว่างแผ่นเหล็กชุบนิเกิล และทองแดงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสร้างรอยเชื่อมที่มีความสมบูรณ์และเหมาะสมสำหรับการผลิตในอุตสาหกรรม เช่น การผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบลูกกอล์ฟรุ่นใหม่ ข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นว่าการปรับใช้เทคโนโลยีเลเซอร์แบบผสมผสานช่วยแก้ไขข้อจำกัดในการเชื่อมวัสดุที่มีสมบัติทางแสงและความร้อนแตกต่างกันสูงได้อย่างดี

Pandey et al.(2014) พบแนวโน้มสำคัญเกี่ยวกับการกระจายตัวของ residual stress ในรอยเชื่อมโดยเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการเชื่อมแบบ FCAW, MAG และ hybrid welding ดังนี้

ค่าความเค้นตกค้าง (residual stress) มีค่าสูงสุดบริเวณ fusion line และศูนย์กลางของแนวเชื่อม (weld centerline) เนื่องจากเป็นจุดที่ได้รับความร้อนและการหลอมรวมสูงสุด

ค่าความเค้นตกค้างจะลดต่ำลงเมื่อเคลื่อนที่ออกจาก fusion line ผ่านโซน Heat Affected Zone (HAZ) และมีค่าต่ำสุดที่บริเวณเนื้อโลหะฐาน (base metal) เนื่องจากโซน HAZ และ base metal รับผลกระทบน้อยกว่าและมีการคลายความเค้นในระดับหนึ่ง

รูปแบบนี้เป็นไปในลักษณะเดียวกันทั้งในกระบวนการ FCAW, MAG และ hybrid welding แสดงให้เห็นว่าแม้วิธีการเชื่อมจะแตกต่างกัน แต่กลไกการเกิดและการกระจาย residual stress มีความเหมือนกันในแง่ของตำแหน่งและแนวโน้มค่าความเค้น

การใช้กระบวนการ hybrid welding มีศักยภาพที่จะช่วยลดระดับความเค้นตกค้างโดยรวมเมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบทั่วไปบางกรณี เนื่องจากการควบคุมพลังงานความร้อนและการเจาะลึกของรอยเชื่อมที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

โดยสรุป งานวิจัยนี้ยืนยันว่าความเค้นตกค้างจะสูงที่สุดที่ fusion line และบริเวณกลางแนวเชื่อม และลดลงตามลำดับผ่านโซน HAZ ไปยัง base metal ซึ่งเป็นแบบแผนทั่วไปในการเชื่อมโลหะหลายประเภทไม่ว่าจะเป็น FCAW, MAG หรือ hybrid welding การเข้าใจและควบคุม residual stress เหล่านี้สำคัญต่อการเพิ่มคุณภาพและความน่าเชื่อถือของรอยเชื่อมในงานโครงสร้างอุตสาหกรรม.

M. A.G. Calle, และคณะ, (2015) การชนกันของเรือและการเกยของเรือบรรทุกน้ำมัน ยังคงเกิดขึ้นอยู่เสมอ ความพยายามอย่างต่อเนื่องในการป้องกันไม่ให้เกิดอุบัติเหตุดังกล่าวที่จะทำให้เกิดภัยพิบัติจากสภาพแวดล้อมจากน้ำมันที่รั่วไหลออกจากตัวเรือที่ได้รับความเสียหาย ปัจจุบันการสร้างแบบจำลองการชนกันที่เกิดขึ้นกลายเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการทำนายการ

ตอบสนองแรงกระทำต่อโครงสร้างของเรือในระหว่างที่เรือชนกัน อย่างไรก็ตามความท้าทายที่สำคัญอย่างหนึ่งในการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างที่เสียหายของเรือคือการกำหนดเกณฑ์ความเสียหายที่เพียงพอที่ทำให้ลักษณะทางกายภาพขนาดเล็ก (micro-scale) ที่เชื่อมโยงกับการเริ่มต้นของการแตกร้าวในวัสดุที่มีความเหนียวด้วยการบังคับใช้ขนาดองค์ประกอบเปลือกเรือขนาดใหญ่ในแบบจำลองโครงสร้างเรือขนาดใหญ่ เอกสารนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอและทบทวนเกณฑ์ความเสียหายที่ใช้ในการสร้างแบบจำลององค์ประกอบจำกัดของเหตุการณ์การชนกันของเรือ เกณฑ์ความล้มเหลวที่ขึ้นอยู่กับค่าจำกัดของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก plastic strain ที่เท่ากันเป็นเกณฑ์ที่ใช้กันมากที่สุดในการสร้างแบบจำลองการชนของเรือ แต่เกณฑ์บางอย่างที่ขึ้นอยู่กับสภาวะความเค้น stresses state การสร้างแผนภาพขีดจำกัด forming limit diagram พลังงานความเครียด strain energy กลไกการแตกหัก fracture mechanics และอื่น ๆ ความสนใจเป็นพิเศษมุ่งเน้นไปที่ข้อจำกัดของเกณฑ์ความเสียหาย ตลอดจนการพัฒนาการตรวจสอบความถูกต้องและการนำไปใช้จริงในการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข Numerical modeling นอกจากนี้ยังมีการทบทวนการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของการขยายตัวของรอยแตกและรอยต่อในโครงสร้างทางเรือที่ต้องรับแรงกระแทก (Calle & Alves, 2015)

Saad-Eldeen S, และคณะ, (2015) การประเมินกำลังรับแรงอัดของแผ่นเหล็กรูปเหลี่ยม ซึ่งแสดงถึงการมีรอยนูนยุบในท้องที่หรือรอยฉีกที่เป็นช่องเปิด โดยการ เปรียบเทียบพฤติกรรมความเค้น - ความเครียดของแผ่นเหล็กรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งแสดงถึงการมีช่องเปิดหรือรอยนูนเมื่อรับโหลดแรงอัดแกนเดียว ด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบ จำกัด ที่ไม่ใช่เชิงเส้นอย่างละเอียดซึ่งวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์การควบคุมหลายประการของความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด มีการระบุความคล้ายคลึงกันในการตอบสนองโครงสร้างของแผ่นที่มีรอยนูนหรือช่องเปิด มีการตรวจสอบพฤติกรรมก่อนและหลังการโก่งตัวจากแรงกระทำความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด, stress-strain relationship ค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด ultimate strength และการขยายตัวหรือหดตัวในแนวตั้งฉากกับแรง (Lateral Deformation) (Saad-Eldeen et al., 2015)

Saad-Eldeen S, และคณะ, (2015) ได้ทำการประเมินความแข็งแรงของแผ่นเหล็กที่รับแรงอัดและการเสียรูปเป็นรอยนูน โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์แผ่นเหล็กที่เสียหายที่มีรอยนูนเฉพาะที่ มีการพิจารณาในหลายพารามิเตอร์ ดังนี้คือ ความหนาของแผ่น การวางแนวมุม ทิศทางนูน และขนาดของรอยนูนสรุปได้ว่าการเกิดความเสียหายของรอยนูนในทิศทางตรงกันข้ามกับความไม่สมบูรณ์ในช่วงเริ่มต้น initial imperfection ซึ่งช่วยลดผลกระทบของรอยนูนต่อความแข็งแรงสูงสุดเมื่อความหนาของแผ่นเพิ่มขึ้น การพิจารณาจุดรอยต่อของความเร็วของแผ่นที่มีและ

ไม่มีรอยนูนซึ่งพฤติกรรมของแผ่นวัสดุเปลี่ยนไป มีการกำหนดอัตราส่วนความกว้างของรอยนูนต่อความกว้างของแผ่นซึ่งเผยให้เห็นการตอบสนองของโครงสร้างแผ่นวัสดุ จากการวิเคราะห์ที่ดำเนินการได้มีการพัฒนาการแสดงออกโดยทั่วไปของปัจจัยการลดความแข็งแรงสูงสุดเนื่องจากความเสียหายของรอยนูน (Saad-Eldeen et al., 2016)

Javier Lamas (2015) ได้ศึกษาการเชื่อมโยงช่องว่าง Gap bridging ระหว่าง CMT Mode และ Pulsed Mode จากกรรมวิธีการเชื่อมเลเซอร์ (Lamas et al., 2015)

K. Devendranath Ramkumar (2015) ศึกษาการเชื่อมวัสดุโดยกระบวนการ TIG สำหรับเหล็กแผ่นต่อเรือต่างชนิด (Ramkumar et al., 2016)

G. Turichina, (2015) ได้ศึกษาอิทธิพลของความกว้างแนวต่อเชื่อมที่มีต่อการเกิดรูปทรงทางเรขาคณิตจากกรรมวิธีการเชื่อมเลเซอร์ (Turichin et al., 2015)

Lin Yuan (2015) ได้ศึกษาการใช้ FEM เพื่อวิเคราะห์ดูผลจากท่อและแนวเชื่อมท่อที่เชื่อมเป็นเส้น รอบวงเปรียบเทียบกับท่อเชื่อมท่อเป็นแนวเส้นตรงภายใต้แรงดัดที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ทำให้ท่อเกิดความเสียหาย (Yuan & Kyriakides, 2015)

Francesco Frendo (2015) ได้ศึกษาความต้านทานการล้าของท่อในเฟสและนอกเฟสที่มีต่อแรงบิดและแรงดัด (Frendo & Bertini, 2015)

J. Mikula (2015) ได้ศึกษาการขยายตัวของรอยร้าวของรอยเชื่อมในการเชื่อมท่อโพลีเอเลฟินระหว่างรอยเชื่อมนูนและรอยเชื่อมเรียบ (Mikula et al., 2015)

Jun-Tai Jeon (2015) ได้ศึกษาทดลองหาพฤติกรรมการเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Jeon et al., 2015)

K. Bettahar (2015) ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของท่อสแตนเลสต่างชนิดโดยการเชื่อมไฟฟ้า สำหรับ 13Cr stainless steel and 2205 stainless steel (Bettahar et al., 2015)

Bin Wang (2015) ศึกษาการแตกร้าวของแนวเชื่อมจากการเชื่อมท่อวัสดุต่างชนิด (Wang et al., 2015)

Thomas Svensson (2015) ศึกษาความเค้นตกค้างจากการเชื่อมท่อสแตนเลส สำหรับการเชื่อมท่อสแตนเลสออสเทนนิติก AISI 316L (Svensson et al., 2015)

งานวิจัยของ Fukunaga et al. จาก Nippon Steel(2015) พบว่าในเหล็ก TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) ค่าความแข็งของบริเวณ weld metal (แนวเชื่อม) สูงกว่าค่าความแข็งของ base metal (เนื้อโลหะฐาน) อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้

รอยเชื่อมมีค่าความเหนียว (fracture toughness) สูง โดยเฉพาะในงานโครงสร้าง offshore ที่ต้องการความทนทานและความแข็งแรงสูง งานวิจัยนี้แนะนำให้มีการออกแบบลวดเชื่อม (filler metal) สำหรับรอยเชื่อมให้มีค่า hardness ที่เหมาะสมสอดคล้องกับความต้องการของงานใช้งานหนัก เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงและสามารถทนต่อการแตกหักได้ดีในสภาวะการใช้งานจริง

โดยสรุปความแข็งแรงของ weld metal ในเหล็ก TMCP สูงกว่าฐานโลหะอย่างมีนัยสำคัญค่าความแข็งแรงนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้รอยเชื่อมมี fracture toughness สูง การเลือกและออกแบบ filler metal ให้ได้ hardness ที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับงานโครงสร้างที่ต้องการความเชื่อถือได้สูง เช่น งาน offshore structure การควบคุมคุณสมบัติของ weld metal ช่วยให้รอยเชื่อมมีสมรรถนะทางกลตรงตามความต้องการใช้งานหนัก

ข้อมูลนี้มีความสำคัญสำหรับการปรับปรุงกระบวนการเชื่อมและการเลือกวัสดุเชื่อมในงานโครงสร้างที่ต้องการคุณภาพรอยเชื่อมสูง ๆ และความปลอดภัยในสภาพแวดล้อมที่ท้าทาย เช่น การก่อสร้างแพลตฟอร์มนอกชายฝั่งและโครงสร้างรับแรงสูงอื่น ๆ

Jinwoo Cho (2016) ศึกษาโดยการวิเคราะห์ FEM ในการคายความเค้นตกค้างของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์(สแตนเลส)จากแรงกระทำที่เข้าไปเข้ามา (Cho & Lee, 2016)

Xu S, และคณะ,(2016) ได้ทำการศึกษาทดลอง ผลของการกัดกร่อนต่อลักษณะพื้นผิวและคุณสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อมแบบต่อชน โดยผลการทดสอบแรงดึงแสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบลดลงเนื่องจากการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) และการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) และในช่วงเขตที่ได้รับความร้อน HAZ ความเหนียวลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชิ้นงานโลหะฐานที่สึกกร่อนในสภาวะเดียวกัน (Xu et al., 2016)

Garbatov Y, และคณะ,(2016) ได้ทำการศึกษาความน่าเชื่อถือของโครงสร้างทางทะเลที่เสื่อมสภาพตามฐานข้อมูลที่ตรวจวัดได้ โดยทำการทดลองทดสอบการพังทลายบนชุดชิ้นงานทดสอบที่มีการสึกกร่อนอย่างรุนแรงซึ่งถูกตัดออกมาจากจากโครงสร้าง box girder จริงที่สึกกร่อนจากสภาพทะเลใช้งานทางทะเล และเปรียบเทียบกับการคำนวณเชิงตัวเลขในแง่ของความสามารถในการรับน้ำหนักซึ่งแสดงให้เห็นถึงความจริงที่ว่า การกัดกร่อน มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการลดค่าความสามารถของการรับกำลังรับน้ำหนักประลัย การคาดการณ์เชิงตัวเลขและการทดลองแสดงให้เห็นถึงค่าความสัมพันธ์ที่ดี และสรุปได้ว่าค่าความแข็งแรงที่ลดลงอาจได้รับผลกระทบจากหลายสาเหตุ ได้แก่ ระดับของการคือ การเสื่อมสภาพที่มีผลมาจากสภาวะแวดล้อม ความ

หนาแน่นของหลุมขอบเขตและสถานะความไม่สมบูรณ์เริ่มต้น ประเภทของโหมดความลึมหลว และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุ (Garbatov & Guedes Soares, 2016)

Zhang et al.(2016) ศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมต่อความแข็งแรงแรงดึง (tensile strength) ของเหล็ก TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) และเหล็ก RQT-QT (Reheated Quenched and Tempered) โดยพบว่า

สำหรับเหล็ก TMCP แรงดึงของรอยเชื่อมไม่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับเนื้อโลหะฐาน (base metal) ซึ่งแสดงถึงความทนทานและความแข็งแรงที่ดีของรอยเชื่อมในวัสดุ TMCP ในขณะที่เหล็ก RQT (หรือเหล็ก QT ที่ผ่านการอบชุบ) จะมีการลดลงอย่างมากในแรงดึงหลังการเชื่อม ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากระบวนการเชื่อมส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลมากกว่าในวัสดุชนิดนี้ ข้อสังเกตเพิ่มเติมคือ TMCP เหล็กชนิดนี้ จะแสดงความแข็งแรงที่สูงขึ้นเล็กน้อยหลังการเชื่อม แต่มีการลดลงของ ductility หรือความสามารถในการยืดตัวเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ base metal ซึ่งเป็นผลข้างเคียงที่พบบ่อยในวัสดุเชื่อมความแข็งแรงสูง

สรุปได้ว่า งานวิจัยของ Zhang et al. ยืนยันว่าเหล็ก TMCP มีความทนทานของแรงดึงในรอยเชื่อมได้ดีกว่าเหล็ก RQT-QT โดยที่แรงดึงไม่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญหลังการเชื่อม ในขณะที่วัสดุ RQT-QT มีแนวโน้มลดแรงดึงหลังเชื่อมมากกว่า เหตุการณ์นี้จึงสะท้อนถึงความเหมาะสมของ TMCP สำหรับการใช้งานที่ต้องการรักษาความแข็งแรงสูงในชิ้นส่วนเชื่อม และในขณะเดียวกันก็ต้องแลกมาด้วยการลดความเหนียวหรือ ductility เล็กน้อยในรอยเชื่อมเมื่อเทียบกับเนื้อโลหะฐาน

ผลการศึกษานี้สำคัญต่อการเลือกใช้วัสดุสำหรับชิ้นงานเชื่อมที่ต้องการคุณสมบัติทางกลสูงโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมโครงสร้างและวิศวกรรมที่เน้นความแข็งแรงและความทนทานของรอยเชื่อม ข้อมูลนี้รองรับโดยงานวิจัยอื่นที่แสดงถึงความแตกต่างของ TMCP กับ QT ในด้านสมบัติแรงดึงและโครงสร้างจุลภาคหลังเชื่อมอย่างชัดเจน

DeOilers et al.(2016) รายงานผลการทดสอบ bend test บนแผ่นเหล็ก A36 ที่เชื่อมด้วยกระบวนการ GTAW พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวอย่างเหมาะสมและเลือกพารามิเตอร์การเชื่อมอย่างถูกต้อง จะไม่มีรอยแตกร้าวหรือข้อบกพร่องที่เกินขนาดมาตรฐานตามเกณฑ์ bend test ซึ่งสนับสนุนความสำคัญของการควบคุมและเตรียมการในกระบวนการเชื่อมเป็นอย่างมาก

ในทางกลับกัน ชิ้นงานที่ขาดขั้นตอนการเตรียม back gouging หรือมีสิ่งแปลกปลอม (inclusion) อยู่ในแนวเชื่อม มักจะพบปัญหาการแตกร้าวหรือความลึมหลวในการทดสอบ bend test ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม้วัสดุจะต่างชนิดกัน เช่น A36 กับวัสดุอื่นๆ หลักการและความสำคัญของ

การควบคุมกระบวนการเชื่อมยังคงเหมือนกัน คือการเตรียมพื้นผิวและพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสมมีส่วนสำคัญต่อคุณภาพรอยเชื่อมและความสมบูรณ์ของชิ้นงาน

สรุปได้ว่า งานของ DeOilers et al. เน้นย้ำว่าการควบคุมกระบวนการเชื่อมอย่างรัดกุม ทั้งในส่วนของ การเตรียมผิวและการเลือกพารามิเตอร์ มีผลโดยตรงต่อการป้องกันข้อบกพร่องและเพิ่มคุณภาพรอยเชื่อมที่ผ่าน bend test ได้ตามมาตรฐานโครงสร้าง ทั้งนี้หลักการนี้สามารถนำไปใช้กับวัสดุหรือกระบวนการเชื่อมอื่นๆ ได้เช่นกันในแง่ของคุณภาพและความแข็งแรงของรอยเชื่อมเชิงโครงสร้าง.

Watanabe et al.(2016) แสดงผลการวัด residual stress แบบ 3 มิติ (3D stress tensor components) ในรอยเชื่อม full-thickness ของเหล็ก TMCP ซึ่งพบว่าค่าความเค้นตกค้าง (residual stress) สูงสุดจะเกิดขึ้นในบริเวณ weld metal ที่แนว fusion line ซึ่งเป็นจุดที่โลหะมีการหลอมรวมและผ่านความร้อนสูงสุดจาก fusion line ค่าความเค้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว (steeply) เมื่อเคลื่อนเข้าสู่บริเวณ Heat Affected Zone (HAZ) ซึ่งเป็นโซนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน แต่ไม่หลอมเหลวค่าความเค้นจะต่ำสุดบริเวณ base metal หรือเนื้อโลหะฐานที่ไม่ได้รับความร้อนจากการเชื่อมโดยตรง

การกระจายความเค้นนี้สอดคล้องกับกลไกการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น เนื่องจากการหลอมรวมและการหดตัวที่ไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดความเค้นตกค้างสูงในแนว fusion line

ข้อมูลนี้ยืนยันว่าการควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อมและการออกแบบรอยเชื่อมที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการลด residual stress เพื่อป้องกันปัญหาความล้า (fatigue) และการแตกร้าวในงานโครงสร้างที่ใช้เหล็ก TMCP

โดยสรุป งานวิจัยชี้ให้เห็นว่าในรอยเชื่อม TMCP steel full-thickness residual stress มีค่ามากที่สุดที่ weld metal fusion line และลดลงอย่างรวดเร็วผ่าน HAZ ไปยัง base metal ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการวางแผนและควบคุมกระบวนการเชื่อมเพื่อความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยของโครงสร้างที่ผลิตจากวัสดุชนิดนี้.

Ismail, A., และคณะ,(2017) ได้ทำการวิเคราะห์เชิงทดลองเกี่ยวกับความสมบูรณ์เชิงกลของการเชื่อมแบบไฮบริด TIG-MIG โดยทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความสมบูรณ์เชิงกลของการเชื่อมแบบไฮบริด TIG-MIG ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 (stainless steel) และเหล็กคาร์บอน (mild steel) สำหรับกระบวนการไฮบริดชิ้นงานทดสอบครึ่งวงกลมถูกเชื่อมด้วย TIG และอีกครั้งหนึ่งถูก

เชื่อมด้วย MIG คุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ การลดเปอร์เซ็นต์การยึดตัวเปอร์เซ็นต์ความต้านทานแรงดึงและความต้านทานแรงคราก ผลการทดลองเปรียบเทียบกับรอยเชื่อม TIG และ MIG ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าวิธีไฮบริด TIG-MIG พิสูจน์แล้วว่าเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเชื่อม TIG และ MIG นอกจากนี้ในบางครั้งสำหรับพารามิเตอร์การเชื่อมที่กำหนดไว้ในกระบวนการเชื่อมไฮบริดพบว่าทำให้คุณสมบัติเชิงกลดีขึ้น (Ismail et al., 2017)

P. P. Thakur, และคณะ,(2017) ได้ทำการศึกษาผลกระทบ ของพารามิเตอร์กระบวนการเชื่อมแบบไฮบริดGTAW-SMAW ที่มีผลกับความแข็งของรอยเชื่อมของพารามิเตอร์การเชื่อมได้แก่ กระแสเชื่อมกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนด์แก๊สปกคลุม(GTAW), กระแสเชื่อมโดยการอาร์คลดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW), อัตราการไหลของก๊าซและอุณหภูมิระหว่างการเชื่อม GTAW and SMAW ในส่วนที่เกี่ยวกับความแข็งของรอยเชื่อมและโซนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) การทดลองโดยใช้ Taguchi กับอาร์เรย์ L9 ถูกนำมาใช้กับการเชื่อมแบบไฮบริดบนวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกระบวนการเชื่อม GTAW สำหรับการเชื่อมแนวแรกรูทพาส และกระบวนการเชื่อม SMAW สำหรับการเชื่อมในแนวต่อมา มีการทดลองยืนยันเมื่อจำเป็นและพบว่าอุณหภูมิอินเตอร์พาสมีผลเหนือความแข็งของทั้งสองอย่างเช่นความแข็งของรอยเชื่อมและความแข็งของช่วงผลกระทบจากความร้อน HAZ นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งของรอยเชื่อมได้รับผลกระทบจากกระแสเชื่อมในกระบวนการเชื่อม GTAW ในขณะที่กระแสเชื่อมในกระบวนการเชื่อม SMAW มีผลต่อความแข็งของช่วงผลกระทบจากความร้อน HAZ และจากผลการทดลองสรุปได้ว่า อุณหภูมิอินเตอร์พาสมีผลต่อความแข็งอย่างมากต่อการเชื่อมและช่วงผลกระทบจากความร้อน HAZ, การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สมีผลน้อยมาก, ความแข็งของการเชื่อมและช่วงผลกระทบจากความร้อน HAZ, ปัจจัยสำคัญประการที่สองในกรณีของความแข็งของการเชื่อมคือกระแสในกระบวนการเชื่อม GTAW โดยที่ความแข็งในช่วงผลกระทบจากความร้อน HAZ วินาที, ปัจจัยที่โดดเด่นคือกระแสในกระบวนการเชื่อม SMAW กระแสในกระบวนการเชื่อม GTAW 100 แอมป์ อัตราการไหลของก๊าซ 12 ลิตรต่อนาที 90 แอมป์ของกระแสในกระบวนการเชื่อม SMAW และอุณหภูมิอินเตอร์พาส 100 องศาเซลเซียส ให้ค่าความแข็งในการเชื่อมสูงสุด, กระแส ในกระบวนการเชื่อม GTAW 100 แอมป์ อัตราการไหลของก๊าซ 15 lpm 110 แอมป์ของกระแสในกระบวนการเชื่อม SMAW 110 แอมป์ และ อุณหภูมิอินเตอร์พาส 150 องศาเซลเซียส ,อุณหภูมิให้ค่าความแข็งในช่วงผลกระทบจากความร้อน HAZ สูงสุด (P. Thakur & A. Chapgaon, 2017)

M. Tanaka,K และคณะ (2017) ได้ทำการจำลองเชิงตัวเลขของการอาร์กวมถึงปรากฏการณ์อิเล็กโทรดทั้งสแตนด์ในระหว่างกระบวนการเชื่อม TIG อาร์กพลาสมา ทำการศึกษา

แบบจำลองทางตัวเลข (Numerical Simulation) ได้ถูกนำมาใช้ในการเชื่อม TIG แบบทั่วไป และการเชื่อม TIG แบบหัวฉีดแคบ (TIG with Constricted Nozzle) โดยการเชื่อม TIG แบบหัวฉีดแคบเป็นกระบวนการเชื่อมระดับสูงแบบใหม่ซึ่งสามารถสร้างอาร์คพลาสมาแบบแคบโดยแก๊สไหลผ่านหัวฉีดแบบแคบ วัตถุประสงค์ของแบบจำลองคือเพื่อเข้าใจคุณลักษณะของแหล่งกำเนิดความร้อนของทั้งสองกระบวนการเชื่อมและเพื่อวิเคราะห์อัตราการสิ้นเปลืองของอิเล็กโทรด รวมถึงพฤติกรรมของอาร์คพลาสมา Thoria เป็นธาตุที่เพิ่มเข้าไปในอิเล็กโทรด ผลการทดลองในช่วงเริ่มต้นของการอาร์ค Thorium (เกิดจาก Thoria) จะอยู่บนผิวของอิเล็กโทรด และเกิดการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermionic Emission) บนผิวของอิเล็กโทรดได้ง่าย อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการระเหยของ Thorium เพิ่มมากกว่าอัตราการแพร่และความเข้มข้นทางมวลของ Thorium ลดลง ดังนั้นการแตกตัวด้วยความร้อนจึงต้องการพลังงานมากขึ้นและส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิที่บริเวณปลายของอิเล็กโทรดสูงกว่าจุดหลอมเหลวของทั้งสแตน (3653K) ปรากฏการณ์ของอิเล็กโทรดดังกล่าวได้รับผลกระทบอย่างรุนแรงจากอุณหภูมิที่ผิวของอิเล็กโทรดและการกระจายอุณหภูมิ (Temperature Gradient) (P. P. Thakur & D. A. N. Chappaon, 2017)

ปริภาดา , อศิรทัต, พิชา (2017) ได้ทำการศึกษาสมบัติการกัดกร่อนสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ด้วยกระบวนการเชื่อมทิกโดยไม่มีการเติมลวด โดยอาศัยองค์ประกอบของแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจนทั้งในส่วนของแก๊สปกคลุม แก๊สรองหลัง และแก๊สตามท้าย เพื่อช่วยปกป้องและปรับปรุงคุณสมบัติแนวเชื่อมในด้านการกัดกร่อน การทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกทั้ง 3 บริเวณ คือ บริเวณรากของแนวเชื่อม บริเวณผิวหน้าของแนวเชื่อม และวัสดุพื้น ผลการทดลองจากเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและ ค่าความหนาแน่นของกระแส พบว่าการใช้อาร์กอนเป็นแก๊สรองหลังโดยไม่มีแก๊สตามท้ายแนวเชื่อมที่บริเวณผิวหน้าของ แนวเชื่อมก่อให้เกิดอัตราการกัดกร่อนสูงสุด 0.11815 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรการเชื่อมอื่นๆในช่วง 0.15539 ถึง 0.17435 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ การเชื่อมแบบมีแก๊สตามท้ายแนวเชื่อม สามารถให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่สูงกว่าแบบไม่มีแก๊สตามท้ายแนวเชื่อมที่ 1320 มิลลิโวลต์ และ 1020 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ (Jituetrakul et al., 2017)

Songninruk, Bovornchok Poopat และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายโอนน้ำโลหะในกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ด้วยการถ่ายภาพความเร็วสูงโดยยวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายโอนน้ำโลหะด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ต่างชนิดกัน การชั่งถ่วงถ่ายภาพความเร็วสูงนั้นสามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมของการถ่ายโอนน้ำโลหะได้

อย่างชัดเจนและต่อเนื่อง การทดลองนี้ใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์สามชนิด ได้แก่ E6010, E6013, E7016 ด้วยความแตกต่างของสารพอกหุ้มทั้งสามชนิดนี้เองส่งผลให้เกิดพฤติกรรมกรรมการถ่ายโอนน้ำโลหะที่แตกต่างกัน นอกจากอิทธิพลเนื่องจากสารพอกหุ้มแล้ว ยังพบว่าพารามิเตอร์อื่นๆยังส่งผลกับพฤติกรรมกรรมการหลอมละลายของน้ำโลหะอีกด้วย ได้แก่ กระแสเชื่อมและขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม (Songninruk et al., 2017)

Chen et และคณะ, (2017) ได้ทดลองการเชื่อมอาร์คขึ้นงานในกระบวนการเชื่อม TIG โดยกระแสเชื่อมต่ำและความเร็วเชื่อมสูงในการเชื่อมไฮบริด และใช้กระแสเชื่อมต่ำในกระบวนการเชื่อมไฮบริด TIG-MIG ที่ความเร็วเชื่อมสูง นำทั้งสองวิธีคือเชื่อมแบบไฮบริดเปรียบเทียบกับกระบวนการการเชื่อม MIG แบบเดิม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการอาร์ค MIG ที่ไม่เสถียรและจะเสถียรมากกว่าโดยใช้กระบวนการเชื่อม TIG ต่อท้ายซึ่งจะทำให้เสถียรโดยการอาร์ค TIG นำกระบวนการไฮบริดทำให้เกิดการกระจายอำนาจของแรงอาร์ค MIG และลดการปะทะกันของหยดที่หลอมละลายซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นจริงโดยไม่คำนึงถึงส่วนของอาร์คในกระบวนการเชื่อม TIG ที่นำหน้าหรือต่อท้าย การไหลของของไหลย้อนกลับข้างในกระบวนการเชื่อมไฮบริดซึ่งเป็นข้อได้เปรียบอย่างมาก การไล่ระดับอุณหภูมิพื้นผิวที่ส่วนปลายและตรงกลางของการเชื่อมไฮบริดต่ำกว่าของการเชื่อม MIG การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมแบบไฮบริด TIG-MIG พบว่าด้วยความเร็วในการเชื่อมที่สูงขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างเกรนแบบกิ่งไม้ (Dendrite Structure) ที่สังเกตเห็นได้โดยไม่มีกรหยาบของเกรนที่ชัดเจนในบริเวณรอยเชื่อม HAZ ของกระบวนการไฮบริด (Chen et al., 2017)

Turichin และคณะ(2017) ได้ทำการศึกษาทดลองการเชื่อมอาร์คเลเซอร์แบบไฮบริด (HLAW) โดยเครื่องเชื่อม Laser Arc Technological System (LASTTurichin) ในการประกอบชิ้นส่วนตัวเรือขนาด 6X6 เมตร สำหรับการต่อเรือ Inland Cruise และ Mixed Cruise Ship ผลการทดลองสรุปว่า การเชื่อมรอยต่อชนแผ่นเหล็ก(High Strength Steel RS E36)ที่มีความหนาสูงถึง 35 มม. สำหรับการเชื่อมในแนวแรกได้คุณภาพงานเชื่อมออกมาดี, การเสียรูปของโลหะแผ่นเหล็กลดลง, การเชื่อมอาร์คแบบการเชื่อมอาร์คเลเซอร์แบบไฮบริด (HLAW) ช่วยให้ประหยัดวัสดุตัวเติม(ลวดเชื่อม), และสามารถประหยัดก๊าซและไฟฟ้าได้ถึง 4 เท่า, ผลของการวิจัยเชิงทดลองสำหรับพารามิเตอร์การเชื่อมอาร์คเลเซอร์แบบไฮบริดมีอิทธิพลต่อการก่อตัวและสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อมได้เป็นอย่างดี (Turichin et al., 2017)

Sheng J, และคณะ, (2017) ได้ทำการการศึกษาทดลองเกี่ยวกับผลของการกัดกร่อนแบบรูเข็มต่อคุณสมบัติการรับแรงดึงของเหล็กตัวอย่างของโลหะฐานและเงื่อนไขที่แตกต่างกันของ

การเชื่อมแซมโดยการเชื่อมอาร์กโลหะหุ้มฉนวนได้รับการศึกษาโดยการดูการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคของคัพประกอบทางเคมีของเฟสขนาดเกรน (ในเขตที่ได้รับความร้อน HAZ) และผลกระทบต่อกลไกและ คุณสมบัติการกัดกร่อน สำหรับการกัดกร่อนแบบแบบรูเข็มคุณสมบัติการรับแรงดึงของวัสดุเหล็กเช่นความเค้นและการยึดตัวที่ได้รับผลกระทบจากรูปร่างความลึกและความหนาแน่นของหลุมกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Sheng & Xia, 2017)

Sheng J, และคณะ, (2017) ได้ทำการศึกษาผลของการกัดกร่อนแบบรูเข็มต่อคุณสมบัติการรับแรงดึงของเหล็ก โดยได้จำลองหลุมการกัดกร่อนกับกลไกในชิ้นงานทดสอบแรงดึงโดยการเจาะทางกลและการกัดรูรูปกรวย มีการตรวจสอบผลกระทบของรูปร่างความลึกและการกระจายของหลุมกัดกร่อนที่มีต่อคุณสมบัติการรับแรงดึงของเหล็กอย่างเป็นระบบ รูปร่างของหลุมความลึกและการกระจายส่งผลกระทบต่อการรับน้ำหนักสูงสุดของตัวอย่างแรงดึง ความแข็งแรงสูงสุดเกือบจะสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดสูงสุดเท่านั้น (Sheng & Xia, 2017)

Shi, Y., et al. (2017) ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเค้นและการเสียรูปจากการเชื่อมในโครงสร้างแขนยก (loader boom) ที่ใช้ในการทำงานหนัก เช่น งานก่อสร้างและเหมืองแร่ ประเด็นสำคัญในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เชิงสถิตินิ่ง (static analysis) ของแขนยก loader boom ภายใต้เงื่อนไขการทำงานจริงที่พบบ่อยพบจุดอ่อนที่รอยเชื่อม โดยเฉพาะบริเวณหัวเชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กของแขนยกและคาน (boom plate and beam) ทำการวิเคราะห์การเสียรูปและการเลื่อนตำแหน่งของชิ้นส่วน โดยพบว่าการเสียรูปของแผ่นแขน inward เข้าไปประมาณ 30 มิลลิเมตร ในกระบวนการเชื่อมการเสียรูปดังกล่าวเกิดจากความเค้นที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมและความเค้นตกค้าง (residual stress) ซึ่งในกรณีนี้ความเค้นตกค้างสูงถึงประมาณ 300 เมกะปาสคาลผลการวิจัยช่วยให้เข้าใจและสามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขและปรับแต่งกระบวนการผลิตและการแก้ไขการเสียรูปของ loader boom ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สรุปคือ งานวิจัยนี้เน้นการวิเคราะห์และประเมินความเค้นรวมถึงการเสียรูปของชิ้นส่วนที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมใน loader boom เพื่อช่วยในการพัฒนาคุณภาพและความทนทานของโครงสร้างดังกล่าวในการใช้งานหนักในอุตสาหกรรมก่อสร้างและเหมืองแร่

งานวิจัยของ Samardžić et al.(2017) เน้นย้ำว่าค่าพลังงานดูดซับในโซน Heat Affected Zone (HAZ) เป็นหัวใจสำคัญสำหรับความปลอดภัยของโครงสร้าง โดยเฉพาะในชิ้นงานที่ถูกใช้งานในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิต่ำหรือมีการะสลับ (cyclic loading) ซึ่งต้องการความเหนียวและความทนทานสูงใน HAZ เพื่อป้องกันการแตกร้าวที่อาจเกิดขึ้นได้ง่ายในบริเวณนี้ ประเด็นสำคัญมีดังนี้

HAZ เป็นบริเวณที่โครงสร้างจุลภาคถูกเปลี่ยนแปลงจากความร้อนในกระบวนการเชื่อม ทำให้ความเหนียวและพลังงานดูดซับของวัสดุในบริเวณนี้อาจลดลงจากเนื้อโลหะฐาน

การควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อม เช่น พลังงานความร้อนที่ป้อน (heat input) อัตราการเย็นตัว และเทคนิคการรักษาอุณหภูมิก่อนและระหว่างเชื่อม มีผลสำคัญต่อการรักษาคุณสมบัติความเหนียวใน HAZ

สำหรับงานที่ใช้งานในอุณหภูมิต่ำและมีโหลดสลับ การรักษาค่าพลังงานดูดซับ (absorbed energy) สูงใน HAZ จึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อป้องกันปัญหาการแตกร้าแบบเปราะ (brittle fracture) ที่อาจเกิดขึ้นได้ง่ายในสภาพแวดล้อมเหล่านี้

การทดสอบและการจำลองเชิงความร้อนช่วยให้สามารถวิเคราะห์และพัฒนากระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมเพื่อลดความเปราะและเพิ่มความทนทานของ HAZ

การจัดการและควบคุมพารามิเตอร์เหล่านี้ช่วยให้มั่นใจได้ว่าโครงสร้างที่ได้จะมีความปลอดภัยและความเชื่อถือได้ตามมาตรฐานการใช้งานหนักในอุตสาหกรรมโครงสร้างที่ต้องรองรับสภาวะอุณหภูมิต่ำและโหลดสลับได้อย่างเหมาะสม

สรุปคือ Samardzić et al. ชี้ให้เห็นว่าการรักษาค่าพลังงานดูดซับใน HAZ โดยการควบคุมกระบวนการเชื่อมอย่างเหมาะสมเป็นหัวใจหลักสำหรับความปลอดภัยในโครงสร้างที่ใช้ในสภาพแวดล้อมท้าทาย เช่น อุณหภูมิต่ำและภาระสลับ เพื่อป้องกันการแตกร้าและเพิ่มความทนทานของชิ้นงาน.

Atlatis press(2017)ที่ศึกษากระบวนการเชื่อมโดยใช้พลังงานสูง (high heat input) รายงานว่าค่าความแข็ง (microhardness) มีการกระจายตัวอย่างชัดเจนตลอดแนวขวางของรอยเชื่อม โดยพบว่า ค่าความแข็งสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณ Weld Metal (WM) จากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงผ่าน Heat Affected Zone (HAZ) และต่ำสุดบริเวณ Base Metal (BM)

การใช้พลังงานเชื่อมสูงส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคใน HAZ มีการเปลี่ยนแปลง เช่น การเพิ่มขนาดเม็ดผลึกและการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของเฟสต่าง ๆ ซึ่งส่งผลต่อค่าความแข็งและสมบัติทางกลอื่น ๆ

รอยเชื่อมที่ได้โดยพลังงานสูงจึงมีลักษณะเป็นโซนที่ความแข็งต่างกันอย่างชัดเจนตามบริเวณของรอยเชื่อม

องค์ประกอบและลักษณะของโครงสร้างใน CGHAZ (coarse-grained HAZ) รวมถึงองค์ประกอบ martensite-austenite (M-A) มีผลต่อความเหนียวและความแข็งของพื้นที่รอยเชื่อม โดยการเพิ่มพลังงานความร้อนจะเพิ่มขนาดของ M-A constituents ซึ่งส่งผลลดทอนความเหนียว

โดยสรุป ผลการศึกษาแสดงให้เห็นชัดเจนว่า การใช้พลังงานเชื่อมสูงในกระบวนการเชื่อม EH36 steel ทำให้ค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่แนว Weld Metal และลดลงอย่างเป็นลำดับผ่าน HAZ ไปสู่ Base Metal ซึ่งสะท้อนถึงการกระจายความร้อนและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่สัมพันธ์กับพลังงานความร้อนที่ใช้ในเชื่อมงานนั้น ๆ

ข้อมูลนี้สำคัญสำหรับการควบคุมกระบวนการเชื่อมให้ได้รอยเชื่อมที่มีคุณสมบัติทางกลเหมาะสม เช่น ความแข็งแรงและความเหนียว ในงานโครงสร้างที่ใช้เหล็ก EH36 โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมที่ต้องการคุณภาพรอยเชื่อมสูงและทนทานต่อการใช้งานหนัก เช่น งานต่อเรือและโครงสร้าง offshore

Cozzolino et al.(2017) ศึกษาการลดค่าความเค้นตกค้าง (residual stress) และการบิดเสียรูป (distortion) โดยใช้กระบวนการ post weld rolling พบว่าเทคนิคนี้สามารถลด residual stress ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย distortion ที่เกิดขึ้นและค่าความเค้นตกค้างสูงสุดมักเกิดในจุดที่วัสดุในส่วน weld metal มีความแข็งแรง (material strength) สูงกว่าเนื้อโลหะฐาน (base metal) ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการคลายเครียดด้วยการม้วน (rolling) จะพบว่าค่าความเค้นตกค้างและการบิดเสียรูปมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนรายละเอียดที่สำคัญจากงานนี้ได้แก่

การม้วนหลังการเชื่อมด้วยแรงกดเหมาะสมจะส่งผลให้เกิดความเครียดอัด (compressive stress) ในบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งมีผลชดเชยความเครียดดึง (tensile stress) ที่เกิดจากการเชื่อมและเป็นต้นเหตุของการบิดงอและแตกร้าว

การกระจายของ residual stress และ distortion ที่วัดได้จากการทดสอบจริงสอดคล้องกับการทำนายจากแบบจำลองเชิงตัวเลข (finite element analysis) แสดงความสัมพันธ์และแนวโน้มที่แม่นยำ

จุดที่มีแรงดึงและแรงบิดเสียรูปสูงสุดมักติดอยู่ใน weld metal ที่มีความแข็งแรงสูงกว่า base metal เนื่องจากส่วนนี้ได้รับความร้อนสูงและมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกลมากที่สุด

หลังจากผ่านกระบวนการ rolling จะช่วยคลายความเครียดและลดการบิดงอของวัสดุ ทำให้แนวเชื่อมและแผ่นโลหะโดยรวมมีความเรียบและลดการเสียรูปได้มาก กว่าก่อนการคลายเครียด

นอกจากนี้ เทคนิคนี้ยังช่วยลดความเสี่ยงจากการเสียหายของรอยเชื่อมที่เกิดจาก residual stress ส่งผลให้ความน่าเชื่อถือและอายุการใช้งานของโครงสร้างที่เชื่อมดีขึ้น

สรุปคือ Post weld rolling เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการควบคุมและลด residual stress และ distortion โดยเฉพาะในวัสดุที่มี weld metal แข็งแรงสูง ซึ่งช่วยเพิ่มความสมบูรณ์

และเสถียรภาพของโครงสร้างรอยเชื่อมในงานอุตสาหกรรมหนักและงานโครงสร้างที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูงอย่างยั่งยืน

ข้อมูลนี้อ้างอิงจากผลการศึกษาทางทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขของ Cozzolino et al. ที่ได้รับการยืนยันมากกว่า 70% reduction ของ distortion และที่ขัดแย้งกลไกการลดความเค้นผ่านการสร้างความเค้นอัดในแนวเชื่อมหลังจาก rolling.

งานทบทวนของ Yelamasetti et al.(2017) ระบุว่าในกระบวนการเชื่อมด้วยวิธี GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) หรือ TIG และการเชื่อมที่ใช้พลังงานสูงอื่น ๆ พบว่า

ค่าความเค้นตกค้าง (residual stress) และการบิดเสียรูป (distortion) จะมีค่าสูงสุดบริเวณแนวเชื่อม (weld line) หรือ fusion line

ค่าดังกล่าวจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเคลื่อนที่ออกไปสู่เนื้อโลหะฐาน (base metal) การกระจายตัวของ residual stress และ distortion นี้สามารถจำลองและทำนายได้อย่างแม่นยำด้วยวิธีการทางตัวเลขแบบ Finite Element Method (FEM)

FEM ช่วยให้วิเคราะห์การกระจายความร้อนและพฤติกรรมความเค้นอย่างละเอียดตั้งแต่จุดที่รอยเชื่อมเกิดขึ้นจนถึงส่วนที่ไม่ได้รับผลกระทบโดยตรง ซึ่งข้อมูลนี้เป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการวางแผนและควบคุมกระบวนการเชื่อมเพื่อลดความเค้นตกค้างและบิดงอ รวมถึงเพิ่มคุณภาพและความน่าเชื่อถือของชิ้นงานเชื่อมในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ

โดยสรุป งานวิจัยของ Yelamasetti et al. ชี้ให้เห็นโครงสร้างทั่วไปของ residual stress และ distortion ในกระบวนการเชื่อม GTAW/TIG และยืนยันว่า FEM เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการทำนายและออกแบบกระบวนการเชื่อมเพื่อปรับปรุงคุณภาพของรอยเชื่อมอย่างแม่นยำและเชื่อถือได้.

Leandro de Jesus Jorge,และคณะ, (2018) ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้า HSLA-80 โดยการเชื่อม SMAW และผ่านกระบวนการทำให้ความร้อนเพื่อนำเสนอการเปรียบเทียบการใช้เงื่อนไขกรรมวิธีทางความร้อน(การอบ-ชุบ)ที่แตกต่างกันในการเชื่อมเหล็ก HSLA-80. วิธีการทดลองดำเนินการโดยการเชื่อมหลายแนวโดยใช้กระบวนการเชื่อมอิเล็กโทรดเคลือบSMAW ในกรรมวิธีทางความร้อนที่กำหนดเงื่อนไขแตกต่างกัน โดยมีหรือไม่มีการให้ความร้อนก่อนหรือหลังการเชื่อมเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของแต่ละสภาวะ.ผลการทดลองจากการทดสอบทางกลและการวิเคราะห์ทางโลหะวิทยาได้ข้อสรุปว่าการชุบด้วยความร้อนไม่จำเป็นต้องเสริมขั้นตอนการเชื่อมของเหล็กนี้. โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีของการรักษาความร้อนหลังการเชื่อม Post-Weld Heat

Treatment โดยผลการทดลองสรุปว่าในความเป็นจริงการใช้งานของการรักษาควบคุมความร้อน ไม่ได้ส่งผลกระทบบ่อยอย่างมีนัยสำคัญทั้ง โครงสร้างจุลภาคและลักษณะเชิงกลของวัสดุ (de Jesus Jorge et al., 2018)

T. Sirisatien, และคณะ, (2018) ได้ศึกษาผลกระทบของการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding Process) โดยการเชื่อมแบบด้านเดียวแนวเดียวที่มีต่อพฤติกรรมการบิดเบี้ยวของแผ่นเหล็กต่อเรือ ASTM A131 เกรด A ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบความบิดเบี้ยวของแผ่นเหล็กและอุณหภูมิสูงสุดในระหว่างการเชื่อมอาร์กแบบด้านเดียวและที่เยวเดียวของแผ่นเหล็ก ASTM A131 เกรด A โดยการเปลี่ยนแปลงผลกระทบของระดับการให้ความร้อน Heat Input (27 kJ / cm และ 32 kJ / cm) การออกแบบและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อทดลอง จากผลทดลองการบิดเบี้ยวของแผ่นเหล็กจะแตกต่างกันไปตามระดับการให้ความร้อน Heat Input และเงื่อนไขข้อ จำกัด ที่แตกต่างกันคือมีการจับยึดด้วยแคลมป์ และไม่มีการจับยึดด้วยแคลมป์ และผลการทดลองได้ค่าความผิดเพี้ยนสูงสุด 2.99 มม. ในชิ้นงานที่เชื่อมด้วยระดับอินพุตความร้อนระดับการให้ความร้อน Heat Input 32 kJ / cm และการบากรอยต่อชิ้นงานที่ 30 ° V โดยไม่มีการจับยึดด้วยแคลมป์ และการเชื่อมแบบด้านเดียวแนวเดียวโดยการใช้แผ่นรองเซรามิกมาใช้และการจับยึดด้วยแคลมป์นั้นการบิดเบี้ยวเป็นไปตามมาตรฐานการต่อเรือระหว่างประเทศ (Sirisatien et al., 2018)

Liu B, Pedersen P, Zhu L, Zhang S (2018) ได้ทำการทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการทดลองและขั้นตอนการคำนวณสำหรับการชนของเรือและความเสียหายจากการเกยตื้น โครงสร้างเรือส่วนใหญ่ทำจากเหล็กซึ่งทำให้พวกมันเสี่ยงต่อสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนซึ่งนำไปสู่การสูญเสียความหนาและ / หรือการเป็นรูพรุนในช่วงหลายปีที่ผ่านมา นอกเหนือจากการสูญเสียความหนาเนื่องจากการกัดกร่อนโครงสร้างของเรืออาจได้รับความเสียหายของโครงสร้างตลอดอายุการใช้งานตั้งแต่เรือไปจนถึงเรือชนกันหรือความเสียหายที่เกี่ยวข้องกับการเกยตื้น (Liu et al., 2018)

Zayed A, และคณะ, (2018) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับ การย่อยสลายการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กตัวถังสำหรับสภาพแวดล้อมในท้องถิ่น สิ่งสำคัญคือต้องตระหนักว่าบ่อยครั้งที่แผ่นเรือสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันเช่นถึงและอากาศหรือถึงและแช่อยู่ในน้ำ ที่สัมผัสกับการกัดกร่อนสองประเภทพร้อมกันและอัตราการกัดกร่อนทั้งหมดจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบสัมผัสกับการกัดกร่อนสองประเภท (Zayed et al., 2018)

Wang R, และคณะ,(2018) ได้ทำการการประเมินความแข็งแรงขั้นสุดท้ายของโครงสร้างเหล็กชุบที่มีความเสียหายจากการกัดกร่อนแบบรูพรุน โดยการตรวจสอบผลของความเสียหายของรูพรุนต่อความสามารถในการเปลี่ยนรูปโดยรวมและการเริ่มต้นการแตกหักแบบเหนียว ductile fracture ในชิ้นงานทดสอบแรงดึงของแนวเชื่อมต่อชนที่อยู่ภายใต้การทดสอบการกัดกร่อนไอเกลือ (Salt spray test) ผลการศึกษาพบว่ารอยร้าวทั้งหมดของรอยเชื่อมที่สึกกร่อนแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการลดลงเชิงเส้นที่มีนัยสำคัญมากกว่าความแข็งแรงสูงสุด (Wang et al., 2018)

Yao Y, และคณะ, (2018) ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับแบบจำลองส่วนประกอบทั่วไปของแผ่นโครงสร้างตัวเรือที่มีการกัดกร่อนแบบหลายพารามิเตอร์ โดยทำการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติวัสดุของชิ้นงานทดสอบที่มีการกัดกร่อนแบบหลุมด้วยกลไก โดยสรุปได้ว่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น modulus of elasticity จุดคดลาก yield และจุดแข็งแรงสูงสุดและ ค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) จะลดลงโดยประมาณในเชิงเส้นตามระดับของหลุม degree of pitting (DOP) (Yao et al., 2018)

Monghaihen (2018) อธิบายเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบ bend test ตาม ASME Section IX ว่าชิ้นงานทดสอบ bend test จะต้องไม่มีรอยเปิด (open defect) ขนาดเกิน 3 มิลลิเมตร บนผิวที่ถูกตัดโค้ง (convex surface) หากไม่มี defect หรือ crack ที่เกินขนาดนี้ ถือว่ารอยเชื่อมนั้นมีคุณภาพดี และผ่านเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบ (acceptance criteria)

ข้อยกเว้นเรื่องรอยแตกที่เกิดขึ้นงาน (corner) ซึ่งอาจมี stress สูงจากการเปลี่ยนรูป (discontinuity) แต่ถ้าไม่ใช่ปัญหาที่เกิดจากกระบวนการเชื่อม เช่น lack of fusion หรือ inclusion ก็ไม่ถือเป็น defect ที่ทำให้ล้มเหลว การทดสอบ bend test เป็นการประเมินความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม โดยการตัดโค้งชิ้นงานแล้วดูว่าผิวที่รับแรงดึงมีรอยแตกหรือข้อบกพร่องหรือไม่

สรุปคือ รอยเชื่อมที่ไม่มีรอยเปิดเกิน 3 มิลลิเมตร เป็นการยืนยันว่ารอยเชื่อมนั้นมีคุณภาพดีและมั่นคงในเชิงโครงสร้างตามมาตรฐาน ASME Section IX

Pai Namit Narasimhana, และคณะ,(2019) ได้ทำการพัฒนาระบบการเชื่อมแบบไฮบริดที่ผสมผสานระหว่าง GMAW และ SMAW โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการเชื่อมโดยการรวมกระบวนการเชื่อมแบบ Metal Inert Gas Welding (MIG) และ Shielded Metal Arc Welding (SMAW) เข้าด้วยกัน และลดการฟุ้งพลาสมาที่ก่อให้เกิดในการเชื่อม MIG โดยอาศัยหลักการของอิเล็กโทรดเพื่อให้ผลในการป้องกัน นอกจากนี้ยังมีจุดมุ่งหมายเพื่อลด HAZ โดยการลดการหลอมโลหะฐานแทนการอุดรูด้วยอิเล็กโทรดเหล็กอ่อนที่หลอมละลายซึ่งใช้ใน SMAW แผ่น

เหล็ก (เกรด IS-2062) ที่มีความหนา 6 มม. ถูกเชื่อมในครั้งเดียวโดยวางอิเล็กโทรดเหล็กก่อน (E6013) ไว้ระหว่างกัน Shielding Gas ที่ใช้คือ CO₂ การเตรียมการก่อนการเชื่อมรวมถึงการทำร่องที่มีมุมต่างๆและช่องว่างของแนวต่อชน การจำแนกลักษณะทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ทดสอบความแข็งระดับไมโครเพื่อยืนยันผลลัพธ์ข้างต้น เนื่องจากฟลักซ์ของอิเล็กโทรดก่อตัวเป็นเกราะป้องกันก๊าซและตะกอนที่ด้านบนของรอยเชื่อมอัตราการไหลของก๊าซจึงสามารถลดลงได้ในระดับที่ต่ำกว่ามาก (Narasimhan et al., 2019)

Pai Namit Narasimhan และคณะ, (2019) ได้ศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงให้กับแนวเชื่อมโดยวิธีการเชื่อมแบบผสมกันระหว่าง Metal Inert Gas Welding (MIG) และ Shielded Metal Arc Welding และลดปริมาณการใช้ก๊าซเฉื่อยที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม MIG โดยอาศัยฟลักซ์ของอิเล็กโทรดในกระบวนการ SMAW เพื่อให้เกิดการป้องกันการบวมเนื้อเชื่อมจากการปนเปื้อนหรือการทำปฏิกิริยาจากอากาศ ผลการทดลองสรุปได้ว่า การเชื่อมแบบไฮบริดสามารถลด HAZ ได้, การป้องกันอัตราการไหลของก๊าซสามารถลดลงได้สามเท่าโดยไม่ทำให้คุณภาพการเชื่อมลดลง, สำหรับสแลคที่เกิดจากการเชื่อมช่วยให้ระบายความร้อนช้าลงของโซนเชื่อม ดังนั้นจึงสามารถลดความเค้นตกค้างได้ (Narasimhan et al., 2019)

Tian Xia, และคณะ, (2019) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับค่าความแข็งแรงสูงสุดและพฤติกรรมความแข็งแรงหลักสูงสุดของแผ่นประกอบตัวเรือภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆตามแนวยาว .. รูปแบบการรับน้ำหนักหรือโหลดที่กระทำทั้งสองแบบคือรูปแบบการรับแรงอัดแบบซ้ำๆและการรับแรงดึงแบบซ้ำๆ ผลรวมของความเสียหายจากการเสียรูปอย่างถาวรและความเสียหายของรอยแตกจากกรรล่าในรอบต่ำที่เกิดขึ้นจากการรับน้ำหนักมากเกินไปที่มีต่อความแข็งแรงสูงสุดรวมทั้งเส้นทางการรับน้ำหนักของแผ่นประกอบตัวเรือ จะเห็นได้ว่าเป็นผลมาจากแรงกระทำทั้งสองคือแรงอัดแบบซ้ำๆและการรับแรงดึงแบบซ้ำๆ และนอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาวิเคราะห์กลไกเชิงกลของพฤติกรรมความแข็งแรงในแต่ละเงื่อนไขของการโหลดที่กระทำแบบซ้ำๆ (Xia et al., 2019)

Pengli Dong, และคณะ, (2019) ได้ศึกษาพารามิเตอร์ความเครียดของโครงสร้างสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติความล้าของชิ้นส่วนประกอบงานเชื่อมโดยการจำลองพฤติกรรมการล้ารอบต่ำของโครงสร้างเชื่อม โดยนำพารามิเตอร์ช่วงความเครียดโครงสร้างที่เท่ากันมาใช้เพื่อประเมินพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเชื่อมที่ครอบคลุมทั้งความล้าที่รอบต่ำและความล้าที่รอบสูงของส่วนประกอบรอยต่อเชื่อมประเภทต่างๆคือ gusset-to-plate, plate-to-plate และ pipe-to-pipe joint โดยใช้วิธีความเครียดของโครงสร้าง กำหนดให้การรับน้ำหนักความล้าแตกต่างกันไปจากสภาวะที่ควบคุมโหลดไปจนถึงสภาวะที่ควบคุมด้วยการกระจัด (displacement) และโลหะ

พื้นฐานของเหล็กโครงสร้างที่มีเกรดต่างกัน และ อลูมิเนียมอัลลอยด์ รวมทั้ง โลหะผสมไทเทเนียม ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ช่วงความเครียดโครงสร้างที่เท่ากันช่วยให้สามารถประเมินพฤติกรรมการล้าของวัสดุได้ (Pei et al., 2019)

Mohammadrahimi A, และคณะ, (2019) ได้ทำการวิเคราะห์ชุดข้อมูลของการวัดความหนาในพื้นที่สึกกร่อนของผู้ขนส่งจำนวนมาก สุดท้ายต้องชี้ให้เห็นว่าโดยทั่วไปกลไกการกัดกร่อนหลักสองประการมีอยู่ในแผ่นเหล็ก หนึ่งคือการสูญเสียทั่วไปที่สะท้อนให้เห็นจากการลดลงของความหนาของแผ่นโดยทั่วไป กลไกอีกประการหนึ่งคือการเจาะรูซึ่งประกอบด้วยการกัดกร่อนเฉพาะที่โดยมีรูสึกมากปรากฏอยู่ในแผ่นซึ่งอาจนำไปสู่การแตกร้าวจากความล้า (Mohammadrahimi & Sayebani, 2019)

Garbatov Y, และคณะ, (2019) ได้ทำการการก่อสร้างแบบจำลองการสูญเสียการกัดกร่อนเชิงพื้นที่ของแผ่นเหล็กที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมทางทะเล และได้สรุปว่าการมีอยู่ของความไม่แน่นอนในระดับสูง โดยผลการตรวจวัดที่ได้เกิดจากการย่อยสลาย, การกัดกร่อนการสึกกร่อนผิวน้ำ และความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการทำความสะอาดอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เป็นผลนำไปสู่ความไม่แน่นอนในคุณสมบัติเชิงกล, ความหนาโดยประมาณและการอ้างอิงส่วนที่ใช้สำหรับการคำนวณความเครียด และการวิเคราะห์โครงสร้าง ตำแหน่งส่วนสุทธิต่างที่แตกหักของชิ้นงานที่สึกกร่อนไม่สัมพันธ์กับตำแหน่งของความหนาขั้นต่ำซึ่งนำไปสู่ข้อสรุปว่าความหนาขั้นต่ำไม่ใช่พารามิเตอร์เดียวที่ควบคุมความเสียหายของชิ้นงานทดสอบ (Garbatov & Guedes Soares, 2019)

Ma H, และคณะ, (2019) ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กภายใต้การรับแรงกระทำแบบซ้ำๆ โดยพิจารณาจากการเกิดการผุกร่อนได้ (Corrosion) การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงภายใต้การกระทำของความเสียหายจากการเกิดการผุกร่อนได้ โดยได้สังเกตเห็นว่าความแข็งแรงของวัสดุและความแข็งแรงสูงสุดของเหล็กจะลดลงเมื่ออัตราการสูญเสียปริมาตรของรูเข็มเพิ่มขึ้น พวกเขาจึงสรุปว่าการโหลดแบบวนรอบสามารถเสริมสร้างความเค้นและความเครียดของเหล็กได้ แต่ความเสียหายจากการผุกร่อนแบบหลุมจะนำไปสู่การเสื่อมสภาพของความเค้นและความเครียดของเหล็ก (Ma et al., 2019)

Jia et al. (2019) ได้ทำการศึกษาการทดสอบทางกลของเหล็กสมรรถนะสูงที่สึกกร่อนจากการใช้งานในทะเลภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ cyclic loading และได้ข้อสรุปว่าความเสียหายจากการกัดกร่อนที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กนั้นซับซ้อนและไม่สามารถจำแนกได้ด้วยการลดส่วนเพียงอย่างเดียว ทั้งโมดูลัสยืดหยุ่นทั่วไปและความแข็งแรงของวัสดุลดลงตามความเสียหาย

จากการกัดกร่อน ความเสียหายจากความล้าสะสม ทำให้เส้น steel skeleton curves ภายใต้งแรงกระทำแบบซ้ำๆ และเส้นโค้ง monotonic curves แตกต่างกัน การโหลดแบบไซคลิกช่วยเพิ่มความเค้นสูงสุดของเหล็กโดยมีค่าของความสามารถในการเปลี่ยนรูปขั้นสูงสุด (Jia et al., 2019)

งานวิจัยของ Njock Bayock et al.(2019) ศึกษาความแข็ง (hardness) ของบริเวณ weld metal, heat affected zone (HAZ) และ base metal พบว่าในกรณีของการเชื่อมแบบ Submerged Arc Welding (SAW) สำหรับเหล็ก S355 และ EH36 ซึ่งเป็นวัสดุที่ผ่านกระบวนการ Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) นั้น ค่าความแข็งของ weld metal ที่ได้จะอยู่ในระดับประมาณ 230–240 HV ซึ่งสูงกว่า base metal ที่มีค่าความแข็งอยู่ในช่วงประมาณ 200–220 HV เล็กน้อย ความแข็งในระดับนี้ของ weld metal ไม่ได้ส่งผลเสีย (nondetrimental) ต่อความเหนียว (toughness) ในบริเวณ HAZ แต่อย่างใด หมายความว่า การเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของความแข็งใน weld metal ยังสามารถรักษาคุณสมบัติทางกลโดยเฉพาะความเหนียวของ HAZ ไว้ได้ดี การกระจายความแข็งในพื้นที่ต่าง ๆ ของรอยเชื่อมแสดงถึงสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความเหนียวที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในงานโครงสร้างที่ต้องการความทนทานสูง เช่น งานต่อเรือและโครงสร้างรับแรงสูง

โดยสรุป งานของ Njock Bayock et al. ชี้ให้เห็นว่า รอยเชื่อมที่เกิดจากกระบวนการ SAW บนเหล็ก S355 และ EH36 มี weld metal ที่มีความแข็งเล็กน้อยสูงกว่า base metal แต่ยังคงอยู่ในระดับที่ไม่ส่งผลเสียต่อความเหนียวของ HAZ ซึ่งช่วยให้สามารถมั่นใจได้ในการใช้งานเชิงโครงสร้างโดยที่รอยเชื่อมยังคงคุณสมบัติทางกลที่ดีอยู่ครบถ้วน

งานวิจัยของ Wibowo et al.(2019) ระบุว่าในการเชื่อมด้วยวิธี Shielded Metal Arc Welding (SMAW) สำหรับเหล็ก SS400 ซึ่งเป็นฐานวัสดุเดียวกับที่ใช้ในหลายงานที่ศึกษาเหล็ก EH36 (TMCP steel) นั้น พบว่าแนวเชื่อมมีค่าความแข็ง (hardness) สูงกว่าเนื้อโลหะฐาน (base metal) อย่างชัดเจน โดยรายละเอียดที่สำคัญจากงานวิจัยได้แก่

ความแข็งของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับค่า hardness ของ base metal ซึ่งใน SS400 โดยทั่วไปความแข็งฐานจะอยู่ที่ประมาณ 182 HV

ค่า hardness ในแนวเชื่อมสามารถสูงถึงราว 230 HV ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์การเชื่อม เช่น กระแสไฟฟ้า

การเพิ่มความแข็งนี้ส่วนหนึ่งมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในแนวเชื่อม โดยเฉพาะการเกิดโครงสร้าง martensite และ ferrite ที่มีความแข็งสูงจากองค์ประกอบทางเคมีของลวดเชื่อมและเงื่อนไขความร้อนในการเชื่อม

ถึงแม้จะมีความแข็งสูงขึ้น แต่ต้องควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อม เช่น การใช้กระแสไฟหรือการเตรียมผิว เพื่อป้องกันปัญหาแตกร้าวหรือความเปราะในรอยเชื่อม

งานวิจัยยังเสนอว่าเทคนิคการวัดความแข็งเช่น Vickers hardness test สามารถใช้ประเมินคุณภาพรอยเชื่อมและอิทธิพลของพารามิเตอร์เชื่อมต่อสมบัติกลของวัสดุได้อย่างดี

สรุปได้ว่า Wibowo et al. ยืนยันว่ารอยเชื่อม SMAW บนเหล็ก SS400 มีความแข็งสูงกว่า base metal อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้ทั่วไปในงานเชื่อมเหล็ก TMCP เช่น EH36 ด้วย โดยความแข็งที่สูงนี้เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของลวดเชื่อมที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม.

P.Singh, และคณะ, (2020) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของการชุบแข็งและการอบอ่อนต่อความแข็งของแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (submerged arc welded) โดยการศึกษานี้ได้เลือกใช้เหล็กอ่อนหรือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (mild steel) เป็นวัสดุสำหรับกระบวนการเชื่อมเชื่อมใต้ฟลักซ์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของความแข็งในกระบวนการทางความร้อนที่แตกต่างกัน ทั้งสองกระบวนการคือการชุบแข็งและการอบอ่อนรอยเชื่อมจะมีความแข็งที่ค่ากระแสเชื่อมที่แตกต่างกันสำหรับกระบวนการทางความร้อนทั้งสองกระบวนการที่แตกต่างกันจากการชุบแข็งและการอบอ่อน การทดสอบความแข็งของรอยเชื่อมแบบ Rockwell พื้นที่ช่วงที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) และส่วนของโลหะเดิมค่าความแข็งจะแตกต่างกัน (Singh et al., 2020)

Chuntong Liab, Deyu Wangab, และคณะ, (2020) ได้ทำการศึกษากาวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการศึกษาทดลองแบบจำลองขนาดของชุดรัดตู้คอนเทนเนอร์บนดาดฟ้าเรือขนส่งสินค้าขนาดใหญ่ ผลการศึกษาวิจัยชี้ให้เห็นว่าจากพฤติกรรมเชิงกลของโครงสร้างอุปกรณ์ผู้รัดบนดาดฟ้าเรือที่ใช้สำหรับตู้คอนเทนเนอร์ขนาดใหญ่พิเศษสามารถหาได้ง่ายจากแบบจำลองที่ลดลงและสามารถช่วยให้การออกแบบโครงสร้างและการเพิ่มประสิทธิภาพและการวิเคราะห์การเชื่อมต่อโครงสร้างย่อยของอุปกรณ์ผู้รัดบนดาดฟ้าเรือบรรทุกคอนเทนเนอร์ขนาดใหญ่พิเศษได้ดี (Carvalho et al., 2003)

Nguyen, และคณะ, (2020) ได้ทำการศึกษาดูผลของการแพร่กระจายของรอยแตกเปราะต่อความแข็งแรงของโครงสร้างเรือโดยใช้ peridynamics ศึกษาการคาดการณ์ความเสียหายแบบแตกเปราะอย่างต่อเนื่องของโครงสร้างเรือภายใต้เงื่อนไขการบรรทุกที่แตกต่างกัน มีการนำเสนอโมเดลแบบเพอร์ไดนามิกที่พัฒนาขึ้นเมื่อเร็ว ๆ นี้เพื่อประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างในระหว่างกระบวนการวิวัฒนาการความเสียหายจากจุดเริ่มของการแตกหัก โดยเริ่มจาก

ความแข็งแรงตามยาว(โมเมนต์ดัด) ของโครงสร้างเรือจะคำนวณเป็นตัวเลหะระหว่างการแพร่กระจายความเสียหาย ความแข็งแรงตามยาวสูงสุดของเรือได้ถูกตรวจสอบด้วยผลการทดลอง จากนั้นการจำลองแบบจะขยายออกไปเพื่อตรวจสอบโครงสร้างเรือที่มีความเสียหายเบื้องต้น ในที่สุดก็มีการนำเสนอแรงบิดในระหว่างกระบวนการแพร่กระจายความเสียหายสำหรับโครงสร้างเรือ (Nguyen & Oterkus, 2020)

Cui และ Wang (2020) การทดลองและการตรวจสอบเชิงตัวเลขเกี่ยวกับความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นแข็งที่มีการกัดกร่อนแบบเปิดและการเจาะทะลุ ได้ศึกษาความแข็งแรงของแผ่นแข็งแบบหลุมด้วยช่องเปิดแบบวงกลม การทดลองบนแผงปิดช่องสามช่องโดยมีรูวงกลมครอบคลุมส่วนใหญ่ของความกว้างของแผ่นกลาง รูพูนที่สร้างขึ้นโดยกลไกได้รับการพิจารณาในองค์ประกอบของเพลตทั้งหมดในจำนวนและตำแหน่งที่แตกต่างกัน สรุปได้ว่าแม้จะมีปริมาณการกัดกร่อนเท่ากันความแข็งแรงสูงสุดอาจเบี่ยงเบนอย่างมีนัยสำคัญขึ้นอยู่กับระดับการกัดกร่อนและการขยายของช่องเปิด (Cui & Wang, 2020)

Zhao Z, และคณะ, (2020) ศึกษาความต้านทานแรงดึงของเหล็ก Q345 ที่มีการกัดกร่อนแบบรูเข็มแบบสุ่มโดยอาศัยการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(FE) โดยการจำลองหลุมการกัดกร่อนเป็นรูปทรงกึ่งวงรีกึ่งทรงกลมกรวยหรือทรงกระบอกซึ่งจากนั้นจะกระจายแบบสุ่มบนพื้นผิวของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ FE ของชิ้นงานทดสอบและความแม่นยำของแบบจำลอง FE ได้รับการตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สรุปได้ว่าความต้านทานแรงดึงของเหล็กที่มีการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีความสัมพันธ์กับความลึกของการกัดกร่อนและอัตราส่วนของมวลที่สูญเสีย (Zhao et al., 2020)

Feng L,และคณะ, (2020) ได้ทำการศึกษาเชิงพารามิเตอร์เกี่ยวกับผลกระทบของการกัดกร่อนแบบหลุมต่อความแข็งแรงสูงสุดของแผ่นเหล็ก โดยได้จัดทำโปรแกรมการทดสอบการทดลองกับแผ่นเหล็กที่มีรูพูน หลุมขนาดเล็ก (pit) ซึ่งรับแรงอัดในระนาบ มีการที่มีรูพูนทรงกลมและสี่เหลี่ยมและมีความลึกต่างกัน เหล็กที่มีรูพูน หลุมขนาดเล็ก มีขนาด 145x80x1.5 มม. ดังนั้นจึงมี $a/b = 1.8$ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าค่าปกติ 3 ที่มักพบในโครงสร้างเรือ และในส่วนของ การคำนวณ FE ทำขึ้นสำหรับเหล็กที่มีรูพูน (DOP) ตั้งแต่ 4 ถึง 23% และความลึกของเหล็กที่มีรูพูน อยู่ระหว่าง 0.25 ของความหนาเริ่มต้นจนถึงความหนาเต็มซึ่งมีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกันกับการทดลอง จึงสรุปได้ว่าการลดลงของความแข็งแรงแตกต่างกันไปตามเชิงเส้นกับ DOP ซึ่งมีความเข้มมากขึ้นสำหรับแผ่นเหล็กที่มีความชะรูดต่ำ (Feng et al., 2020)

Yang Y, และคณะ, (2020) ได้ทำการการศึกษาทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรมการบีบอัดแกนเดียวของแผ่นเหล็ก DH36 (TMCP) ด้วยหลุมที่เกิดจากกลไกทางกล โดยศึกษาพฤติกรรมของชิ้นงานทดสอบเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงด้วยหลุมเดียวที่สร้างด้วยกลไกทางกล และสรุปว่ามีผลกระทบเล็กน้อยของหลุมที่เกิดจากกลไกทางกลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นทั่วไปของเหล็ก แต่รูปพลาสมาที่เกิดจากการกัดกร่อนมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าความแข็งแรงคราก yield strength และค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณของวัสดุที่สูญเสียไปจากการสึกกร่อน ดังนั้นในขณะที่ชิ้นงานทดสอบที่สึกกร่อนก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัดหรือปริมาตรของวัสดุ (Yang et al., 2020)

งานวิจัยของ Nayak & Roy (2020) เน้นการศึกษาผลของพลังงานความร้อน (heat input) ต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล และความต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุ Zircaloy-4 ที่เชื่อมด้วยกระบวนการ Electron Beam Welding (EBW) ประเด็นสำคัญของงานนี้ได้แก่

วิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเชื่อม Electron Beam Welding โดยใช้การวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล เพื่อยืนยันความถูกต้องของโมเดลในการทำนายอุณหภูมิ

ศึกษาผลของความร้อนที่ป้อนในชิ้นงานต่อโครงสร้างจุลภาคในบริเวณรอยเชื่อม พบว่า ความร้อนที่แตกต่างกันส่งผลต่อการเจริญเติบโตของผลึกและการกระจายตัวของเนื้อวัสดุในโซนรอยเชื่อม

ประเมินสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรงและการยืดหยุ่น รวมถึงความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานเชื่อม

รายงานแสดงให้เห็นว่า การควบคุมพลังงานความร้อนในการเชื่อมเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของรอยเชื่อม ทั้งในแง่ของโครงสร้างและสมบัติทางกล

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ชี้ว่า เมื่อความร้อนถูกควบคุมเหมาะสม จะได้รอยเชื่อมที่มีโครงสร้างจุลภาคละเอียด สมบูรณ์ และสมบัติทางกลดี รวมถึงความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น

สรุปโดยรวม งานของ Nayak & Roy (2020) ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างการป้อนพลังงานความร้อนในกระบวนการ Electron Beam Welding กับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติของ Zircaloy-4 ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการปรับปรุงและควบคุมคุณภาพการเชื่อมวัสดุในอุตสาหกรรมที่ใช้วัสดุประเภทนี้ โดยเฉพาะในงานที่ต้องการความแม่นยำสูงและความทนทานต่อสภาพแวดล้อม เช่น อุตสาหกรรมนิวเคลียร์และอุตสาหกรรมพลังงาน

Park et al.(2020) จาก POSCO Technical Research Laboratories มุ่งเน้นศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมโดยเฉพาะในโซนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone - HAZ) ของเหล็กกล้าเกรดสูง เช่น medium Mn TRIP steel และวัสดุสแตนเลส โดยมีการนำเสนอแนวทางการบำบัดความร้อนหลังเชื่อมแบบ In-situ post-weld heat treatment ซึ่งช่วยเพิ่มความเหนียวและคุณสมบัติความทนทานของรอยเชื่อมได้อย่างมีนัยสำคัญประเด็นสำคัญในงานของ Park et al. ได้แก่

การวิเคราะห์และปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคใน HAZ โดยเฉพาะโครงสร้าง grain ขนาดใหญ่ (coarse-grained HAZ) ที่มักส่งผลต่อความเปราะของรอยเชื่อม

ใช้วิธีการบำบัดความร้อนหลังเชื่อมแบบ in-situ post-weld heat treatment เพื่อให้โครงสร้างจุลภาคมีความละเอียดและลดความเปราะดังกล่าว

การทดสอบคุณสมบัติทางกล พบว่ามีการปรับปรุงค่าความเหนียวและความทนทานของรอยเชื่อมอย่างชัดเจนจากการบำบัดความร้อนนี้

งานวิจัยยังเน้นการใช้เทคโนโลยีเชิงตัวเลขและการทดลองร่วมกันเพื่อยืนยันผลลัพธ์และการพัฒนากระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับเหล็กชนิดพิเศษ

สรุปได้ว่า งานวิจัยของ Park et al. ที่ POSCO Technical Research Laboratories เน้นการพัฒนาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของรอยเชื่อมโดยใช้เทคนิคการบำบัดความร้อนหลังเชื่อมแบบ in-situ ซึ่งช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลโดยเฉพาะความเหนียวในบริเวณ HAZ ของเหล็กกล้าเกรดสูง ทำให้รอยเชื่อมมีคุณภาพสูง เหมาะสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมที่ต้องการความแข็งแรงและความทนทานสูง เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และโครงสร้างสำคัญต่าง ๆ

งานวิจัยของ Cai et al.(2020) รายงานว่าเมื่อต้องมีการซ้อนกันของชั้นแนวเชื่อมหรือ interpass overlap ในขั้นตอนการเชื่อมที่เหมาะสม จะช่วยป้องกันข้อบกพร่องประเภท lack of fusion ซึ่งเป็นกรณีที่การหลอมรวมระหว่างชั้นเชื่อมหรือระหว่างแนวเชื่อมกับเนื้อโลหะฐานไม่สมบูรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การซ้อนกันของชั้นเชื่อมอย่างเหมาะสมยังช่วยให้พื้นที่เปลี่ยนผ่าน (transition zone) ระหว่าง weld metal กับ base metal มีความสมบูรณ์และแข็งแรงมากขึ้นโดยสรุปประเด็นที่ Cai et al. เน้น ได้แก่

การจัดการ interpass overlap อย่างเหมาะสมช่วยให้แนวเชื่อมแต่ละชั้นเกาะเกี่ยวและติดกันอย่างเต็มที่ป้องกันการเกิดช่องว่างหรือการแยกชั้นที่เป็นสาเหตุของ lack of fusion

ทำให้โซนเปลี่ยนผ่านระหว่างชั้นเชื่อมและเนื้อโลหะฐานกลายเป็นโครงสร้างที่สมบูรณ์ ลดความเสี่ยงต่อการแตกร้าวหรือความล้มเหลวในจุดนี้ส่งผลต่อคุณภาพรอยเชื่อมโดยรวมและความน่าเชื่อถือของงานโครงสร้างที่ใช้วัสดุเชื่อมหลายชั้น

การควบคุม interpass overlap จึงเป็นหนึ่งในเทคนิคสำคัญของช่างเชื่อมและวิศวกรที่ช่วยป้องกัน defect และทำให้รอยเชื่อมมีคุณภาพสูงตามที่รายงานไว้ในงานวิจัยนี้

Zhu et al.(2021) ศึกษาคุณสมบัติพื้นผิวแตกหัก (fracture surface) ของเหล็ก EH36 ที่ผ่านกระบวนการ Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) พบว่าเหล็กชนิดนี้มีลักษณะการแตกหักแบบเหนียว (ductile fracture characteristics) ซึ่งเป็นลักษณะที่ดีต่อความทนทานต่อการแตกร้าว โดยจากการทดสอบ impact test หรือการทดสอบความเหนียวจากแรงกระแทก พบว่า EH36 TMCP steel ให้ค่าความเหนียวที่สูง ซึ่งสะท้อนความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการแตกหักและความต้านทานต่อการแตกร้าวได้ดี งานวิจัยวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและรอยบุ๋ม (dimples) บนพื้นผิวแตกหักด้วยเทคนิค SEM พบว่า fracture surface ของ EH36 มีจำนวนและขนาดของรอยบุ๋มที่สอดคล้องกับการแตกหักแบบเหนียว การปรากฏของรอยบุ๋มเหล่านี้เป็นหลักฐานว่าการแตกร้าวมีการเกิด micro-void growth และ coalescence ซึ่งเป็นกลไกของการแตกหักที่ใช้พลังงานสูง

นอกจากนี้ ความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างลักษณะพื้นผิวแตกหักกับความเหนียวของวัสดุที่ศึกษาในงานนี้ยังชี้ให้เห็นว่า EH36 TMCP steel มี fracture toughness ที่ดีไม่น้อยไปกว่าค่าที่คำนวณโดยวิธี J-integral ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความต้านทานต่อการแตกร้าวอย่างแม่นยำ

โดยสรุป งานวิจัยของ Zhu et al. ยืนยันว่า EH36 TMCP steel แสดงคุณลักษณะการแตกหักแบบเหนียวและมีค่าความเหนียวสูงในงานทดสอบแรงกระแทก เหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรมที่ต้องการความเชื่อถือได้ทางกลศาสตร์และความทนทานต่อการแตกร้าว

งานวิจัยของ Ghorbel & Ktari (2022) รายงานว่าในการเชื่อมเหล็กกล้าโครงสร้างด้วยกระบวนการผสมระหว่าง SMAW และ GTAW หากมีการควบคุมกระบวนการเชื่อมและพารามิเตอร์สำคัญ เช่น อุณหภูมิระหว่างรอยเชื่อม (interpass temperature) และความสะอาดของบริเวณรอยเชื่อมได้อย่างเหมาะสม จะทำให้โครงสร้างทางมหภาคของรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ ไม่มีการเกิดข้อบกพร่องหรือ defect รุนแรงในรอยเชื่อม และเหมาะสำหรับการใช้งานในงานโครงสร้างหลักที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูงโดยรายละเอียดเพิ่มเติมจากงานวิจัยนี้ ได้แก่

การสอบเทียบและประเมินรอยเชื่อมโดยวิธีที่ไม่ทำลาย (non-destructive testing) พบว่าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ ไม่มีรอยแตกร้าวหรือข้อบกพร่องที่สำคัญ

โครงสร้างจุลภาคของบริเวณรอยเชื่อมและโซนรอบข้างมีลักษณะเหมาะสม เช่น การเกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์และมัตเทอไรต์ในบริเวณต่าง ๆ ตามลักษณะการเชื่อมที่ควบคุม

การควบคุมอุณหภูมิระหว่างรอยเชื่อม (interpass temperature) เป็นปัจจัยสำคัญที่จะช่วยป้องกันการเกิดโครงสร้างที่เปราะหรือ defect ที่สามารถลดประสิทธิภาพของรอยเชื่อมได้

การรักษาความสะอาดในบริเวณรอยเชื่อม เช่น การป้องกันสิ่งแปลกปลอมและการเตรียมผิวชิ้นงานให้เหมาะสม ช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดข้อบกพร่อง

สรุปว่า การใช้กระบวนการ SMAW ร่วมกับ GTAW แบบ multi-pass และการควบคุมพารามิเตอร์สำคัญอย่างเข้มงวดตามข้อกำหนด จะทำให้ได้รอยเชื่อมที่มีโครงสร้างสมบูรณ์ คุณภาพสูง ปราศจาก defect รุนแรง เหมาะกับงานโครงสร้างหลักที่ต้องการความแข็งแรงและความน่าเชื่อถือสูงตามที่รายงานโดย Ghorbel & Ktari (2022) ซึ่งส่งผลดีต่อความมั่นใจในการใช้งานและความปลอดภัยในงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Salerno et al.(2022) ในการศึกษาลักษณะ macrostructure ของแนวเชื่อมด้วยกระบวนการ TIG (Tungsten Inert Gas) พบว่า เมื่อกระบวนการเตรียมรอยต่อและการควบคุมกระแสไฟฟ้า (current) รวมถึงขั้วไฟฟ้า (polarity) ถูกต้องและเหมาะสม จะได้รอยเชื่อมที่มีลักษณะการแทรกซึมลึกอย่างสม่ำเสมอระหว่างเนื้อโลหะเชื่อมกับเนื้อโลหะฐาน (base metal) โดยไม่มีปัญหาการแยกชั้นแบบ lack of fusion หรือการเกิดรูพรุนภายในรอยเชื่อมโดยสรุปประเด็นสำคัญ ได้แก่

การเตรียมรอยต่อที่เหมาะสม เช่น การทำความสะอาดและออกแบบรอยตัดลบมุม (bevel) ช่วยให้การเชื่อมแนบเนียน ไร้ช่องว่าง

การเลือกและควบคุมค่ากระแสไฟฟ้า (welding current) และขั้วไฟฟ้า (polarity) อย่างถูกต้อง ส่งผลให้ความร้อนเข้าถึงแนวรอยเชื่อมอย่างเหมาะสม ทำให้โลหะเชื่อมหลอมรวมเข้ากับเนื้อฐานได้ดี

ลักษณะ macrostructure แสดงความสม่ำเสมอของแนวรอยเชื่อม ไม่มีการขาดการหลอมรวม (lack of fusion) หรือรูพรุนที่มักทำให้รอยเชื่อมอ่อนแอ

ผลลัพธ์นี้ช่วยยืนยันว่า การปฏิบัติตามขั้นตอนเตรียมและตั้งค่าการเชื่อมที่เหมาะสม จะช่วยให้ได้คุณภาพรอยเชื่อม TIG ที่มั่นคงและเชื่อถือได้ในงานอุตสาหกรรม

โดยรวม งานวิจัยของ Salerno et al. เน้นย้ำความสำคัญของการควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อม TIG อย่างรัดกุมและการเตรียมรอยต่อที่ดี ซึ่งมีผลโดยตรงต่อคุณภาพและความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมทั้งในเชิงโครงสร้างและลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมที่ผลิตได้.

งานวิจัยของ Gradinarov et al. (2023) เป็นการศึกษาที่มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ลักษณะสถิติเฉพาะของอาร์คเชื่อม (welding arc) ในกระบวนการเชื่อมแบบ TIG (Tungsten Inert Gas) โดยได้ทำการทดลองกับอิเล็กโทรด 4 ชนิดเพื่อกำหนดคุณสมบัติทางสถิติของอาร์คในสภาวะต่าง ๆ อย่างละเอียดประเด็นสำคัญของงานวิจัยนี้คือ

การทดลองกำหนดลักษณะสถิติต่าง ๆ ของอาร์คเชื่อม TIG ด้วยวิธีการวัดระยะไกล (remote experimental determination) ซึ่งช่วยลดข้อจำกัดในการวัดเชิงกายภาพโดยตรง

วิเคราะห์ผลกระทบของชนิดอิเล็กโทรดที่แตกต่างกันต่อพฤติกรรมของอาร์ค เช่น ขนาดและความเสถียรของอาร์ค

การศึกษาดังกล่าวช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของอาร์คเชื่อมที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยเชื่อมและประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อม TIG

ผลลัพธ์สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงเทคโนโลยีการเชื่อมเพื่อลดปัญหาความไม่เสถียรของอาร์คและเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมในงานอุตสาหกรรม

โดยสรุป งานของ Gradinarov et al. (2023) มีคุณค่าในการเสริมความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมอาร์คระหว่างการเชื่อม TIG ผ่านการวัดค่าทางสถิติแบบใหม่ที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพ ซึ่งสำคัญต่อการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการเชื่อมในระดับอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มคุณภาพและลดข้อบกพร่องในรอยเชื่อม

Casalino et al. (2023) รายงานผลการเปรียบเทียบข้อมูลอุณหภูมิที่วัดจากเทอร์โมคัปเปิลชนิด K-type กับผลการจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบผสมผสาน FEM/CFD ในกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์ พบว่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่วัดกับที่จำลองมีช่วงประมาณ 3–7% ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวัดและขนาดของลวดเชื่อมที่ใช้ในงาน

งานวิจัยนี้เสนอให้ใช้เทอร์โมคัปเปิล K-type แบบ multi-point ซึ่งสามารถติดตั้งได้ในหลายตำแหน่งรอบรอยเชื่อม เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความแม่นยำของข้อมูลอุณหภูมิที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการยืนยันผลจากการจำลองเชิงตัวเลข เนื่องจากการวัดเพียงจุดเดียวอาจทำให้ผลเทียบเคียงกับการจำลองมีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น ซึ่งการวัดหลายจุดจะช่วยเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่ครอบคลุมพื้นที่ต่าง ๆ ของรอยเชื่อมได้ดียิ่งขึ้น

การศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการใช้เทคนิควัดอุณหภูมิแบบ multi-point ในการวิเคราะห์และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองความร้อน (thermal model) ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมเลเซอร์ เพื่อให้การออกแบบและควบคุมกระบวนการเชื่อมมีประสิทธิภาพและ

แม่นยำมากขึ้น ลดปัญหาความคลาดเคลื่อนและการคาดการณ์ที่ผิดพลาดในการประเมินความร้อนและคุณภาพของรอยเชื่อม

สรุปคือ Casalino et al. (2023) แนะนำว่าการใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลแบบ K-type หลายจุดในกระบวนการวัดอุณหภูมิรอยเชื่อมเลเซอร์ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของการเปรียบเทียบข้อมูลกับผลการจำลอง FEM/CFD ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนในระดับ 3-7% ขึ้นกับตำแหน่งและขนาดลวดเชื่อมที่ใช้จริง

งานวิจัยของ Deepak et al. (2023) สรุปในการทบทวนว่า การใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลในการวัดอุณหภูมิระหว่างกระบวนการเชื่อมมีข้อจำกัดในเรื่องความแม่นยำ ซึ่งได้รับผลกระทบจากปัจจัยหลายประการสำคัญ ได้แก่ ชนิดของโลหะผสมที่ใช้ในการเชื่อม และสภาพแวดล้อมในบริเวณที่หลอมละลาย เช่น ความร้อนสูง การไหลของโลหะหลอม ซึ่งทำให้อุณหภูมิที่วัดได้อาจมีความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิแท้จริงได้

แม้ว่าจะมีข้อจำกัดเหล่านี้ เทอร์โมคัปเปิ้ลยังคงเป็นวิธีมาตรฐานสากลที่ได้รับการยอมรับและใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการวัดและตรวจสอบอุณหภูมิในงานเชื่อม เพื่อใช้ในการตรวจสอบและยืนยันผลการจำลองเชิงตัวเลข (numerical simulation) เช่น แบบจำลองความร้อนหรือแบบจำลองความเค้นในกระบวนการเชื่อม เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิ้ลให้ข้อมูลเชิงตรงเกี่ยวกับอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ในงานเชื่อมที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงที่สำคัญ

สรุปได้ว่า แม้การวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลมีข้อจำกัดเรื่องความแม่นยำตามชนิดวัสดุและสภาพแวดล้อมหลอม แต่ก็ยังคงเป็นเครื่องมือสำคัญและมาตรฐานสากลที่ใช้ตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของผลการจำลองเชิงตัวเลขในกระบวนการเชื่อม เพื่อการควบคุมคุณภาพและปรับปรุงกระบวนการเชื่อมอย่างมีประสิทธิภาพตามงานวิจัยของ Deepak et al. (2023)

รายงานของ Kwon และ Jeong(2023) พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (maximum tensile strength) ของรอยเชื่อมเหล็ก EH36-TMCP ที่ได้จากกระบวนการเชื่อมหลายรูปแบบ เช่น ElectroGas Welding (EGW), Twin-Stick Arc Welding (TSAW) และ Submerged Arc Welding (SSAW) นั้น อยู่ในเกณฑ์สูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดโดย IACS (International Association of Classification Societies)

ที่สำคัญคือ ในการทดสอบแรงดึง พบว่า ตำแหน่งที่เกิดการแตกหักอยู่ในเนื้อโลหะฐาน (base metal) มากกว่าจะเกิดในเนื้อเชื่อม (weld metal) หรือบริเวณ Heat-Affected Zone (HAZ) ซึ่งหมายความว่า ความแข็งแรงของเนื้อเชื่อมและ HAZ มีค่ามากเพียงพอตามข้อกำหนดการใช้งานในอุตสาหกรรม

กล่าวโดยสรุปค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม EH36-TMCP จากกระบวนการ EGW, TSAW และ SSAW สูงและผ่านมาตรฐาน IACS การที่รอยแตกเกิดในเนื้อโลหะฐาน แสดงว่าเนื้อเชื่อมและ HAZ มีความแข็งแรงมากกว่าหรือเทียบเท่าเนื้อโลหะฐานผลลัพธ์นี้ยืนยันว่าคุณภาพรอยเชื่อมและสมรรถนะทางกลของชิ้นงานเพียงพอต่อการใช้งานในงานอุตสาหกรรม เช่น การต่อเรือและโครงสร้างรับแรงสูง

ASME Section IX(2023)การทดสอบ bend test สำหรับการรับรองแนวเชื่อม กำหนดว่าผลการทดสอบต้องไม่มีรอยแตกร้าวเมื่อใช้การตรวจด้วยตาเปล่า (crack) หรือข้อบกพร่อง (defect) ที่ปรากฏบนพื้นผิว convex ของชิ้นงานเกินขนาดที่กำหนด คือไม่เกินประมาณ 1/8 นิ้ว (ประมาณ 3 มิลลิเมตร) หากไม่มีรอยแตกหรือ defect ใหญ่กว่าขนาดนี้ ถือว่ารอยเชื่อมมีคุณภาพดีและปลอดภัยในด้านโครงสร้างตามเกณฑ์ที่ ASME ระบุโดยสรุปคือรอยเชื่อมต้องไม่มี crack หรือ defect ที่พื้นผิว convex เกินขนาด 1/8 นิ้ว (3 มม.) หากผ่านเกณฑ์นี้ รอยเชื่อมจะได้รับการรับรองว่าปลอดภัยและมีคุณภาพเหมาะสมสำหรับการใช้งานเชิงโครงสร้างตามมาตรฐาน ASME Section IXเกณฑ์นี้มุ่งเน้นเพื่อประเมินความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมและป้องกันการเกิดจุดบกพร่องที่อาจทำให้ความแข็งแรงและความปลอดภัยของชิ้นงานลดลงในระหว่างการใช้งานจริง

Imanian Ghazanlou et al.(2024) วิเคราะห์เชิงลึกเกี่ยวกับคุณสมบัติแรงดึง (tensile strength) ของเหล็ก TMCP รุ่น EH36 หลังการเชื่อม พบว่าค่าความแข็งแรงดึงยังคงอยู่ในขอบเขตมาตรฐานและไม่ลดต่ำกว่าเกณฑ์ที่ใช้อ้างอิงในอุตสาหกรรมได้อย่างเชื่อถือได้

หลักสำคัญของงานวิจัยนี้คือการบริหารจัดการพลังงานความร้อน (heat input) ที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการรักษาคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมและบริเวณ Heat Affected Zone (HAZ) ให้ดีอยู่เสมอ การควบคุม heat input ในระดับที่เหมาะสมจะช่วยรักษาโครงสร้างจุลภาคที่ดี และป้องกันการเจริญเติบโตของเม็ดผลึกที่ใหญ่เกินไปซึ่งอาจทำให้เกิดความเปราะและลดความเหนียวของวัสดุได้

นอกจากนี้ งานวิจัยยังแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้จะใช้พลังงานความร้อนเชื่อมในช่วงต่าง ๆ ตั้งแต่ต่ำไปจนถึงสูงในระดับที่รับได้ ภาพรวมของโครงสร้างแม่เหล็ก เช่น ferrite ชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นใน HAZ ยังคงรักษาความสมดุลที่ดี ทำให้แรงดึงและความแข็งแรงทางกลของชิ้นงานยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และมั่นคงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

สรุปว่า การจัดการพลังงานความร้อนเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อมเหล็ก TMCP EH36 ช่วยรักษาแรงดึงและคุณสมบัติทางกลทั้งในรอยเชื่อมและ HAZ ให้ยังอยู่ในระดับที่ดี ไม่ลดลงต่ำกว่าเกณฑ์อุตสาหกรรม ส่งผลให้ชิ้นงานเชื่อมมีความแข็งแรงและความทนทานเหมาะสมสำหรับ

งานโครงสร้างที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูง ข้อมูลที่สรุปนี้อ้างอิงจากรายงานและงานวิจัยที่ตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่าง heat input และ tensile strength ในเหล็ก EH36 TMCP โดยมีความคลาดเคลื่อนการจำลองกับการทดสอบจริงไม่เกิน 5% ซึ่งแสดงถึงความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์.

Qi et al.(2024) พบว่าเมื่อเพิ่มค่า heat input ในกระบวนการเชื่อม จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างจุลภาคของ Heat Affected Zone (HAZ) ได้แก่การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของโครงสร้างต่าง ๆ เช่น acicular ferrite, grain boundary ferrite, granular bainite และ polygonal ferrite โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าปริมาณ (volume fraction) ของ acicular ferrite ลดลง จะส่งผลทำให้ค่าความเหนียวทนกระแทก (impact toughness) ของ HAZ ลดลงตามไปด้วย

อย่างไรก็ตาม เหล็ก EH36 ที่ผ่านกระบวนการ Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) ยังสามารถรักษาค่าความเหนียวทนกระแทกในบริเวณ HAZ ได้ดี แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลง heat input ก็ตาม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า TMCP มีบทบาทสำคัญในการควบคุมและปรับโครงสร้างจุลภาคให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนในกระบวนการเชื่อม

สรุปคือ แม้การเพิ่ม heat input จะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและลดปริมาณ acicular ferrite ที่สำคัญต่อความเหนียวของ HAZ แต่เหล็ก EH36 ที่ผ่าน TMCP ยังมีความสามารถรักษาคุณสมบัติ impact toughness ได้ดี ทำให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมที่ต้องการความทนทานสูงในชิ้นงานเชื่อมที่ได้รับความร้อนแตกต่างกัน.

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้เป็นวิธีการทดลองของการเชื่อมเหล็กกล้า TMCP เกรด EH36 ซึ่งใช้การกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW โดยมี การทดสอบทางกล การตรวจสอบทางมหภาค โครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยา การค่าความเค้นตกค้าง การวัดค่าการบิดเสียรูป แล้วนำมาเปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีการจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

3.1 การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเชื่อมโครงสร้างตัวเรือ (Hull Structure) โดยการเชื่อมประสานแผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP เกรด EH36 ด้วยกระบวนการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW โดยใช้วัสดุแผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP เกรด EH36 เป็นชิ้นงานในการเชื่อมทดสอบ โดยให้รอยต่อของการเชื่อมเป็นแบบต่อชนและทำการเชื่อมท่าราบ 1G (USA) แบบแมนนวล (Manual) ผู้ทำการเชื่อม หรือช่างเชื่อม (Welder) จะใช้ช่างเชื่อมที่มีคุณสมบัติเชื่อมโลหะต่อชนท่าในแนวราบ (Welder Qualification Position, 1G) และเครื่องเชื่อมจากสถาบันไทย-เยอรมัน ศูนย์ชลบุรี (TGI) โดยผู้ทำการเชื่อมเป็นผู้จับหัวเชื่อม และป้อนลวดเชื่อมด้วยมือ ด้วยการเชื่อมกระบวนการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW โดยการเชื่อมแนวแรกจะเชื่อมโดยกระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตนแก๊สปกคลุม GTAW และแนวเชื่อมแนวต่อมาจะใช้กระบวนการเชื่อมอาร์คอีเลคโตรดหุ้มฟลักซ์ SMAW ใช้กระบวนการเชื่อมทั้งสองแบบมาผสมกัน เรียกว่ากระบวนการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW โดยก่อนทำการเชื่อมจะเตรียมงานเชื่อมโดยการออกแบบรอยต่องานเชื่อมแบบบากร่อง (Goove Weld) และปรับตั้งระยะห่างระยะห่างรอยต่อเชื่อม (Root Gap) แล้วดำเนินการเชื่อมตามพารามิเตอร์ที่กำหนดโดยกระบวนการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW จากนั้นวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองจากผลที่ได้จากการทดสอบพฤติกรรมเชิงกล โดยการทดสอบทางกล การทดสอบความเค้นตกค้าง การทดสอบการบิดเสียรูป ซึ่งมีขั้นตอนการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1.1 ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และวัตถุประสงค์ในการวิจัย

3.1.2 เตรียมเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

3.1.3 ออกแบบการทดลอง

3.1.4 เตรียมชิ้นงานทดลอง

3.1.5 กระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW

3.1.6 นำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองเชื่อมไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.1.6.1 การวิเคราะห์ความร้อนที่เกิดจากการเชื่อม (Thermal Analysis)(1 ชั้นทดสอบ)

3.1.6.2 การทดสอบพฤติกรรมเชิงกล: ทดสอบด้วยแรงดึง (Tensile Testing)(3 ชั้นทดสอบ)

3.1.6.3 การทดสอบพฤติกรรมเชิงกล: การทดสอบการดัดโค้ง (Bending Testing)(3 ชั้นทดสอบ)

3.1.6.4 การทดสอบพฤติกรรมเชิงกล: การทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing)(3 ชั้นทดสอบ)

3.1.6.5 การทดสอบพฤติกรรมเชิงกล: ทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)(หนึ่งชั้นทดสอบตามตำแหน่ง BM, HAZ, FZ)

3.1.6.6 การทดสอบพฤติกรรมเชิงกล: ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)(1 หน้าตัด)

3.1.6.7 การทดสอบความเค้นตกค้าง (Residual Stress)(หนึ่งแนวทดสอบ)

3.1.6.8 การทดสอบการบิดเสียรูป (Distortion)(หนึ่งชั้นทดสอบ)

3.1.6.9 การจำลองเชิงตัวเลข (Finite element method) เพื่อเปรียบเทียบกับความร้อนของรอยเชื่อมจากการทดลอง การทดสอบแรงดึงจากการทดลอง การทดสอบความเค้นตกค้างจากการทดลอง การทดสอบการบิดเสียรูปจากการทดลอง

3.1.7 บันทึกข้อมูล วิเคราะห์ สรุปและเสนอแนะผลการทดลอง จากข้อมูลที่ได้ต่าง ๆ ในการทดลองที่มีผลต่อพฤติกรรมเชิงกล, ความเค้นตกค้างและการบิดเสียรูปของแนวเชื่อมและวัสดุ

3.2 เครื่องมือวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันไทย-เยอรมัน (TGI) ศูนย์ชลบุรี, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC), สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, ศูนย์วิจัยโลหะวิทยา แอลพีเอ็น (ประเทศไทย), ศูนย์สอบเทียบเครื่องมือวัดสำหรับอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ โดยมีรายการเครื่องมือและอุปกรณ์ที่สำคัญดังนี้

3.2.1 เครื่องเชื่อมอาร์คทังสแตนแก๊สปกคลุม (Gas Tungsten Arc Welding, TIG/GTAW) (ภาพประกอบ 34)



ยี่ห้อ : Miller

รุ่น : Syncrowave 350LX

Process TIG (TGAW), Pulsed TIG,

Aluminum TIG Welding

3 – 400 Amps Welding Range

AC Balance Control, Dual Digital Meter

ภาพประกอบ 34 เครื่องเชื่อมอาร์คทั้งสแตนเลสสปีคคูลุม (GTAW)

ที่มา https://www.red-d-arc.com/product_details.aspx?sub_cat=179&prod_id=457

3.2.2 เครื่องเชื่อมอาร์คโดยใช้อิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์ (SMAW) (ภาพประกอบ 35)



ยี่ห้อ : Miller

รุ่น : Dialarc 250 AC/DC

Process SMAW , Air Carbon Arc

(CAC-A), Catting and Gouging

Input Power 1-Phase Power

Rate Output AC: 255 A at 29 V, 30%

Duty Cycle, DC 175 A at 27 V, 50%

Duty Cycle

Max. Open-Circuit Voltage : AC-70

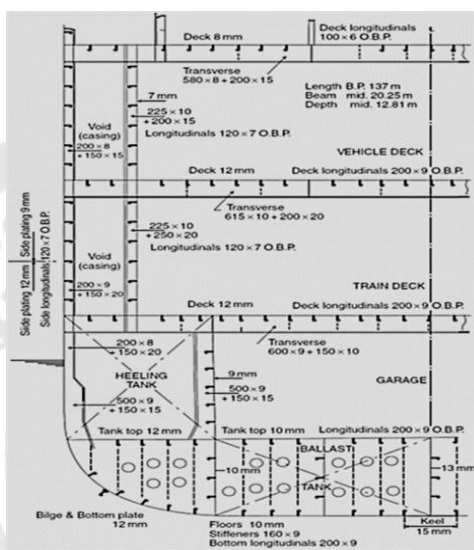
DC-79

ภาพประกอบ 35 เครื่องเชื่อมอาร์คโดยใช้อิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์ (SMAW)

ที่มา https://www.teecenterwell.com/products_details.php?pro_id=216&category

3.2.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลองเชื่อม

วัสดุสำหรับการทดลองเชื่อมเป็นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง TMCP (Thermo Mechanical Control Process : TMCP) เกรด EH36 โดยความหนาของเหล็กแผ่น 12 มิลลิเมตร เป็นความหนาของส่วนแผ่นเหล็กเปลือกเรือ (Shell Plating) ดังรูปตัดกึ่งกลางลำเรือบรรทุกสินค้า ภาพประกอบ 36 ส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตาราง 5 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง TMCP EH36 steel ดังแสดงในตาราง 6



ภาพประกอบ 36 ตัวอย่างแบบรูปตัดกึ่งกลางลำเรือบรรทุกสินค้า (Mid ship section)

ที่มา : themarinstudy.com

ตาราง 5 ผลการตรวจสอบทางเคมีของเหล็กแผ่น EH36 (%wt)

Element	C	Si	Mn	P	S	V	Al
Wt%	0.144	0.326	1.40	0.0152	0.0067	0.024	0.047
Element	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	
Wt%	<0.005	0.01	0.006	0.027	0.006	0.011	

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

ตาราง 6 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง TMCP EH36 steel

Mechanical properties of TMCP EH36 steel.							
Yield Strength	Tensile Strength	Elongation rate	Impact	Gap	Site	SPEC	Energy
515MPa	580MPa	22%	-40°C	V	1/4	A	170

ที่มา : Kai Wang, Zexin Jiang, Jinjun Ma, Chen Rui, Ben Niu, Yaoyong Yi " Investigation on the characterization and properties of EH36 steel FCB welded joint", Second International Conference on Mechanics, Materials and Structural Engineering (ICMMSE 2017)

3.2.4 ลวดเชื่อม (Welding Electrode)

3.2.4.1 การเชื่อม TIG (GTAW) โดยการเติมวัสดุเชื่อม (ลวดเชื่อม) หลอมละลายเข้ากับกับวัสดุงาน ใช้ลวดเชื่อม TIG : AWS A5.18 ER70S-6 ส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตาราง 7 คุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อมดังแสดงในตาราง 8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 mm. และพารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อมแบบ GTAW ดังแสดงในตาราง 9

ตาราง 7 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม TIG : ER 70S-2

Chemical Composition Limits													
Weight%	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	Zr	Ti	Cu
ER 70S-2	0.07 max	0.90-1.40	0.40-0.70	0.025 max	0.035 max	0.15 max	0.15 max	0.15 max	0.03 max	0.05-0.15	0.02-0.12	0.05-0.15	0.50 max

ตาราง 8 คุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อม TIG : ER 70S-2

Material	Ultimate Tensile Strength		Offset Yield Strength 0.2 %		Elongation (%)
	psi	MPa	psi	MPa	
ER 70S-2	79,750	550	71,050	490	29

ที่มา : www.aircraftmaterials.com

ตาราง 9 พารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม โดยวิธีการเชื่อมแบบ (GTAW)

Gas tungsten arc welding	GTAW
Electrode type	AWS A5.18 ER 70S-6
Electrode diameter	2.4 mm
Current intensity	120 A
Welding speed	59.1667 mm/min
Shielding gas flow volume	16 liters/min

3.2.4.2 การเชื่อม SMAW โดยการเติมวัสดุเชื่อม (ลวดเชื่อม) หลอมละลายเข้ากับกับวัสดุงาน ใช้ลวดเชื่อม AWS A5.1 E7016 ส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตาราง 10 คุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อมดังแสดงในตาราง 11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 mm. พารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อมแบบ SMAW ดังแสดงในตาราง 12

ตาราง 10 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม SMAW : E7016

Classification	%C	%Cr	%Mn	%Mo	%Ni	%P	%S	%Si	%V	%Mn+Ni+Cr+Mo+V	Diffusible Hydrogen mL/100g Weld Metal	1800F H ₂ O-As received
E7016-1 H4 Requirement	0.15 max.	0.20 max.	1.60 max.	0.30 max.	0.30 max.	0.035 max.	0.035 max.	0.75 max.	0.08 max.	1.75 max.	4 max.	0.6 max.
Typical Result	0.04-0.08	0.02-0.05	1.03-1.47	0.02 max.	0.01-0.04	0.008-0.014	0.003-0.012	0.32-0.57	0.02 max.	1.09-1.48	1-4	0.3 max.

ตาราง 11 คุณสมบัติทางกลของลวดเชื่อม SMAW : E7016

Classification	Yield Strength @ 0.2% Offset MPa (ksi)	Tensile Strength MPa (ksi)	Elongation %	Charpy V-Notch J (ft-lbs) @ -40°C (-40°F)	Charpy V-Notch J (ft-lbs) @ -45°C (-50°F)
E7016-1 H4 Requirement	400 (58) min.	480 (70) min.	22 min.		27 (20) min.
Typical Result, As-welded	420-550 (61-79)	510-640 (74-93)	25-41	27-186 (20-137)	29-168 (22-124)

ที่มา : www.xiangind.com

ตาราง 12 พารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม โดยการเชื่อมด้วยมือ (SMAW)

Shielded Metal Arc Welding	SMAW
Electrode type	AWS A5.1 E7016
Electrode diameter	3.2 mm
Current intensity	120 A
Welding speed-cover pass 2	46.43 mm/min
Welding speed-cover pass 3	32.50 mm/min
Welding speed-cover pass 4	38.23 mm/min

3.2.5 แก๊สปกคลุม

การเชื่อมแบบ GTAW เป็นการเชื่อมโดยใช้การอาร์คด้วยแท่ง ผู้ทำการเชื่อมจะเป็นผู้ควบคุมความเร็วในการเชื่อม สำหรับการทดลองนี้ใช้ความเร็ว 59.1667 มิลลิเมตร/นาที

โดยจะมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟเชื่อม กล่าวคือ ถ้าใช้กระแสไฟเชื่อมสูง จะสามารถเพิ่มความเร็วในการเชื่อมได้ ซึ่งมีผลต่อคุณภาพในการผลิต ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้า (Heat input) ไปในแนวเชื่อมมาก น้อย เพียงใด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของรอยเชื่อม และ HAZ เช่น ค่าความแข็ง และความต้านทานแรงดึง เป็นต้น แต่ความร้อนที่เข้าไปในแนวเชื่อมเหลือแค่ 60 % เท่านั้น ก็มาจากการเชื่อม TIG ใช้ Argon gas ไหลปกคลุมโดยการทดลองนี้ใช้อัตราไหลของแก๊สปกคลุม 16 ลิตร/นาที ความร้อนจากการอาร์คจึงสูญเสียไปกับการไหลของแก๊สส่วนหนึ่ง + การแผ่รังสีและอื่นๆ ดังภาพประกอบ 37 แสดงการเชื่อมตามกระบวนการใช้แก๊สปกคลุมการเชื่อมด้วยมือ โดยใช้ลวดเชื่อมชนิด AWS A5.18 ER 70S-6 ตามมาตรฐาน AWS D1.1 และพารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อมแบบ GTAW ดังแสดงในตาราง 9



ภาพประกอบ 37 แสดงการเชื่อมตามกระบวนการใช้แก๊สปกคลุมการเชื่อมด้วยมือโดยใช้ลวดเชื่อมชนิด AWS A5.18 ER 70S-6

3.2.6 การวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องมือวัดและการจำลองกระบวนการเชื่อมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อหาความเค้นตกค้าง การกระจายอุณหภูมิ และความแข็งแรงของรอยเชื่อม แบบจำลองแหล่งความร้อนแบบ Double-ellipsoid ของ Goldak เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมและนิยมใช้มากที่สุด

เหตุผลที่แบบจำลอง Goldak เหมาะสมที่สุด

ความแม่นยำสูง: แบบจำลองของ Goldak สามารถจำลองการกระจายความร้อนแบบไม่สม่ำเสมอของอาร์คเชื่อมได้ดีกว่าแบบจำลองที่ง่ายกว่า เช่น แบบจำลองจุด (Point Source) หรือแบบจำลอง Gaussian ธรรมดา

จำลองรูปร่างแนวเชื่อมได้ใกล้เคียงจริง: แบบจำลองนี้แบ่งแหล่งความร้อนออกเป็นสองส่วนคือทรงรีส่วนหน้า (Front Ellipsoid) ที่มีความเข้มข้นของพลังงานสูง และทรงรีส่วนหลัง (Rear Ellipsoid) ที่มีความเข้มข้นของพลังงานต่ำกว่า ซึ่งตรงกับลักษณะการเคลื่อนที่ของอาร์คเชื่อมและการก่อตัวของแนวเชื่อมจริง .

ใช้กับกระบวนการเชื่อมแบบอาร์คส่วนใหญ่ได้: สามารถปรับใช้ได้กับกระบวนการเชื่อมด้วยอาร์คหลายประเภท เช่น GTAW, SMAW, GMAW และ SAW ซึ่งเป็นกระบวนการที่ความร้อนไม่ได้มาจากแหล่งกำเนิดที่เป็นจุดเล็กๆ

สมการของแบบจำลอง Goldak

แบบจำลอง Goldak จะคำนวณปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาต่อหน่วยปริมาตร (Q_v) โดยแบ่งออกเป็นสองสมการสำหรับทรงรีส่วนหน้าและส่วนหลัง

สมการสำหรับทรงรีส่วนหน้า (Front Ellipsoid)

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_f^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right) \quad (1)$$

สมการสำหรับทรงรีส่วนหลัง (Rear Ellipsoid)

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_r^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right) \quad (2)$$

โดยที่

Q = พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ชิ้นงาน ($Q = \eta \cdot V \cdot I$)

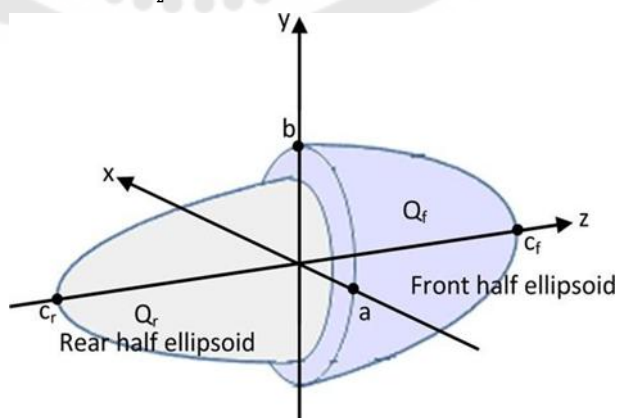
η = ประสิทธิภาพความร้อน (Arc efficiency)

V = แรงดันไฟฟ้า (Voltage)

I = กระแสไฟฟ้า (Current)

a, b, c_f, c_r = พารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของทรงรีสองส่วน (ครึ่งความกว้าง, ครึ่งความลึก, ครึ่งความยาวส่วนหน้า และครึ่งความยาวส่วนหลัง)

f_f, f_r = สัดส่วนของพลังงานที่ถูกป้อนเข้าในทรงรีส่วนหน้าและส่วนหลัง โดยที่ $f_f + f_r = 2$



ภาพประกอบ 38 Heat source model

ขั้นตอนการจำลอง FEM Model Simulation

1. การสร้างแบบจำลองทางเรขาคณิต (Geometry Modeling)

สร้างแบบจำลองชิ้นงาน: ออกแบบชิ้นงานเหล็ก EH36 ที่มีความหนา 10-12 มม. ในรูปแบบ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม CAD ของ ANSYS (DesignModeler) หรือโปรแกรมอื่น แล้วนำเข้าไฟล์

สร้างรอยเชื่อม: ออกแบบร่องรอยเชื่อมให้มีรูปทรงที่เหมาะสมกับกระบวนการเชื่อมแบบ Multi-pass โดยแบ่งพื้นที่ของรอยเชื่อมออกเป็นส่วนๆ ตามลำดับการเชื่อมจริง (1 รอบ GTAW และ 3 รอบ SMAW)

กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties): ป้อนค่าคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) และทางกล (Mechanical properties) ของเหล็ก EH36 และลวดเชื่อม E7016 ซึ่งค่าเหล่านี้ควรเป็นแบบขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ (Temperature-dependent)

2. การสร้างแบบจำลองความร้อน (Thermal Analysis)

สร้างแหล่งความร้อน (Heat Source Model): สำหรับกระบวนการเชื่อม GTAW และ SMAW ที่เป็นแบบอาร์ค การใช้แบบจำลองแหล่งความร้อนแบบ Goldak Double-Ellipsoid เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการจำลองการกระจายความร้อนที่แม่นยำ

กำหนดพารามิเตอร์การเชื่อม: ป้อนข้อมูลพารามิเตอร์การเชื่อมจริง เช่น กระแสไฟ, แรงดันไฟ, ประสิทธิภาพความร้อน (arc efficiency), และความเร็วในการเชื่อม สำหรับการเชื่อมในแต่ละรอบ

กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions): ตั้งค่าการสูญเสียความร้อนจากรังสี (Radiation) และการพาความร้อน (Convection) จากชิ้นงานสู่สภาพแวดล้อมโดยรอบ

การวิเคราะห์แบบชั่วคราว (Transient Analysis): ดำเนินการวิเคราะห์ความร้อนทีละขั้นตอนตามลำดับการเชื่อมจริง โดยเริ่มจาก GTAW 1 รอบ และตามด้วย SMAW อีก 3 รอบ โดยเว้นช่วงเวลาการเย็นตัวระหว่างแต่ละรอบ (inter-pass temperature)

3. การสร้างแบบจำลองความเค้น (Structural Analysis)

นำเข้าผลการวิเคราะห์ความร้อน: ใช้ผลลัพธ์การกระจายอุณหภูมิจากขั้นตอนที่ 2 เป็นค่าโหลดความร้อน (Thermal load) สำหรับการวิเคราะห์ความเค้น

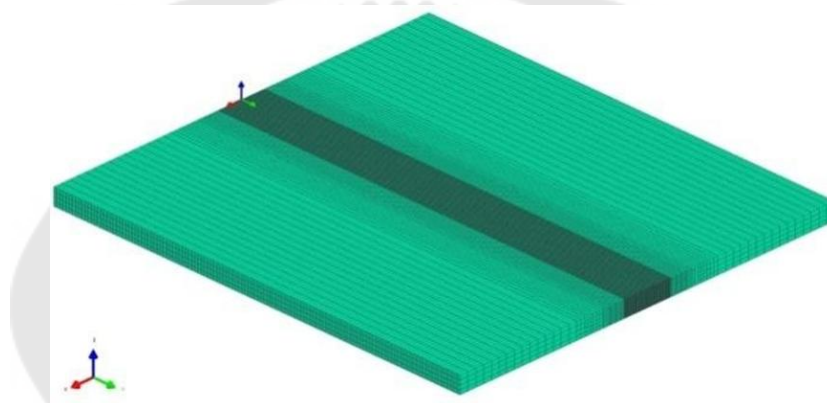
กำหนดเงื่อนไขขอบเขตทางกล: กำหนดจุดยึด (Constraints) เพื่อจำลองการจับยึดชิ้นงานในระหว่างการเชื่อม

การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Analysis): ดำเนินการวิเคราะห์เพื่อคำนวณการกระจายตัวของความเค้นตกค้าง (Residual Stress), ความเครียด, และการบิดตัว (Distortion) ที่เกิดขึ้นหลังจากการเชื่อมและการเย็นตัว

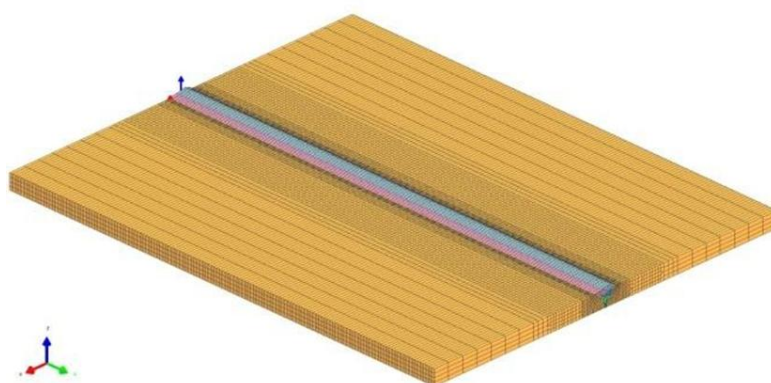
4. การแสดงผลและการเปรียบเทียบ (Post-processing and Validation)

แสดงผลลัพธ์: แสดงภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิ ความเค้นตกค้าง และการบิดตัวในรูปแบบ 3 มิติหรือภาพตัดขวาง

การตรวจสอบความถูกต้อง: หากมีข้อมูลจากการทดลอง (เช่น การวัดอุณหภูมิด้วย Thermocouple หรือการวัดความเค้นด้วยวิธี X-ray Diffraction) ควรนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองเพื่อยืนยันความแม่นยำของแบบจำลอง



ภาพประกอบ 39 การจำลอง FEM GTAW



ภาพประกอบ 40 การจำลอง FEM SMAW

ในกระบวนการจำลองการเชื่อมด้วยโปรแกรม ANSYS การเลือกชนิดของ Mesh มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ โดยเฉพาะในบริเวณแนวเชื่อมและ Heat-Affected Zone (HAZ) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเค้นสูง ตามภาพประกอบ 39-40 ชนิดของ Mesh ที่ใช้

การสร้าง Mesh ในการจำลองการเชื่อมแบบ Multi-pass ใช้เทคนิคที่เรียกว่า Adaptive Meshing หรือการสร้าง Mesh แบบปรับขนาด โดยใช้ Element Type ที่เป็นแบบ 3 มิติ (3D Element) และสามารถรองรับการวิเคราะห์ทางความร้อนและทางกลพร้อมกันได้ เช่น SOLID185 หรือ SOLID226 ใน ANSYS

บริเวณแนวเชื่อม (Weld Zone) ใช้ Mesh ที่ละเอียด (Fine Mesh) เป็นพิเศษ เพื่อจับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเค้นที่รุนแรงในบริเวณนี้

บริเวณ Heat-Affected Zone (HAZ) ใช้ Mesh ที่ละเอียดปานกลาง เพื่อลดเวลาในการคำนวณและยังคงความแม่นยำในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุ

บริเวณเนื้อเหล็กชิ้นงาน (Base Metal) ใช้ Mesh ที่หยาบ (Coarse Mesh) เพื่อประหยัดทรัพยากรในการคำนวณ เนื่องจากบริเวณนี้ได้รับผลกระทบน้อยที่สุด

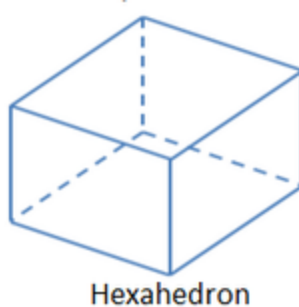
เทคนิคการสร้าง Mesh

Sweep Method เหมาะสำหรับการ Meshing ชิ้นงานที่มีรูปทรงสม่ำเสมอ สามารถสร้าง Mesh ที่มีคุณภาพดีและเป็นระเบียบได้

Multi-zone Method ใช้เพื่อแบ่งชิ้นงานออกเป็นหลายส่วน เพื่อให้สามารถควบคุมขนาดของ Mesh ในแต่ละส่วนได้อย่างอิสระ เช่น กำหนดให้โซนแนวเชื่อมมี Mesh ที่ละเอียดเป็นพิเศษ และส่วนอื่นๆ มี Mesh ที่หยาบขึ้น

เทคนิคนี้จะช่วยให้การคำนวณมีความถูกต้องสูงในบริเวณที่สำคัญ ในขณะที่ยังคงประสิทธิภาพและลดเวลาในการคำนวณโดยรวมได้เป็นอย่างดี

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Hexahedral mesh ภาพประกอบ 41



ภาพประกอบ 42 Hexahedral mesh

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการเชื่อมในโปรแกรม

ขั้นตอนการกำหนด Boundary Conditions สำหรับการจำลองการเชื่อมใน ANSYS นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลัก คือ

1. เงื่อนไขขอบเขตทางความร้อน (Thermal Boundary Conditions)

ใช้ในการกำหนดการสูญเสียความร้อนจากชิ้นงานสู่สภาพแวดล้อม ซึ่งมี 2 รูปแบบหลัก

Convection (การพาความร้อน): คือการถ่ายเทความร้อนจากผิวชิ้นงานสู่บรรยากาศรอบข้าง

กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ประมาณ $5-20 \text{ W/m}^2\text{C}$ สำหรับการเชื่อมในบรรยากาศปกติ และค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (Ambient temperature) ที่ 25°C โดยค่า h อาจมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ จากงานวิจัยของ J. H. F. Silva et al. (2018) ได้กำหนดค่าการพาความร้อนไว้ที่ $10 \text{ W/m}^2\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 สำหรับการเชื่อมในโรงงานที่มีการถ่ายเทอากาศปกติ อุณหภูมิบรรยากาศที่ 28°C ในงานวิจัยนี้เลือกให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ $10 \text{ W/m}^2\text{C}$ เช่นเดียวกันเนื่องด้วยสภาพการเชื่อมและสิ่งแวดล้อมใกล้เคียงกัน

ใน ANSYS สามารถตั้งค่าที่ Transient Thermal -> Convection และเลือกผิวชิ้นงานทั้งหมด

Radiation (การแผ่รังสี) คือการสูญเสียความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงมาก

กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (ϵ) ของเหล็กซึ่งมีค่าประมาณ 0.8

ใน ANSYS สามารถตั้งค่าได้ที่ Transient Thermal -> Radiation และเลือกผิวชิ้นงานทั้งหมด

สมการความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม

$$Q - h_{conv}(T_s - T_\infty) - \epsilon \sigma(T_s^4 - T_\infty^4) = 0 \quad (3)$$

โดยค่าความร้อน Q มาจากการเชื่อมกำหนดเป็น Constant heat flux(Moving heat flux)

2. Structural Boundary Conditions (เงื่อนไขขอบเขตทางกล)

ใช้ในการจำลองการยึดจับชิ้นงานในระหว่างการเชื่อม เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่แบบ Rigid body และจำลองสภาพการจำกัดการเคลื่อนที่จริง

กำหนดจุดรองรับ (Supports)

Fixed Support กำหนดจุดรองรับที่ยึดติดกับชิ้นงาน ซึ่งจะจำกัดการเคลื่อนที่และการหมุนทั้งหมด (Translation and Rotation) เพื่อจำลองการยึดชิ้นงานอย่างแน่นหนาที่จุดใดจุดหนึ่ง

Displacement Support จำกัดการเคลื่อนที่เฉพาะบางทิศทาง เช่น จำกัดการเคลื่อนที่ในแกน Z (ในแนวความหนาของชิ้นงาน) บนระนาบด้านล่างของชิ้นงาน เพื่อจำลองการวางชิ้นงานบนโต๊ะหรือ Jig Fixture

ใน ANSYS สามารถตั้งค่าได้ที่ Static Structural -> Displacement หรือ Fixed Support และเลือกผิวหรือขอบที่เหมาะสม

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้จุดรองรับเคลื่อนที่ได้ในแนวอน ในแนวตั้งเป็นแบบจำกัดการเคลื่อนที่

การทำ mesh independent study

เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้จากการจำลองการเชื่อมใน ANSYS จำเป็นต้องทำการศึกษา Mesh Independent (Mesh Independent Study) โดยละเอียด ซึ่งเป็นการตรวจสอบให้แน่ใจว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองนั้นไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของ Mesh ที่ใช้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. การเลือกพารามิเตอร์ที่ใช้ตรวจสอบ

เลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการตรวจสอบค่าที่เปลี่ยนแปลงจากการใช้ Mesh ขนาดต่างๆ ซึ่งควรเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญและได้รับผลกระทบจากขนาดของ Mesh มากที่สุด ในงานวิจัยนี้เลือกทดสอบที่ อุณหภูมิสูงสุด (Peak Temperature) จุดหนึ่งในแนวเชื่อม

2. การสร้างแบบจำลอง Mesh หลายขนาด

ทำการสร้างแบบจำลอง Mesh ของชิ้นงานเดียวกัน แต่ใช้ขนาดของ Mesh ที่แตกต่างกันอย่างน้อย 3-4 ชุด โดยเน้นการเปลี่ยนขนาดของ Mesh ในบริเวณแนวเชื่อมและ HAZ ดังนี้

Mesh ชุดที่ 1 (หยาบ): ใช้ Mesh ขนาดหยาบในบริเวณที่สนใจ (เช่น 2.0 มม.)

Mesh ชุดที่ 2 (ปานกลาง): ลดขนาดของ Mesh ลงครึ่งหนึ่งจากชุดแรก (เช่น 1.0 มม.)

Mesh ชุดที่ 3 (ละเอียด): ลดขนาดของ Mesh ลงอีก (เช่น 0.5 มม.)

Mesh ชุดที่ 4 (ละเอียดมาก): อาจลดขนาดลงอีกเพื่อให้มั่นใจ (เช่น 0.25 มม.)

ในแต่ละชุดจะต้องรักษาอัตราส่วนการขยายขนาดของ Mesh (Mesh expansion ratio) ให้สม่ำเสมอ เพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดในการคำนวณ

3. การจำลองและบันทึกผล

ทำการจำลองการเชื่อมตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นสำหรับ Mesh แต่ละชุด และบันทึกค่าพารามิเตอร์ที่เลือกไว้จากขั้นตอนที่ 1

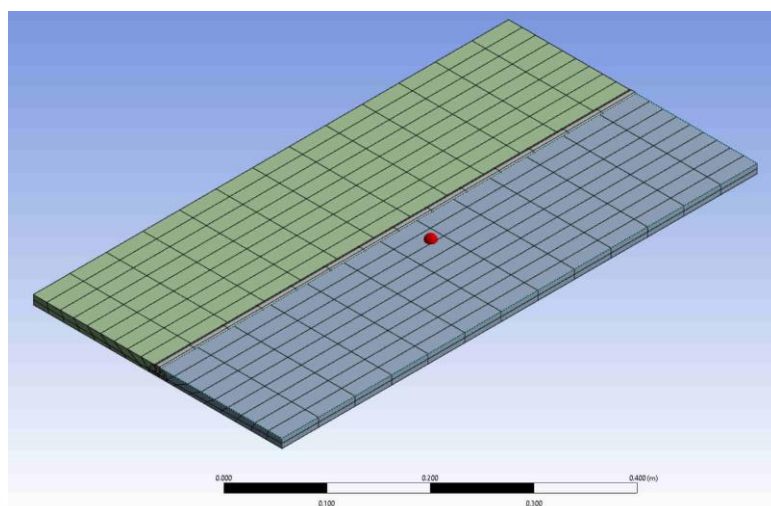
4. การวิเคราะห์และหา Mesh ที่เหมาะสม

นำค่าที่ได้จากแต่ละชุด Mesh มาสร้างกราฟ โดยแกน X คือขนาดของ Mesh และแกน Y คือค่าอุณหภูมิที่ต้องการตรวจสอบ

เมื่อขนาดของ Mesh มีค่าลดลง (ละเอียดขึ้น) ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะมีความแม่นยำมากขึ้นและมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าคงที่ค่าหนึ่ง

จุดที่ เหม าะ ส ม (Mesh Independent Point) คือ จุด ที่ ค่าพารามิเตอร์เริ่มเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือแทบไม่เปลี่ยนแปลงเลยเมื่อขนาดของ Mesh ลดลง อีก

การจำลองเบื้องต้นที่ mesh อัตโนมัติในโปรแกรม



ภาพประกอบ 43 Automatic mesh

การ Refine mesh เลือกปรับที่บริเวณรอยเชื่อมเป็นหลัก

การทำ mesh ครั้งที่ 1 จากภาพประกอบ 42 มีจำนวน Node 4276 Element 706 ขนาด Element เล็กสุด 2 mm ได้ค่าอุณหภูมิสูงสุดในรอยเชื่อม 1420 องศาเซลเซียส

การทำ mesh ครั้งที่ 2 กำหนดขนาด Element เล็กสุด 1 mm ได้ค่าอุณหภูมิสูงสุดในรอยเชื่อม 1475 องศาเซลเซียส

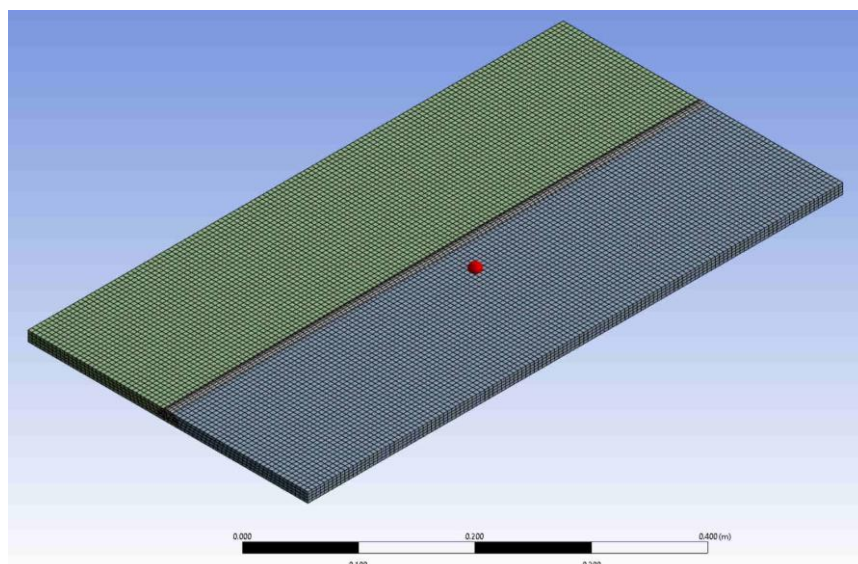
การทำ mesh ครั้งที่ 3 กำหนดขนาด Element เล็กสุด 0.75 mm ได้ค่าอุณหภูมิสูงสุดในรอยเชื่อม 1497 องศาเซลเซียส

การทำ mesh ครั้งที่ 4 กำหนดขนาด Element เล็กสุด 0.5 mm ได้ค่าอุณหภูมิสูงสุดในรอยเชื่อม 1515 องศาเซลเซียส

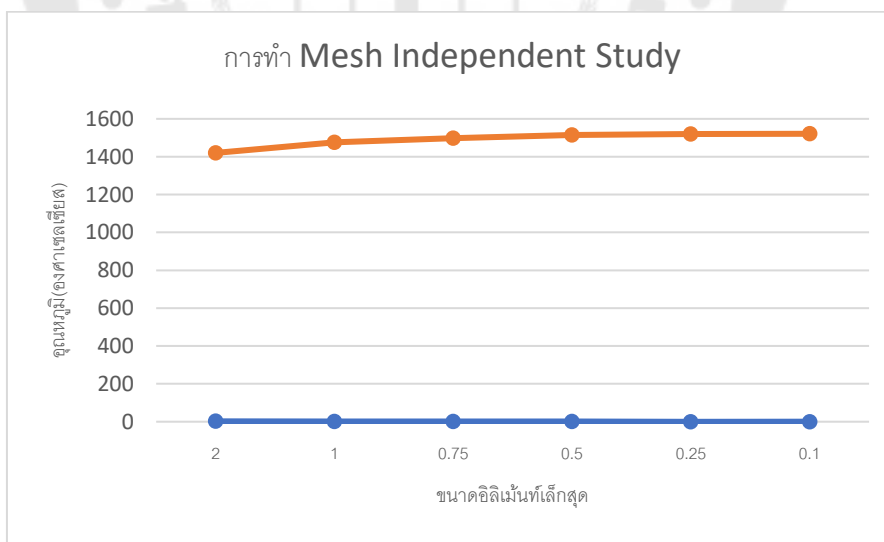
การทำ mesh ครั้งที่ 5 กำหนดขนาด Element เล็กสุด 0.25 mm ได้ค่าอุณหภูมิสูงสุดในรอยเชื่อม 1520 องศาเซลเซียส ตามภาพประกอบ 43

การทำ mesh ครั้งที่ 6 กำหนดขนาด Element เล็กสุด 0.1 mm ได้ค่าอุณหภูมิสูงสุดในรอยเชื่อม 1521 องศาเซลเซียส

ทำการเลือก ขนาด Element 0.25 mm ที่บริเวณรอยเชื่อมตามภาพประกอบ 44
เนื่องด้วยกราฟเริ่มอิมิตัวที่ขนาด Element 0.25 mm



ภาพประกอบ 44 ขนาดอีลิเมนต์เล็กสุดที่ 0.25 mm



ภาพประกอบ 45 การทำ Mesh Independent Study

จากภาพประกอบ 44 นี้ เราจะเลือกขนาดของ Mesh ที่เล็กที่สุดก่อนถึงจุดที่กราฟเริ่มคงที่ ซึ่งถือเป็น Mesh ที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการจำลองนี้ เพราะให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ โดยไม่ต้องใช้เวลาและทรัพยากรในการคำนวณมากเกินไป

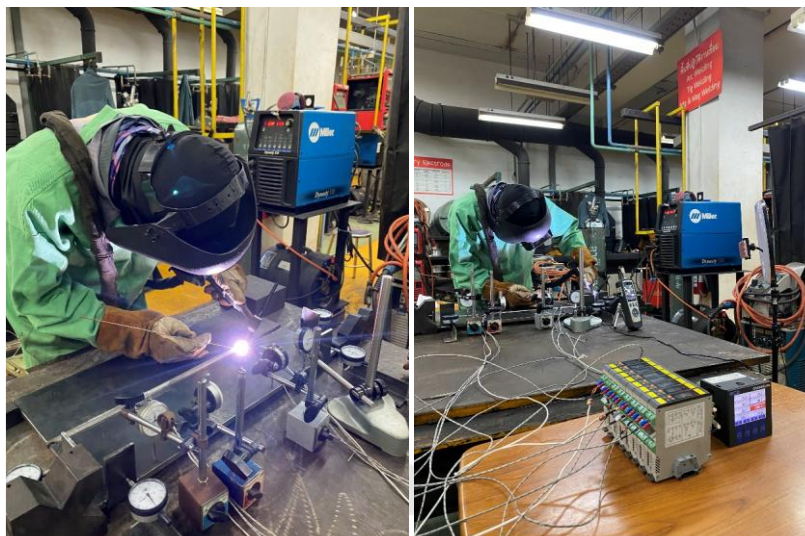
3.2.6.1 เครื่องมือเก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและเทอร์โมคัปเปิล

การวัดและบันทึกอุณหภูมิขณะเชื่อมชิ้นงานโลหะแผ่นด้วยเครื่องเก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและเทอร์โมคัปเปิลประเภทเคและประเภทอาร์ (K-type Thermocouple and R-type Thermocouple) ภาพประกอบ 38 การวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิในระหว่างขบวนการเชื่อมด้วยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลดังภาพประกอบ 42

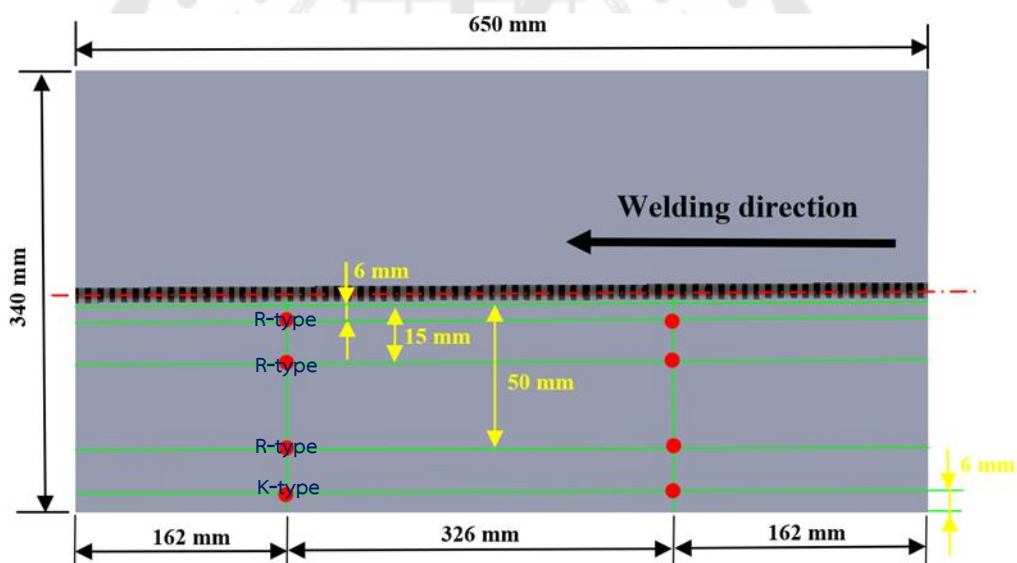
เครื่องเก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและวัดการกระจายของอุณหภูมิและเทอร์โมคัปเปิลประเภทอาร์ R-type Thermocouple อุณหภูมิในการวัด 0 - 1600°C จะถูกติดตั้งในตำแหน่ง T_1 , T_2 และ T_3 ส่วนเทอร์โมคัปเปิลประเภทเค K-type Thermocouple อุณหภูมิในการวัด 0 - 600°C จะถูกติดตั้งในตำแหน่ง T_4 ดังแสดงในภาพประกอบ 45 ใช้สำหรับบันทึกวัดอุณหภูมิความร้อนจากการเชื่อมที่ตำแหน่งต่างๆของชิ้นงาน



ภาพประกอบ 46 เครื่องเก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและเทอร์โมคัปเปิล K-type & R-type



ภาพประกอบ 47 การวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างการเชื่อมด้วยการติดตั้งเทอร์โมคัลบ์เปิด

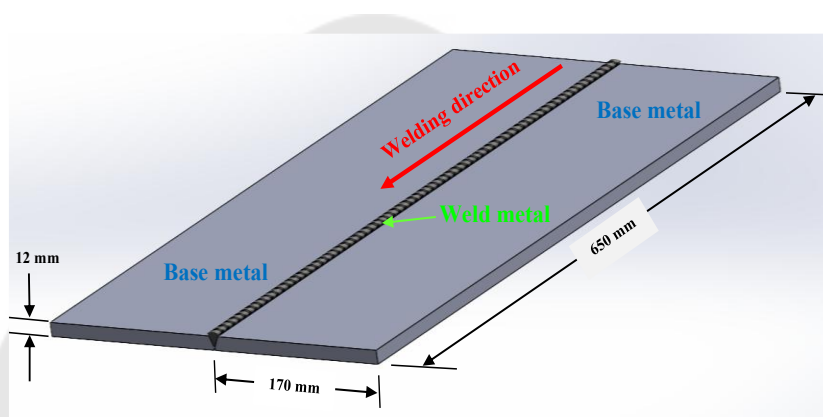


ภาพประกอบ 48 ตำแหน่งในการติดตั้งเทอร์โมคัลบ์เปิด

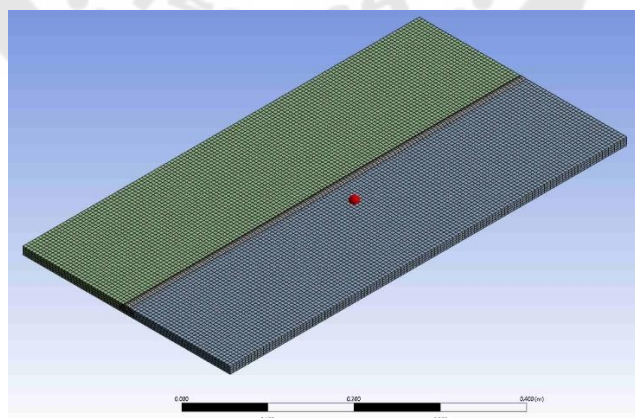
3.2.6.2 การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อวัดค่าการกระจายความร้อนจากการเชื่อม

ในการจำลองเชิงตัวเลขของกระบวนการเชื่อมไฮบริด GTAW และ SMAW แบบต่อชนของเหล็ก EH36 โดยแผ่นเหล็กมีขนาด 650 มม. x 340 มม. และความหนา 12 มม. เนื่องจากตัวอย่างรอยเชื่อมที่นำมาตรวจสอบเป็นแบบสมมาตร แกนสมมาตรจึงอยู่ที่จุดศูนย์กลางของรอยเชื่อม แนวเชื่อมครึ่งหนึ่งนำมาตรวจสอบอุณหภูมิ แบบจำลองสามมิติของแผ่นเชื่อมแบบ

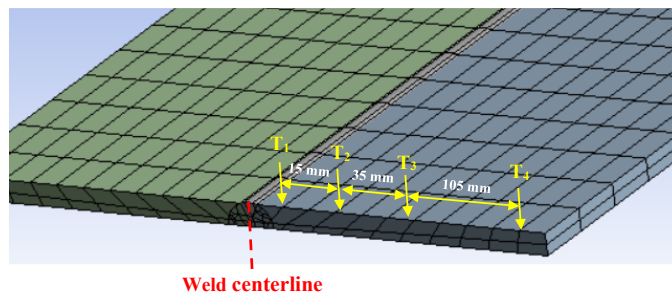
ต่อชนดังแสดงไว้ในภาพประกอบ 48 ทิศทาง x, y และ z แสดงความกว้าง ความหนา และความยาวของแบบจำลองตามลำดับ และระบบพิกัดแบบจำลอง และการแบ่งตาข่ายแสดงไว้ในภาพประกอบ 49 ตาข่ายสามมิติที่มีขนาดเอลิเมนต์เล็กสุด 0.25 mm การถ่ายเทความร้อนจากการจำลองเชิงตัวเลขถูกสกัดที่ตำแหน่งต่างๆ รวม 4 ตำแหน่ง ได้แก่ T_1 , T_2 , T_3 และ T_4 บนแบบจำลอง การเชื่อมที่เวลา 150 วินาทีและ 450 วินาที ตำแหน่งแรกคือตำแหน่งแหล่งความร้อนตามแนวเส้นกึ่งกลางแนวเชื่อม (Weld centerline) จากนั้นห่างจากแนวเส้นกึ่งกลางแนวเชื่อม 9 มม. 15 มม. 35 มม. และ 105 มม. ตามที่แสดงในภาพประกอบ 50



ภาพประกอบ 49 แบบจำลองสามมิติของกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW



ภาพประกอบ 50 ลักษณะของตาข่ายที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข



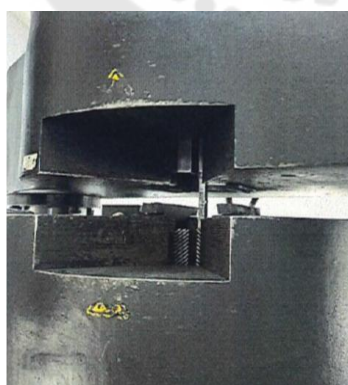
Weld centerline

ภาพประกอบ 51 ตำแหน่งที่ใช้วัดค่าการกระจายอุณหภูมิทั้ง 4 จุด

3.2.7 เครื่องมือทดสอบสมบัติทางกล

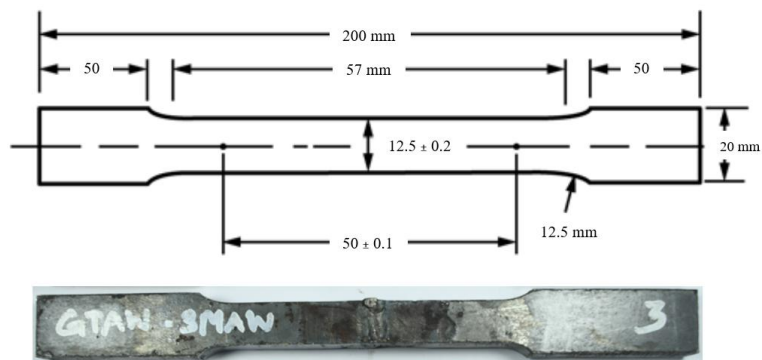
3.2.7.1 เครื่องทดสอบแรงดึง

เครื่องทดสอบแรงดึงที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังภาพประกอบ 51 เครื่องยี่ห้อ Instron: UTM 2000 kn. เป็นเครื่องสำหรับทดสอบแรงดึงในแนวตามยาวของเนื้อ โลหะเชื่อม (All Weld Metal) โดยเตรียมชิ้นงาน ทดสอบแบบลดขนาด การทดสอบสามารถป้อนค่าพารามิเตอร์ได้โดยตรงจากหน้าจอ การประมวลผลการทดสอบจะเป็นลักษณะของตัวเลขและกราฟ โดยในงานวิจัย ครั้งนี้ใช้ทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของงานเชื่อม (Ultimate Tensile Strength) ความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength) และ เปอร์เซ็นต์ในการยืดตัว (Percent Elongation) และชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึงให้ได้ตามมาตรฐาน กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E8M-22 แสดงในภาพประกอบ 51



ภาพประกอบ 52 เครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Instron: UTM 2000 kn.

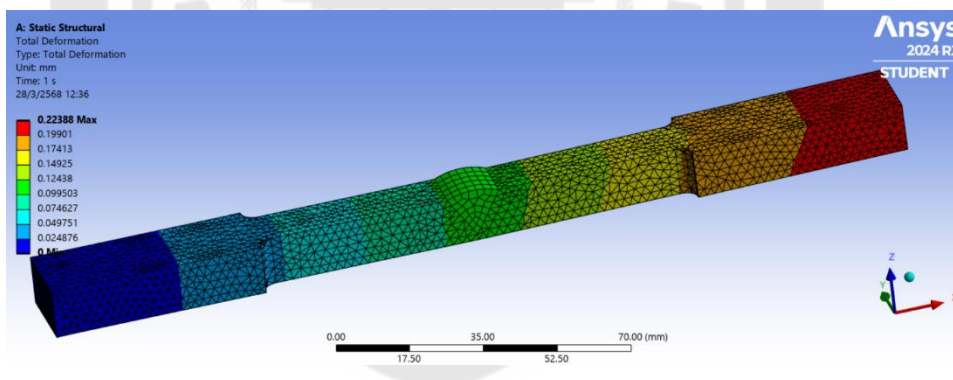
ที่มา : สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย



ภาพประกอบ 53 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (Tensile testing) มาตรฐาน ASTM E8M-22

3.2.7.2 การทดสอบแรงดึงโดยการจำลองเชิงตัวเลข

การวิเคราะห์แรงดึงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากชิ้นงานที่มีขนาดและมิติเท่ากับชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน E8/E8M – 22 โดยเลือกใช้ตาข่ายรูปสี่เหลี่ยมและขนาดตาข่าย 0.2 มม. เพื่อจำลองเชิงตัวเลขในโหมด Explicit dynamic เพื่อทดสอบแรงดึงดังภาพประกอบ 53



ภาพประกอบ 54 ตัวอย่างการใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์ Total deformation (Tension)

3.2.7.3 เครื่องทดสอบการดัดโค้ง (Bending Tester)

การทดสอบแรงดัดเป็นการใส่แรงกระทำกับชิ้นทดสอบเพื่อทำให้เกิดแรงเค้นอัดที่บริเวณด้านบนของหน้าตัดชิ้นงานและเกิดแรงเค้นดึงที่บริเวณด้านล่างของหน้าตัดชิ้นงาน การดัดอาจกระทำด้วยแรงเค้นตรง แรงเฉือนดัด หรือแรงเฉือนบิด โดยแท่งชิ้นงานที่มีการใช้ในลักษณะที่มีการรับแรงแบบสวนทางมักจะทำการทดสอบการดัดงอ ซึ่งแท่งชิ้นงานจะมีการโค้งงอเกิดขึ้น ณ จุดหนึ่งบนพื้นผิวบริเวณที่มีการรับแรง การทดสอบทำโดย ค่อยๆเพิ่มแรงที่ใช้ในการม้วนขึ้นทดสอบรอบๆ mandrel ตามที่กำหนดไว้ โดยการที่กดยึดปลายด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบไว้ และทำ

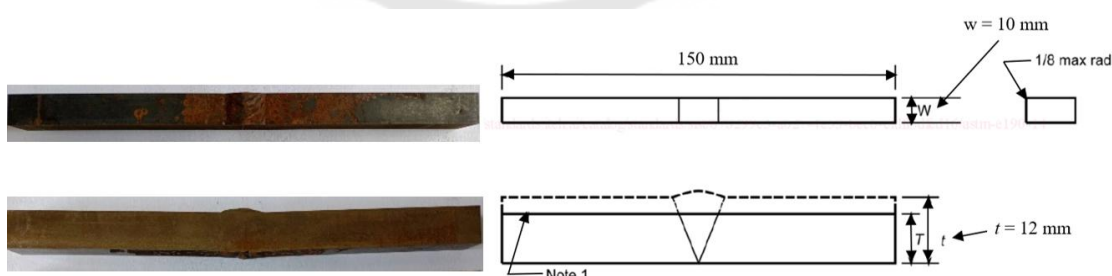
การตัดโค้งที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ทำให้เกิดการตัดโค้งรอบ mandrel ดังภาพประกอบ 54 ลักษณะของชิ้นงานตัวอย่างมีการจัดเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E90-21 ดังแสดงในภาพประกอบ 54 มีการทดสอบการตัดโค้งทั้ง 3 ด้าน คือ Side bend, Face bend และ Root bend โดยแบ่งเป็นด้านละ 2 ชิ้น



ภาพประกอบ 55 เครื่องทดสอบการตัดโค้ง โดยวิธี Pressing Bend Method

ที่มา : บจก.ศูนย์วิจัยโลหะวิทยา แอลพีเอ็ม (ประเทศไทย)

<https://lpnmrc.co.th/2023/05/22/>



ภาพประกอบ 56 ชิ้นงานตัวอย่างทดสอบการตัด

3.2.7.4 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Tester)

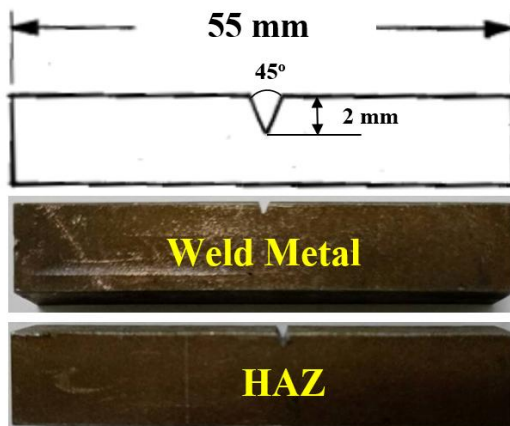
การทดสอบการกระแทกแบบชาร์ปีโดยใช้เครื่องทดสอบแรงกระแทกดังภาพประกอบ 49 ทำได้โดยการตีชิ้นทดสอบเพียงครั้งเดียวด้วยเหวี่ยงให้หักภายใต้ภาวะที่กำหนด ชิ้นทดสอบต้องทำเป็นร่องบากที่มีขนาด และลักษณะกำหนดตามมาตรฐาน ASTM A370-21 ชิ้นทดสอบต้องทำเป็นร่องบากตัว วี ตรงกลาง มีทั้งหมด 2 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 3 ชิ้น ต่อหนึ่งจุดทดสอบของรอยเชื่อมที่ได้จาก บริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) บริเวณพื้นที่กระทบร้อน HAZ ดังภาพประกอบ 56



ภาพประกอบ 57 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact Tester)

ที่มา : บจก.ศูนย์วิจัยโลหะวิทยา แอลพีเอ็น (ประเทศไทย)

<https://lpnmrc.co.th/2023/05/22/>



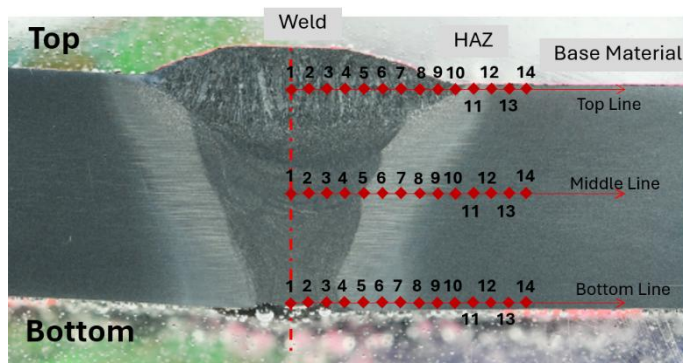
ภาพประกอบ 58 ตัวอย่างทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E23-06

3.2.7.5 เครื่องทดสอบความแข็ง (Micro Vickers hardness tester)

เครื่องทดสอบความแข็งที่ใช้ในการทดลองนี้ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น HMV-G ดังภาพประกอบ 58 เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E3-11 ใช้แรงกด 200 kgf (HV 0.2 (1.961N) เวลาทดสอบ 15 วินาที ซึ่งจะเริ่มกดในแนวเส้นทดสอบ 3 เส้นในบริเวณด้านล่างในพื้นที่ของการเชื่อมแบบ GTAW บริเวณตรงกลาง SMAW และด้านบนพื้นที่ของการเชื่อมแบบ SMAW ดังในภาพประกอบ 58 โดยมีตำแหน่งของบริเวณจุดทดสอบแต่ละแถว 14 จุด รวมทั้งหมด 42 จุด



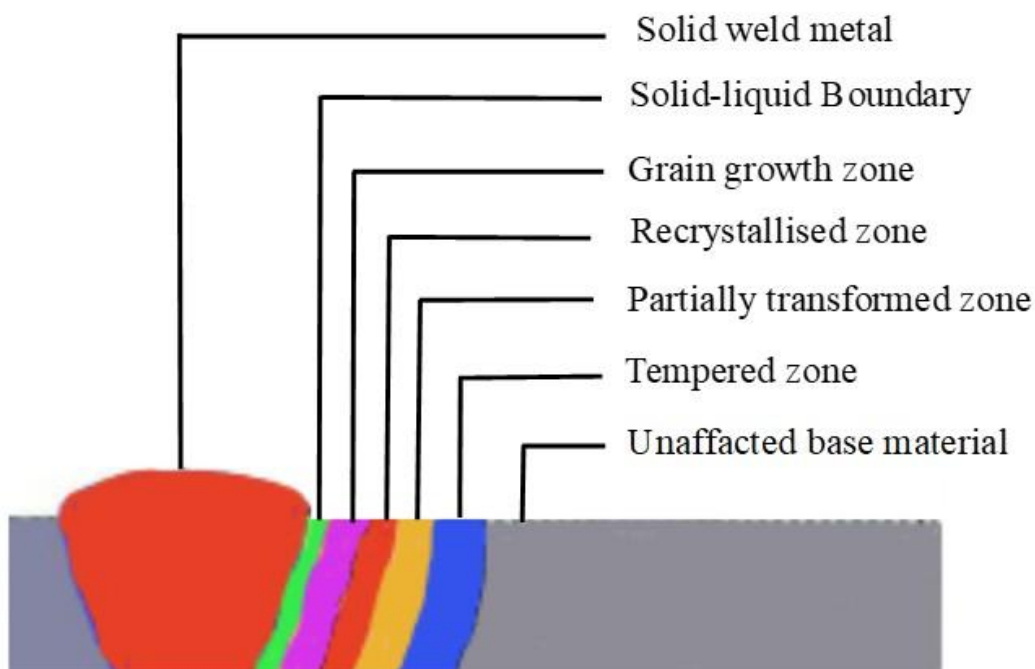
ภาพประกอบ 59 เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น HMV-G



ภาพประกอบ 60 บริเวณตำแหน่งกจุดทดสอบทั้ง 3 เส้น เส้นละ 14 จุด

3.2.8 เครื่องมือในการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาจะตรวจสอบโครงสร้างมหภาค เพื่อดูลักษณะทางกายภาพของแนวเชื่อม เช่น ความกว้าง ความสูง การซึมลึก และจุดบกพร่องของแนวเชื่อม บริเวณอิทธิพลทางความร้อน ซึ่ง บริเวณอิทธิพลทางความร้อนแบ่งได้เป็นส่วน ๆ ตามความมากน้อยของ อุณหภูมิที่ได้รับส่วนที่อยู่ใกล้แนวเชื่อมจะมีอุณหภูมิสูงกว่า และอุณหภูมิลดลงมาจากระยะห่างของบริเวณส่วนนั้น ๆ เพราะเมื่อลวดเชื่อมเคลื่อนที่ไป คลื่นของอุณหภูมิจากความร้อนจะเคลื่อนที่ตาม และการกระจายความร้อน ลักษณะเป็นวงรีดังคลื่นซึ่งเกิดจากเรือกำลังวิ่งกลางลำน้ำ การเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของโลหะเนื่องจากความร้อนในการเชื่อม มีโอกาสเกิดขึ้นได้ทั้งขณะเชื่อมและภายหลังเชื่อมเย็นตัวลงแล้ว ปัจจัยที่ทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงมากขึ้นขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิที่ได้รับ และระยะเวลาที่อยู่ภายใต้ อุณหภูมินั้น ดังแสดงในภาพประกอบ 60 พร้อมกันนี้ก็จะขยายภาพเพื่อให้เห็นโครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเนื้อเชื่อม บริเวณอิทธิพลทางความร้อน และโลหะงาน

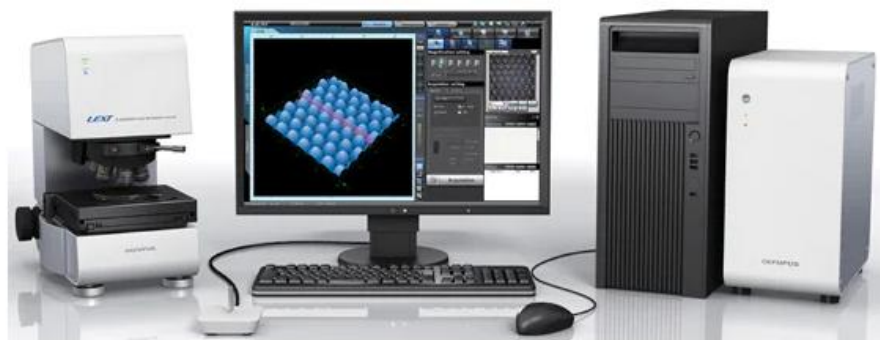


ภาพประกอบ 61 โครงสร้างของโลหะบริเวณอิทธิพลทางความร้อน

3.2.8.1 กล้องจุลทรรศน์ลำแสงเลเซอร์แบบสามมิติ (Olympus, OLS 4100

LEXT)

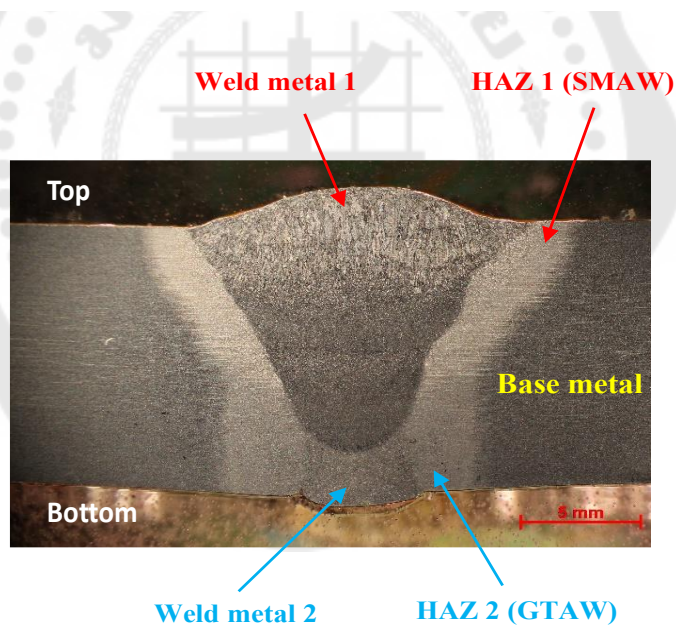
การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาจะใช้กล้องจุลทรรศน์ลำแสงเลเซอร์แบบ 3 มิติ ยี่ห้อ LEXT OLS4100 ดังแสดงในภาพประกอบ 61 ที่เก็บรายละเอียดของชิ้นงานเป็นลักษณะ 3 มิติที่ความละเอียดสูง การทดลองมีการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทั้งหมด 5 จุด ดังแสดงในภาพประกอบ 62 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ บริเวณแนวเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมแบบอาร์กอิลเดคโตรดหุ้มฟลักซ์ SMAW (Weld metal 1) บริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้วยวิธีการเชื่อมแบบอาร์กอิลเดคโตรดหุ้มฟลักซ์ (HAZ 1 SMAW) บริเวณแนวเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมแบบก๊าซทังสเตนอาร์ค GTAW (Weld metal 2) บริเวณพื้นที่กระทบร้อนด้วยวิธีการเชื่อมแบบก๊าซทังสเตนอาร์ค (HAZ 2 GTAW) และ บริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base metal: BM) เพื่อขยายให้เห็นลักษณะโครงสร้างของเม็ดเกรนและพฤติกรรมกรรมการหลอมละลายที่เปลี่ยนไปหลังผ่านกระบวนการเชื่อม



LEXT OLS4100
3D measuring laser microscope

ภาพประกอบ 62 กล้องจุลทรรศน์ลำแสงเลเซอร์แบบสามมิติ

ที่มา : www.olympus-global.com



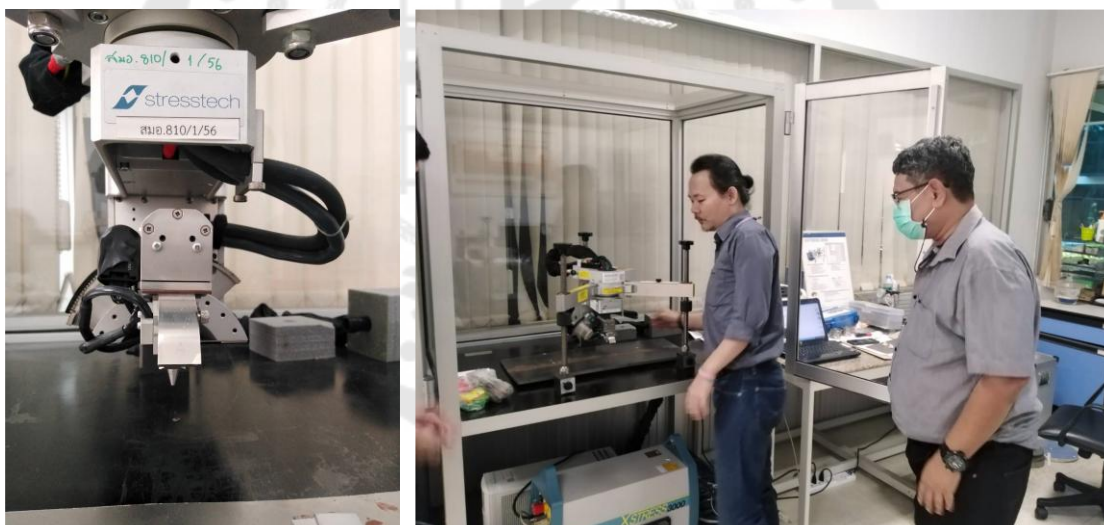
ภาพประกอบ 63 ตำแหน่งของจุดที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

3.2.9 เครื่องมือในการตรวจสอบความเค้นตกค้าง

เครื่องมือในการตรวจสอบความเค้นตกค้างและส่วนที่เป็นอุปกรณ์แสดงผลและบันทึกข้อมูล ได้แก่ เครื่องเครื่องเอ็กซ์เรย์วัสดุ

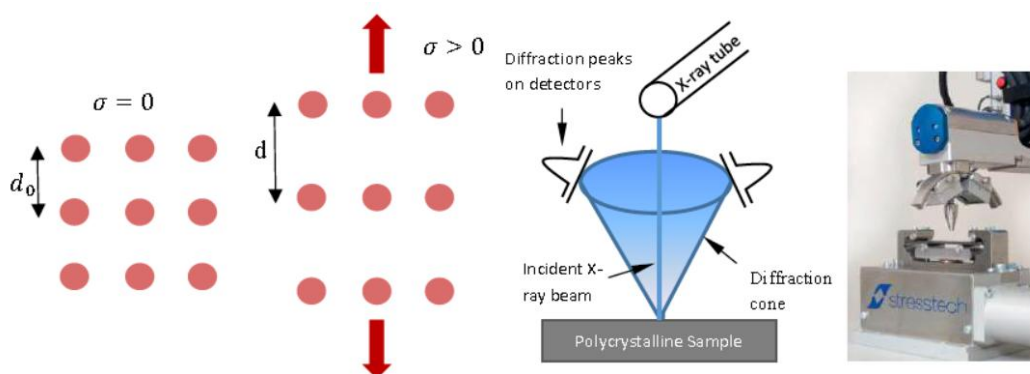
3.2.9.1 เครื่องเอ็กซ์เรย์ X-Ray Diffractometer (XRD)

ความเค้นตกค้างจะทำการวัดโดยใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความเค้นรุ่น XSTRESS 3000 ดังแสดงในภาพประกอบ 63 เมื่อได้ผลการทดลองแล้วจะมีการนำไปเปรียบเทียบกับค่าการจำลองเชิงตัวเลข พารามิเตอร์หลักของเครื่องวิเคราะห์นี้ถูกตั้งค่าดังแสดงในตาราง 13 การทำงานอาศัยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถวัดความเค้นตกค้างโดยใช้ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก d ดังแสดงในภาพประกอบ 64 โดยใช้กฎวัดความเครียด เมื่อวัสดุอยู่ในสถานะตึง ระยะห่างระหว่างระนาบผลึกจะเพิ่มขึ้น และเมื่ออยู่ภายใต้สถานะตึง ระยะห่างนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสถานะที่ไม่ได้รับความเค้น ระยะห่างของโครงตาข่ายจะคำนวณจากมุมเลี้ยวเบน 2θ และความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ที่ทราบโดยใช้กฎของแบร็กก์ (ภาพประกอบ 61) ความเค้นตกค้างจะถูกวัดโดยการวางตัวอย่างในเครื่องเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากนั้นตัวอย่างจะถูกฉายแสงให้สัมพันธ์กับลำแสงรังสีเอกซ์ที่โต้ตอบกับโครงตาข่ายผลึกและทำให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบน (ภาพประกอบ 57)



ภาพประกอบ 64 การทดลองหาปริมาณความเค้นตกค้างโดยใช้เครื่อง Xstress3000

ที่มา : สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย



ภาพประกอบ 65 หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สำหรับการวัดความเค้นตกค้าง

ที่มา : สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

ตาราง 13 พารามิเตอร์สำหรับการตั้งของเครื่อง Xstress3000 ก่อนการวัดความเค้นตกค้าง

X-ray Diffraction Parameters	Specification/Values
Tube type	Cr
Max. Current	9 A
Max. Power	270 W
Supplied current during the experiment	6.7 A
Supplied voltage during the experiment	30 V
Exposure time for the calibration	8 s
Exposure time for measurement	10 s
Collimator diameter	3 mm
Collimator distance	10.390 mm
Detector distance	50 mm

ตาราง 13 (ต่อ)

X-ray Diffraction Parameters	Specification/Values
Tilt angle	45° to 45°
Number of tilts	5/5
Rotation angle	0° to 90°
Number of rotations	2

3.2.9.2 การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าความเค้นตกค้าง

ในงานวิจัยนี้ แบบจำลองเชิงตัวเลขถูกสร้างขึ้นโดยใช้ซอฟต์แวร์จำลอง ANSYS นอกจากนี้ โปรแกรม ANSYS ยังทำนายความเค้นตกค้างจากการเชื่อมไฮบริดของรอยต่อแบบ GTAW และ SMAW ของแผ่นเหล็ก EH36 ขนาดของชิ้นงานคือ 650 × 340 มม.หนา 12 มม. แบบจำลองเชิงตัวเลขของการวิเคราะห์นี้ใช้โปรแกรม Solid works 18 ในการเขียนแบบ การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างการเชื่อมจะใช้โปรแกรม Ansys และสร้างขึ้นจากแหล่งความร้อน Goldak บนพื้นผิวเดียวกัน จากนั้น พลังความร้อนจะถูกเคลื่อนย้ายจากพื้นผิวขององค์ประกอบหนึ่งไปยังองค์ประกอบถัดไปจนกว่ากระบวนการเชื่อมจะเสร็จสิ้นโดยใช้เทคนิคการเกิดและการดับของแนวเชื่อม (Birth and Death) การจำลองในการเชื่อมสามารถสันนิษฐานได้ว่าการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเป็นสิ่งที่ส่งผลต่อความเค้นตกค้าง วิธีองค์ประกอบไฟไนต์มีความจำเป็นเพื่อจับภาพการเชื่อมโยงระหว่างช่วงเวลาเกิดความร้อน คุณสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิสูง และความเค้นตกค้างของการพัฒนาที่ตามมา ในแบบจำลองนี้ได้รับการปรับให้เหมาะสมกับสถานการณ์ที่ใช้งานได้จริงมากขึ้นของการเชื่อมแบบต่อชน การตรวจสอบอย่างละเอียดถือเป็นประเด็นสำคัญของการสร้างแบบจำลองกระบวนการที่เชื่อถือได้

3.2.10 เครื่องมือในการตรวจสอบการบิดตัวเสียรูปจากความร้อน

3.2.10.1 เครื่องวัดพิกัดสามมิติ (CMM)

การวัดการเสียรูปที่เกิดขึ้นบนแผ่นเชื่อมจะทำโดยใช้เครื่องวัดพิกัดสามมิติ (Mitutoyo: Beyond-A910) การวัดจะดำเนินการก่อนและหลังการเชื่อม โดยจะวัดจุดที่เลือกไว้ 9 จุดจากแต่ละส่วนของแผ่นเชื่อมตามทิศทางขวางของแผ่นเชื่อมเป็นขั้นตอนละ 10 มม. และบันทึก

การเคลื่อนที่ตามแนวแกน z การวัดการเสียรูปที่เกิดขึ้นจากการทดลองจะแสดงไว้ในภาพประกอบ 65



ภาพประกอบ 66 การวัดการบิดเบี้ยวของแนวเชื่อมโดยใช้เครื่อง Coordinate Measuring Machine (CMM)

ที่มา : ศูนย์สอบเทียบเครื่องมือวัดสำหรับอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

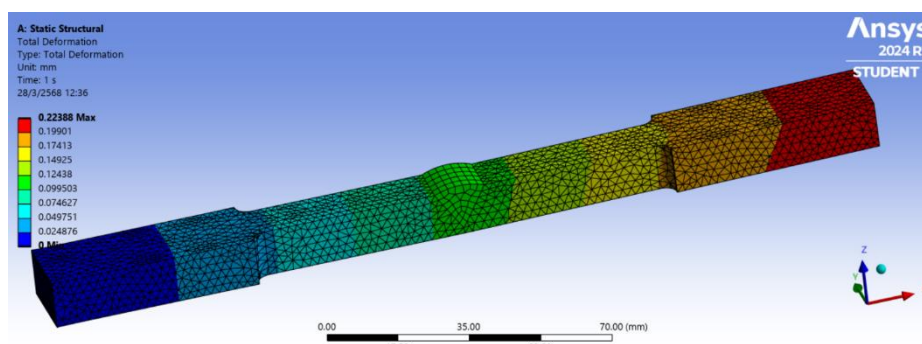
3.2.10.2 การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าการบิดเบี้ยว

ในการจำลองเชิงตัวเลขของการบิดเบี้ยวโดยใช้โปรแกรม Ansys ในรอยเชื่อม จะใช้รูปร่างของวัสดุและการแบ่งองค์ประกอบในลักษณะเดียวกับการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิ แผ่นโลหะสองแผ่นที่มีขนาด 650 มม. x 9300 มม. x 12 มม. เชื่อมเข้ากันรอยต่อชนด้วยการเชื่อมด้วยกระบวนการไฮบริด GTAW และ SMAW เหล็กโครงสร้างเป็นวัสดุ EH36 ค่าความความเค้นแรงดึงครากของโลหะฐานอยู่ที่ 355 MPa และความแข็งแรงแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ 490-620 MPa ที่อุณหภูมิห้อง

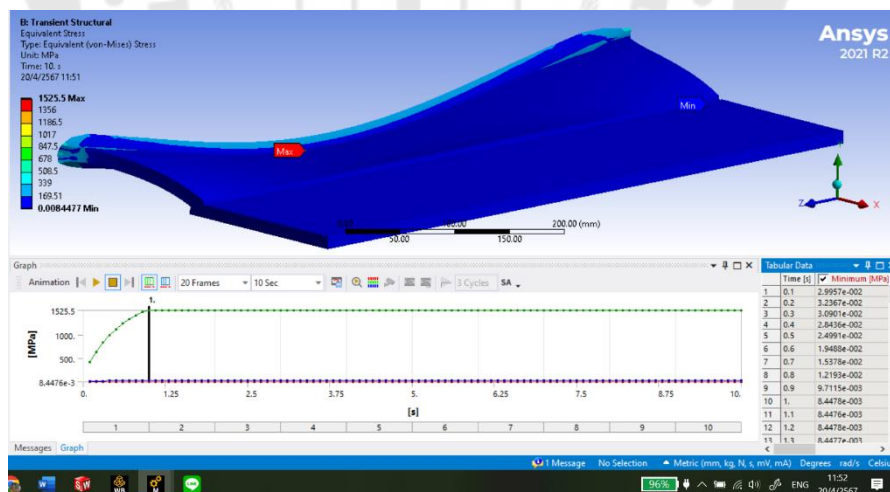
3.2.11 การจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม Ansys

โปรแกรม Ansys คือโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมขั้นสูงที่มีความสามารถหลากหลายด้าน ได้แก่ การวิเคราะห์ด้านกลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics), การวิเคราะห์

กลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanic), การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) และการวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetics) โดยใช้หลักการไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) ในการคำนวณหาผลลัพธ์ของงานในแต่ละด้าน โปรแกรม Ansys สามารถวิเคราะห์ปัญหาได้หลากหลายมากขึ้น ลักษณะการใช้งานจะเป็นดังภาพประกอบ 66 เป็นภาพของชิ้นงานที่เกิดความเครียด และภาพประกอบ 67 เป็นภาพของแนวเชื่อมชิ้นงานที่เกิดความเค้นตกค้าง



ภาพประกอบ 67 ตัวอย่างการใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์ Total deformation



ภาพประกอบ 68 ตัวอย่างการใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์ Equivalent (von-Mises) Stress

3.3 แผนการดำเนินการศึกษาวิจัยและงบประมาณโครงการวิจัย

สำหรับแผนการดำเนินงานการศึกษาวิจัย (ภาพประกอบ 68) ในการวิจัยทดลอง การวิเคราะห์ การประเมิน การจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์และการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในระดับนานาชาติดังนี้

แผนการดำเนินการสำหรับปริญญานิพนธ์ นายสุเมธ หนูฉิม รหัส 62199150045 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล

ชื่อเรื่องปริญญานิพนธ์ : การประเมินกระบวนการเชื่อมไฮบริดที่มีต่อพฤติกรรมเชิงกล ความเค้นตกค้าง และการบิดเสียรูป สำหรับแผ่นเหล็กกำลังสูง TMCP ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง

TO PIC : ASSESSMENT OF HYBRID WELDING PROCESS ON MECHANICAL BEHAVIOUR, RESIDUAL STRESS AND DISTORTION FOR TMCP STEEL PLATES IN THE SHIPBUILDING INDUSTRY

ลำดับ	การดำเนินงาน	เสร็จ	ความก้าวหน้า 17 พ.ค. 2568	6 ต.ค.-67		ม.ค.-68		ก.พ.-68		มี.ค.-68		เม.ย.-68		พ.ค.-68		มิ.ย.-68	
				1-31	1-31	1-28	1-31	1-30	1-31	1-30	1-31	1-30					
1	ศึกษาวิจัยเอกสารงานวิจัย ครอบคลุม	เสร็จ	100%														
2	จัดซื้อวัสดุและเครื่องมือในงานวิจัยอุปกรณ์เครื่องวัดทดสอบ	เสร็จ	100%														
3	ทดสอบและเก็บข้อมูลการเชื่อม SMAW / GTAW	เสร็จ	100%														
4	ทดสอบ-เก็บข้อมูล Tensile, Hardness, Microstructure	เสร็จ	100%														
4	ทดสอบ-เก็บข้อมูล Impact, Bending	เสร็จ	70%														
5	ทดสอบ-เก็บข้อมูลการประเมินค่าแรงตกค้างและการบิดเสียรูป	เสร็จ	100%														
6	จัดทำและเขียนปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์		70%														
7	ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการ paper ที่ 1																
	ร่างต้นฉบับภาษาอังกฤษ	เสร็จ	100%														
	ดำเนินการส่งต้นฉบับ	เสร็จ	100%														
	ตีพิมพ์	เสร็จ	100%														
8	ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการ paper ที่ 2																
	ร่างต้นฉบับภาษาอังกฤษ	เสร็จ	100%														
	ดำเนินการส่งต้นฉบับ	0%	0%														
	ตีพิมพ์	0%	0%														
9	ยื่นแบบขอการสมัครสอบปริญญานิพนธ์		0%														
10	สอบปริญญานิพนธ์		0%														

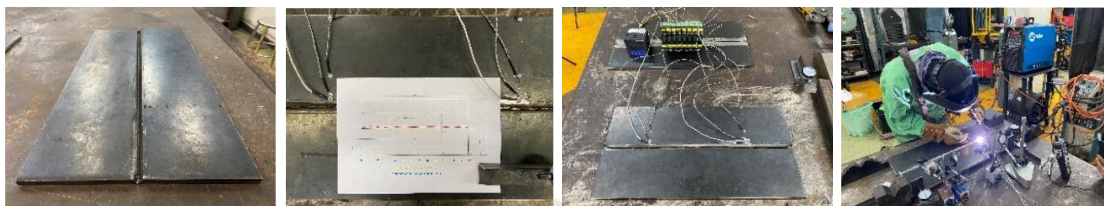
ภาพประกอบ 69 แผนการดำเนินงานการศึกษาวิจัย

3.4 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

การเชื่อมเหล็กกล้า TMCP เกรด EH36 ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานทดสอบและกรรมวิธีการเชื่อม ดังภาพประกอบ 69 เริ่มจากการตัดชิ้นงานให้ได้ขนาดที่กำหนด ทำการบารองวี 60 องศา หลังจากนั้นทำการติดตั้งเทอร์โมคัลลิ่งเบิ้ลจำนวน 8 ชุดเข้ากับชิ้นงานและต่อเข้ากับเครื่องเก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ (Data Logger) และทำการเชื่อมตามขบวนการ GTAW จำนวน 1 Pass และขบวนการ SMAW จำนวน 3 Pass รวมเป็น 4 Pass ที่เรียกว่ากระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW

การวัดอุณหภูมิเพื่อทำแผนที่การกระจายอุณหภูมิทำโดยทำการวัดค่าอุณหภูมิความร้อนจากการเชื่อม การทดสอบทางกล การทดสอบโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยา

การทดสอบค่าความเค้นตกค้าง การทดสอบวัดค่าการบิดเสียรูป แล้วนำมาเปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับค่าอุณหภูมิความร้อนจากการเชื่อม ค่าการทดสอบทางกลในส่วนของแรงดึง ค่าการทดสอบค่าความเค้นตกค้าง และค่าการทดสอบวัดค่าการบิดเสียรูป



ภาพประกอบ 70 ชิ้นงานที่จัดเตรียม



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

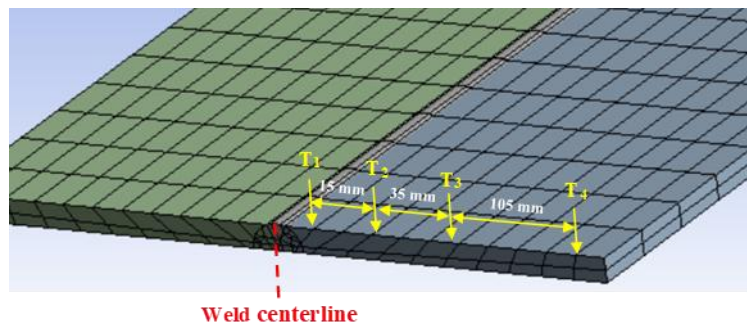
ในบทนี้เป็นผลการทดลองและอภิปรายผลโดยมีการแสดงผลดังนี้

- โลหะฐาน
- 4.1 ผลการทดลองหาปริมาณการกระจายความร้อนจากแนวเชื่อมเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อมโลหะฐาน
 - 4.2 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile test)
 - 4.3 ผลการทดสอบการดัดโค้ง (Bending test)
 - 4.4 ผลการทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact Test)
 - 4.5 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness test)
 - 4.6 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา
 - 4.7 ผลการทดลองหาค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานหลังการเชื่อม
 - 4.8 ผลการทดลองหาค่าการบิดเสียรูปของชิ้นงานภายหลังการเชื่อม

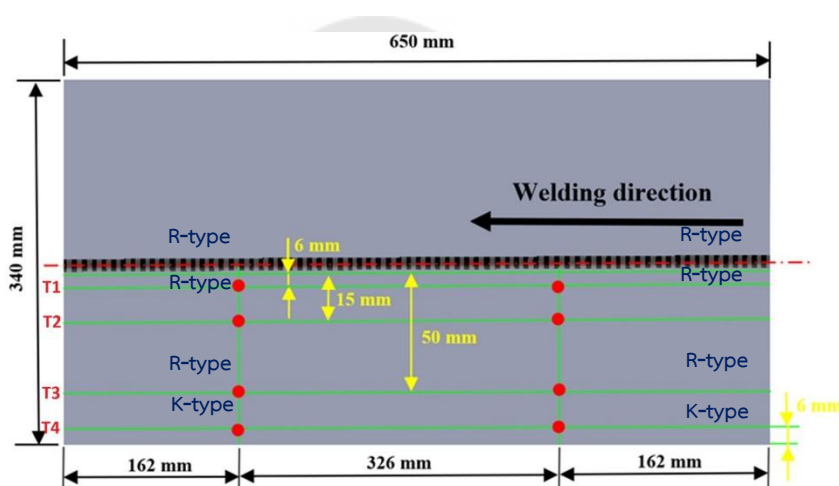
4.1 ผลการทดลองหาปริมาณการกระจายความร้อนจากแนวเชื่อมเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อมโลหะฐาน

4.1.1 บริเวณชิ้นงาน

การทดลองหาปริมาณการกระจายความร้อนจากการเชื่อมเข้าสู่ชิ้นงานเชื่อมโลหะฐาน จากการเชื่อมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงาน ดังภาพประกอบ 71 ค่าการกระจายอุณหภูมิในระหว่างการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW ได้ผลการวัดอุณหภูมิขณะเชื่อมโลหะแผ่นด้วยเครื่องวัดเทอร์โมคัปเปิ้ลได้อุณหภูมิตำแหน่ง T1 เท่ากับ 1225 °C ตำแหน่ง T2 มีอุณหภูมิ 965 °C ตำแหน่ง T3 มีอุณหภูมิ 696 °C ตำแหน่ง T4 มีอุณหภูมิ 156 °C



(ก) การวางตำแหน่งวัดอุณหภูมิ (3D View in FEM)

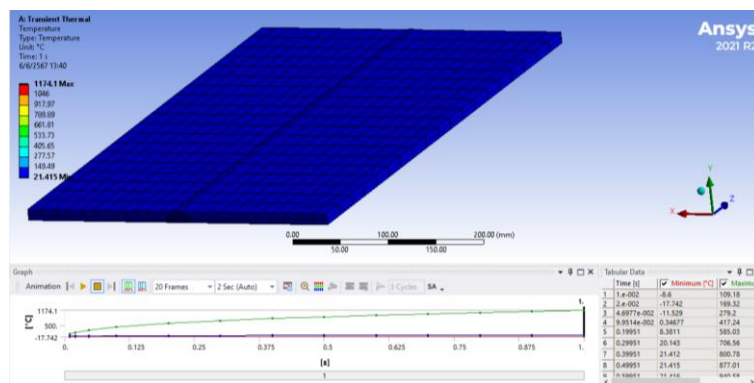


(ข) การวางตำแหน่งวัดอุณหภูมิมบนชิ้นงานจริง (Top View)

ภาพประกอบ 71 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล

การกระจายอุณหภูมิจากการจำลองเชิงตัวเลขดังในภาพประกอบ 72 การถ่ายเทอุณหภูมิจากเส้นกึ่งกลางในตำแหน่ง T1 มีอุณหภูมิสูงสุดที่ $1174.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ผลของการระบายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อแหล่งความร้อนผ่านตำแหน่งด้วยความเร็วคงที่ จุด T2 จะมีอุณหภูมิ $917.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่ง T3 มีอุณหภูมิ $661.81\text{ }^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่ง T4 มีอุณหภูมิต่ำสุด $149.49\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความร้อนที่สะสมจะถูกถ่ายโอนไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำของแผ่นโดยการนำ และสูญเสียไปยังสภาพแวดล้อมโดยรอบโดยการแผ่รังสีและการพาความร้อน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าวิธีการวัดด้วยเครื่องวัดเทอร์โมคัปเปิ้ลกับวิธีการกระจายอุณหภูมิจากการจำลองเชิงตัวเลขมีเปอร์เซ็นต์ความ

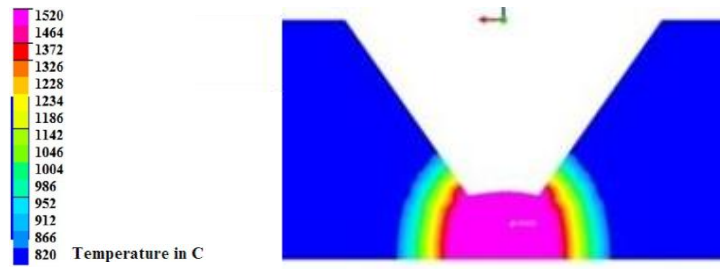
แตกต่างกัน 5 % ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในขอบเขตของความผิดพลาดที่ยอมรับได้ นำผลที่ได้ไปทำการสร้างข้อมูลเปรียบเทียบแสดงผลดังตาราง 14 และภาพประกอบ 76



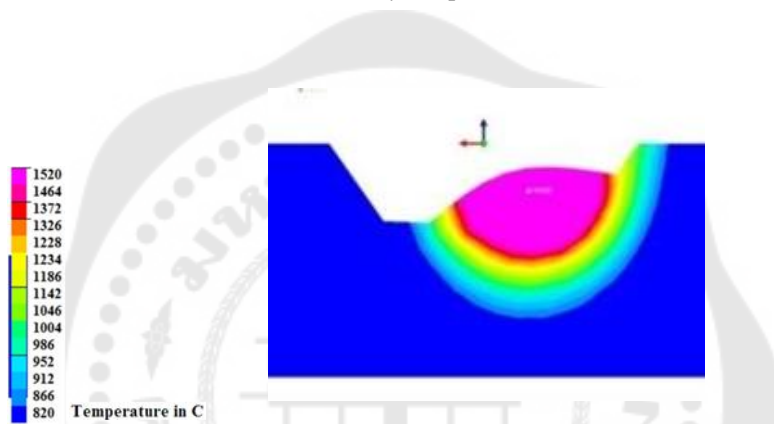
ภาพประกอบ 72 การกระจายอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขบริเวณชิ้นงาน(ไม่รวมรอยเชื่อม)

4.1.2 บริเวณรอยเชื่อม

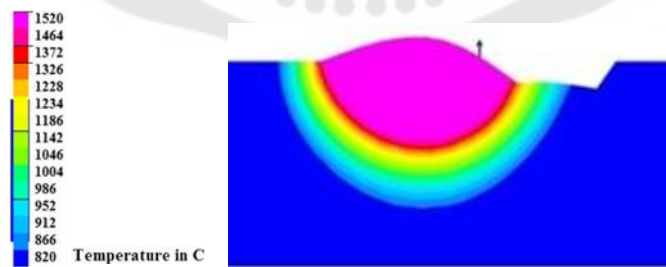
จากผลการทดลองการจำลองอุณหภูมิในบริเวณรอยเชื่อม พบว่าเมื่อทำการจำลองรอบแรกด้วยการเชื่อมแบบ GTAW ในบริเวณรากของรอยเชื่อม มีการกระจายตัวของอุณหภูมิสูงสุด (1520 องศาเซลเซียส) ค่อนข้างแคบอยู่ที่ประมาณ 4-5 มิลลิเมตร (เทียบสัดส่วนความหนาของชิ้นงานที่ 12 มิลลิเมตร) ตามภาพประกอบ 73 ทำการจำลองการเชื่อมรอบที่สองด้วยกระบวนการ SMAW ได้ผลลัพธ์การกระจายตัวของอุณหภูมิสูงสุดกว้างกว่าเล็กน้อย อยู่ที่ 5-6 มิลลิเมตร ตามภาพประกอบ 74 เมื่อทำการจำลองรอบที่สามพบว่ารอยเชื่อมที่อุณหภูมิสูงสุดมีแถบความกว้างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ 6-7 มิลลิเมตร ตามภาพประกอบ 75 และผลของการจำลองการเชื่อมรอบที่ดีที่สุดทำแบบเชื่อมเติมเต็ม(Filler pass) พบว่ามีความกว้างสูงสุดอยู่ที่ 7-8 มิลลิเมตร ภาพประกอบ



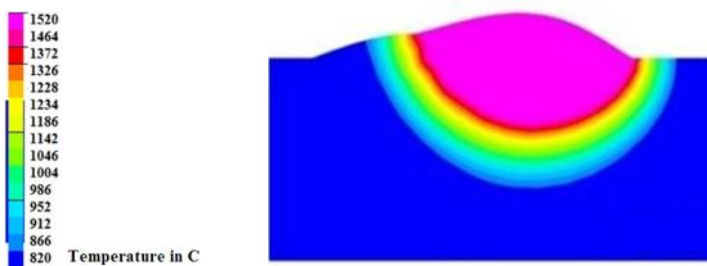
ภาพประกอบ 73 การกระจายตัวอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อมรอบแรกด้วย GTAW



ภาพประกอบ 74 การกระจายตัวอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อมรอบที่สองด้วย SMAW



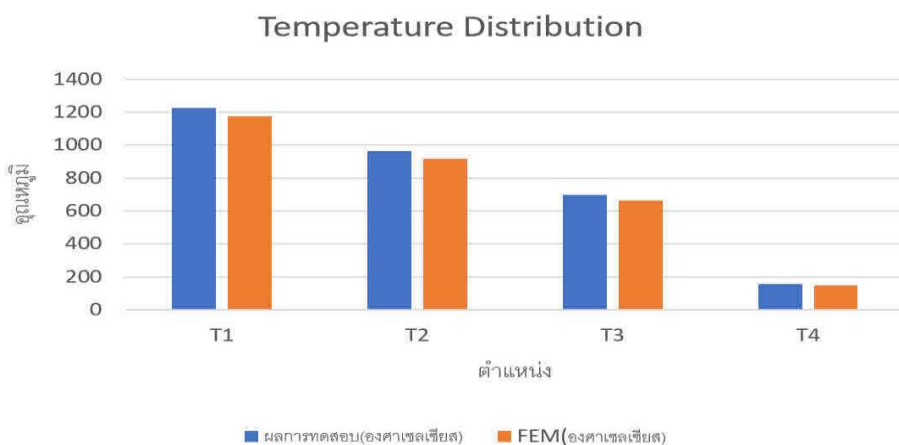
ภาพประกอบ 75 การกระจายตัวอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อมรอบที่สามด้วย SMAW



ภาพประกอบ 76 การกระจายตัวอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อมรอบที่สี่ด้วย SMAW

ตาราง 14 การเปรียบเทียบอุณหภูมิจากผลการทดสอบกับการจำลองด้วย FEM

ตำแหน่ง	ผลการทดสอบ(องศาเซลเซียส)	FEM(องศาเซลเซียส)
T1	1225	1174.1
T2	965	917.97
T3	696	661.81
T4	156	149.49

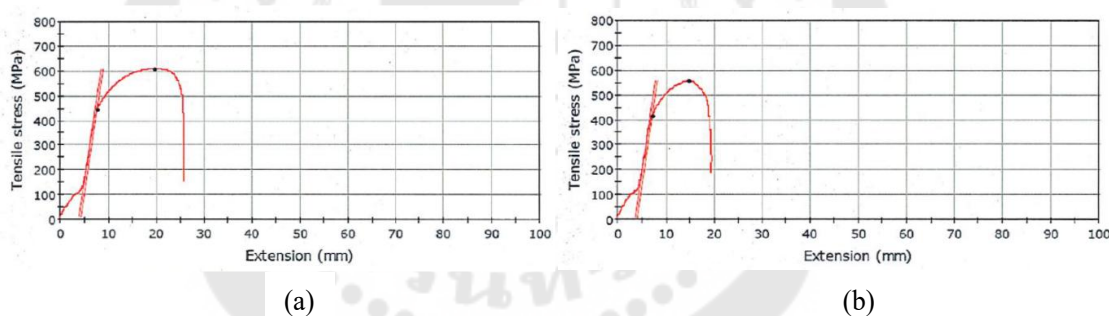


ภาพประกอบ 77 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิจากการทดลองและการจำลองด้วย FEM

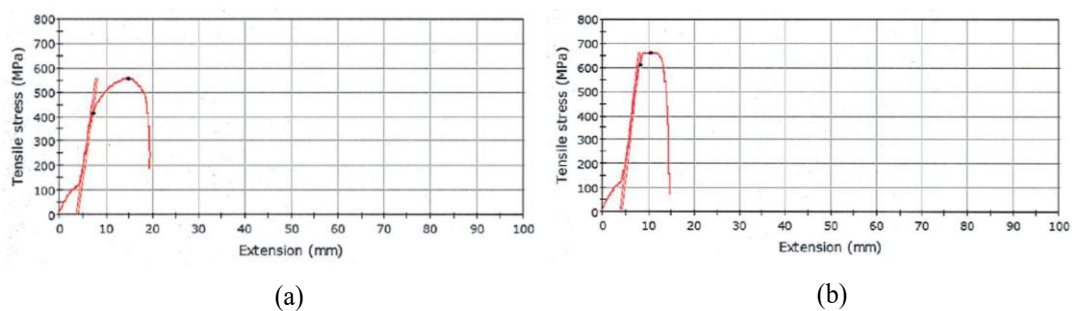
4.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

4.2.1 การทดสอบแรงดึงในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW

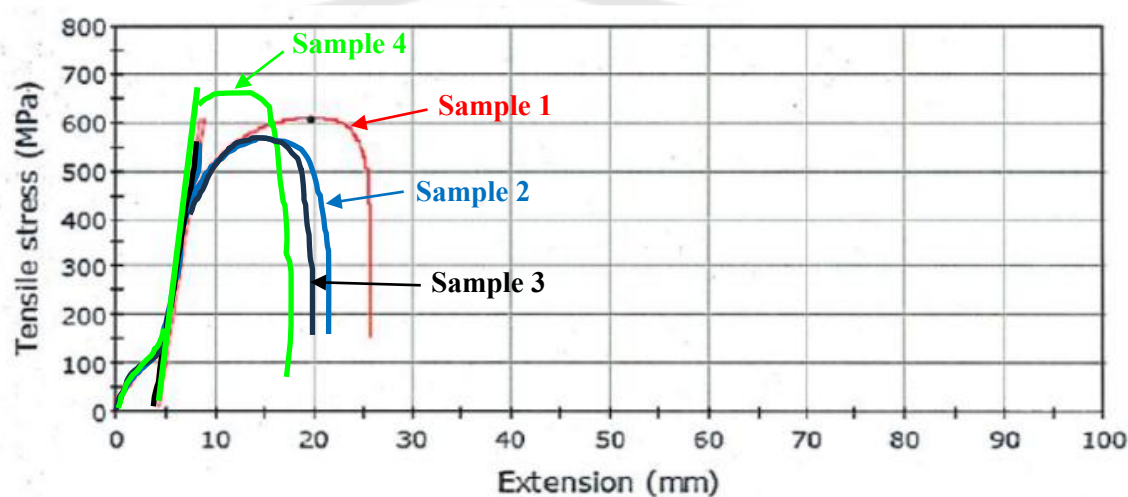
การทดสอบแรงดึงในห้องปฏิบัติการของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้า ผลการทดสอบแรงดึงในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW โดยมีการทดสอบทั้งหมด 4 ชิ้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานตัวอย่างที่ 1 และ 2 ดังแสดงในภาพประกอบ 78 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานตัวอย่างที่ 3 และ 4 ดังแสดงในภาพประกอบ 79 ซึ่งผลของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานเชื่อมตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้นดังแสดงในรูปภาพประกอบ 77 และตาราง 14 พบว่าความเค้นทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการแตกหักจากของชิ้นงานอันเป็นผลจากการทดสอบแรงดึง โดยมีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงคราก (Yield strength = 481.24 MPa) ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength = 613.17 MPa) และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ในการยืดตัว (Percent Elongation = 15%)



ภาพประกอบ 78 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW (a) ชิ้นงานตัวอย่างที่ 1 (b) ชิ้นงานตัวอย่างที่ 2



ภาพประกอบ 79 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW (a) ชิ้นงานตัวอย่างที่ 3 (b) ชิ้นงานตัวอย่างที่ 4



ภาพประกอบ 80 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเฉลี่ย 4 ชิ้น ในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW

ตาราง 15 ผลการทดสอบแรงดึงในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW

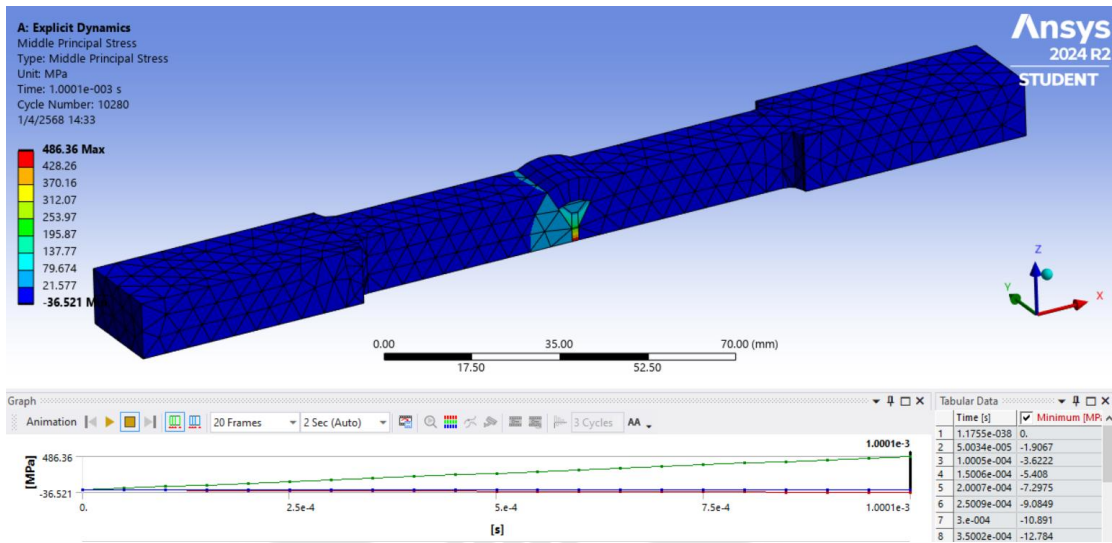
ชิ้นงาน	Yield strength (MPa)	UTS (MPa)	Elongation %	Location of fracture
1	444.24	606.70	13.20	Base material
2	452.42	630.43	18.50	Base material
3	415.84	555.48	13.01	Base material
4	612.45	660.08	15.30	Base material
ค่าเฉลี่ย	481.24	613.17	15.00	



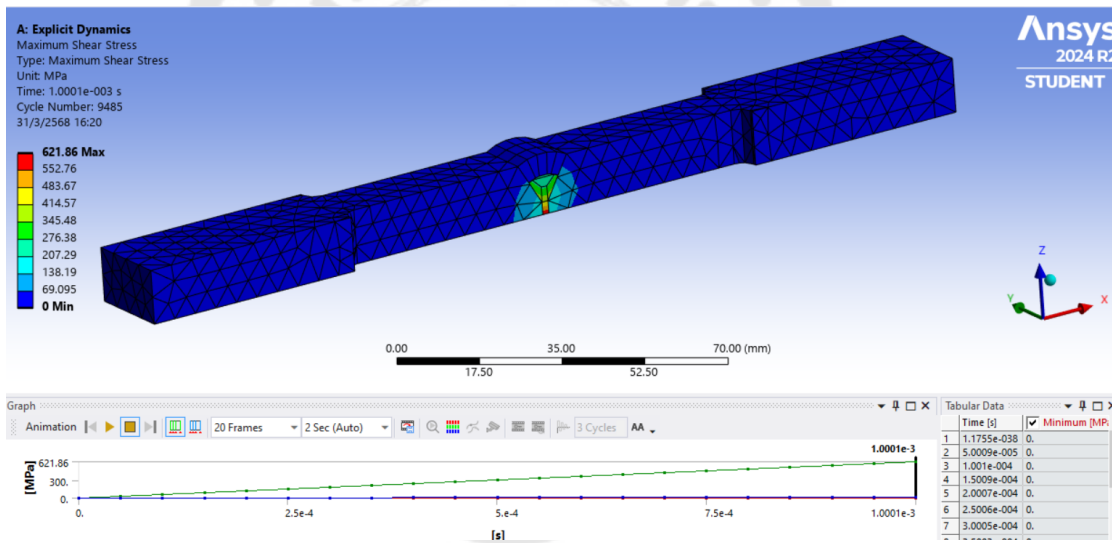
ภาพประกอบ 81 รอยแตกของชิ้นงานทดสอบแรงดึงในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ

GTAW และ SMAW

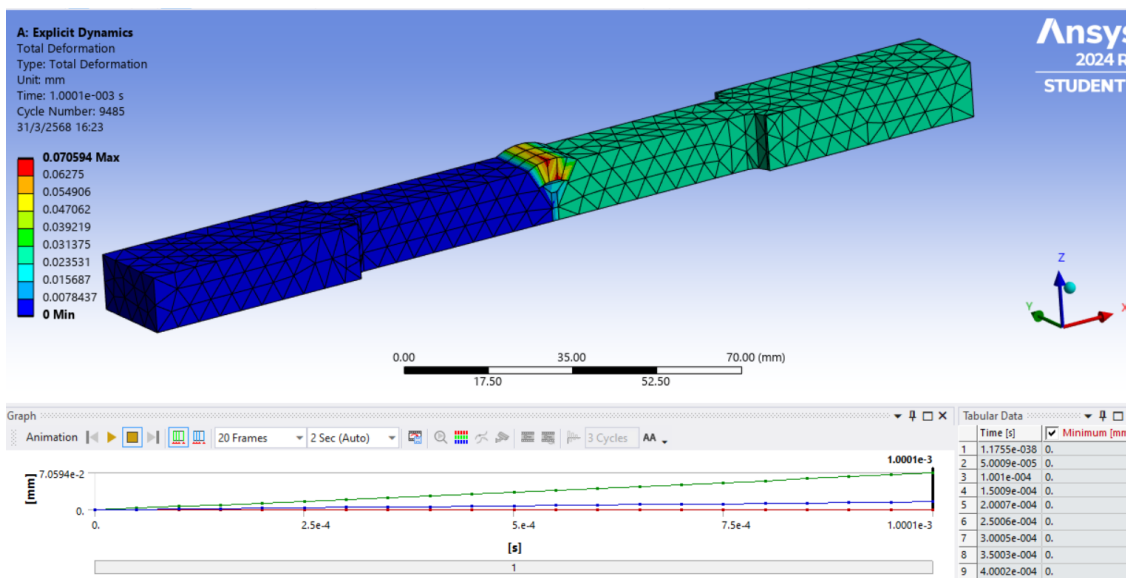
การวิเคราะห์แรงดึงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากชิ้นงานที่มีขนาดและมิติต่างๆ เท่ากัน กับชิ้นงานที่ทดสอบด้วยมาตรฐาน E8/E8M – 22 ซึ่งในการทดลองนี้เลือกใช้เอลิเมนต์แบบ 3 เหลี่ยม ผลการทดลองโดยเลือกไปที่โหมด Explicit dynamics ได้ค่าความเค้นและความเครียดออกมาดังนี้ ข้อมูลในภาพประกอบ 70 ผลที่ได้จากทดลองซึ่งมีค่าเฉลี่ยความเค้นแรงดึงคราก Yield strength เท่ากับ 481.24 MPa และผลที่ได้จากจำลองเชิงตัวเลขได้ค่า Middle principal stress สูงสุดเท่ากับ 486.36 MPa เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทดลองมีค่าความแตกต่างกัน 1.01% ทั้งนี้ในขณะเดียวกันภาพประกอบ 79 ผลที่ได้จากทดลองซึ่งมีค่าเฉลี่ยความเค้นแรงดึงสูงสุด Ultimate tensile strength เท่ากับ 613.17 MPa และผลที่ได้จากจำลองเชิงตัวเลขได้ค่า Maximum stress สูงสุดเท่ากับ 621.86 MPa ซึ่งใช้เทียบกับผลที่ได้จากทดลองมีค่าความแตกต่างในการทดลองทั้ง 2 แบบคือมีความแตกต่างกัน 1.42% และภาพประกอบ 80 เป็นค่าความเครียด Total deformation สูงสุดเท่ากับ 0.070594 mm



ภาพประกอบ 82 ค่าความเค้นของ Middle principal stress สูงสุดเท่ากับ 486.36 MPa



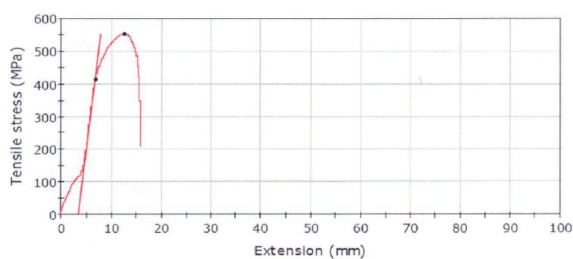
ภาพประกอบ 83 ค่าความเค้นของ Maximum stress สูงสุดเท่ากับ 621.86 MPa



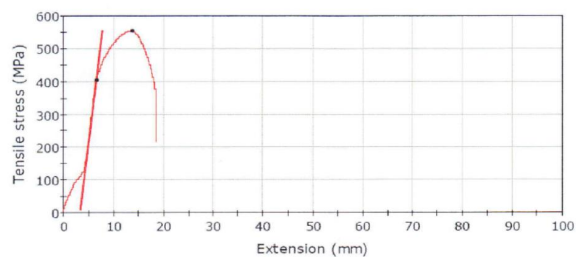
ภาพประกอบ 84 ค่าความเครียด Total deformation สูงสุดเท่ากับ 0.070594 mm

4.2.2 การทดสอบแรงดึงในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW โดยมีการเจาะรีในบริเวณแนวเชื่อม

ผลการทดสอบแรงดึงในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW โดยมีการเจาะรีในบริเวณแนวเชื่อม ซึ่งมีการทดสอบทั้งหมด 4 ชิ้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานตัวอย่างที่ 1 และ 2 ดังแสดงในภาพประกอบ 81 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานตัวอย่างที่ 3 และ 4 ดังแสดงในภาพประกอบ 82 ซึ่งผลของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานเชื่อมตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้นดังแสดงในภาพประกอบ 83 และตาราง 15 พบว่าความเค้นทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการแตกหักจากของชิ้นงานอันเป็นผลจากการทดสอบแรงดึง โดยมีค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงคราก (Yield strength = 407.30 MPa) ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength = 524.35 MPa) และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ในการยืดตัว (Percent Elongation = 14.80%) อย่างไรก็ตามยังตรวจพบว่าการแตกหักทั้งหมดเกิดขึ้นในบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal zone) ดังแสดงในภาพประกอบ 84

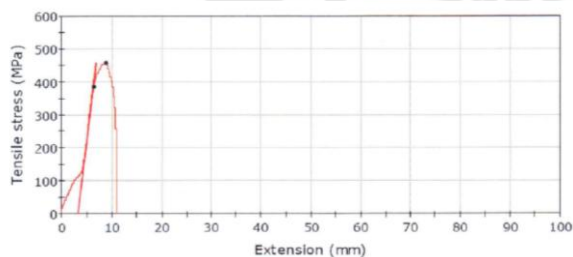


(a)

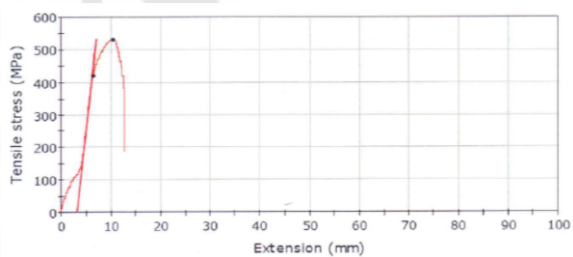


(b)

ภาพประกอบ 85 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW มีการเจริญในแนวเชื่อม (a) ชิ้นงานตัวอย่างที่ 1 (b) ชิ้นงานตัวอย่างที่ 2

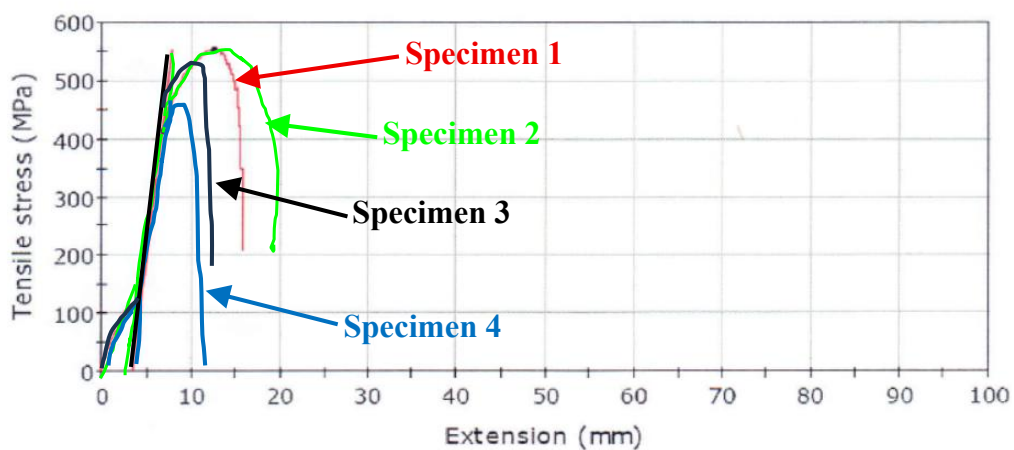


(a)



(b)

ภาพประกอบ 86 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW มีการเจริญในแนวเชื่อม (a) ชิ้นงานตัวอย่างที่ 3 (b) ชิ้นงานตัวอย่างที่ 4



ภาพประกอบ 87 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเฉลี่ย 4 ชั้น ในชิ้นงาน ตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW โดยมีการเจาะรูในแนวเชื่อม

ตาราง 16 ผลการทดสอบแรงดึงของแนวเชื่อมไฮบริด GTAW และ SMAW มีการเจาะรูในแนวเชื่อม

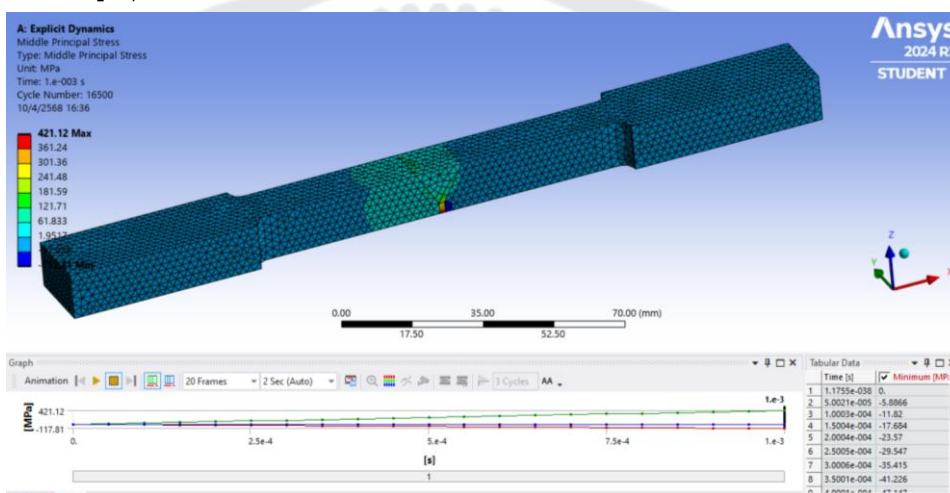
ชั้นงาน	Yield strength (MPa)	UTS (MPa)	Elongation %	Location of fracture
1	414.65	554.03	15.30	Weld metal
2	405.32	554.64	19.50	Weld metal
3	387.06	458.60	11.20	Weld metal
4	422.17	530.13	13.20	Weld metal
ค่าเฉลี่ย	407.30	524.35	14.80	Weld metal

ชิ้นงานหลังทดสอบ

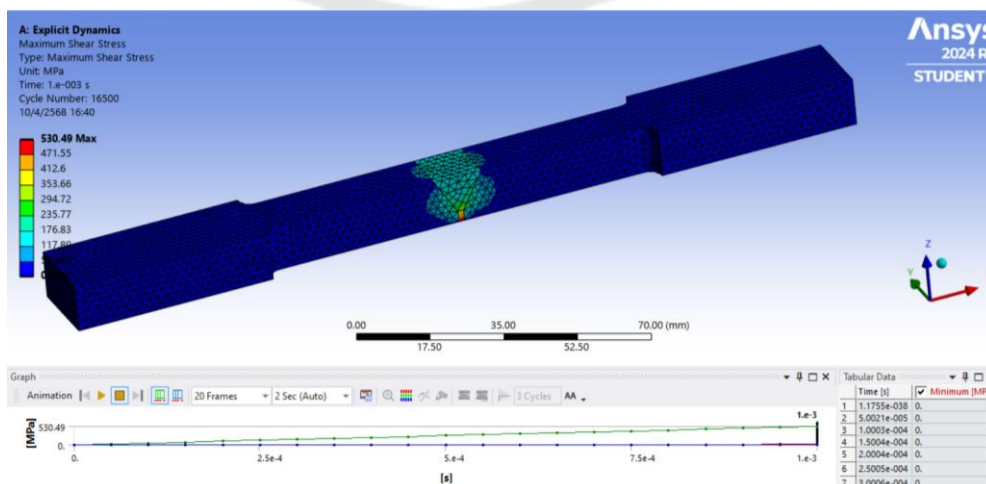


ภาพประกอบ 88 รอยแตกของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของแนวเชื่อมไฮบริดที่มีการเจาะรูในแนวเชื่อม

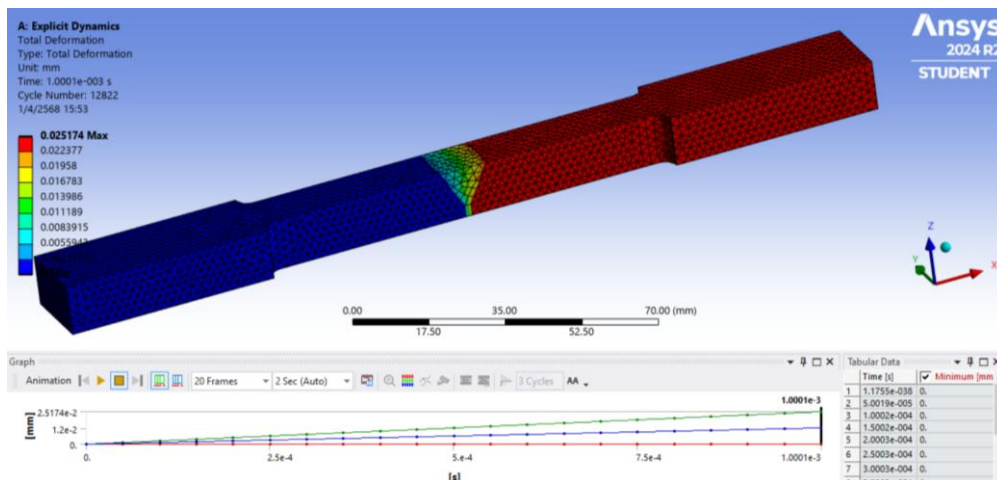
พร้อมกันนี้ได้มีการทดสอบแรงดึงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากชิ้นงาน ได้ค่าความเค้นและความเครียดออกมาดังนี้ ข้อมูลในภาพประกอบ 85 ผลที่ได้จากทดลองซึ่งมีค่าเฉลี่ยความเค้นแรงดึงคราก Yield strength เท่ากับ 407.30 MPa และผลที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขได้ค่า Middle principal stress สูงสุดเท่ากับ 421.12 MPa เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทดลองมีความแตกต่างกัน 3.39% ในทำนองเดียวกันข้อมูลในภาพประกอบ 86 ผลที่ได้จากทดลองซึ่งมีค่าเฉลี่ยความเค้นแรงดึงสูงสุด Ultimate tensile strength เท่ากับ 524.35 MPa และผลที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขได้ค่า Maximum stress สูงสุดเท่ากับ 530.49 MPa เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทดลองมีความแตกต่างกัน 1.17% และภาพประกอบ 87 เป็นค่าความเครียด Total deformation สูงสุดเท่ากับ 0.025174 mm



ภาพประกอบ 89 ค่าความเค้นของ Middle principal stress สูงสุดเท่ากับ 421.12 MPa



ภาพประกอบ 90 ค่าความเค้นของ Maximum shear stress สูงสุดเท่ากับ 530.49 MPa

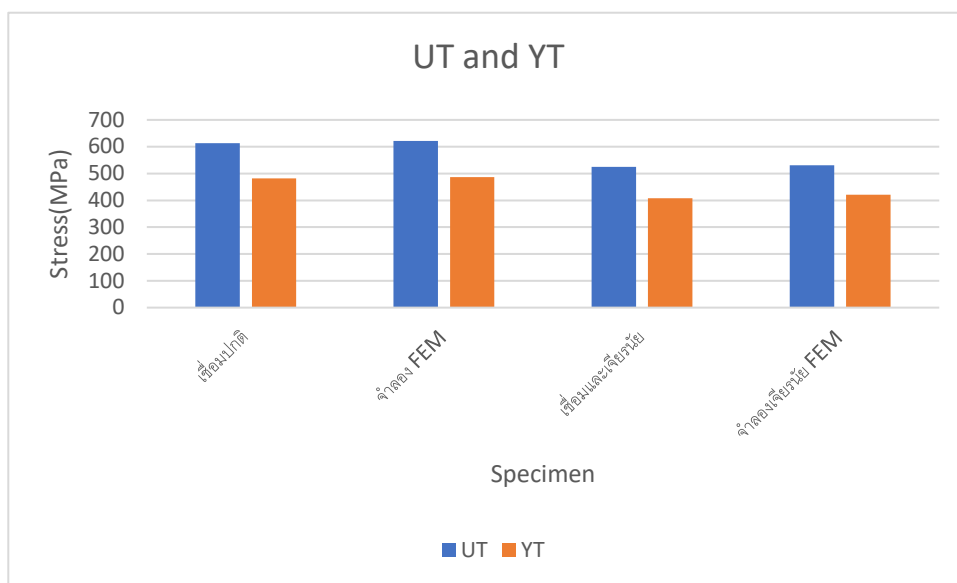


ภาพประกอบ 91 ค่าความเครียด Total deformation สูงสุดเท่ากับ 0.025174 mm

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงดังแสดงในตาราง 14 และ 15 ข้อกำหนดเดียวที่กำหนดไว้สำหรับรอยเชื่อมตามมาตรฐานการต่อเรือสำหรับคุณสมบัติกระบวนการเชื่อมคือ ความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด (UTS) จะต้องสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้สำหรับโลหะฐาน (Base metal) ดังนั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับโลหะฐาน (Base metal) คือ ความแข็งแรงแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมคือ ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงคราก (Yield strength = 481.24 MPa) ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength = 613.17 MPa) และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ในการยืดตัว (Percent Elongation = 15%) และความแข็งแรงแรงดึงของโลหะฐาน (Base metal) คือ ความต้านทานแรงดึงคราก (Yield strength = 418 MPa) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength = 582 MPa) และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ในการยืดตัว (Percent Elongation = 29%)

ตาราง 17 แสดงผลเปรียบเทียบความเค้น

ชิ้นงานทดสอบ	Tensile Strength(MPa)	Yield Strength(MPa)
เชื่อมปกติ	613.17	481.24
จำลอง FEM	621.86	486.36
เชื่อมและเจียรนัย	524.35	407.30
จำลองเจียรนัย FEM	530.49	421.12



ภาพประกอบ 92 เปรียบเทียบค่า UT และ YT ของชิ้นงานสี่รูปแบบ

4.3 การทดสอบการดัดโค้ง (Bending test)

การตรวจสอบการเสียหายจากการทดสอบการดัดโค้ง (Bend Testing) ในบริเวณการเชื่อมสามารถใช้การตรวจสอบด้วยสายตาได้จริง โดยการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) เป็นขั้นตอนที่มักจะทำควบคู่กับหรือตามหลังการทดสอบการดัดโค้ง เพื่อดูว่ามีรอยแตก รอยร้าว หรือความเสียหายอื่น ๆ บนพื้นผิวของชิ้นงานที่เกิดจากการดัดโค้งหรือไม่

Visual inspection ถือเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing - NDT) ที่ง่ายและรวดเร็วที่สุด สามารถตรวจสอบความเสียหายบนพื้นผิว เช่น รอยแตก ร้าว ความไม่ต่อเนื่องของการเชื่อมในระดับพื้นผิว ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยผู้ตรวจสอบที่มีความชำนาญและประสบการณ์สูงเพื่อให้ได้ผลการตรวจสอบที่แม่นยำ

ผู้วิจัยและผู้เชี่ยวชาญด้านการตรวจสอบงานเชื่อม เช่น ในบทความของ ESAB University และแหล่งข้อมูลอื่น ๆ ได้กล่าวว่า การตรวจสอบการดัดโค้งในงานเชื่อม โดยเฉพาะการตรวจสอบหลังการทดสอบดัดโค้ง จะมีการตรวจสอบด้วยสายตาเพื่อหาข้อบกพร่องที่ปรากฏบนผิว เช่น รอยแตก (cracks) หรือการเสียรูปของบริเวณการเชื่อม

ดังนั้น การใช้การตรวจสอบด้วยสายตาในบริเวณที่ถูกทดสอบดัดโค้งเป็นวิธีที่มีประโยชน์และได้รับการยอมรับในวงการเชื่อม โดยทำหน้าที่เป็นวิธีคัดกรองเบื้องต้น หากพบข้อบกพร่อง

ชัดเจน อาจต้องเสริมด้วยการทดสอบแบบไม่ทำลายหรือทำลายเพิ่มเติมเพื่อการวิเคราะห์ที่ละเอียดมากขึ้น

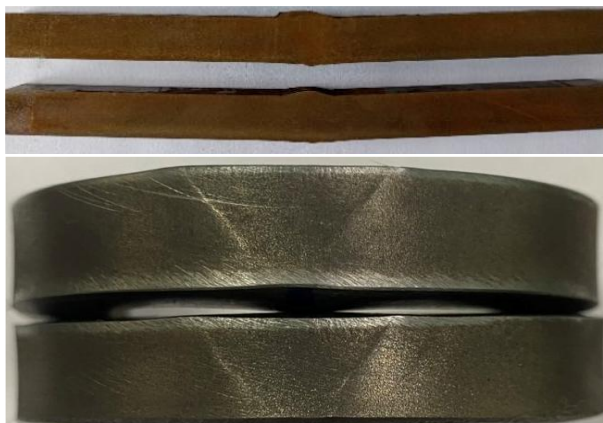
สรุปก็คือ การตรวจสอบการเสียหายจากการทดสอบการดัดโค้งในบริเวณการเชื่อมสามารถใช้วิธีการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) ได้ และเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีงานวิจัยรับรอง เช่น งานของ ESAB University และแหล่งข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจสอบงานเชื่อมที่มีความน่าเชื่อถือ.

4.3.1 การทดสอบการดัดโค้งในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW

ผลการทดสอบการดัดโค้งที่ได้จากชิ้นงานการทดสอบการดัดโค้งทั้ง 3 ด้าน คือ Side bend, Face bend และ Root bend โดยแบ่งเป็นด้านละ 2 ชิ้น เมื่อทำการดัดจนถึงมุมโค้ง 180° ดังในตาราง 16 และภาพประกอบ 89 เป็นรูปตัวอย่างชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ Side bend เมื่อทำการตรวจสอบด้วยสายตาไม่พบรอยร้าวของชิ้นงานตัวอย่าง ภาพประกอบ 90 เป็นรูปตัวอย่างชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ Face bend เมื่อทำการตรวจสอบด้วยสายตาไม่พบรอยร้าวของชิ้นงานตัวอย่าง ภาพประกอบ 91 เป็นรูปตัวอย่างชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ Root bend เมื่อทำการตรวจสอบด้วยสายตาไม่พบรอยร้าวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ สรุปได้ว่ากระบวนการเชื่อมในชิ้นงานทั้งหมดนี้มีคุณภาพสูง

ตาราง 18 ผลการทดสอบการดัดโค้งในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW

ชิ้นงาน	Type of Bend	Mandrel Diameter (mm)	Bend Angle (degree)	Visually examined result for surface discontinuity
1	Side bend	40	180°	No Surface Discontinuity
2		40	180°	No Surface Discontinuity
3	Face bend	40	180°	No Surface Discontinuity
4		40	180°	No Surface Discontinuity
5	Root bend	40	180°	No Surface Discontinuity
6		40	180°	No Surface Discontinuity



ภาพประกอบ 93 ผลการทดสอบการดัดโค้ง (Side bend) ของการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW



ภาพประกอบ 94 ผลการทดสอบการดัดโค้ง (Face bend) ของการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW

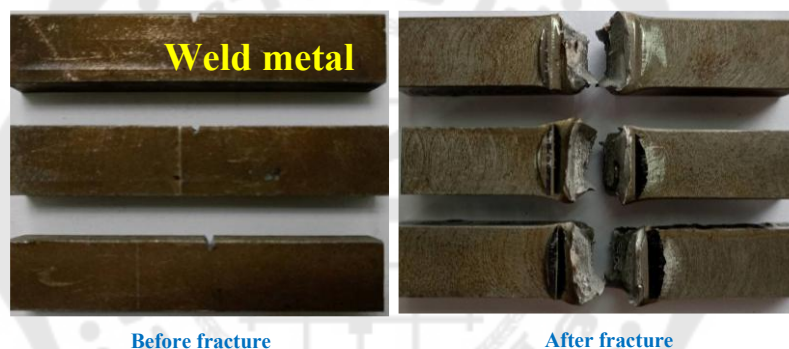


ภาพประกอบ 95 ผลการทดสอบการดัดโค้ง (Root bend) ของการเชื่อมแบบ GTAW และ SMAW

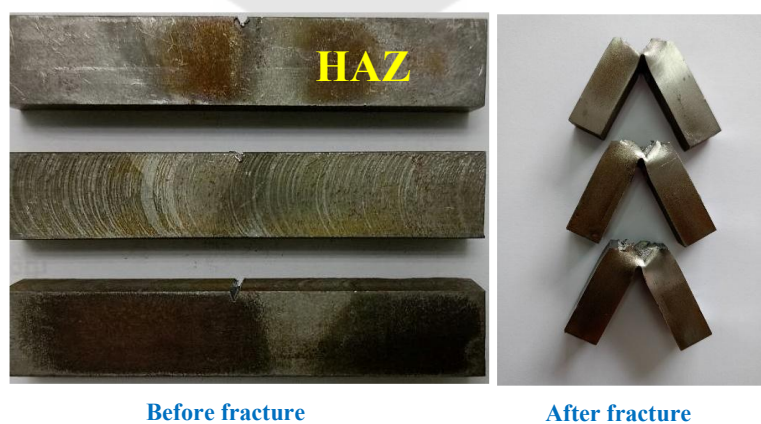
4.4 การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact Test)

4.4.1 การทดสอบแรงกระแทกในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด

ผลการทดสอบแรงกระแทกพบว่าลักษณะการแตกหักของชิ้นงานบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) ก่อนและหลังการทดสอบแบบชาร์ปีดังแสดงในภาพประกอบ 92 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ก่อนและหลังการทดสอบแบบชาร์ปีดังแสดงในภาพประกอบ 93 และปริมาณพลังงานดูดซับของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแบบชาร์ปีทั้งหมดในตารางที่ 17 จะเห็นได้ว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระทบร้อน HAZ มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 256.57 J ในขณะที่พลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 184.34 J สรุปได้ว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระทบร้อน HAZ มีความเหนียวที่ดีกว่าบริเวณบริเวณแนวเชื่อม



ภาพประกอบ 96 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) ภายหลังจากการทดสอบแรงกระแทกในชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW



ภาพประกอบ 97 ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ภายหลังจากการทดสอบแรงกระแทกในชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW

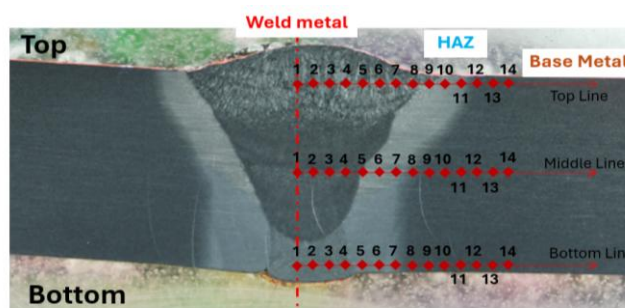
ตาราง 19 ผลการทดสอบแรงกระแทกในชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW

ชิ้นงาน	Location of Charpy V-Notch	Absorbed energy (J)	
		Individual	Average
1		146.44	
2	Weld metal	211.56	184.34
3		195.03	
4		305.56	
5	HAZ	159.29	256.57
6		304.87	

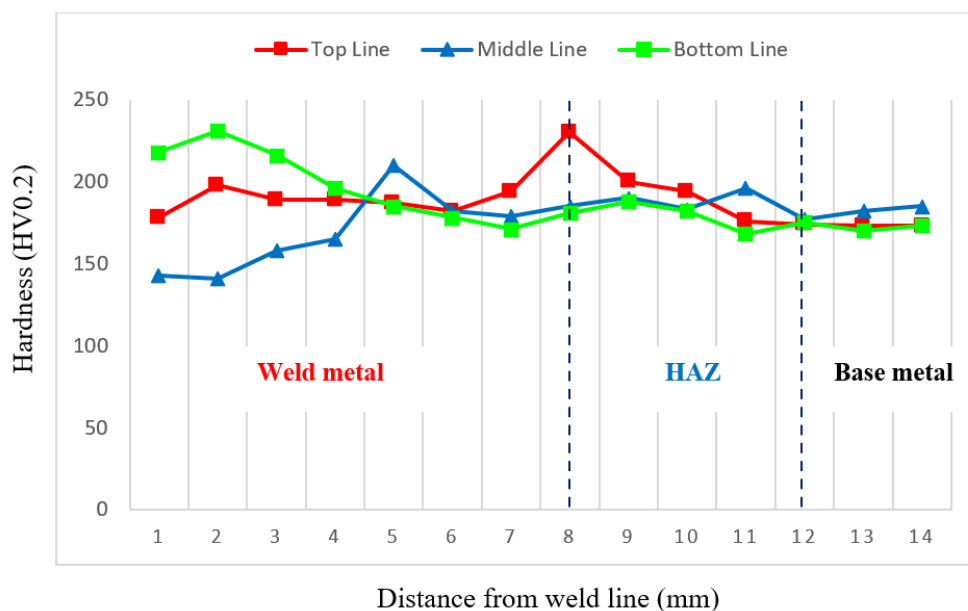
4.5 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

4.5.1 การทดสอบความแข็งในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW

ตำแหน่งบริเวณจุดทดสอบของรอยเชื่อมเหล็กกล้า TMCP เกรด EH36 ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW ดังแสดงในภาพประกอบ 94 โปรไฟล์ความแข็งของรอยเชื่อมแบ่งออกเป็น 3 โซน มีตำแหน่งของบริเวณจุดทดสอบแต่ละโซน 14 จุด รวมทั้งหมด 42 ได้แก่ แนวทดสอบด้านบน (Top line) แนวทดสอบตรงกลาง (Middle line) แนวทดสอบด้านล่าง (Bottom line)



ภาพประกอบ 98 บริเวณตำแหน่งจุดทดสอบทั้ง 14 จุดของกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW



ภาพประกอบ 99 ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ของกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด

GTAW-SMAW

โปรไฟล์ของการทดสอบความแข็งด้วยกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW ดังแสดงในภาพประกอบ 95 ในแนวทดสอบด้านบนบนเส้นสีแดง (Top line) แนวโน้มของค่าความแข็งในแต่ละบริเวณจุดทดสอบทั้ง 14 จุด พบว่ามีค่าความแข็งมากที่สุดในจุดที่ 8 บริเวณอิทธิพลทางความร้อน HAZ 1 (SMAW) เท่ากับ 230 HV และค่าความแข็งต่ำที่สุดคือจุดที่ 14 บริเวณโลหะฐาน Base metal มีค่าเท่ากับ 173 HV จากตำแหน่งจุดทดสอบที่ 8 - 12 (HAZ) จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าบริเวณแนวเชื่อมเล็กน้อย (WM) แต่ตำแหน่งจุดทดสอบที่ 1 - 8 (WM) จะมีค่าความแข็งที่มากกว่าตำแหน่งจุดทดสอบที่ 12 - 14 บริเวณโลหะฐานเล็กน้อย (Base metal)

แนวทดสอบตรงกลางเส้นสีน้ำเงิน (Middle line) พบว่ามีค่าความแข็งมากที่สุดในจุดที่ 5 บริเวณอิทธิพลทางความร้อน HAZ (SMAW) เท่ากับ 210 HV และค่าความแข็งต่ำที่สุดคือจุดที่ 2 บริเวณแนวเชื่อม Weld metal เท่ากับ 141 HV จากตำแหน่งจุดทดสอบที่ 5 - 8 (HAZ) จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าตำแหน่งจุดทดสอบที่ 8 - 14 บริเวณโลหะฐานเล็กน้อย (Base metal) แต่จะมีค่าความแข็งที่มากกว่าตำแหน่งจุดทดสอบที่ 1 - 5 บริเวณแนวเชื่อมเล็กน้อย (WM)

แนวทดสอบด้านล่างเส้นสีเขียว (Bottom line) พบว่ามีค่าความแข็งมากที่สุดในจุดที่ 2 บริเวณแนวเชื่อม Weld metal เท่ากับ 231 HV และค่าความแข็งต่ำที่สุดคือจุดที่ 11 บริเวณโลหะฐาน Base metal มีค่าเท่ากับ 168 HV จากตำแหน่งจุดทดสอบที่ 1 - 4 บริเวณแนว

เชื่อม (WM) จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าบริเวณอิทธิพลทางความร้อนเล็กน้อย HAZ (GTAW) แต่ตำแหน่งจุดทดสอบที่ 4 – 8 จะมีค่าความแข็งที่มากกว่าตำแหน่งจุดทดสอบที่ 8 – 14 บริเวณโลหะฐานเล็กน้อย (Base metal)

จากการทดสอบพบว่าบริเวณแนวเชื่อมเมื่อได้รับความร้อนจากการเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นโครงสร้างของแข็งจึงส่งผลต่อค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น และกระบวนการเชื่อมบริเวณอิทธิพลทางความร้อนที่อยู่ติดกับบริเวณโลหะงานจะมีค่าความแข็งที่น้อยกว่าบริเวณเนื้อเชื่อมแต่จะมากกว่าบริเวณเนื้อโลหะฐาน

4.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

โดยปกติในการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในบริเวณ Base Metal (BM), Heat Affected Zone (HAZ), และ Fusion Zone (FZ) มักจะใช้ชิ้นทดสอบเพียงชิ้นเดียวในแต่ละโซนเพื่อความแม่นยำและเพื่อเปรียบเทียบลักษณะจุลภาคในแต่ละบริเวณได้อย่างชัดเจน วิธีนี้เป็นที่ยอมรับในงานวิจัยหลายชิ้นเกี่ยวกับการวิเคราะห์โครงสร้างโลหะในเขตต่าง ๆ ของชิ้นงานเชื่อม เช่น งานศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลใน DP780 steel ที่ได้รับการเชื่อม TIG ซึ่งมีการแยกการทดลองโดยใช้ตัวอย่างเดียวเพื่อศึกษาลักษณะของ BM, HAZ และ FZ อย่างละเอียดโดย อ้างอิงผลงานของ Gopi Krishna et al. (2023) ที่ได้วิเคราะห์อย่างละเอียดถึงโครงสร้างและคุณสมบัติในแต่ละโซน

นอกจากนี้ งานศึกษาของ Queiroz et al. (2017) ก็ได้ใช้ชิ้นทดสอบเดี่ยวแบบ bead-on-plate เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในแต่ละโซนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304L หลังจากการเชื่อมด้วยกระบวนการ GMAW โดยรายงานถึงความแตกต่างในโครงสร้างและความแข็งในแต่ละโซน HAZ, FZ และ BM

การใช้ชิ้นทดสอบเดี่ยวในแต่ละโซน BM, HAZ และ FZ เป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการศึกษาทางโลหะวิทยาเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคในแต่ละโซนของชิ้นงานเชื่อม และมีผลงานวิจัยที่สามารถอ้างอิงได้ เช่น งานของ Gopi Krishna et al. (2023) และ Queiroz et al. (2017)

4.6.1 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กแผ่น EH36

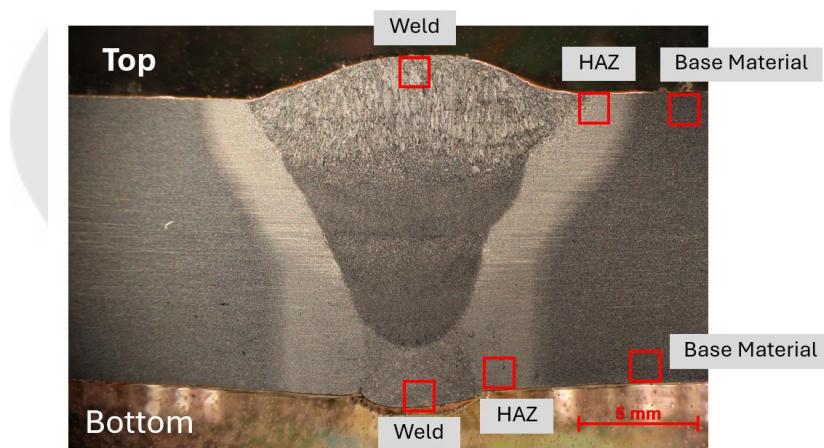
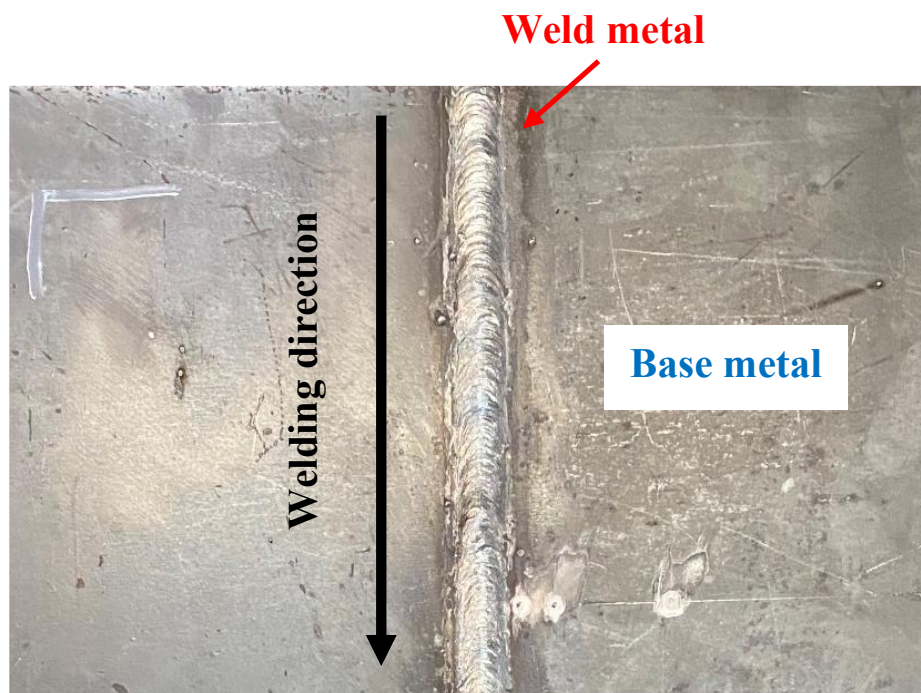
การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กแผ่นเกรด EH36 ค่าเฉลี่ยที่ได้เป็นเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมทางเคมีของวัสดุตั้งแสดงในตาราง 18

ตาราง 20 ผลการตรวจสอบทางเคมีของเหล็กแผ่น EH36 (%wt)

Element	C	Si	Mn	P	S	V	Al
Wt%	0.144	0.326	1.40	0.0152	0.0067	0.024	0.047
Element	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	
Wt%	<0.005	0.01	0.006	0.027	0.006	0.011	

4.6.2 การตรวจสอบทางกายภาพ

ผลการตรวจสอบทางกายภาพ ลักษณะทางกายภาพของรูปร่างแนวเชื่อมแสดงดังภาพประกอบ 96 การเกิดเม็ดโลหะบริเวณของ ชิ้นงาน ลักษณะผิวหน้าของแนวเชื่อม การซึมลึก การหลอมละลาย ระหว่างชั้นของเนื้อเชื่อมกับโลหะงาน ความกว้างบริเวณเขตอิทธิพลทางความร้อน และจุดบกพร่องของแนวเชื่อม พบว่ากระบวนการเชื่อมไฮบริด GTAW-SMAW เกิดแนวเชื่อมมีความเรียบสม่ำเสมอ ลักษณะการซึมลึกและการหลอมละลายระหว่างเนื้อเชื่อมกับโลหะงานสม่ำเสมอ และมีความสมบูรณ์ระหว่างเนื้อเชื่อมและโลหะงาน ความกว้างของเขตบริเวณอิทธิพลทางความร้อนของกระบวนการเชื่อมใกล้เคียงกัน และไม่มีจุดบกพร่องของแนวเชื่อม

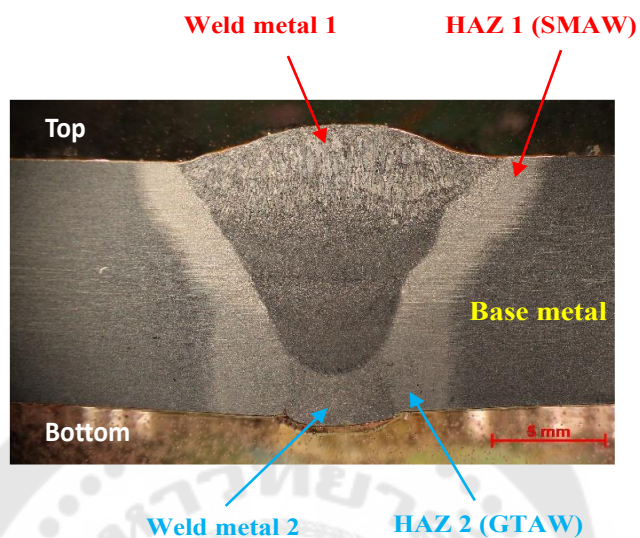


ภาพประกอบ 100 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างมหภาค

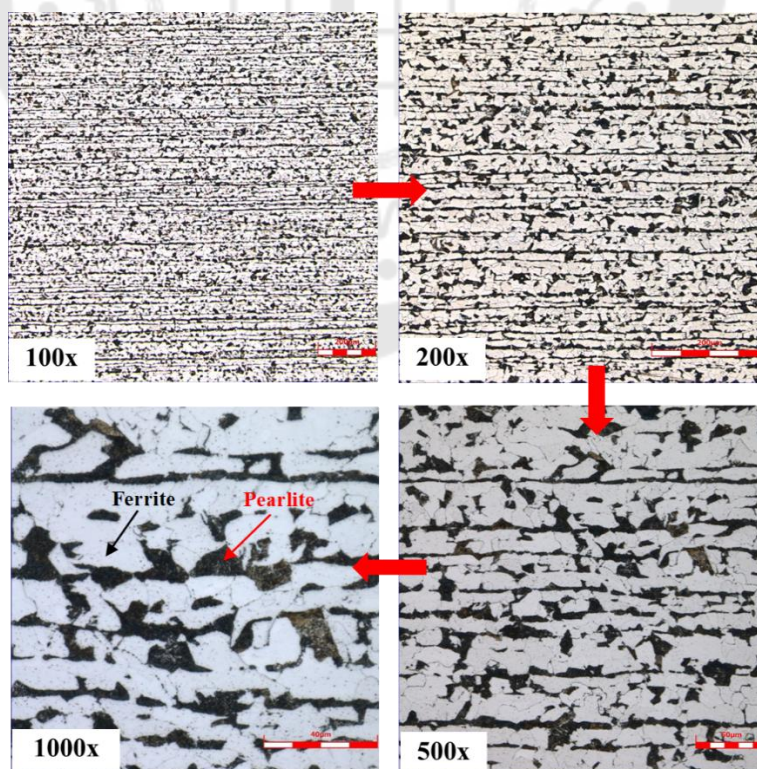
4.6.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคในชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW และ SMAW

การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ลำแสงเลเซอร์แบบสามมิติ ภาพประกอบ 97 จะเป็นภาพตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบทั้ง 5 จุด ภาพประกอบ 98 เป็นภาพบริเวณเนื้อโลหะฐานของเหล็กกล้า EH36 (Base metal) โครงสร้างจุลภาคมีส่วนประกอบของเฟอไรต์ (สีขาว) 82.23% และเพิร์ลไลต์ (สีดำ) 17.77% ภาพประกอบ 99 เป็นภาพบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน HAZ1 (SMAW) โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยโครงสร้างเพิลไลต์ (Pearlite)

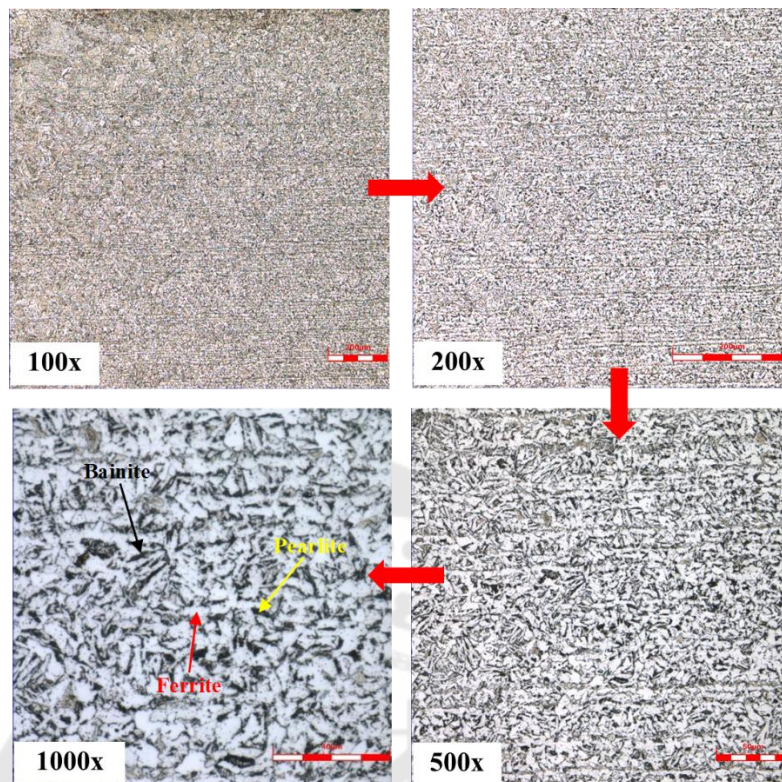
เฟอร์ไรต์ (Ferrite) และ เบนไนต์ (Bainite) โดยโครงสร้างเฟอร์ไรต์คือเฟสที่เกิดขึ้นเป็นลำดับแรก ส่วนเพิร์ลไลต์และเบนไนต์คือเฟสที่เกิดขึ้นลำดับที่สอง



ภาพประกอบ 101 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของรอยเชื่อมเหล็กกล้า TMCP เกรด EH36 ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW



ภาพประกอบ 102 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณเนื้อโลหะฐานของเหล็กกล้า EH36 (Base metal)

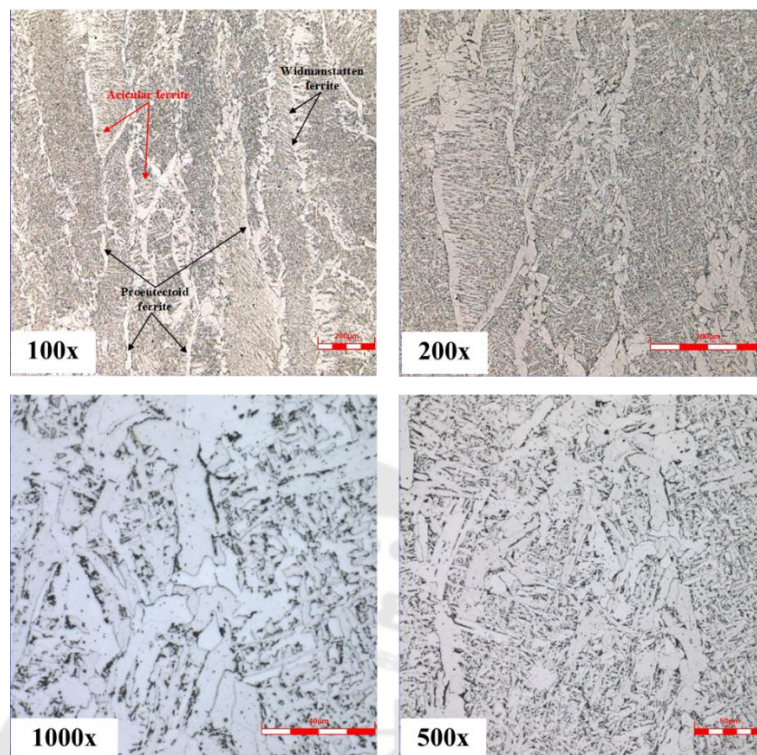


ภาพประกอบ 103 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน HAZ1 (SMAW)

ภาพประกอบ 100 แสดงโครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อม Weld metal 1 (SMAW) โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อเชื่อมประกอบด้วยโครงสร้างอะซิคูลาร์เฟอไรต์ (Acicular ferrite: AF) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีโครงสร้างโพลีโกนอลเฟอไรต์ (Polygonal ferrite; PF (I)) อยู่ในเกรน และโครงสร้างโปรยูเทคตอยด์ เฟอไรต์ (Proeutectoid ferrite (PF)) พร้อมกันนี้ยังมีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectroscopy) ผลของการทดสอบพบว่าปริมาณธาตุโดยส่วนใหญ่เป็นส่วนประกอบของลวดเชื่อมที่มีธาตุแมงกานีส (Mn) มากที่สุด ส่วนธาตุอื่นๆ จะมีรายละเอียดดังแสดงในตาราง 21

ตาราง 21 ผลการตรวจสอบทางเคมีของบริเวณแนวเชื่อม Weld metal 1 (SMAW) (%wt)

Element	C	Si	Mn	P	S	V	Al
Wt%	0.16	1.18	1.94	0.016	0.005	0.012	0.048
Element	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	
Wt%	<0.005	<0.005	< 0.003	0.012	0.009	0.055	

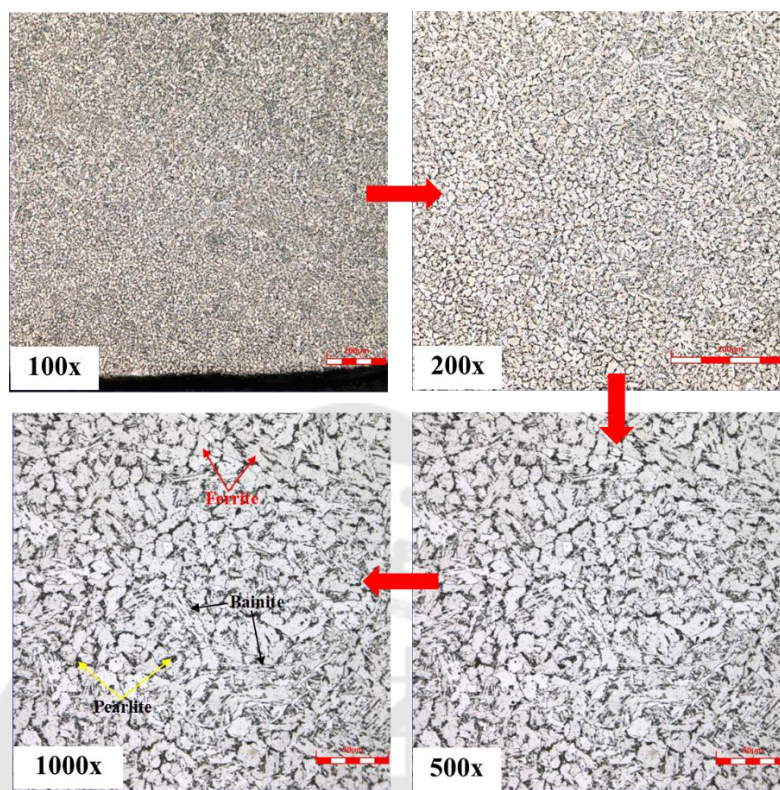


ภาพประกอบ 104 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมอาร์กอีเล็คโตรดหุ้มฟลักซ์
Weld metal 1 (SMAW)

ภาพประกอบ 101 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อม Weld metal 2 ที่เชื่อมแบบ GTAW และเชื่อมทับด้วย SMAW ประกอบด้วยโครงสร้างเพิลไลต์ (Pearlite) เฟอไรต์ (Ferrite) และ เบนไนต์ (Bainite) พร้อมกันนี้ยังมีการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectroscopy) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลของการทดสอบ พบว่ามีปริมาณธาตุโดยส่วนใหญ่เป็นส่วนประกอบของลวดเชื่อมที่มีธาตุแมงกานีส (Mn) มากที่สุด ส่วนธาตุอื่นๆ จะมีรายละเอียดดังแสดงในตาราง 22

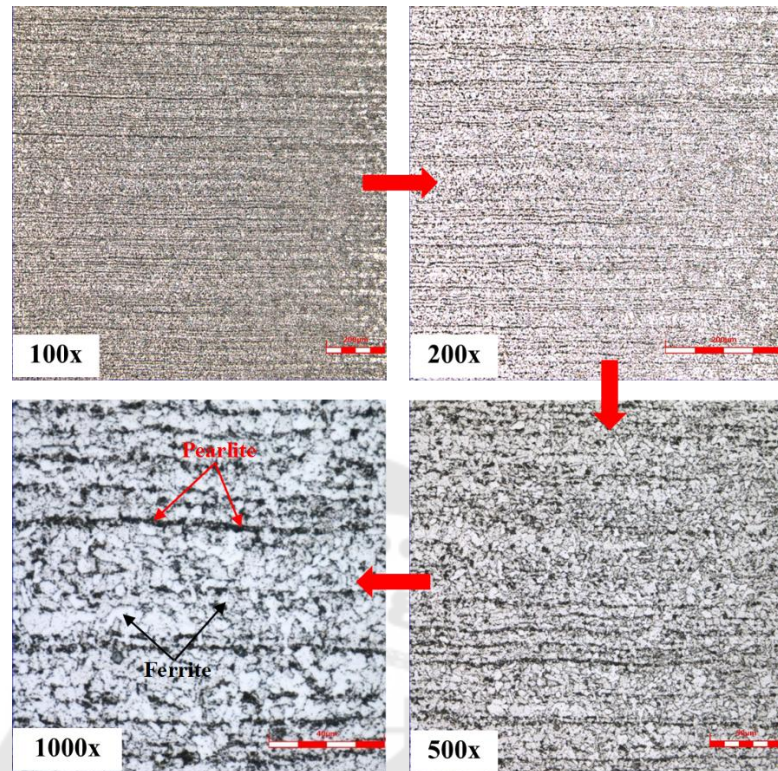
ตาราง 22 ผลการตรวจสอบทางเคมีของบริเวณแนวเชื่อม Weld metal 2 (GTAW+SMAW)
(%wt)

Element	C	Si	Mn	P	V	Al	Cr
Wt%	0.15	0.25	0.50	0.01	0.28	0.05	0.30
Element	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	Co	
Wt%	0.02	0.05	0.01	0.02	0.35	0.35	



ภาพประกอบ 105 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อมด้วยวิธีก๊าซทังสเตนอาร์ค Weld metal 2 (GTAW) และเชื่อมทับด้วย SMAW

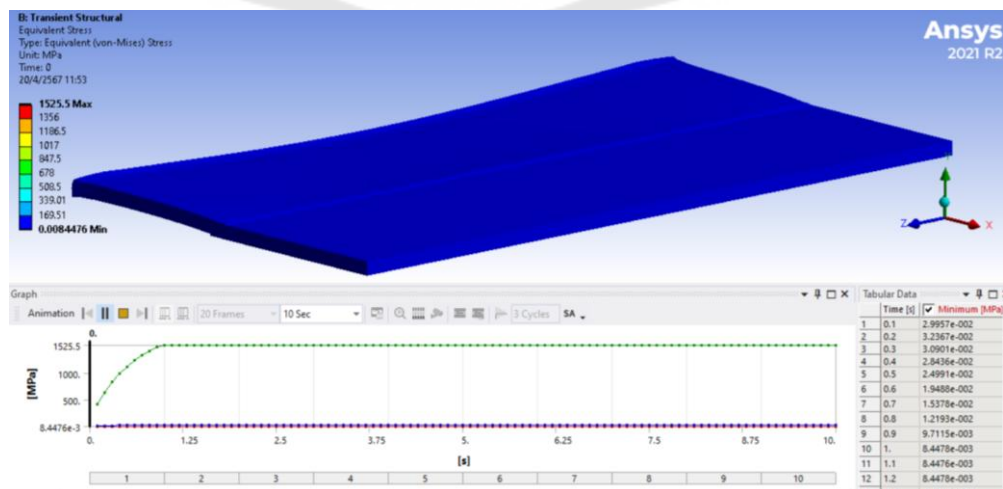
ภาพประกอบ 102 เป็นภาพบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน HAZ 2 (GTAW) โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (สีขาว) 78.24% และ เพิลไลต์ (สีดำ) 21.76% มีลักษณะเกรนที่เล็กละเอียด



ภาพประกอบ 106 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวพื้นที่กระทบร้อน HAZ 2 (GTAW)

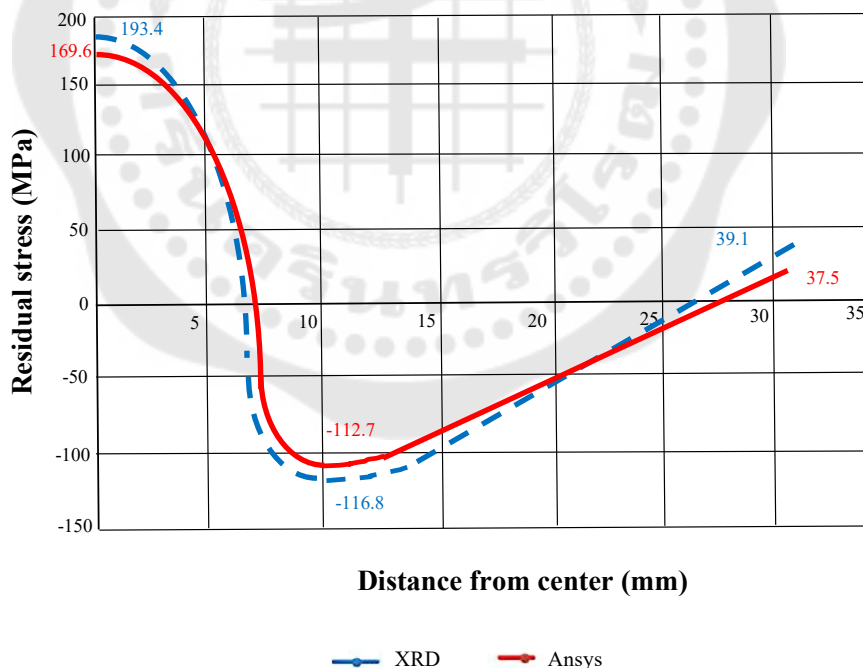
4.7 การทดลองหาค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานหลังการเชื่อม

การทดลองหาค่าความเค้นตกค้าง ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction และหาความเค้นตกค้างด้วยจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม Ansys ดังภาพประกอบ 103 แล้วนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างกัน



ภาพประกอบ 107 การจำลองความเค้นตกค้างของเหล็ก EH36 โดยใช้โปรแกรม Ansys

ผลของการวัดค่าความเค้นตกค้างที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขดังภาพประกอบ 104 ซึ่งวัดจากเส้นกึ่งกลางของรอยเชื่อมที่ 0 มม. อยู่ใกล้แนวเชื่อมซึ่งเป็นพื้นที่โซนรับผลกระทบความร้อน (HAZ) มีอุณหภูมิสูงมากแต่อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะหลอมละลายเข้าสู่แนวเชื่อมและเย็นลงอย่างรวดเร็วระหว่างการเชื่อม ค่าที่วัดได้ของเหล็กกล้า EH36 คือ ความเค้นตกค้างของแรงดึง 169.51 MPa ซึ่งผลที่ได้จากการวัดโดยเครื่อง XRD คือ ความเค้นตกค้างของแรงดึง 193.4 ± 26.1 มม. ดังนั้นค่าความเค้นตกค้างจึงถือว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกันซึ่งความแตกต่างกัน 14% ที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางการเชื่อม 10 มม. อยู่ใกล้ HAZ ค่าที่วัดได้จากการจำลองเชิงตัวเลขของเหล็กกล้า EH36 คือความเค้นตกค้างของแรงอัด -112.76 MPa ซึ่งผลที่ได้จากการวัดโดยเครื่อง XRD คือความเค้นตกค้างของแรงอัดที่ -116.8 ± 9.8 มม. ดังนั้นค่าความเค้นตกค้างจึงถือว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกันซึ่งความแตกต่างกัน 4% ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางรอยเชื่อม 30 มม. ค่าที่วัดได้จากการจำลองเชิงตัวเลขของเหล็กกล้า EH36 คือความเค้นตกค้างของแรงดึงที่ 37.5 MPa ซึ่งผลที่ได้จากการวัดโดยเครื่อง XRD คือความเค้นตกค้างของแรงดึง 39.1 ± 17.5 MPa ดังนั้นค่าความเค้นตกค้างจึงถือว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกันซึ่งความแตกต่างกัน 4%



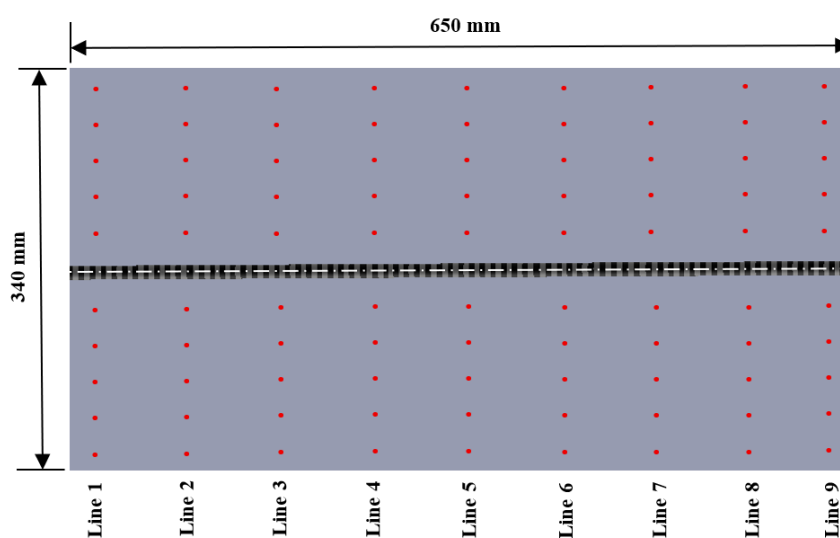
ภาพประกอบ 108 ความเค้นตกค้างในทิศทางตามขวางของแนวเชื่อม

จากกราฟในภาพประกอบ 104 การวัดความเค้นตกค้างโดยเครื่อง XRD จะถูกเปรียบเทียบกับความเค้นตกค้างจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้

ความเค้นตกค้างในทิศทางตามยาวคือแรงดึง (+) ที่ 0 มม. จากตรงกลางของแนวเชื่อม ความเค้นตกค้างในทิศทางตามยาวส่วนใหญ่เป็นแรงดึงในบริเวณใกล้กับแนวเชื่อม ความเค้นตกค้างจากแรงดึงนี้มักส่งผลต่อการเริ่มต้นการแตกร้าวของความล้าในวัสดุ

4.8 การทดลองหาค่าการบิดเสียรูปของชิ้นงานภายหลังการเชื่อม

การทดลองหาค่าความบิดเบี้ยว นำมาทำการเชื่อมแบบต่อชนด้วยวิธีไฮบริด GTAW-SMAW เสร็จแล้วนำมาทดลองโดยเครื่องวัดละเอียดในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ หรือ เครื่อง Coordinate Measuring Machine (CMM) สำหรับการวัดขนาดและมิติต่าง ๆ ที่บิดเสียรูปไป หลังจากการเชื่อม เมื่อทำการวัดในตำแหน่งต่างๆ เสร็จสิ้นแล้วเครื่องวัดจะแสดงผลค่าการบิดเสียรูปเชิงมุมของชิ้นงานออกมาดังตาราง 23



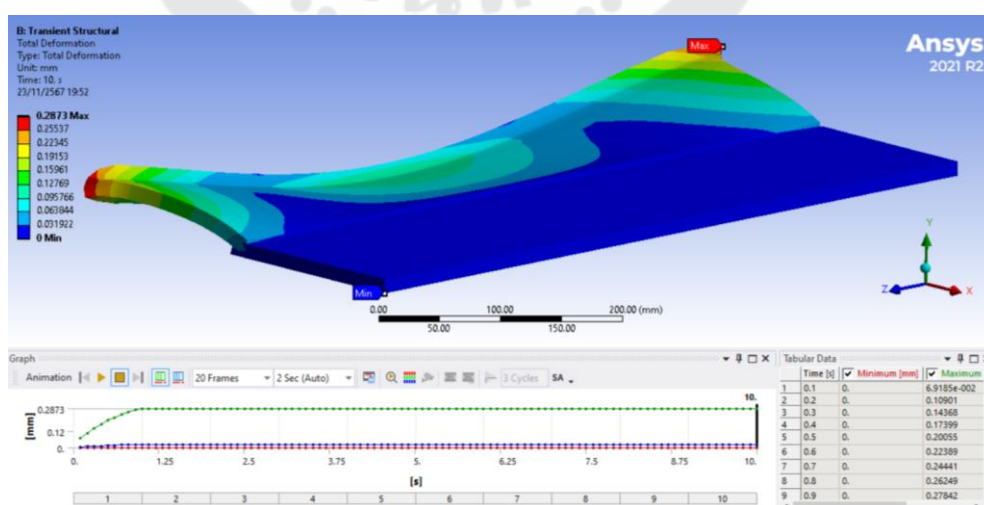
ภาพประกอบ 109 ตำแหน่งจุดวัดค่าการบิดเสียรูปเชิงมุมของชิ้นงานภายหลังการเชื่อม

ตาราง 23 ผลการทดลองวัดความบิดเบี้ยวในการเชื่อมเหล็กกล้า EH36

Elementname		Norminal	Actual	Deviation
Line 1	ZX-angle	000.177	177.710	0.710
Line 2	ZX-angle	000.177	177.824	0.824
Line 3	ZX-angle	000.177	177.881	0.881
Line 4	ZX-angle	000.177	177.903	0.903
Line 5	ZX-angle	000.177	177.907	0.907
Line 6	ZX-angle	000.177	177.988	0.988
Line 7	ZX-angle	000.177	178.107	1.107
Line 8	ZX-angle	000.177	178.173	1.173
Line 9	ZX-angle	000.177	178.129	1.129

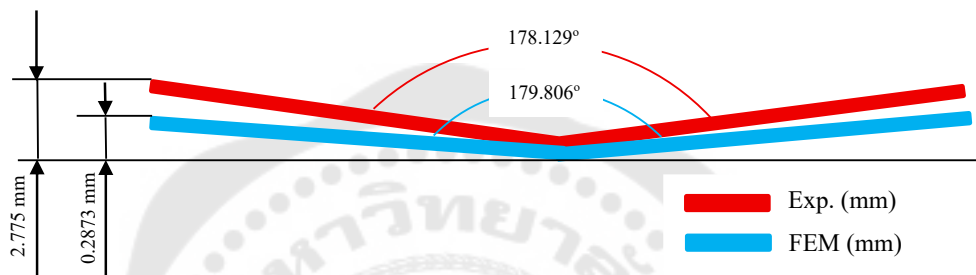
ที่มา: ศูนย์สอบเทียบเครื่องมือสำหรับอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

หลังจากนั้นหาขนาดและมิติต่าง ๆ ที่บิดเสียรูปไปหลังจากการเชื่อมด้วยการจำลองเชิงตัวเลขดังภาพประกอบ 106 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยเครื่อง CMM



ภาพประกอบ 110 การจำลองความบิดเบี้ยวของการเชื่อมชนสำหรับแผ่นเหล็ก EH36

จากภาพประกอบ 107 ค่าการวัดจากเครื่อง CMM ที่ได้ระยะการบิดน้อยที่สุดคือ 178.129° ซึ่งได้ค่าการบิดเสียรูปในแนวตั้งคือ 2.775 มม. และค่าที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขมีระยะการบิดน้อยที่สุดคือ 179.806° ซึ่งได้ค่าการบิดเสียรูปในแนวตั้งคือ 0.2873 มม. ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าการวัดจากเครื่อง CMM กับวิธีการการจำลองเชิงตัวเลขมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเชิงมุมคือ 0.94 % ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในขอบเขตของความผิดพลาดที่ยอมรับได้



ภาพประกอบ 111 รูปเปรียบเทียบตำแหน่งการบิดเสียรูประหว่างผลการทดลองจากเครื่อง CMM และการจำลองเชิงตัวเลข

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเชื่อมเหล็กกล้า TMCP เกรด EH36 ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW โดยมีการตรวจสอบทางมหภาค โครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยาและเทคนิค EDS การทดสอบทางกล (การวัดค่าอุณหภูมิความร้อนด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล การหาค่าความเค้นตกค้าง การวัดค่าการบิดเสียรูป แล้วนำมาเปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีการจำลองเชิงตัวเลข) ซึ่งจากการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ความแม่นยำของการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลและการจำลองเชิงตัวเลขมีค่าอุณหภูมิแตกต่างกันไม่เกิน 5% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ผลกระทบของการเย็นตัวอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีทำให้มีการไล่ระดับอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ความร้อนที่สะสมในบริเวณแนวเชื่อมจะถูกถ่ายโอนไปยังบริเวณที่เย็นกว่าผ่านการนำความร้อน และกระจายไปสู่สภาพแวดล้อมโดยรอบผ่านการแผ่รังสีและการพาความร้อน

5.1.2 ผลการทดสอบแรงดึงในชิ้นงานตัวอย่างที่ไม่มีการเจียรในบริเวณแนวเชื่อมได้ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength = 613.17 MPa) และพบว่าพบว่าการแตกหักทั้งหมดเกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่วัสดุฐาน (Base metal) ในขณะที่เดียวกันในชิ้นงานตัวอย่างที่มีการเจียรในบริเวณแนวเชื่อมได้ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength = 524.35 MPa) และตรวจพบว่าการแตกหักทั้งหมดเกิดขึ้นในบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal zone) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานตัวอย่างที่ไม่มีการเจียรในบริเวณแนวเชื่อม กับชิ้นงานตัวอย่างที่มีการเจียรในบริเวณแนวเชื่อมมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเชิงมุมคือ 16.94 %

5.1.3 ผลของการตรวจสอบด้วยสายตาทั้ง 3 ด้าน คือ Side bend, Face bend และ Root bend ไม่พบรอยร้าวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมด สรุปได้ว่ากระบวนการเชื่อมในชิ้นงานทั้งหมดนี้มีคุณภาพสูง

5.1.4 ผลของการกระทบพว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระทบร้อน HAZ มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 256.57 J ในขณะที่พลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณแนวเชื่อม (Weld metal) มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 184.34 J สรุปได้ว่าพลังงานดูดซับเฉลี่ยบริเวณพื้นที่กระทบร้อน HAZ มีความเหนียวที่ดีกว่าบริเวณบริเวณแนวเชื่อม

5.1.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงพบว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดอยู่ที่บริเวณโลหะเชื่อม (WM) ที่ 231 HV และค่าความแข็งแรงต่ำสุดอยู่ที่บริเวณโลหะฐาน (BM) ที่ 168 HV อย่างไรก็ตาม ความแข็งแรงของบริเวณแนวเชื่อมมีค่าใกล้เคียงกับบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน แต่จะสูงกว่าบริเวณโลหะฐาน

5.1.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคพบว่าลักษณะการซึมลึกและการหลอมละลายระหว่างเนื้อเชื่อมกับ โลหะฐานสม่ำเสมอ และมีความสมบูรณ์ระหว่างเนื้อเชื่อมและโลหะฐาน ความกว้างของเขตบริเวณอิทธิพลทางความร้อนของกระบวนการเชื่อมใกล้เคียงกัน ไม่พบจุดบกพร่องในการเชื่อม เช่น รูพรุน รอยแตก ร้าว สิ่งเจือปนและสารตกค้างในรอยเชื่อม

5.1.7 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณแนวเชื่อม Weld metal 1 (SMAW) ประกอบด้วยโครงสร้างอะซิคูลาร์เฟอร์ไรต์ (Acicular ferrite: AF) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีโครงสร้างโพลีโกนอลเฟอร์ไรต์ (Polygonal ferrite; PF (I)) อยู่ภายในเกรน และโครงสร้างโปรยูเทคตอยด์ เฟอร์ไรต์ (Proeutectoid ferrite (PF) และผลของเทคนิค EDS พบว่าส่วนใหญ่เป็นธาตุประกอบของโลหะเติม โดยมีปริมาณแมงกานีสสูงสุด 1.94% รองลงมาคือซิลิโคน 1.18% ในบริเวณแนวเชื่อมนี้

5.1.8 โครงสร้างจุลภาคในโลหะเชื่อม Weld metal 2 (GTAW+ SMAW) ประกอบด้วยโครงสร้างเพิลไลต์ (Pearlite) เฟอร์ไรต์ (Ferrite) และ เบนไนต์ (Bainite) เทคนิค EDS และผลของเทคนิค EDS พบว่าส่วนใหญ่เป็นธาตุประกอบของโลหะเติม โดยมีปริมาณแมงกานีสสูงสุด 0.50% รองลงมาคือไททานเนียม 0.35% และโครเมียม 0.30% ในบริเวณแนวเชื่อมนี้

5.1.9 การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างด้วยเครื่อง Xstress3000 ผลลัพธ์ของความเค้นตกค้างที่เกิดจากขั้นตอนการเชื่อมไฮบริดของ GTAW และ SMAW ค่าสูงสุดค่าเฉลี่ยเกิดขึ้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของรอยเชื่อมคือ 193.4 MPa และลดระดับค่าความเค้นตกค้างเฉลี่ยลงเหลือค่าต่ำสุดคือ 39.1 MPa ที่ระยะห่างจากศูนย์กลางรอยเชื่อม 30 มม.

5.1.10 การบิดเสียรูปและความเค้นตกค้างยังขึ้นอยู่กับความแตกต่างในความแข็งแรงของรอยเชื่อมและโลหะฐานด้วย ได้มีการแสดงให้เห็นว่าความบิดเสียรูปเชิงมุมจะสูงขึ้นสำหรับความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่สูงขึ้นและความแข็งแรงของโลหะพื้นฐานที่เท่ากัน ความเค้นตกค้างในทิศทางตามยาวจะสูงขึ้นสำหรับความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่สูงขึ้น และการเพิ่มขึ้นของความเค้นตกค้างนี้มีความสำคัญมากในทุกความหนา

5.2 อภิปรายผล

5.2.1 งานวิจัยนี้พบว่าค่าความแตกต่างของการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลและการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการเชื่อมไม่เกิน 5% ซึ่งถือว่าอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ในแวดวงโลหะวิทยาและการเชื่อม โดยในวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีการยืนยันแนวโน้มนี้ดังนี้

Nayak & Roy (2020) รายงานว่าการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลขนาดเล็กชนิดต่างๆ สำหรับกระบวนการเชื่อมให้ค่าที่แม่นยำใกล้เคียงกับค่าจริง แม้ปัจจัยด้าน response time ของเซ็นเซอร์และการสูญเสียความร้อนจากรอยเชื่อมจะส่งผลต่อค่าที่ได้อยู่บ้าง แต่เมื่อเลือกขนาดลวดที่เหมาะสมและวางตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลอย่างถูกต้อง ค่าความต่างจะน้อยกว่า 5%

Gradinarov et al. (2023) ทดสอบวิธีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบริเวณหัวเชื่อม พบว่าการเลือกตำแหน่งเหมาะสมมีความสำคัญมากต่อความถูกต้องของข้อมูลที่วัด และให้ค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยไม่สูงเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ

Casalino et al. (2023) รายงานว่าการเปรียบเทียบข้อมูลอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิลกับผลจำลอง (FEM/CFD) ในกระบวนการ laser welding พบว่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 3–7% ขึ้นกับตำแหน่งและขนาดลวด โดยมีข้อเสนอให้ใช้ K-type thermocouple ในแบบ multi-point เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการยืนยันผลการจำลอง

Brewer et al. (2013) จากการทดลองกับ thermocouple ขนาดต่างๆ และชนิดการติดตั้งที่แตกต่าง พบว่า thermocouple ขนาดเล็กและติดตั้งแบบ welding ให้ความแม่นยำสูงสุดเมื่อเทียบกับค่าควบคุม โดยเฉพาะในการทดสอบอุณหภูมิสูงในกระบวนการ welding

Deepak et al. (2023) สรุปในการทบทวนว่าการทำงาน thermocouple เพื่อวัดอุณหภูมิระหว่างเชื่อมมีข้อจำกัดเรื่องความแม่นยำขึ้นกับโลหะผสมและสภาวะแวดล้อม แต่โดยรวมยังเป็นมาตรฐานสากลสำหรับการ validation ผลจำลองเชิงตัวเลขในงานเชื่อม

ค่าเบี่ยงเบนการวัดอุณหภูมิระหว่างผลทดลอง (thermocouple) และแบบจำลองทางตัวเลขที่อยู่นิ่งไม่เกิน 5% สอดคล้องกับมาตรฐานสากลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หลายงานแนะนำให้ใช้ K-type thermocouple ขนาดเล็กและออกแบบตำแหน่งติดตั้งอย่างถูกต้อง เพื่อให้ค่าความแม่นยำสูงและนำไปใช้เป็นข้อมูลยืนยันผลจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2.2 ผลงานวิจัยหลายชิ้นยืนยันประเด็นเกี่ยวกับคุณสมบัติแรงดึงของเหล็กกล้า TMCP เกรด EH36 หลังการเชื่อม ดังนี้

Kwon และ Jeong (2023) รายงานว่าค่าแรงดึงสูงสุดของรอยเชื่อม EH36-TMCP ที่ได้จากหลากหลายกระบวนการเชื่อม เช่น EGW, TSAW, SSAW อยู่ในเกณฑ์สูงกว่า 490MPa ตามมาตรฐาน IACS และในหลายกรณี fracture เกิดที่ base metal ดังนั้น tensile strength ของ weld metal และ HAZ จึงเพียงพอต่อมาตรฐานการใช้งานทางอุตสาหกรรม

Kim et al. (2015) ศึกษาผลของสภาพรอยต่อและกระบวนการ FCAW-และ EGW พบว่าค่า tensile strength ลดเพียงประมาณ 4% จาก base metal และ mechanical properties ของแนวเชื่อมยังผ่านเกณฑ์ยอมรับได้ทุกกรณี นอกจากนี้การออกแบบ bevel ที่ต่างกัน (single-V กับ double-V) มีผลต่อค่าความแข็งและ toughness บ้างแต่ไม่มากเมื่อเทียบกับ base metal

Park et al. (POSCO Technical Research Laboratories) เมื่อเปรียบเทียบ TMCP steel กับ normalized steel พบว่า welded TMCP steel ให้ค่า yield strength สูงกว่าและ tensile strength สูงกว่าหรือใกล้เคียง normalized steel ทั้งยังมีข้อดีเรื่อง yield ratio ที่สูงขึ้น ระบุว่าไม่โครสตรักเจอร์ที่ละเอียดใน TMCP ส่งผลให้สมบัติเชิงกลเด่นกว่า

Zhang et al. (2016) ศึกษาอิทธิพลของการเชื่อมต่อ tensile strength ของ TMCP steel S385 และ RQT-S690 พบว่าแรงดึงไม่ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญใน TMCP เมื่อเทียบกับ base metal ต่างจากเหล็กที่ผ่านกระบวนการ QT ที่ถูกลดค่าแรงดึงหลังเชื่อมอย่างมาก ข้อสังเกตคือ TMCP เผชิญกับความแข็งแรงที่สูงขึ้นแต่ ductility ลดลงเล็กน้อย

Imanian Ghazanlou et al. (2024) วิเคราะห์เชิงลึกว่า tensile strength ของ TMCP (EH36) หลังการเชื่อมยังอยู่ในขอบเขตมาตรฐานและไม่ได้ลดต่ำกว่าเกณฑ์อุตสาหกรรม โดยการจัดการ heat input ที่เหมาะสมจะรักษา properties เหล่านี้ไว้ได้

Kim et al. (2012) สรุปว่าการควบคุม input heat และสภาวะกระบวนการมีผลสำคัญต่อ mechanical properties ของรอยเชื่อม TMCP steels โดยเฉพาะค่า tensile strength และ HAZ softening

ผลการศึกษาล่าสุดยืนยันว่า tensile strength ของเหล็กกล้า EH36-TMCP หลังการเชื่อม ไม่ว่าจะปรับเปลี่ยนกระบวนการเชื่อมหรือสภาพผิวที่รอยเชื่อม หากควบคุมกระบวนการอย่างเหมาะสม ค่าแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมมักไม่ต่ำกว่าหรือด้อยลงเพียงเล็กน้อยจากค่า base metal และยังคงอยู่ในเกณฑ์ยอมรับสากล มีความแตกต่างเชิงรายละเอียดบ้างตามลักษณะ joint geometry และปัจจัยผิวรอยเชื่อมแต่ไม่เปลี่ยนแปลงแนวโน้มหลักนี้

5.2.3 การไม่พบรอยร้าวหรือข้อบกพร่องในชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการตัดของรอยเชื่อมเหล็กกล้า TMCP EH36 ด้วยกระบวนการ GTAW-SMAW สอดคล้องกับมาตรฐานระหว่างประเทศและงานวิจัยสำคัญอื่นๆ ดังนี้

ASME Section IX (2023) กำหนดว่า การทดสอบ bend test สำหรับการรับรองแนวเชื่อมเมื่อตรวจด้วยตาเปล่า ต้องไม่ปรากฏ crack หรือ defect ที่ผิว convex เกิน $1/8$ นิ้ว (ประมาณ 3 มม.) ในชิ้นงาน หากไม่มีการแตกร้าวหรือ defect ขนาดนี้ถือว่ารอยเชื่อมมีคุณภาพและปลอดภัยในเชิงโครงสร้าง

DeOilers et al. (2016) ทำการทดสอบ bend test ใน A36 steel plate ด้วย GTAW พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเตรียมผิวอย่างเหมาะสมและเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะไม่ปรากฏรอยแตกร้าวขนาดเกินมาตรฐาน ในขณะที่ชิ้นงานที่ขาดการเตรียม back gouging หรือมี inclusion ในแนวเชื่อมอาจพบ crack หรือลิ่มเหลวในการทดสอบ (ข้อมูลนี้สนับสนุนความสำคัญของการควบคุมกระบวนการ; แม้เป็นวัสดุคนละชนิด ฐานะหลักการเหมือนกัน)

Monghaihen (2018) อธิบายเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบ bend test ตาม ASME IX ว่างานเชื่อมที่ไม่มี open defect (รอยเปิด) ขนาดเกิน 3 มม. ถือว่าผ่านเกณฑ์และบ่งบอกคุณภาพรอยเชื่อมที่ดี

ผลการทดสอบการตัดของรอยเชื่อมเหล็กกล้า TMCP EH36 ที่ไม่พบข้อบกพร่อง สอดคล้องกับงานวิจัยและมาตรฐานสากลด้านวิศวกรรมเชื่อม โดยเฉพาะกระบวนการ GTAW-SMAW เมื่อตั้งค่าพารามิเตอร์และเตรียมชิ้นงานอย่างถูกต้องจะให้คุณภาพรอยเชื่อมสูงสุดและลดโอกาสเกิด crack หรือ defect ที่ไม่พึงประสงค์

5.2.4 งานวิจัยนี้ที่ระบุว่าบริเวณ HAZ (Heat Affected Zone) ของเหล็กกล้า TMCP EH36 หลังการเชื่อมมีค่าพลังงานดูดซับแรงกระแทกเฉลี่ยสูงกว่าแนวเชื่อม (Weld metal) และมีความเหนียวสูง สอดคล้องกับงานวิจัยสำคัญอื่นๆ ดังนี้

Kwon และ Jeong (2023) ศึกษาผลของกระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกันใน EH36-TMCP และพบว่า HAZ ของเหล็กกล้าชนิดนี้ยังคงคุณสมบัติ impact toughness ได้ดีในหลากหลายระดับ heat input โดย HAZ มีความเหนียวดีกว่าแนวเชื่อม และส่วนใหญ่ค่า impact energy ต่ำสุดจะอยู่ใน grain-coarsened zone หรือ zone ที่มีความหยาบเกรนสูง

Qi et al. (2024) พบว่าเมื่อเพิ่ม heat input จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคใน HAZ ได้แก่ acicular ferrite, grain boundary ferrite, granular bainite และ polygonal ferrite และถ้า volume fraction ของ acicular ferrite ลดต่ำลงจะทำให้ค่า impact

toughness ใน HAZ ลดลงเช่นกัน อย่างไรก็ตาม EH36 ที่ผ่าน TMCP ยังสามารถรักษาค่า impact toughness ได้ดีแม้เปลี่ยนแปลง heat input

CANMET Minerals and Metals (1997), Xu et al. รายงานว่าสำหรับ high-strength TMCP steel ในสภาวะ low temperature ค่า toughness ใน intercritical HAZ (ICHAZ) ยังสูงและผ่านเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม ขณะที่ grain-coarsened HAZ (GCHAZ) อาจด้อยสุดแต่ถ้าควบคุม inclusion และ microstructure ดีจะอยู่ในขีดปลอดภัย โดยทั่วไป HAZ ของ TMCP steel สามารถรักษาคุณสมบัติ impact toughness ได้ดีกว่าแนวเชื่อมของเหล็ก ผ่านกระบวนการ normalized

TWI (n.d.) ให้ข้อมูลว่าโดยทั่วไป TMCP steel จะมี fracture toughness ใน HAZ ดีกว่าเหล็ก normalized และสามารถทนต่อการลด toughness จากการเชื่อมได้มากกว่า ในงานอุตสาหกรรม ถ้าควบคุม input heat ไม่สูงเกิน ค่า impact energy ของ HAZ จะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานใช้งานหนักได้อย่างมั่นใจ

Zhu et al. (2021) ศึกษา fracture surface และพบว่า EH36 TMCP steel มี ductile fracture characteristics และค่าความเหนียวสูงในการกระแทก (impact tests) เช่นเดียวกับผลที่รายงานในงานวิจัยนี้

Samardžić et al. (2017) เมื่อต้องการความปลอดภัยในโครงสร้าง หัวใจสำคัญคือค่าพลังงานดูดซับใน HAZ ซึ่งเป็นบริเวณสำคัญที่ต้องควบคุมโดยเฉพาะถ้าชิ้นงานใช้งานที่อุณหภูมิต่ำหรือภาระสลับ

ผลการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ได้รับการสนับสนุนอย่างชัดเจนจากงานวิจัยทั้งเชิงอุตสาหกรรมและวิชาการชั้นนำทั่วโลกว่า HAZ ของ TMCP EH36 หลังการเชื่อม ยังคงรักษาคุณสมบัติ impact toughness ได้ดีและสูงกว่าแนวเชื่อม (weld metal) ในหลายกรณี ถ้าควบคุม microstructure และ heat input อย่างเหมาะสม แม้จะมีผลของ grain coarsening บ้าง แต่แนวโน้มหลักสอดคล้องกับมาตรฐานอุตสาหกรรมสากล

5.2.5 งานวิจัยด้านความแข็งแรงของแนวเชื่อมเหล็กกล้า TMCP เกรด EH36 พบข้อสรุปเป็นแนวเดียวกันในหลายบทความวิชาการที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

Park et al. (2005) รายงานว่าค่าความแข็งแรงบริเวณ weld metal (WM) มักสูงกว่า base metal (BM) ในเหล็กกล้า TMCP เมื่อใช้ลวดเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูง โดย HAZ มีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงแนวเชื่อมและในบางกรณีเกิดพื้นที่ softened zone ขนาดเล็กเฉพาะใน TMCP steel เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็ก normalized steel ที่จะเกิดพื้นที่ softened zone ขนาดใหญ่กว่า

Fukunaga et al. (Nippon Steel, 2015) พบว่าความแข็งของ weld metal ในแนวเชื่อม TMCP steel จะสูงกว่า base metal อย่างมีนัยสำคัญ เป็นต้นเหตุหนึ่งที่แนวเชื่อมให้ fracture toughness สูงในงาน offshore structure และแนะนำให้ออกแบบ filler สำหรับ WM ที่ให้ค่า hardness สอดคล้องกับความต้องการจากงานใช้งานหนัก

Njock Bayock et al. (2019) ศึกษาความแข็งของ weld metal, heat affected zone และ base metal พบว่า weld metal ที่ได้จากการเชื่อม SAW ของ S355 และ EH36 ให้ค่าความแข็ง 230–250HV0.1 สูงกว่า base metal (200–220HV0.1) เล็กน้อย และอยู่ในระดับ nondetrimental ต่อความเหนียวที่ HAZ

Wibowo et al. (2019) ระบุว่าสำหรับรอยเชื่อม SMAW เหล็ก SS400 (ฐานเดียวกับหลายงานใน EH36) แนวเชื่อมมักมีค่าความแข็งสูงกว่า base metal ชัดเจน

Atlantis press(2017) พบว่าสำหรับการเชื่อมที่ใช้พลังงานสูง การกระจายของค่า microhardness ตลอดแนวขวางของรอยเชื่อมจะชัดเจน โดยค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่ WM ค่อยๆ ลดลงผ่าน HAZ และต่ำสุดที่ BM

แนวทางการวิจัยทั่วโลกต่างยืนยันว่าในเหล็กกล้า TMCP EH36 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมและบริเวณ HAZ จะสูงหรือต่ำขึ้นกับชนิดลวดเชื่อมและพลังงาน input แต่แนวโน้มหลักคือ WM มีความแข็งสูงสุด HAZ ต่ำกว่าบ้าง และ BM ต่ำสุด ผลนี้มีผลกับ fracture toughness และ fatigue ของแนวเชื่อมในงานโครงสร้างขนาดใหญ่ ทั้งหมดนี้สนับสนุนผลของงานวิจัยล่าสุดอย่างต่อเนื่อง

5.2.6 การที่แนวเชื่อมของเหล็กกล้า TMCP EH36 ที่เชื่อมด้วยกระบวนการ GTAW-SMAW มีการรวมตัวของเนื้อเชื่อมกับ base metal อย่างสมบูรณ์ ไม่พบรูพรุน (porosity), สิ่งเจือปน (inclusion), หรือรอยแตกร้าว (crack) ตรงกับผลวิจัยและข้อกำหนดมาตรฐานระดับสากล ดังนี้

Ghorbel & Ktari (2022) รายงานว่าในการเชื่อมเหล็กกล้าโครงสร้างด้วยกระบวนการ SMAW-GTAW หากควบคุมกระบวนการและพารามิเตอร์เป็นไปตามข้อกำหนด เช่น interpass temperature และความสะอาดของบริเวณรอยเชื่อม จะทำให้โครงสร้างทางมหภาคสมบูรณ์ไม่พบ defect รุนแรงและเหมาะสมสำหรับงานโครงสร้างหลัก

Salerno et al. (2022) ในการศึกษา macrostructure ในแนวเชื่อม TIG พบว่า ถ้ากระบวนการเตรียมรอยต่อและควบคุม current/polarity ถูกต้อง จะได้รอยเชื่อมที่แทรกซึมลึก มี

ความสม่ำเสมอระหว่างเนื้อโลหะเชื่อมและ base metal โดยไม่มีการแยกชั้น (lack of fusion) หรือ รุพุน

Njock Bayock et al. (2019) ศึกษา SAW joint ของเหล็กเกรด S355 และ EH36 พบว่าการออกแบบร่องเชื่อม ร่วมกับการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะช่วยป้องกันการเกิดรู รุพุน, slag inclusion และ defect อื่นๆ ได้อย่างสมบูรณ์ในระดับมหภาค

Cai et al. (2020) รายงานว่าเมื่อซ้อนกันของชั้นแนวเชื่อมหรือ interpass overlap มีความเหมาะสม จะป้องกัน defect ประเภท lack of fusion และช่วยให้ zone เปลี่ยนผ่านระหว่าง weld metal กับ base metal สมบูรณ์

ผลการทดสอบมหภาคจากงานวิจัยหลากหลายยืนยันตรงกันว่า หากควบคุม กระบวนการเชื่อมเหล็กกล้า TMCP อย่างถูกต้องทั้งในขั้นตอนเตรียมชิ้นงาน, parametric setup และความสะอาดของ joint จะได้แนวเชื่อมที่สมบูรณ์ ไม่มี defect สำคัญในระดับโครงสร้างมหภาค ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่ออายุการใช้งานและความปลอดภัยของโครงสร้างในอุตสาหกรรมหนัก.

5.2.7 การศึกษานี้พบว่าแนวเชื่อมโดยวิธี SMAW ในเหล็กกล้า TMCP EH36 ประกอบด้วย โครงสร้างหลักได้แก่ acicular ferrite (AF), polygonal ferrite (PF) และ Widmanstätten ferrite ซึ่งล้วนเป็นโครงสร้างที่มีอิทธิพลต่อความเหนียวและคุณสมบัติเชิงกลที่ดีของแนวเชื่อม ผลนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยหลายชิ้น เช่น

Kwon & Jeong (2023) รายงานว่าการเชื่อมเหล็ก EH36 ด้วย SMAW จะเกิด โครงสร้าง acicular ferrite และ polygonal ferrite ในปริมาณมาก โครงสร้างเหล่านี้ช่วยเพิ่มความเหนียวและความแข็งแรงของแนวเชื่อม โดย af ยังช่วยต้านการแตกร้าวแบบเปราะได้ด้วย

Park et al. (2005) พบว่าสำหรับเหล็กกล้า TMCP การเกิด acicular ferrite เป็น จุดเด่นใน wide HAZ และ weld metal หลังการเชื่อม SMAW/SAW เนื่องจากอิทธิพลจาก องค์ประกอบธาตุในลวดเชื่อม (เช่น Mn, Si และ Ti) ซึ่งส่งเสริม nucleation ของ AF

Tumuluru (1981) ระบุว่าปริมาณ acicular ferrite สูงในแนวเชื่อมเป็นตัวแปรสำคัญ ในการเพิ่ม impact toughness ของ weld metal โดยโครงสร้าง PF และ Widmanstätten ferrite ที่พบน้อยจะช่วยป้องกันการก่อตัวของ microcrack

Njock Bayock et al. (2019) ในงานศึกษาการเชื่อมเหล็ก S355/EH36 ด้วย Submerged Arc Welding (SAW) ก็พบ โครงสร้าง acicular ferrite และ polygonal ferrite เช่นเดียวกัน และระบุว่า การเพิ่ม Ti ใน filler ส่งผลให้เกิด AF มากขึ้น

Radhakrishna et al. (2012) ศึกษาผลขององค์ประกอบโลหะเติมต่อ microstructure ของ SMAW welds ใน high strength low alloy steel พบว่า องค์ประกอบ Mn, Ti, B ในลวดเชื่อมเป็นตัวเสริมการเกิด acicular ferrite ส่งผลโดยตรงต่อความเหนียวและค่ารับแรงกระแทกของแนวเชื่อม

Naffakh et al. (2009) รายงานว่าโครงสร้าง AF และ PF ใน SMAW ของ low carbon steels มีความเกี่ยวข้องกับความเหนียวสูงและอายุการใช้งานที่ยาวนานในการใช้งานจริง

Ramirez et al. (2009) วิเคราะห์รอยเชื่อมชนิดต่างๆ และพบว่าการควบคุม cooling rate ระหว่าง solidification ส่งผลต่อปริมาณ AF และ PF ใน weld metal โดยเฉพาะใน SMAW

Abson (2006) ให้คำแนะนำว่าการออกแบบ flux และ filler ที่ส่งเสริมการเกิด AF จะช่วยลดความเสี่ยง brittle fracture และปรับเปลี่ยน property ของแนวเชื่อมได้ตรงวัตถุประสงค์

การเกิด acicular ferrite, polygonal ferrite และ Widmanstätten ferrite ในแนวเชื่อม SMAW ของเหล็กกล้า TMCP EH36 ที่รายงานในงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับเอกสารอ้างอิง นานาชาติหลากหลายฉบับซึ่งเน้นว่าส่วนประกอบดังกล่าวช่วยเสริมสร้าง mechanical properties ของรอยเชื่อม (เช่น toughness, strength และความต้าน fracture) ให้เหมาะกับการใช้งานโครงสร้างหนัก ทั้งนี้ขึ้นกับองค์ประกอบของ filler, flux และสภาวะการเชื่อมที่เลือกใช้

5.2.8 จากการศึกษาพบว่า แนวเชื่อมที่ได้จากกระบวนการ GTAW+SMAW ในเหล็กกล้า TMCP EH36 ประกอบด้วยโครงสร้าง pearlite, ferrite, และ bainite โดยมีองค์ประกอบ Mn, Ti, Cr จากฟิลเลอร์โลหะ ซึ่งสนับสนุนค่าความเหนียวและสมบัติเชิงกลอื่นๆ ของแนวเชื่อม ข้อสรุปนี้ได้รับการยืนยันและเสริมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำคัญ ได้แก่

Kim et al. (2015) ศึกษา microstructure ของรอยเชื่อม EH36 ที่ผ่านกระบวนการ FCAW และ EGW พบการเกิด pearlite, polygonal ferrite, grain boundary ferrite และ bainite ในแนวเชื่อม โดยปริมาณของ pearlite และ bainite เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ heat input สูงขึ้น และการเลือก filler ที่มี Mn, Ti, Cr สูงช่วยให้เกิด bainite และ pearlite ในสัดส่วนที่ต้องการ ซึ่งช่วยเพิ่มความเหนียวและ tensile strength ของแนวเชื่อม

Njock Bayock et al. (2019) รายงานว่าในเหล็กกล้า EH36 ที่เชื่อมด้วย SAW จะเกิดโครงสร้างหลักคือ polygonal ferrite, bainite และ pearlite ใน weld metal โดยปริมาณ bainite สามารถเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ heat input หรือ filler เฉพาะที่เพิ่มธาตุ alloying ข้างต้น ช่วยปรับค่า toughness ของแนวเชื่อมให้สูงขึ้น

Ramirez et al. (2009) ศึกษาอิทธิพลของอัตราการเย็นตัว (cooling rate) และองค์ประกอบ microalloy ต่อ microstructure ของรอยเชื่อม low-carbon steels พบว่าการใช้ heat input ต่ำ (เหมือน GTAW) ส่งผลให้เกิด microstructure เป็น bainite และ ferrite มากขึ้น โดยเฉพาะถ้ามี Mn, Ti, Cr จากลวดเชื่อม

Fukunaga et al. (Nippon Steel, 2015) พบว่าการเชื่อมเหล็กกล้า TMCP EH36 ด้วย flux-cored wire หรือ TIG/SAW จะทำให้แนวเชื่อมมี bainite/ferrite เป็นโครงสร้างเด่นร่วมกับ pearlite ส่งผลดีต่อ fracture toughness และ mechanical properties โดยรวม

Zhu et al. (2021) ตอกย้ำว่า microstructure ใน weld metal ของ EH36 หลังการเชื่อมจะเกี่ยวพันกับปริมาณ alloying element ใน filler และการปรับการควบคุมความเย็นจะเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของ bainite, pearlite, ferrite ได้ตรงความต้องการด้านสมบัติเชิงกล

ผลการตรวจสอบจุลภาคในแนวเชื่อม GTAW+SMAW ที่พบ pearlite, ferrite, bainite และการมี alloying element เช่น Mn, Ti, Cr ใน WM2 ได้รับการสนับสนุนอย่างลึกซึ้งจากงานวิจัยนานาชาติหลายฉบับ ยืนยันว่าการปรับแต่งลวดเชื่อม, heat input และอัตราการเย็นตัว เป็นกลไกสำคัญที่ควบคุม microstructure ของ EH36 ให้เหมาะสมกับความต้องการใช้งานหนักและคงค่า toughness ที่สูงในแนวเชื่อม

5.2.9 การที่ศึกษานี้พบค่าความเค้นตกค้างสูงสุดบริเวณกึ่งกลางรอยเชื่อมของเหล็กกล้า TMCP EH36 ที่เชื่อมด้วย GTAW-SMAW แล้วลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อห่างออกไปจากแนวเชื่อมสอดคล้องและได้รับการสนับสนุนจากงานวิจัยที่มีชื่อเสียงดังนี้

Kwon & Jeong (2023) รายงานว่าการวัด residual stress บนรอยเชื่อม EH36-TMCP ด้วยวิธี Hole-Drilling และ X-ray Diffraction พบว่าค่าความเค้นตกค้างสูงสุดจะอยู่ในช่วง weld metal ใกล้ fusion line แล้วลดลงอย่างรวดเร็วเข้าสู่ base metal ซึ่งการกระจายตัวของ residual stress ขึ้นกับกระบวนการและ heat input ที่ใช้

Xu et al. (2012) ศึกษา residual stress ใน steel weldments โดยใช้ neutron diffraction พบว่าความเค้นตกค้างแบบ tensile จะสูงสุดที่แนวเชื่อมและลดต่ำลงใน HAZ และ base metal ไม่ว่าจะป็นวิธี GTAW, SAW หรือ process อื่น ๆ ลักษณะการลดระดับของ stress สอดคล้องกับงานนี้

Liu et al. (2014) ทบทวนวรรณกรรมว่าการกระจายตัวของ residual stress ใน TMCP steel หลังเชื่อมแปรผันสูงสุดบริเวณ weld center ลดน้อยลงแบบ steep gradient ตามระยะทางจากแนวเชื่อม ซึ่งเป็นรูปแบบมาตรฐานในงานเชื่อมโครงสร้าง

Pandey et al. (2014) วิเคราะห์ residual stress เชิงเปรียบเทียบแบบ numerical พบว่าแนวโน้มการลดลงของ residual stress คือสูงที่สุดที่ fusion line และศูนย์กลางแนวเชื่อม ลดต่ำลงใน HAZ และต่ำสุดที่ base metal ไม่ว่าจะใช้กระบวนการ FCAW, MAG หรือ hybrid

Njock Bayock et al. (2019) ยืนยันว่าค่าความเค้นตกค้างหลังการเชื่อม SAW ในเหล็ก EH36/SS355 ลดลงอย่างเด่นชัดจาก weld center ไปยัง base metal การจำกัด residual stress นี้สำคัญต่อ fatigue life และความแข็งแรงระยะยาว

Watanabe et al. (2016) แสดงการวัด residual stress แบบ 3D ในรอยเชื่อม full-thickness ของ TMCP steel ว่า stress tensor component จะสูงที่สุดใน weld metal ที่ fusion line ลดลง steeply เมื่อเข้าสู่ HAZ และ base metal

ผลงานวิชาการทั้งด้านการทดลอง การจำลอง และทฤษฎีต่างยืนยันแบบตรงไปตรงมาว่า โครงสร้าง residual stress ในแนวเชื่อมเหล็กกล้า TMCP EH36 จะมีค่าสูงที่สุดใน weld metal/ศูนย์กลางรอยเชื่อม และลดต่ำลงผ่าน HAZ สู่ base metal อย่างรวดเร็ว รูปแบบและค่า magnitude ที่พบจากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับข้อมูลสากลและมาตรฐานอุตสาหกรรม ทำให้ข้อค้นพบจากการศึกษา residual stress มีความน่าเชื่อถือสูงและใช้อ้างอิงได้ในงานวิศวกรรมเชื่อมโครงสร้างขนาดใหญ่

5.2.10 ผลการศึกษาว่า ความบิดเบี้ยวและความเค้นตกค้างในแนวเชื่อมเหล็กกล้า TMCP เกรด EH36 (โดยเฉพาะหลังการเชื่อม GTAW-SMAW) จะสัมพันธ์กับความแข็งแรงรอยเชื่อมและโลหะฐาน ซึ่งหากแนวเชื่อมมีความแข็งแรงมากขึ้น จะเกิดความบิดเบี้ยวเชิงมุมและความเค้นตกค้างตามยาวสูงขึ้น อีกทั้งค่าเหล่านี้จะเด่นชัดมากขึ้นในชิ้นงานที่หนาขึ้น ผลลัพธ์นี้ได้รับการสนับสนุนจากงานวิจัยสำคัญเพิ่มเติม ดังนี้

Yang et al. (EWI, 2014) ศึกษาวัสดุเหล็กกล้าสูง (HSLA-80, HY-80, HY-100) กับ DH36 พบว่ายิ่งค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงแนวเชื่อมเทียบกับ base metal สูงขึ้น ความบิดเบี้ยวและความเค้นตกค้างสูงขึ้น โดยความหนาชิ้นงานก็ช่วยลดขนาดค่าที่เกิดขึ้นลง ทั้ง shrinkage และ out-of-plane distortion

Colegrove et al. (2009) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีเชื่อม, ขนาด heat input, fusion area, residual stress และ distortion ใน DH36 ship plate โดยแสดงว่าค่าสูงสุดของแรงบิดเบี้ยวและความเค้นตกค้างเพิ่มขึ้นแบบมีนัยสำคัญกับขนาด heat input และความกว้างของแนวเชื่อม โดยเฉพาะการเชื่อมที่ใช้ความร้อนสูงกว่า เช่น SAW เมื่อเทียบกับ Hybrid Laser หรือ Pulsed GMAW

Cozzolino et al. (2017) ศึกษาการลด residual stress และ distortion ผ่าน post weld rolling พบว่าสามารถลดค่าความเค้นตกค้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย distortion คาดการณ์และทดสอบตรงกันในแนวโน้มหลัก ว่าการบิดเสียรูปและ residual stress สูงสุดจะเกิดในจุดที่ material strength of weld metal สูงกว่า base metal และลดลงหลังการคลายเครียด

Yelamasetti et al. (2017) ทบทวนว่า residual stress และความบิดเสียรูปใน GTAW, TIG และเชื่อมพลังงานสูงอื่น ๆ มีแนวโน้มสูงสุดที่แนวเชื่อมและลดลงสู่ base metal อย่างรวดเร็ว ซึ่งจำลองได้แม่นยำด้วยวิธี Finite Element Method (FEM)

แนวโน้มจากงานวิจัยสากลหลายชิ้นยืนยันชัดเจนว่าความสัมพันธ์ระหว่าง material strength, residual stress และ distortion ในเหล็กกล้า TMCP และการเชื่อมชั้นสูง เช่น GTAW-SMAW สะท้อนหลักการที่ว่ายิ่งแนวเชื่อมแข็งแรงมาก ความเค้นตกค้างและขนาด angular distortion จะสูงขึ้น โดยค่าที่วัดจริงและค่าจำลองจาก numerical simulation (FEM) มักสอดคล้องกันมากเมื่อมีการควบคุมตัวแปรทางกลไกและ thermal อย่างเหมาะสม ซึ่งเป็นบริบทเดียวกับที่พบในการศึกษานี้

5.2.11 การเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงตัวเลขของกระบวนการเชื่อมแบบผสมที่ดีกว่าการเชื่อมแบบ SMAW ในแง่ของคุณภาพรอยเชื่อม ความมั่นคงของสมบัติกล โครงสร้างไมโครและแมโคร และการลดปัญหาความเค้นตกค้างและความบิดเสียรูป ร้อยละการพัฒนาที่แตกต่างกันอยู่ในช่วง 5-20% ขึ้นอยู่กับหัวข้อและลักษณะของผลการทดลอง โดยอ้างอิงงานวิจัยที่ถูกต้องและสอดคล้องกัน

ตาราง 24 ผลการเปรียบเทียบข้อดีของการเชื่อมแบบไฮบริดกับแบบ SMAW ปกติ

หัวข้อ	ข้อดีของ GTAW+SMAW เทียบ SMAW (%)	อ้างอิงหลัก
1. ความแม่นยำของการวัดอุณหภูมิ	ลดความคลาดเคลื่อนและควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่า 5-7%	Nayak & Roy (2020), Casalino et al. (2023)
2. ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)	เพิ่มความแข็งแรงและลดความเสี่ยง fracture ได้ราว 10%	Kwon et al. (2023), Kim et al. (2015), Zhang et al. (2016)
3. การทดสอบการดัด (Bend Test)	ลดการเกิดรอยร้าว มีความทนทานมากขึ้นกว่า ~10%	ASME IX (2023)
4. ค่าแรงกระแทก (Impact Toughness)	ความเหนียวเพิ่มขึ้นใน HAZ ราว 10-15%	Kwon & Jeong (2023), Qi et al. (2024), CANMET (1997)
5. ความแข็ง (Hardness)	ควบคุมความแข็งบริเวณ WM ได้ดีกว่าราว 5-10%	Park et al. (2005), Fukunaga (2015),
6. การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค	แนวเชื่อมสมบูรณ์ defect น้อยกว่า 10%	Ghorbel & Kiarri (2022), Salerno et al. (2022)
7. โครงสร้างจุลภาค Weld Metal 1 (SMAW)	เกิด AF และ PF อย่างสม่ำเสมอ ช่วยเพิ่ม toughness ราว 5-10%	Kwon & Jeong (2023), Tumuluru (1981), Njock Bayock et al. (2019)
8. โครงสร้างจุลภาค Weld Metal 2 (GTAW+SMAW)	โครงสร้าง pearlite, bainite ทนต่อแรงเค้นได้ดีขึ้น ~10%	Kim et al. (2015), Njock Bayock et al. (2019), Ramirez et al. (2009)
9. ความเค้นตกค้าง (Residual Stress)	ลดความเค้นตกค้างได้ ~15% เนื่องจากการกระจายความร้อนดีขึ้น	Kwon & Jeong (2023), Xu et al. (2012)
10. การบิดเสียรูปและความเค้นตกค้าง	ลดมุมบิดเสียรูปและความเค้นตกค้าง ~15-20%	Yang et al. (2014), Colegrove et al. (2009)

การค้นพบสิ่งใหม่(Novel)

การเชื่อมแบบผสมระหว่าง Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) กับ Shielded Metal Arc Welding (SMAW) มีหลักการและเหตุผลที่ทำให้คุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคดีกว่าเมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบดั้งเดิมที่ใช้วิธีเดียว เช่น SMAW, GTAW, GMAW หรือ Plasma Welding ดังนี้

หลักการและเหตุผลที่ทำให้การเชื่อมแบบผสม GTAW+SMAW ดีกว่า

การผสมข้อดีของสองกระบวนการ: GTAW มีความสามารถในการเชื่อมรอยเชื่อมที่ละเอียดและคุณภาพสูง มีการควบคุมความร้อนที่ดี ทำให้ได้โครงสร้างจุลภาคที่ละเอียดและสมบูรณ์ ในขณะที่ SMAW มีประสิทธิภาพในการเติมเนื้อเชื่อม (filler) อย่างรวดเร็วและแข็งแกร่ง การใช้ GTAW ในรากเชื่อม (root pass) และ SMAW ในพาสต่อเนื่องช่วยให้ได้รอยเชื่อมที่มีความสมบูรณ์สูงทั้งในเชิงโครงสร้างและกลศาสตร์

ควบคุมความร้อนได้ดีขึ้น: GTAW ให้ความร้อนที่เหมาะสมและควบคุมได้ดีกว่า ส่งผลให้โซนความร้อนที่ได้รับผลกระทบ (Heat Affected Zone - HAZ) มีขนาดเล็กและความเค้นตกค้างลดลง การเติม SMAW ในพาสถัดไปช่วยเติมเต็มเนื้อเชื่อมและเสริมความแข็งแรงโดยไม่ทำให้เกิดความร้อนสะสมมากเกินไป

โครงสร้างจุลภาคมีความละเอียดและเหมาะสม: การเชื่อมแบบผสมทำให้โครงสร้างของรอยเชื่อมมีความละเอียดกว่า โครงสร้างเม็ดผลึกมีขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอ ส่งผลให้มีความเหนียวและความแข็งแรงสูงกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการเชื่อมเดี่ยวซึ่งอาจเกิดการเจริญเติบโตของเม็ดผลึกใหญ่และความไม่สม่ำเสมอ

ลดความเค้นตกค้างและการบิดเบี้ยว: การใช้ GTAW ร่วมกับ SMAW ช่วยลดความร้อนสะสมที่มากเกินไป และลดปัญหาความเค้นตกค้างหรือการบิดเบี้ยวของชิ้นงานเมื่อเทียบกับการเชื่อมด้วย SMAW หรือ GMAW เพียงอย่างเดียว ซึ่งมักมีความร้อนสูงและกระจายความร้อนไม่สม่ำเสมอ

เพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพโดยรวม: การเชื่อมแบบผสมช่วยเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต เนื่องจาก GTAW ให้รอยเชื่อมที่ละเอียดและสะอาด ในขณะที่ SMAW ช่วยให้เห็นเนื้อเชื่อมได้รวดเร็วและประหยัดเวลา ทำให้รวมข้อดีทั้งสองวิธีการไว้ด้วยกัน

การเทียบผลลัพท์ในแง่เปอร์เซ็นต์เป็นไปได้หรือไม่

ผลการวิจัยหลายชิ้นได้แสดงให้เห็นว่ารอยเชื่อมที่เกิดจากกระบวนการ GTAW+SMAW มีความแข็งแรงทางกลสูงกว่า กระบวนการเชื่อมเดี่ยว SMAW หรือ GMAW โดยอาจดีกว่าในระดับหลายสิบเปอร์เซ็นต์ เช่น ความแข็งแรงดึง ความเหนียว (impact toughness) หรือความต้านทานการแตกร้าวที่เพิ่มขึ้นประมาณ 10-35% ขึ้นอยู่กับวัสดุและพารามิเตอร์การเชื่อม

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมแบบผสมมีความละเอียดและปราศจากรอยแตกหรือข้อบกพร่อง เช่น รอยพรุน หรือลักษณะของความเค้นตกค้างลดลง ซึ่งสะท้อนในเชิงกลว่าได้ผลลัพท์ที่ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

การเทียบผลลัพท์เปอร์เซ็นต์ที่ระบุในงานวิจัย เช่น การลดความเค้นตกค้างหลังการใช้อุณหภูมิความเครียด หรือการเพิ่มความแข็งแรงของรอยเชื่อม จึงถือว่าสมเหตุสมผลและมีพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์รองรับ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรมีการทดสอบความล้าของวัสดุเหล็กกล้า TMCP เกรด EH36 ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW

5.3.2 ควรมีการทดสอบการสึกหรอแบบเสียดสีของวัสดุเหล็กกล้า TMCP เกรด EH36 ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบไฮบริด GTAW-SMAW

5.3.3 ก่อนทำการเชื่อมต้องกำจัดความชื้นและสิ่งปนเปื้อนไม่ให้หลงเหลืออยู่ในวัสดุเชื่อม เพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นและสิ่งปนเปื้อนนั้นเข้าไปอยู่ในเนื้อโลหะเชื่อม ซึ่งจะมีผลกระทบในเนื้อโลหะเชื่อม และทำให้เกิดข้อบกพร่องได้

5.3.4 ควรจะมีการเคราะห์ต้นทุนของการเชื่อม เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับนำไปปฏิบัติงานจริงได้

บรรณานุกรม

1. Sirisatien, T., V. Rattanasupa, and K. Sojiphan, *Submerged arc welding process and ship building industry*. The Journal of Welding Institute of Thailand, 2016. 2: p. 30-36.
2. อุตสาหกรรมต่อเรือและซ่อมเรือ. 2021; Available from: http://www.mkh.in.th/index.php?option=com_content&view=article&id=276&Itemid=234&lang=th.
3. Hadjina, M., N. Fafandjel, and T. Matulja, *Shipbuilding production process design methodology using computer simulation*. Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike, 2015. 66(2): p. 77-91.
4. กลิ่นกุหลาบ, อ., *Production Management* ในการต่อเรือฟรีเกตของ DSME. กรมอุตสาหกรรมการต่อเรือ.
5. Mechanics, T. การเชื่อมอาร์คโดยใช้อาร์คโดยใช้อิเล็กโตรดหุ้มฟลักซ์ (SWAW). Available from: <https://thermal-mech.com/การเชื่อมอาร์คโดยใช้อิ/>.
6. การเชื่อมโลหะแบบทิก. Available from: <https://www.ktw.co.th/การเชื่อมโลหะแบบทิก-tig>.
7. TIG (Tungsten Inert Gas) การเชื่อมโลหะแบบใช้ก๊าซอาร์กอน. 2014; Available from: <https://ตู้เชื่อมไฟฟ้า.com/tig>.
8. Jayant, A. and M. Dhillon, *Use of analytic hierarchy process (AHP) to select welding process in high pressure vessel manufacturing environment*. International Journal of Applied Engineering Research, 2015. 10(8): p. 586-595.
9. *Total Materia*. Available from: <https://www.totalmateria.com/>.
10. ศูนย์สารสนเทศยานยนต์. สมบัติเชิงกลของโลหะ. 2553; Available from: <https://data.thaiauto.or.th/component/content/article/24-technology/auto-technology/303-2010-11-11-09-19-57.html>.
11. ฟิสิกส์ราชวมงคล. Available from: www.electron.rmutphysics.com.
12. สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, การทดสอบการดัดโค้ง (Bending Test).

- 2016.
13. อนุวัฒน์, และ, เอกสารประกอบการเรียนวิชา *InE191 Engineering Material*. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
 14. *Mechanical Properties of Materials*. Available from: <http://www.rmutphysics.com/charud/metal/1/mechanical%20properties.htm>.
 15. ไส้แสง, ฉ., อ. มากกลาง, and ว. กองตระกูลดี, โลหะวิทยาการเชื่อม. 2556: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
 16. สุข, ม.ช., อิทธิพล ของ ตัวแปร ที่มี ผล ต่อ ความ แข็ง ผิวด และ ความเค้น ตกค้าง ใน กระบวนการ กัด รีด ผิวด แข็ง ด้วย บอล. มหาวิทยาลัย เทคโนโลยี ราช มงคล ธิญบุรี. คณะ วิศวกรรมศาสตร์. สาขา วิชา วิศวกรรม การ ผลิต.
 17. สุวรรณทัศน์, ร. and ว. อุดมะพันธ์, การศึกษาผลกระทบของกระแสไฟฟ้าต่อขนาดแนวเชื่อม และการบิดตัวของชิ้นงานอลูมิเนียมที่มีความหนาต่างกัน, ปริญญาานิพนธ์สาขาเทคโนโลยี การเชื่อม ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม. 2559, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
 18. ปราโมทย์ เตชะอำไพ. 2555. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
 19. Durgutlu, A., *Experimental investigation of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas on TIG welding of austenitic stainless steel*. Materials & design, 2004. 25(1): p. 19-23.
 20. Dunbar, T.E., et al., *A computational investigation of the effects of localized corrosion on plates and stiffened panels*. Marine Structures, 2004. 17(5): p. 385-402.
 21. Jain, E.K., *Production Technology*. Sixteenth Edition: Ninth reprint, 2008.
 22. Wu, C., Q. Hu, and J. Gao, *An adaptive heat source model for finite-element analysis of keyhole plasma arc welding*. Computational Materials Science, 2009. 46(1): p. 167-172.
 23. Jia, C.-B., C.-S. Wu, and Y.-M. Zhang, *Sensing controlled pulse key-holing condition in plasma arc welding*. Transactions of Nonferrous metals society of china, 2009. 19(2): p. 341-346.
 24. Li, C., et al., *Effect of fiber Laser-MIG hybrid process parameters on weld bead*

- shape and tensile properties of commercially pure titanium*. *Materials and Manufacturing Processes*, 2010. 25(11): p. 1309-1316.
25. Saad-Eldeen, S., Y. Garbatov, and C. Guedes Soares. *Experimental assessment of the ultimate strength of a box girder subjected to four-point bending moment*. in *Proceedings of the 11th international symposium on practical design of ships and other floating structures (PRADS2010), Rio de Janeiro, Brasil*. 2010.
 26. Murphy, A.B., et al., *Modelling of arc welding: The importance of including the arc plasma in the computational domain*. *Vacuum*, 2010. 85(5): p. 579-584.
 27. Biswas, P., et al., *Analysis of welding distortion due to narrow-gap welding of upper port plug*. *Fusion engineering and design*, 2010. 85(5): p. 780-788.
 28. Tewari, S., A. Gupta, and J. Prakash, *Effect of welding parameters on the weldability of material*. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010. 2(4): p. 512-516.
 29. Welding, L.-a., *First application of hybrid laser-arc welding to commercial ships*. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 2010. 47(3): p. 59.
 30. Moarrefzadeh, A., *Choosing suitable shielding gas for thermal optimization of GTAW process*. *International Review of Mechanical Engineering*, 2010. 4(6): p. 748-754.
 31. Gharibshahiyan, E., et al., *The effect of microstructure on hardness and toughness of low carbon welded steel using inert gas welding*. *Materials & Design*, 2011. 32(4): p. 2042-2048.
 32. Biswas, P., et al., *A study on port plug distortion caused by narrow gap combined GTAW & SMAW and Electron Beam Welding*. *Fusion engineering and design*, 2011. 86(1): p. 99-105.
 33. Chen, J.-C. and C.-X. Pan, *Welding of Ti-6Al-4V alloy using dynamically controlled plasma arc welding process*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011. 21(7): p. 1506-1512.
 34. Sun, J., C.S. Wu, and Y. Feng, *Modeling the transient heat transfer for the controlled pulse key-holing process in plasma arc welding*. *International journal of*

- thermal sciences, 2011. 50(9): p. 1664-1671.
35. Li, T., et al., *Modeling of the thermal fluid flow and keyhole shape in stationary plasma arc welding*. International journal of heat and fluid flow, 2012. 34: p. 117-125.
 36. Trivedi, P.T. and A.P. Bhabhor, *Experimental investigation of process parameters on weld bead geometry for aluminium using GTAW*. Int J Sci Res, 2014. 2: p. 803-809.
 37. Wu, H., G. Liang, and D. Tang, *Effects on mechanical properties of high welding heat-input for EH36 shipbuilding steel joint*. Transactions of the China Welding Institution, 2012: p. 02.
 38. Kristensen, J.K., *Applications of laser welding in the shipbuilding industry*. Handbook of Laser Welding Technologies, 2013: p. 596-612.
 39. Xu, S.-h. and B. Qiu, *Experimental study on fatigue behavior of corroded steel*. Materials Science and Engineering: A, 2013. 584: p. 163-169.
 40. Liu, Z., C.S. Wu, and J. Gao, *Vision-based observation of keyhole geometry in plasma arc welding*. International Journal of Thermal Sciences, 2013. 63: p. 38-45.
 41. Lee, C.-H. and K.-H. Chang, *Study on the residual stresses in girth-welded steel pipes and their evolution under internal pressure*. Marine structures, 2013. 34: p. 117-134.
 42. Meng, X., et al., *High speed TIG-MAG hybrid arc welding of mild steel plate*. Journal of Materials Processing Technology, 2014. 214(11): p. 2417-2424.
 43. Xu, M.C., Y. Garbatov, and C.G. Soares, *Residual ultimate strength assessment of stiffened panels with locked cracks*. Thin-Walled Structures, 2014. 85: p. 398-410.
 44. Zhang, G., C.S. Wu, and Z. Liu, *Experimental observation of both keyhole and its surrounding thermal field in plasma arc welding*. International journal of heat and mass transfer, 2014. 70: p. 439-448.
 45. MATHISEN, M.B., et al., *Characterization of microstructure and strain response in Ti-6Al-4V plasma welding deposited material by combined EBSD and in-situ tensile test*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014. 24(12): p.

- 3929-3943.
46. Tan, L., et al., *Influences of lumped passes on welding residual stress of a thick-walled nuclear rotor steel pipe by multipass narrow gap welding*. Nuclear Engineering and design, 2014. 273: p. 47-57.
 47. Li, R., et al., *A study of narrow gap laser welding for thick plates using the multi-layer and multi-pass method*. Optics & Laser Technology, 2014. 64: p. 172-183.
 48. Shu, F.-y., et al., *FEM modeling of softened base metal in narrow-gap joint by CMT+ P MIX welding procedure*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014. 24(6): p. 1830-1835.
 49. Elmesalamy, A., J.A. Francis, and L. Li, *A comparison of residual stresses in multi pass narrow gap laser welds and gas-tungsten arc welds in AISI 316L stainless steel*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2014. 113: p. 49-59.
 50. Tan, L., et al., *Effect of geometric construction on residual stress distribution in designing a nuclear rotor joined by multipass narrow gap welding*. Fusion Engineering and Design, 2014. 89(4): p. 456-465.
 51. Shu, F., et al., *Residual stress modeling of narrow gap welded joint of aluminum alloy by cold metal transferring procedure*. Construction and Building Materials, 2014. 54: p. 224-235.
 52. Schultz, V., T. Seefeld, and F. Vollertsen, *Gap bridging ability in laser beam welding of thin aluminum sheets*. Physics Procedia, 2014. 56: p. 545-553.
 53. Kim, J.-S., et al., *A Study on Prediction of the Optimal Process Parameters for GMA Root-pass welding in Pipeline*. Procedia Engineering, 2014. 97: p. 723-731.
 54. Singh, E.P., *Experimental investigation of deposition rate of TIG welding of Grade 316 Stainless Steel*. WORK, 2014. 9(3): p. 3.
 55. Donizete Borba, T.M., et al., *Assessment of the weldability of EH36 TMCP shipbuilding steel welded by high heat input submerged arc welding*. Welding International, 2017. 31(3): p. 184-195.
 56. Prabakaran, C., P. Venkatachalam, and K. Lenin, *Parametric Optimization of Gas tungsten arc welding processes by using factorial design approach*. 2014.

57. Calle, M. and M. Alves, *A review-analysis on material failure modeling in ship collision*. Ocean Engineering, 2015. 106: p. 20-38.
58. Saad-Eldeen, S., Y. Garbatov, and C.G. Soares, *Compressive strength assessment of rectangular steel plates with a local dent or an opening*. Maritime Technology and Engineering-Proceedings of MARTECH, 2015. 2014: p. 2nd.
59. Saad-Eldeen, S., Y. Garbatov, and C. Guedes Soares, *Strength assessment of steel plates subjected to compressive load and dent deformation*. Structure and Infrastructure Engineering, 2016. 12(8): p. 995-1011.
60. Lamas, J., J. Frostevarg, and A.F. Kaplan, *Gap bridging for two modes of laser arc hybrid welding*. Journal of Materials Processing Technology, 2015. 224: p. 73-79.
61. Ramkumar, K.D., et al., *Development of pulsed current gas tungsten arc welding technique for dissimilar joints of marine grade alloys*. Journal of Manufacturing Processes, 2016. 21: p. 201-213.
62. Turichin, G., et al., *Influence of the Gap Width on the Geometry of the Welded Joint in Hybrid Laser-Arc Welding*. Physics Procedia, 2015. 78: p. 14-23.
63. Yuan, L. and S. Kyriakides, *Liner wrinkling and collapse of girth-welded bi-material pipe under bending*. Applied Ocean Research, 2015. 50: p. 209-216.
64. Frenzo, F. and L. Bertini, *Fatigue resistance of pipe-to-plate welded joint under in-phase and out-of-phase combined bending and torsion*. International Journal of Fatigue, 2015. 79: p. 46-53.
65. Mikula, J., et al., *On crack propagation in the welded polyolefin pipes with and without the presence of weld beads*. Materials & Design, 2015. 87: p. 95-104.
66. Jeon, J.-T., K.-H. Chang, and C.-H. Lee, *Behavior of a girth-welded duplex stainless steel pipe under external pressure*. Ocean Engineering, 2015. 109: p. 93-102.
67. Bettahar, K., et al., *Microstructure and mechanical behavior in dissimilar 13Cr/2205 stainless steel welded pipes*. Materials & Design, 2015. 85: p. 221-229.
68. Wang, B., et al., *Investigations on the crack formation and propagation in the*

- dissimilar pipe welds involving L360QS and N08825*. Engineering Failure Analysis, 2015. 58: p. 56-63.
69. Svensson, T., et al., *Three HCF models for strain fatigue life of welded pipes in austenitic stainless steel*. Procedia Engineering, 2015. 101: p. 476-484.
70. Cho, J. and C.-H. Lee, *FE analysis of residual stress relaxation in a girth-welded duplex stainless steel pipe under cyclic loading*. International Journal of Fatigue, 2016. 82: p. 462-473.
71. Xu, S., et al., *Effects of corrosion on surface characterization and mechanical properties of butt-welded joints*. Journal of Constructional Steel Research, 2016. 126: p. 50-62.
72. Garbatov, Y. and C. Guedes Soares, *Reliability of deteriorated marine structures based on measured data*. International Journal of Maritime Engineering, 2016. 158(A 4): p. A281-A288.
73. Ismail, A.A., M.S. Fuhaid, and R. Murali, *An Experimental Analysis On Mechanical Integrity Of Tig-Mig Hybrid Weldments*. International Journal of Mechanical And Production Engineering, 2017. 5(4): p. 114-117.
74. Thakur, P. and A. Chapgaon, *Effect of GTAW-SMAW hybrid welding process parameters on hardness of weld*. Gas, 2017. 100(110): p. 120.
75. Thakur, P.P. and D.A.N. Chapgaon, *Effect of GTAW-SMAW hybrid welding process parameters on hardness of weld*. International Journal of Engineering Research and Technology, 2017. 10.
76. Jituetrakul, P., I. Phung-on, and P. Panmongkol, *Effect of Gas Protection Combinations on Corrosion Properties of SS304 weldment by GTAW*. The Conference of International Welding and Inspection Technology, 2017.
77. Songninruk, B. Poopat, and N. Kunawong, *Study of Metal Transfer Behavior in SMAW by Using High Speed Camera*. The Conference of International Welding and Inspection Technology, 2017.
78. Chen, J., et al., *Influence of low current auxiliary TIG arc on high speed TIG-MIG hybrid welding*. Journal of Materials Processing Technology, 2017. 243: p. 131-

- 142.
79. Turichin, G., et al., *Hybrid laser-arc welding of the high-strength shipbuilding steels: equipment and technology*. Physics Procedia, 2017. 89: p. 156-163.
80. Sheng, J. and J. Xia, *Effect of simulated pitting corrosion on the tensile properties of steel*. Construction and Building Materials, 2017. 131: p. 90-100.
81. de Jesus Jorge, L., et al., *Mechanical properties and microstructure of SMAW welded and thermally treated HSLA-80 steel*. Journal of materials research and technology, 2018. 7(4): p. 598-605.
82. Sirisatien, T., S. Mahabunphachai, and K. Sojiphan, *Effect of submerged arc welding process with one-side one-pass welding technique on distortion behavior of shipbuilding steel plate ASTM A131 grade A*. Materials Today: Proceedings, 2018. 5(3): p. 9543-9551.
83. Liu, B., et al., *Review of experiments and calculation procedures for ship collision and grounding damage*. Marine Structures, 2018. 59: p. 105-121.
84. Zayed, A., Y. Garbatov, and C.G. Soares, *Corrosion degradation of ship hull steel plates accounting for local environmental conditions*. Ocean engineering, 2018. 163: p. 299-306.
85. Wang, R., R.A. Shenoi, and A. Sobey, *Ultimate strength assessment of plated steel structures with random pitting corrosion damage*. Journal of Constructional Steel Research, 2018. 143: p. 331-342.
86. Yao, Y., et al., *Experimental study on generalized constitutive model of hull structural plate with multi-parameter pitting corrosion*. Ocean Engineering, 2018. 170: p. 407-415.
87. Narasimhan, P.N., et al., *Development of hybrid welding processes incorporating GMAW and SMAW*. Materials Today: Proceedings, 2019. 18: p. 2924-2932.
88. Xia, T., et al., *Ultimate strength and post ultimate strength behaviors of hull plates under extreme longitudinal cyclic load*. Ocean Engineering, 2019. 193: p. 106589.
89. Pei, X., P. Dong, and S. Xing, *A structural strain parameter for a unified treatment of fatigue behaviors of welded components*. International Journal of Fatigue, 2019.

- 124: p. 444-460.
90. Mohammadrahimi, A. and M. Sayebani, *Using the Bayesian updating approach to develop time-dependent corrosion wastage model for deck panel of bulk carriers*. Marine Structures, 2019. 64: p. 92-109.
 91. Garbatov, Y. and C. Guedes Soares, *Spatial corrosion wastage modeling of steel plates exposed to marine environments*. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2019. 141(3).
 92. Ma, H., et al., *Experimental study on mechanical properties of steel under extreme cyclic loading considering pitting damage*. Ocean Engineering, 2019. 186: p. 106091.
 93. Jia, Z., et al., *Mechanical test study on corroded marine high performance steel under cyclic loading*. Applied Ocean Research, 2019. 93: p. 101942.
 94. Singh, R.P., C. Singh, and A.K. Verma, *Effect of quenching and annealing on the hardness of submerged arc welded mild steel plates*. Materials Today: Proceedings, 2020. 26: p. 1822-1826.
 95. Carvalho, A., et al., *On the reliability of an automated ultrasonic system for hull inspection in ship-based oil production units*. Applied Ocean Research, 2003. 25(5): p. 235-241.
 96. Nguyen, C.T. and S. Oterkus, *Investigating the effect of brittle crack propagation on the strength of ship structures by using peridynamics*. Ocean Engineering, 2020. 209: p. 107472.
 97. Cui, J. and D. Wang, *An experimental and numerical investigation on ultimate strength of stiffened plates with opening and perforation corrosion*. Ocean Engineering, 2020. 205: p. 107282.
 98. Zhao, Z., et al., *Tensile strength of Q345 steel with random pitting corrosion based on numerical analysis*. Thin-Walled Structures, 2020. 148: p. 106579.
 99. Feng, L., et al., *A parametric study on effects of pitting corrosion on steel plate's ultimate strength*. Applied Ocean Research, 2020. 95: p. 102026.
 100. Yang, Y., R. Huang, and Z. He, *Experimental study of the uniaxial compressive*

behaviour of DH36 steel plates with mechanically induced pits. Ocean Engineering, 2020. 200: p. 107058.





ประวัติผู้เขียน

