



วารสารวิชาการ สถาบันการเชื่อมแห่งประเทศไทย The Journal of Welding Institute of Thailand

ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2559

Vol. 2, No. 1, January - June 2016

ISSN : 2465-406X



WIT 03

Better than yesterday, everyday



บริษัท เอ็ม.ซี.เอส.สตีล จำกัด (มหาชน)

เป็นผู้ผลิต และติดตั้งงานโครงสร้างที่มีกำลังการผลิต 5,000-6,000 ตัน/เดือน โดยเราได้ผลิตให้กับลูกค้าโดยตรงในประเทศ และส่งออกไปยังประเทศกัมพูชาจนถึง ร้อยละ 90 สินค้าของเราได้รับการรับรองมาตรฐานสากล เป็นที่ยอมรับในประเทศไทย และประเทศญี่ปุ่น ตามนโยบายคุณภาพที่ว่า



“เราเป็นผู้ผลิต ติดตั้งและทดสอบ
งานโครงสร้างเหล็กที่มีคุณภาพ
ได้มาตรฐานสากล เป็นที่พึงพอใจของลูกค้า”

เจ้าของ สถาบันการเชื่อมแห่งประเทศไทย

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.ธีรภูมิ บุญยโสภณ
รองศาสตราจารย์ ดร.บรรเลง ศรีนิล

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อดีตอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนาฤทธิ์ เศรษฐกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองหัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ศิริพร ดาวพิเศษ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เมธีพงษ์ พัฒนศักดิ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ทรงคุณวุฒิ

Prof. Dr.-Ing. Fritz Hartung

University Dortmund and University of Applied Sciences
Trier, Germany

รองศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ ทิมทรัพย์
รองศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ พัฒนพงศ์
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต สุขสวัสดิ์
รองศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ศรียรรยงค์
รองศาสตราจารย์ ดร.เนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนา แก้วมณี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ ช่วยพันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยุคล จุลอุภัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธีรฐ์ แก้วสกุล
อาจารย์ ดร.กิตติชัย ไสจพันธ์
ดร.สมนึก ฉัตรจิ๋ว
นายสมพงษ์ เมธาสถิตยสุข
นายวิรัตน์ ชนะสิทธิ์
นายสุชิน คราวุธ
นายมนูศักดิ์ ฤกษ์ปานี
นายธานี โมสกุล
นายภูริ กาลเนากุล

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยีไทย-ฝรั่งเศส
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
นักวิชาการอิสระ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
บริษัท เอ็กซ์เพทิฟ จำกัด
สมาคมผู้ก่อสร้างงานเหล็กไทย
สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย
สมาคมการเชื่อมและการตรวจสอบแห่งประเทศไทย
บริษัท ไอเอส อินดัสทรี (ไทยแลนด์) จำกัด
บริษัท ลอยด์ รีเสเตอร์ อินเตอร์เนชันแนล ประเทศไทย จำกัด
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ทรงคุณวุฒิ (เฉพาะฉบับ)

รองศาสตราจารย์ ดร.บรรเลง ศรีนิล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ ทิมทรัพย์	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
รองศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ พัฒนพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรเนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยุคล จุลอุภัย	นักวิชาการอิสระ
อาจารย์ ดร.กิตติชัย โคจิพันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
นายวิรัตน์ ชนะสิทธิ์	สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย
นายสุชิน คธาวัชร	สมาคมการเชื่อมและการตรวจสอบแห่งประเทศไทย
นายมนุศักดิ์ ฤกษ์ปानी	บริษัท ไอเอส อินดัสทรี (ไทยแลนด์) จำกัด
นายธานี โมสกุล	บริษัท ลอยด์ รีวิสเตอร์ อินเทอร์เน็ต ประเทศไทย จำกัด
นายภูริ กาลเนากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ฝ่ายประสานงานและจัดการ

นางสาวสุภาภรณ์ เลขพัฒน์
นางสาวอโนชา ทิมทรัพย์
นางสาวกนกวรรณ จิตต์งามขำ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อสนับสนุนและกระตุ้นให้มีการเขียนผลงานทางวิชาการ
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการของคณาจารย์ นักวิชาการ และนักศึกษา ทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยฯ
3. เพื่อเป็นสื่อกลางทางการศึกษา ค้นคว้า และเผยแพร่ความรู้ทางวิชาการ

การส่งบทความ

1. ส่งทาง E-mail เป็น Microsoft Word Document และ PDF ไฟล์ไปที่ welding@kmutnb.ac.th, anwida.t@tfii.kmutnb.ac.th
2. ส่งต้นฉบับทางไปรษณีย์ไปที่สำนักงาน

กำหนดการออกวารสาร ปีละ 2 ฉบับ ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม

ลักษณะบทความ

1. ต้องไม่เคยเผยแพร่ในวารสารอื่นใดมาก่อนหรือไม่อยู่ในขั้นตอนการพิจารณาเพื่อเผยแพร่ในวารสารอื่น ๆ
2. ต้องเป็นผลงานวิจัยที่มีผลกระทบในวงกว้าง

สำนักงาน สถาบันการเชื่อมแห่งประเทศไทย

1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร 02 555 2512 โทรสาร 02 585 3810

E-mail: anbthailand@gmail.com, welding@kmutnb.ac.th

บทความที่ลงพิมพ์เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น
ผู้เขียนจะต้องเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความนั้น

วารสารวิชาการสถาบันการเชื่อมแห่งประเทศไทย

The Journal of Welding Institute of Thailand

ISSN : 2465-406X

ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2559

Vol. 2, No. 1, January – June 2016

บทความวิจัย

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการเกิดความเค้นตกค้างในการเชื่อมพอลิเมอร์และพลาสติกโดยใช้โลหะแผ่นร้อน

Finite Element Modeling of Residual Stress Formation in Hot Plate Welding of Polymers and Plastics 1

กิตติชัย ไศรีพันธุ์

บทความวิชาการ

การเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำและเหล็กกล้าผสมสูง 7

Black-White Welding

บรรเลง ศรีนิล, กอบบุญ หล่อทองคำ, Fritz Hartung

มาตรฐานการตรวจสอบสำหรับ Inspector ที่เกี่ยวข้องกับงาน In-Service Inspection ในอุตสาหกรรม Oil & Gas 15

สมพล เพชรฤทธิ์

ลวดเชื่อมมีสารพอกหุ้มสำหรับเหล็กกล้าไม่เจือ 21

Covered Electrode for Non-Alloy Steels

ยุคล จุลอุทัย

กระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์กับอุตสาหกรรมต่อเรือ 30

Submerged Arc Welding Process and Ship Building Industry

ธนวัฒน์ ศิริสถียร, วิทยา รัตนสุภา, กิตติชัย ไศรีพันธุ์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการเกิดความเค้นตกค้างในการเชื่อมพอลิเมอร์และพลาสติกโดยใช้โลหะแผ่นร้อน

Finite Element Modeling of Residual Stress Formation in Hot Plate Welding of Polymers and Plastics

กิตติชัย โสจิพันธุ์ (Kittichai Sojiphan)^{1*}

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

1518 ถนนประชาธนาภรณ์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทร (02) 555-2000 ต่อ 6406

(kittichai.s@cit.kmutnb.ac.th)*

บทคัดย่อ

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้คำนวณค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในชิ้นงานได้ บทความนี้กล่าวถึงกระบวนการเชื่อมพอลิเมอร์และพลาสติกโดยใช้โลหะแผ่นร้อน และทำการคำนวณค่าการกระจายตัวของความเค้นตกค้างในชิ้นงานโพลีคาร์บอเนตที่ผ่านการเชื่อมโดยใช้โลหะแผ่นร้อนที่อุณหภูมิ 230-250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 35-60 วินาที โดยใช้โปรแกรม ANSYS 11.0 จากผลการคำนวณพบว่าค่าความเค้นตกค้างมีขนาดสูงที่บริเวณใกล้ผิวสัมผัสโลหะแผ่นร้อนและมีขนาดแตกต่างกันที่เวลาต่างกันและใช้พารามิเตอร์ในการเชื่อมที่ต่างกัน

คำสำคัญ: ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ความเค้นตกค้าง, การเชื่อมด้วยโลหะแผ่นร้อน, โพลีคาร์บอเนต, การเชื่อมพลาสติก

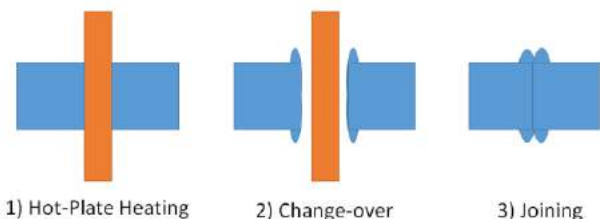
Abstract

Finite element modeling is a popular method used to calculate residual stress within the material. In this article, hot plate welding process of polymer and plastic is discussed. The residual stress distribution within polycarbonate samples subjected to hot plate welding at 230-250°C with welding time of 35-60 seconds were calculated using ANSYS 11.0 finite element software. The results show increasing residual stress in the region near the hot plate and the values of residual stress vary with time and parameters used during hot plate welding.

Keyword: finite element modeling, residual stress, hot plate welding, polycarbonate, plastic welding

1. บทนำ

การเชื่อมพอลิเมอร์และพลาสติกโดยใช้โลหะแผ่นร้อน (hot plate welding) เป็นวิธีที่นิยมสำหรับเชื่อมชิ้นส่วนเทอร์โมพลาสติก โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ โดยอาศัยความร้อนจากโลหะแผ่นร้อนที่อุณหภูมิสูง (สูงกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุประมาณ 30-100°C) มาสัมผัสกับผิวของชิ้นงานที่ต้องการจะเชื่อมเข้าด้วยกันเป็นระยะเวลาหนึ่งจนกระทั่งเกิดการหลอมละลาย (melt layer) จึงนำโลหะแผ่นร้อนออกก่อนจะกดชิ้นงานที่หลอมเข้าด้วยกันและให้ชิ้นงานเย็นตัวลง ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งในทางปฏิบัติจะต้องเลือกอุณหภูมิของโลหะแผ่นร้อน และเวลาในการสัมผัสให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ชั้นหลอมละลายที่เหมาะสมสำหรับการกดรีด (squeeze out) [1]



รูปที่ 1 การเชื่อมพอลิเมอร์และพลาสติกโดยใช้โลหะแผ่นร้อน

ความร้อนและแรงกดในขณะที่เชื่อม ส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้าง (residual stress) สะสมในชิ้นงาน โดยเฉพาะบริเวณใกล้แนวเชื่อม ซึ่งอาจจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน นอกจากจะมีแรงจากภายนอกมากระทำ หรือได้รับผลกระทบจากสภาวะแวดล้อม ทำให้ชิ้นงานหรือโครงสร้างเกิดการชำรุดเสียหายได้ อันเนื่องมาจากอายุการใช้งานหรือความต้านทานความล้า (fatigue life) ลดลง ความทนต่อการแตกหัก (fracture toughness) ลดลง ความสามารถในการรับแรงในสภาวะ

สถิต (static loading) และสภาวะพลวัต (dynamic loading) ลดลง นอกจากนี้ความเค้นตกค้างยังทำให้เกิดรอยแตกหรือ ผิวดแตก (cracking and crazing) ในชิ้นงานได้ โดยเฉพาะเมื่อสัมผัสกับสารละลาย (solvent) [2-5] อย่างไรก็ตามความเค้นตกค้างอาจมีประโยชน์ในการเพิ่มความแข็งแรง (strength) ให้กับโครงสร้างภายใต้แรงดึง (tensile loading) [6, 7]

เทคนิคที่นิยมใช้ในการวัดค่าความเค้นตกค้างใน ชิ้นงานพลาสติก ได้แก่ เทคนิค photoelasticity และการทดสอบด้วยสารละลาย (GE solvent test) [8, 9] การวัดค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมชิ้นงานพอลิเมอร์หรือพลาสติกโดยใช้โลหะแผ่นร้อนจะช่วยลดความเสี่ยงหรือป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในชิ้นงาน

อย่างไรก็ตามการคำนวณหาความสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าของความเค้นตกค้างในชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากการใช้พารามิเตอร์ในการเชื่อมยังมีข้อจำกัดอยู่มาก วิธีที่นิยมใช้ในการคำนวณหาความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้น คือการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถใช้สร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมศาสตร์และคณิตศาสตร์ขั้นสูงได้ แต่ข้อจำกัดคือข้อมูลสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงมาก รวมถึงการกระทำจากแรงภายนอกที่มีความซับซ้อน ยังมีไม่เพียงพอสำหรับแต่ละชนิดของวัสดุหรือกระบวนการ ทำให้แบบจำลองที่ผ่านมามีมาอาจยังไม่สามารถทำนายค่าความเค้นตกค้างได้แม่นยำนัก เนื่องจากต้องอาศัยสมมติฐานจำนวนมากในการสร้างโมเดลสำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ

จากการทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [10, 11, 12] พบว่า ได้มีการศึกษาการกระจายของอุณหภูมิใน ชิ้นงานโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate) ที่เชื่อมโดยใช้ โลหะแผ่นร้อน และทำการวัดและคำนวณหาค่าของความเค้นตกค้างในชิ้นงานโดยใช้โปรแกรม ABAQUS โดยใช้ สมบัติทางความร้อนที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ รวมถึงการสร้างความสัมพันธ์ของสมบัติทางกล คือความเหนียวหรือความยืดหยุ่น (viscoelastic property) ของโพลีคาร์บอเนต เพื่อจำลองพฤติกรรมกลไกในสภาวะกึ่งของแข็งที่ อุณหภูมิต่าง ๆ ผู้วิจัยได้ปรับปรุงแบบจำลองของ Lu [10] โดยปรับจากค่า Relaxation modulus ของโพลีคาร์บอเนตที่มีความสัมพันธ์ตาม William-Landell-Ferry Shift Equation ในแบบจำลองของ Lu [10] มาใช้เป็นค่า Relaxation modulus ที่มีความสัมพันธ์ตามสมการในรูปแบบของ

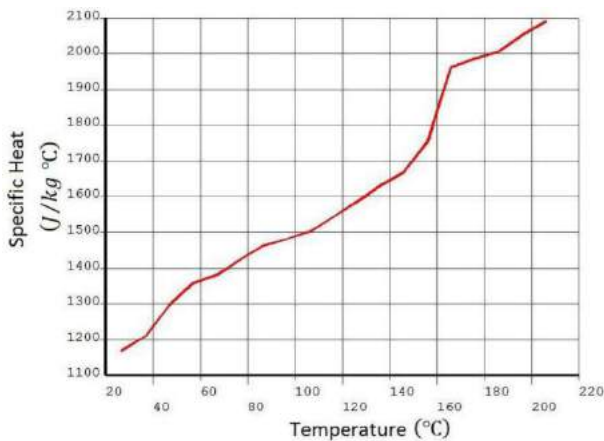
Arrhenius-type [12] แทน โดยใช้โปรแกรม ANSYS 11.0 เพื่อทำการศึกษาและเปรียบเทียบค่าความเค้นตกค้างใน ชิ้นงานโพลีคาร์บอเนตที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมโดยใช้ โลหะแผ่นร้อน [13, 14, 15]

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

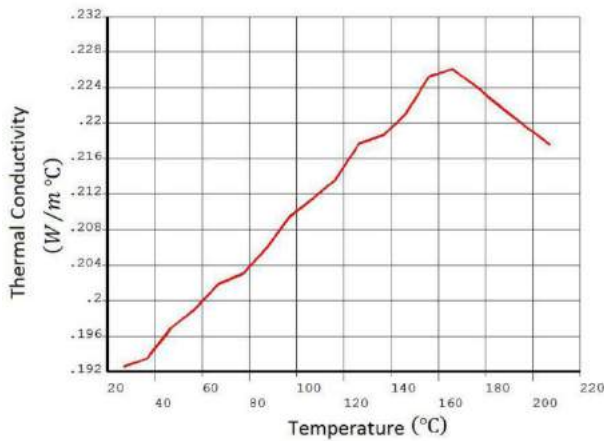
ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บน โปรแกรม ANSYS 11.0 [15] เพื่อศึกษาค่าการกระจายตัว ของอุณหภูมิและค่าความเค้นตกค้างบนชิ้นงานโพลีคาร์บอเนต ที่ผ่านการเชื่อมโดยใช้โลหะแผ่นร้อนที่อุณหภูมิ 230-250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 35-60 วินาที ซึ่งเป็นช่วง อุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานโพลีคาร์บอเนตโดยใช้โลหะแผ่นร้อน [1] โดยทำการคำนวณแบบแยกโมเดลระหว่างการคำนวณทางความร้อนก่อนที่จะ นำผลการกระจายความร้อนที่ได้มาคำนวณทางกลเพื่อ คำนวณหาความเค้น ความเครียด และค่าความเค้นตกค้างในชิ้นงานต่อไป โดยเลือกใช้เอลิเมนต์แบบ 8 โหนด (node) ชนิด PLANE77 สำหรับการคำนวณทางความร้อน (Thermal modeling) และ VISCO88 สำหรับการคำนวณทางกล (Mechanical modeling) โดยสมมติฐานของโมเดลที่กำหนดไว้ ได้แก่ การทำโมเดลแบบสองมิติ (2-D modeling) การคำนวณโดยแยกโมเดลความร้อนและโมเดลทางกล (Uncoupled thermal-mechanical analysis) การใช้ ชิ้นงานเพียง 1 ใน 4 ส่วน เนื่องจากชิ้นงานสมมาตร คุณสมบัติของวัสดุไม่ขึ้นกับทิศทาง (isotropic) และเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โมเดลไม่ได้พิจารณาความต้านทานทางความร้อน (Thermal contact resistance) แต่พิจารณาการสูญเสียความร้อนแบบแผ่กระจาย (convection) กับบรรยากาศ และ โมเดลนี้ไม่ได้พิจารณาคุณสมบัติทางการไหล (Rheological behavior) ของวัสดุ ขณะหลอมละลาย แต่คำนวณแค่ค่าของความเค้นตกค้างเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal residual stress) เท่านั้น

ในโมเดลนี้ได้ใช้โมเดลวัสดุของโพลีคาร์บอเนตจากค่าสมบัติที่เปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิตามงานวิจัยของ Lu [10] ได้แก่ ค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat) ค่าการนำพาความร้อน (thermal conductivity) และ ค่าความหนาแน่น (density) ดังแสดงในรูปที่ 2, 3, 4 ตามลำดับ สมบัติทางกลของโพลีคาร์บอเนต ได้ใช้ค่าความเค้นขณะผ่อนคลาย (Stress relaxation) จากงานวิจัยของ Malik, et al. [12] โดยวิธีการสร้างโมเดลวัสดุ หรือค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ Relaxation modulus กับอุณหภูมิและเวลา

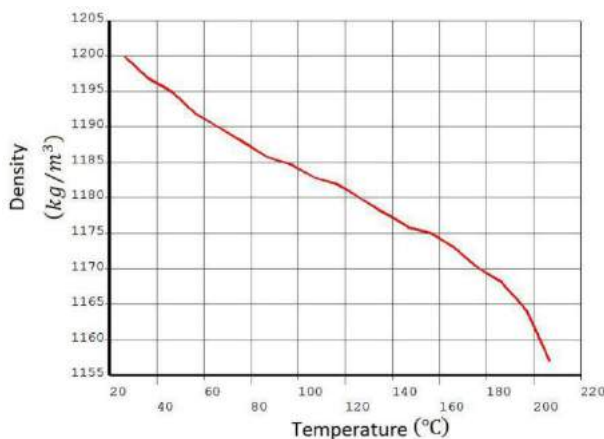
ได้มีการอธิบายวิธีการและขั้นตอนไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [13, 14] และแสดงเป็นกราฟ Master curve ในรูปที่ 5



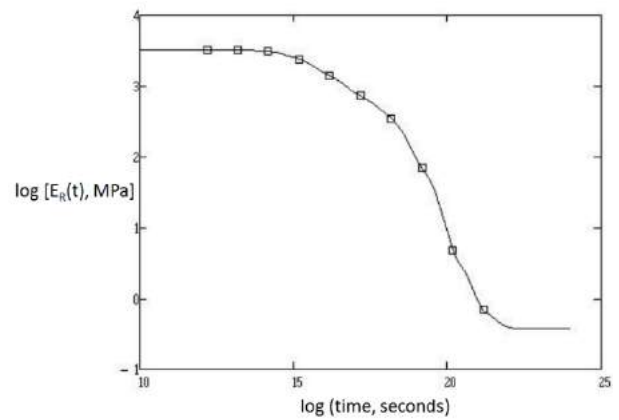
รูปที่ 2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของ polycarbonate กับอุณหภูมิ [10, 11]



รูปที่ 3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำพาความร้อนของ polycarbonate กับอุณหภูมิ [10, 11]



รูปที่ 4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ polycarbonate กับอุณหภูมิ [10, 11]



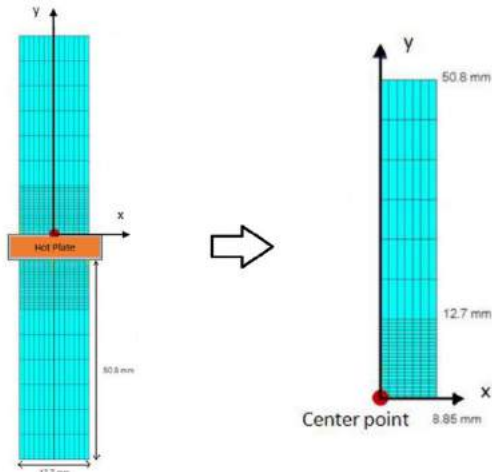
รูปที่ 5 Master Curve แสดงความสัมพันธ์แบบลอการิทึมระหว่างค่า Relaxation modulus $E_R(t)$ กับเวลา ของ polycarbonate ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยคำนวณจาก TN-shift function [14]

สำหรับค่า Relaxation modulus ของโพลีคาร์บอเนตที่อุณหภูมิห้อง ในโปรแกรม ANSYS 11.0 [15] จะต้องใส่ค่าสมบัติทางกลสำหรับเอลิเมนต์ VISCO88 ในรูปแบบของค่า $G(t) = E(t)/[2*(1+V)]$ (Shear relaxation modulus) และ $K(t) = E(t)/[3*(1-2*V)]$ (Bulk relaxation modulus) โดยที่ $E(t)$ คือค่า Relaxation modulus ในรูปที่ 5 และ V คือค่าของ Poisson's ratio ของโพลีคาร์บอเนต ซึ่งในการคำนวณจะระบุให้ค่าของ V มีขนาดเท่ากันในทุกทิศทาง หรือเรียกว่า isotropic

การคำนวณทางความร้อน หรือ heat transfer analysis จะแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ การให้ความร้อนขณะที่โพลีคาร์บอเนตสัมผัสกับโลหะแผ่นร้อน heating และการเย็นตัวลง cooling เพื่อคำนวณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิในชิ้นงาน โดยในวิธีการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ จะต้องกำหนดให้ขนาดของชิ้นงานและเอลิเมนต์ หรือ mesh มีขนาดเท่ากันในการคำนวณทางความร้อนและการคำนวณทางกล โดยที่ขนาดของ mesh จะมีขนาดเล็กและละเอียดกว่าที่บริเวณใกล้กับแผ่นโลหะร้อน และขนาดใหญ่ขึ้นที่บริเวณที่ห่างออกไป เพื่อให้ได้การกระจายตัวของอุณหภูมิที่แม่นยำมากขึ้นเนื่องจากค่าการนำพาความร้อนที่ไม่สูงนักของพอลิเมอร์ ดังแสดงเป็นโมเดลแบบสมมาตรสองมิติในรูปที่ 6

หลังจากได้ค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของชิ้นงานแล้ว ก็สามารถคำนวณหาความเค้นตกค้าง (residual stress) ได้จากค่าของความเค้นจากความร้อน หรือ thermal stress ที่เวลาสูงๆได้ หลังจากค่าของความเค้นเสถียรแล้ว ซึ่งขั้นตอนอย่างละเอียดของการคำนวณได้ระบุไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [13, 14] โดยกำหนดให้ค่า

สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของโพลีคาร์บอเนต thermal expansion coefficient เป็นค่าคงที่เท่ากับ $6.84 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ และค่าสัมประสิทธิ์การแผ่ความร้อนแบบ convection เท่ากับ $16 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10]

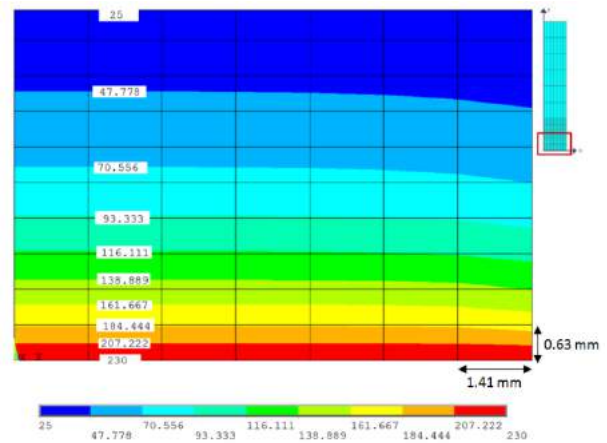


รูปที่ 6 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติแบบสมมาตรโดยใช้เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 0.25×1.0 ตารางมิลลิเมตร และ 5.0×1.0 ตารางมิลลิเมตร ในชิ้นงานพลาสติกในกระบวนการเชื่อมโดยใช้โลหะแผ่นร้อน

3. ผลการดำเนินงาน

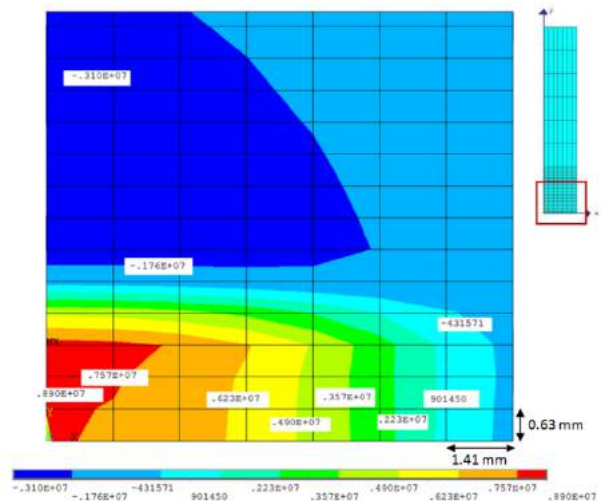
ผลการคำนวณทางความร้อนและการคำนวณทางกลสำหรับการเชื่อมสามารถแสดงในลักษณะ contour plot ของการกระจายตัวของอุณหภูมิในชิ้นงานโพลีคาร์บอเนต หรือค่าความเค้นตกค้าง หรือแม้แต่ว่าค่าความเค้น ความเครียดต่าง ๆ หรือค่าการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานได้ โดยการทำการ post-processing โดยใช้โปรแกรม ANSYS 11.0 [15]

รูปที่ 7 แสดงผลการคำนวณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิในชิ้นงานโพลีคาร์บอเนตที่ผ่านการเชื่อมโดยใช้โลหะแผ่นร้อนที่อุณหภูมิ 230°C เป็นเวลา 60 วินาที พบว่าที่ผิวสัมผัสมีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 230°C และค่าอุณหภูมิมิขนาดลดลงไปในบริเวณที่ห่างออกไปจากผิวสัมผัส นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าของอุณหภูมิที่สูงขึ้นนั้นอยู่ในบริเวณที่ค่อนข้างแคบมาก เนื่องจากค่าการนำพาความร้อนที่ต่ำของโพลีคาร์บอเนต ทำให้ความร้อนแผ่ไปได้ไม่ไกลนัก และยังพบว่าที่บริเวณศูนย์กลางของชิ้นงานจะมีอุณหภูมิสูงกว่าด้านข้างของชิ้นงานเนื่องจากการสูญเสียความร้อนในรูปแบบการพาความร้อน (convection heat transfer)



รูปที่ 7 ผลการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิในชิ้นงาน polycarbonate ที่ผ่านการเชื่อมโดยใช้โลหะแผ่นร้อนที่อุณหภูมิ 230°C เป็นระยะเวลารวม 60 วินาที [14]

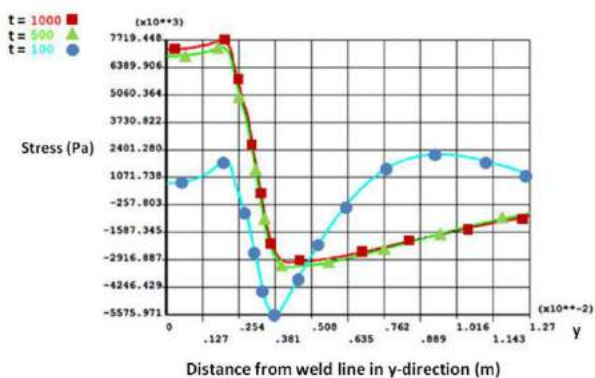
สำหรับการคำนวณหาความเค้นตกค้างในชิ้นงานโพลีคาร์บอเนต สามารถแสดงผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรม ANSYS 11.0 ได้ในลักษณะของ contour plot ดังแสดงในรูปที่ 8 ค่าของความเค้นตกค้างมีค่าสูงที่สุดใกล้บริเวณผิวสัมผัสโลหะแผ่นร้อน และจะลดลงไปมากเมื่อห่างออกไปจากบริเวณใกล้ผิวสัมผัสโลหะแผ่นร้อนทั้งในแนวแกน x และในแนวแกน y โดยที่ค่าความเค้นตกค้างจะลดลงไวกว่าในแนวแกน y เมื่อเทียบกับในแนวแกน x



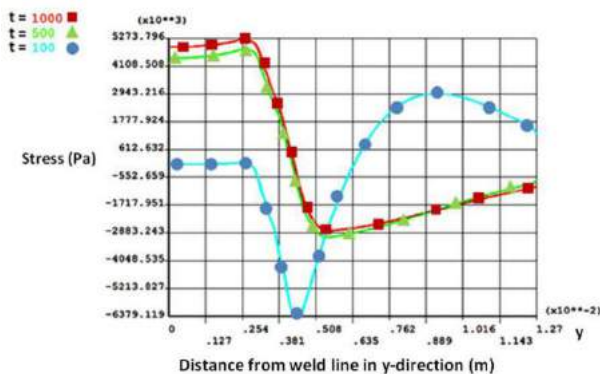
รูปที่ 8 ผลการคำนวณการกระจายตัวของความเค้นตกค้างในชิ้นงาน polycarbonate ที่ผ่านการเชื่อมโดยใช้โลหะแผ่นร้อน โดยใช้โปรแกรม ANSYS 11.0 [14]

รูปที่ 9 และรูปที่ 10 แสดงค่าการกระจายตัวของความเค้นตกค้างในแนวแกน y ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของชิ้นงานโพลีคาร์บอเนตที่ผ่านการเชื่อมโดยใช้โลหะแผ่นร้อน โดยทำการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นตกค้างที่

เวลาต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มทำการเชื่อม ที่เวลาต่างกัน คือ $t = 100, 500, 1000$ วินาที หลังจากเริ่มเชื่อมชิ้นงาน ผลการคำนวณ พบว่า ค่าความเค้นตกค้างที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานโพลีคาร์บอเนตมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่เมื่อเวลาสูง ๆ และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในชิ้นงานโพลีคาร์บอเนตหลังจากการเชื่อมด้วยโลหะแผ่นร้อนที่อุณหภูมิ 250°C พบว่าค่าความเค้นตกค้างมีขนาดน้อยกว่าในการเชื่อมด้วยเวลา 60 วินาที เมื่อเทียบกับการเชื่อมโดยใช้เวลา 35 วินาที และบริเวณที่มีค่าความเค้นตกค้างสูงจะใหญ่หรือกว้างกว่าเมื่อเชื่อมโดยใช้เวลานานกว่า



รูปที่ 9 ผลการคำนวณการกระจายตัวของความเค้นตกค้างในแนวแกน y ของชิ้นงาน polycarbonate ที่ผ่านการเชื่อมโดยใช้โลหะแผ่นร้อนที่อุณหภูมิ 250°C เป็นระยะเวลารวม 32 วินาที ที่เวลาแตกต่างกัน [14]



รูปที่ 10 ผลการคำนวณการกระจายตัวของความเค้นตกค้างในแนวแกน y ของชิ้นงาน polycarbonate ที่ผ่านการเชื่อมโดยใช้โลหะแผ่นร้อนที่อุณหภูมิ 250°C เป็นระยะเวลารวม 60 วินาที ที่เวลาแตกต่างกัน [14]

4. บทสรุป

บทความวิจัยนี้ได้อธิบายวิธีการคำนวณหาค่าความเค้นตกค้างในชิ้นงานโพลีคาร์บอเนตที่ผ่านการเชื่อมโดยใช้โลหะแผ่นร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนโปรแกรม ANSYS 11.0 จากผลการคำนวณพบว่าค่าความเค้นตกค้างมีค่าสูงสุดที่บริเวณใกล้ผิวสัมผัสโลหะแผ่นร้อน โดยที่ค่าความเค้นตกค้างบริเวณใกล้ผิวสัมผัสที่เกิดการหลอมละลายจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อทำการเชื่อมโดยใช้เวลาที่สั้นกว่า และบริเวณที่มีค่าความเค้นสูงจะกว้างกว่าเมื่อเชื่อมโดยใช้เวลานานขึ้น และค่าความเค้นตกค้างที่ได้จะเข้าใกล้ค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไปนานมาก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการทำวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท เรื่อง Finite Element Modeling of Residual Stress Formation in Polycarbonate Welds ของผู้วิจัยที่มหาวิทยาลัย The Ohio State University ประเทศสหรัฐอเมริกา ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา Assoc. Prof. Dr. Avraham Benatar ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำตลอดระยะเวลาที่ศึกษาวิจัยด้วยดีตลอดมา และผู้วิจัยขอขอบคุณทุนรัฐบาลกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่สนับสนุนค่าเล่าเรียนและค่าใช้จ่ายระหว่างการศึกษาและการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. A. Grewell, A. Benatar and J. B. Park, "Plastics and Composites Welding Handbook," Hanser, 2003.
- [2] T. Guney, "Some recent work relation to the influence of residual stresses on fatigue strength," Residual stresses in welded construction and their effects – An International Conference, London, November. 1977.
- [3] N. Liede, "The significance of residual welding stresses – some experimental results and practical experience in a shipyard," Residual stresses in welded construction and their effects – An International Conference, London, November. 1977.
- [4] K. Masabuchi, "Analysis of welded structures," Pergamon Press, 1980.

- [5] P. So, and L. Broutman, "Residual stress and their effects on mechanical behavior," Polymer Engineering & Science, vol. 16, no. 12, 1976.
- [6] W. F. Zoetelief, L. F. A. Douvin and A. J. Ingen Housz, "Residual Thermal Stress in Injection Molded Products," Polymer Engineering and Science, vol. 36, no. 14, pp. 1886-1896, July. 1996.
- [7] C. Krishnan and A. Benatar, "Analysis of Residual Stress in Hot Plate Polycarbonate," ANTEC 2004.
- [8] S. Anantharaman and A. Benatar, "Photoelastic Measurement of Residual Stress in Hot Plate Welded Polycarbonate," ANTEC 2002.
- [9] S. Anantharaman and A. Benatar, "Measurement of Residual Stresses in Laser Welded Polycarbonate Using Photoelasticity," ANTEC 2003.
- [10] H. Lu, "Analysis of Heat Flow and Residual Stress Formation During Hot Plate Welding of Polycarbonate," Ph.D. Dissertation, The Ohio State University, 1996.
- [11] Z. Tadmor and C. Gogos, "Principles of Polymer Processing," John Willey and Sons, Inc., 1990.
- [12] T. M. Malik, P. J. Carreau and N. Chapleau, "Characterization of Liquid Crystalline Polyester Polycarbonate Blends," Polymer Engineering and Science, vol. 29, no. 9, pp. 600-608, 1989.
- [13] K. Sojiphan and A. Benatar, "Prediction of Residual Stress Formation in Polycarbonate Welded Samples using ANSYS Finite Element Software," ANTEC 2009.
- [14] K. Sojiphan, "Finite Element Modeling of Residual Stress Formation in Polycarbonate Welds," M.S. Thesis, The Ohio State University, 2008.
- [15] ANSYS version 11.0.



กิตติชัย ไศจิพันธ์ ได้รับทุนรัฐบาล
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อ
ศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี-โท-เอก ที่
ประเทศสหรัฐอเมริกา สำเร็จการศึกษา
ระดับปริญญาตรี สาขา Materials

Science and Engineering และปริญญาตรี สาขา
Manufacturing Engineering จาก Northwestern University
ประเทศสหรัฐอเมริกา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทและ
ปริญญาเอก สาขา Welding Engineering จาก The Ohio
State University ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อปี พ.ศ. 2558
ปัจจุบันเป็นอาจารย์ สังกัดภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการ
เชื่อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ งานวิจัยที่สนใจ
ได้แก่ เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ การศึกษาค่าความเค้น
ตกค้างในงานเชื่อม การเชื่อมวัสดุต่างชนิดกัน การศึกษา
วิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของแนวเชื่อม และการสร้าง
แบบจำลองสำหรับงานเชื่อมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำและเหล็กกล้าผสมสูง (Black-White Welding)

บรรเลง ศรีนิล¹, กอบบุญ หล่อทองคำ², Fritz Hartung²

¹ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

โทร 02 555 2512, E-mail: bsn@kmutnb.ac.th

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โทร 02 218 6942 E-mail: f-hartung@hotmail.com^{*}, Gobboon.L@chula.ac.th

1. บทนำ

การเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าไม่ผสมและเหล็กกล้าผสมต่ำ เหล็กกล้าไม่ผสมและเหล็กกล้าผสมสูง เหล็กกล้าผสมต่ำและเหล็กกล้าผสมสูง จะเรียกว่า การเชื่อมดำ-ขาว (Black-White Welding) เนื่องจากสภาพการเกิดการกัดกร่อน ผู้เชี่ยวชาญจะเรียกเหล็กกล้าที่ผสมโลหะอื่นต่ำกว่า 5% ว่าเป็น “เหล็กดำ” (Black Steel) เนื่องจากมีผิวที่ผ่านการรีดเป็นสีคล้ำและเป็นสนิมในระยะต่อมา ส่วนเหล็กกล้าผสมสูงจะเรียกว่า “เหล็กขาว” (White Steel) เนื่องจากเหล็กที่ผลิตออกมามีสีขาวหรือสีโลหะและจะคงสภาพผิวโดยไม่เปลี่ยนแปลงหรือไม่เกิดสนิม การเชื่อมเหล็กทั้งสองชนิดมีขอบข่ายการใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมเคมี (รูปที่ 1) อุตสาหกรรมอาหาร โรงไฟฟ้าหรือโรงกลั่นน้ำมัน ที่ต้องการไม่ให้เกิดการกัดกร่อนทั้งในสภาพอุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง และการใช้งานที่มีเงื่อนไขพิเศษของการใช้เหล็กสองชนิดเชื่อมต่อกัน

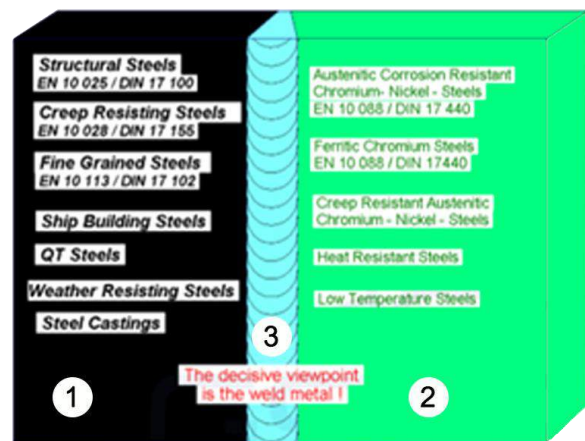


รูปที่ 1 โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้วัสดุหลายอย่างเชื่อมต่อกัน [1]

การเชื่อมต่อเหล็กต่างชนิดหรือชั้นคุณภาพต่างกัน ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ โลหะเหล็กพื้นฐาน (Base Metal)

2 ชนิด และแนวเชื่อม (Weld Metal) ที่เป็นเหล็กอีกชนิดหนึ่ง ทั้ง 3 ส่วนต้องละลายเข้ากันได้ (ดูรูปที่ 2)

- 1) โลหะพื้นฐาน: โลหะที่ 1
- 2) โลหะพื้นฐาน: โลหะที่ 2
- 3) เนื้อแนวเชื่อม: โลหะที่ 3



รูปที่ 2 ตัวอย่างการเชื่อมต่อกันเหล็กต่างชนิดกัน [1]

ในแนวเชื่อมจะมีการผสมกันขึ้นอยู่กับความลึกของการหลอมละลายของส่วนโลหะพื้นฐาน 1 และ 2 กับโลหะเติมแนวเชื่อมโลหะที่ 3 กลายเป็นเนื้อโลหะแนวเชื่อม โลหะทั้ง 3 จะไม่เหมือนกัน

ช่างเชื่อมชำนาญงานส่วนใหญ่จะไม่ค่อยเข้าใจในการเลือกเหล็กเพื่อให้ได้แนวเชื่อมที่ผสมผสานกันโดยไม่มีข้อบกพร่อง คำถามที่พบบ่อย ๆ จากผู้ประกอบการกิจการงานเชื่อม ชี้ให้เห็นว่า ยังมีความไม่เข้าใจในการเลือกใช้โลหะผสมผสานที่ถูกต้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โลหะเติมแนวเชื่อมหรือโลหะตัวประสาน (Filler Metal) เทคโนโลยีการเชื่อม และกรรมวิธีทางความร้อน

2. หลักการทำงาน

ตามหลักการแล้วในขั้นแรกจะต้องพิจารณาว่าโลหะพื้นฐาน สามารถนำมาเชื่อมต่อกันได้ เนื่องจากมี 2 หรือ 1 ข้อพิจารณาในการเชื่อมได้ของโลหะ ซึ่งเป็นสมบัติของโลหะทุกชนิด ขั้นต่อไปจึงจะเลือกโลหะตัวประสาน และเทคโนโลยีที่ใช้ในงานเชื่อม

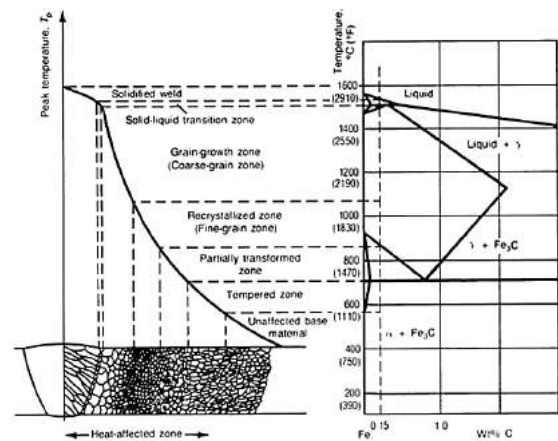
สำหรับคุณภาพโดยรวมของแนวเชื่อมนอกจากต้องมีส่วนผสมที่ดีแล้วสมบัติของโลหะพื้นฐานทั้งสองในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนหรือบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone, HEZ) ยังมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากสมบัติของโลหะที่ได้รับความร้อนจะเปลี่ยนไป ส่วนบริเวณอื่นที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนจะไม่มีเปลี่ยนแปลงด้านโลหะวิทยาแต่อย่างใด

บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน หรือบริเวณกระทบร้อนจะไม่เป็นเฉพาะการเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำ และเหล็กกล้าผสมสูงเท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นกับการเชื่อมโลหะชนิดเดียวกันด้วย อิทธิพลของการเชื่อมต่อสมบัติของบริเวณกระทบร้อนคือบริเวณนี้จะมีโครงสร้างจุลภาคแตกต่างกัน เนื่องจากผลการตั้งค่าต่าง ๆ ในการเชื่อม ความร้อนที่ใช้เชื่อม และเงื่อนไขในการทำให้เย็นตัว เราจำเป็นต้องรู้เรื่องเทคโนโลยีและโลหะวิทยาของโลหะทั้งสองเป็นอย่างดีก่อนที่จะทำการเชื่อมเหล็กที่ไม่เหมือนกัน

3. กฎเกณฑ์เบื้องต้นของการเชื่อมได้ของโลหะ

3.1 ด้านเหล็กไม่ผสมและเหล็กกล้าผสมต่ำ (โลหะที่ 1)

จะใช้หลักเกณฑ์และบรรทัดฐานที่เป็นที่รู้จักกันดีสำหรับวัสดุเหล่านี้โดยไม่ต้องพิจารณาถึงด้านเหล็กผสมสูงที่สำคัญคือ การรวมทางส่วนผสมทางเคมี สภาพของกรรมวิธีทางความร้อนก่อนนำมาใช้ และโครงสร้างจุลภาคในบริเวณกระทบร้อนที่เกิดขึ้นหลังจากทำให้เย็นตัวหรือหลังจากเชื่อมเสร็จ (ดูรูปที่ 3) แสดงให้เห็นลักษณะโครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทบร้อนของเหล็กไม่ผสมและบริเวณโครงสร้างจุลภาคเมื่อทำให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ ในแผนภูมิ Fe-C ถ้าทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งระหว่างอุณหภูมิ 800°C และ 500°C จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในบริเวณกระทบร้อนสูง เกิดโครงสร้างจุลภาคที่แข็ง และมีแนวโน้มเกิดรอยร้าวขณะเย็น (Cold Cracking, CC) ปัญหาสำคัญของการเชื่อมได้ประเด็นนี้ก็คือ



รูปที่ 3 แผนภูมิของบริเวณกระทบร้อนของเหล็กไม่ผสม (C=0.15%) หลังจากทำให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ และตำแหน่งในแผนภูมิ Fe-C [2]

- 1) ปริมาณคาร์บอน ($C > 0.22\%$ หรือไม่)
- 2) ปริมาณกำมะถันและฟอสฟอรัสในบริเวณกระทบร้อน ($S, P > 0.025\%$ หรือไม่)
- 3) ความแข็งที่ต้องการในบริเวณกระทบร้อน ($HV > 350$ หรือไม่)
- 4) ค่าคาร์บอนเทียบเท่า (Carbon Equivalent, CE)

$$(\%C + \%(\text{Mn} + \text{Mo})/10 + \%(\text{Cr} + \text{Cu})/20 + \%(\text{Ni})/40) > 0.35$$
 หรือไม่
- 5) มีแผนภูมิการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคตามเวลาและอุณหภูมิการเย็นตัว (CCT diagram) หรือไม่
- 6) ระยะเวลาเย็นตัวระหว่าง 800°C และ 500°C $t(8/5)$ หรือไม่
- 7) อุณหภูมิให้ความร้อนก่อนหน้าการเชื่อม (Pre Heat Treatment) และอุณหภูมิระหว่างการเปลี่ยนเทียวยเชื่อม (Interpass Temperature) มีค่าเท่ากับเท่าไร
- 8) มีการทำกรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม (Postweld Heat Treatment) หรือไม่

โดยเฉพาะอย่างยิ่งระยะเวลาทำให้เย็นตัวระหว่าง 800°C และ 500°C มีความสำคัญมากสำหรับสมบัติของเหล็กกล้าผสมและไม่ผสมในบริเวณกระทบร้อน ซึ่งจะหาค่าได้จากสูตรที่รู้จักกันดีตามเงื่อนไขรูปทรงของชิ้นงาน การให้ความร้อนของกระบวนการเชื่อมที่ใช้ และส่วนประกอบของวัสดุ หลังจากนั้นจะสามารถหาอุณหภูมิให้ความร้อนก่อนเชื่อม (Preheat) เพื่อลดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะสามารถหาเวลาทำให้เย็นตัว $t(8/5)$ หรือกรรมวิธีทางความร้อนได้

ตารางและแผนภูมิที่รวบรวมประสบการณ์ด้านนี้เอาไว้จะมีคำแนะนำที่เป็นประโยชน์สำหรับการให้ความร้อนก่อนเชื่อมและการมีวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม

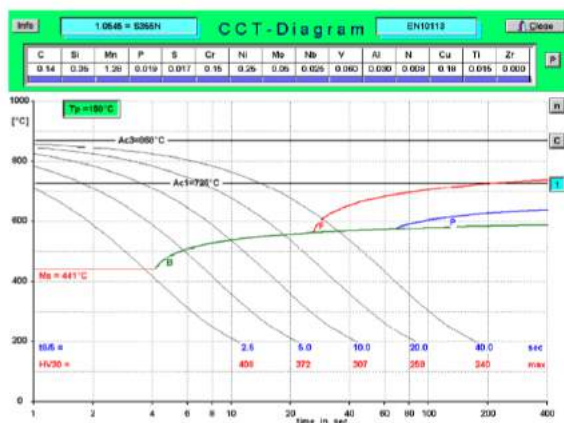
หน้าที่ของผู้เชี่ยวชาญในงานเชื่อมที่จะต้องควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเลือกเวลาในการเย็นตัว $t(8/5)$ การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคในบริเวณกระแทกด้วยการควบคุมการให้ความร้อนเพื่อให้ได้สมบัติของวัสดุที่ดี

ถ้าเวลาในการเย็นตัว $t(8/5)$ สั้นเกินไปอาจทำให้เกิดการแตกหักที่มีความเค้นคราก (Yield Point) สูงขึ้น เกิดการแตกหักเนื่องจากความเค้นสูงหรือเนื่องจากไฮโดรเจนได้ (การเกิดรอยร้าวขณะเย็น) การทำให้เย็นตัวเร็วจะจำกัดการแปรรูปในบริเวณกระแทกที่มีความเค้นมากเกินไป

ระยะเวลาเย็นตัว $t(8/5)$ ที่นานเกินไปจะทำให้การทนต่อแรงกระแทกและความเค้นครากในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนลดลงเนื่องด้วยการโตของเกรน

ระยะเวลาเย็นตัว $t(8/5)$ ที่ถูกต้องจริง ๆ สำหรับเหล็กกล้าแต่ละชนิดไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคแตกต่างกันมากในช่วงบริเวณที่วิเคราะห์

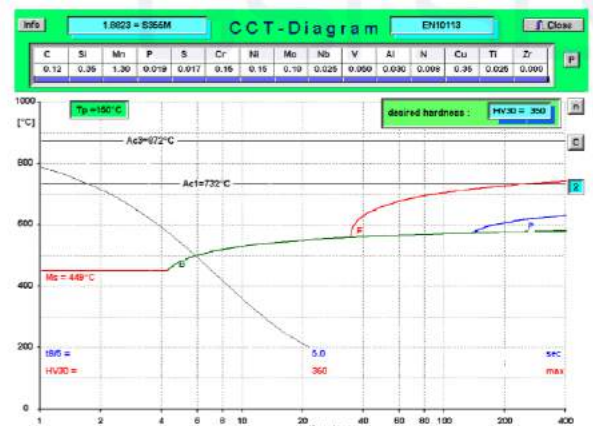
ในกรณีนี้การใช้แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคตามเวลาและอุณหภูมิการเย็นตัว (CCT-Diagram) สำหรับการเชื่อมจะช่วยให้ (ดูรูปที่ 4)



รูปที่ 4 แผนภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคตามเวลาและอุณหภูมิการเย็นตัว (CCT-Diagram) ของเหล็กกล้า 1.0545 (S 355N), EN 10113 [1]

ในตัวอย่างแผนภูมิของเหล็กกล้า 1.0545 (รูปที่ 4) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจะต้องอยู่ในช่วง Bainite (B) เพื่อไม่ให้ความเค้นสูงสุดเกิน 350 HV ตามแผนภูมิ

เวลาการเย็นตัว $t(8/5)$ ประมาณ 7.5 วินาที คือ เวลาที่การเย็นตัวสิ้นสุด ที่ความเค้นไม่เกิน 350 HV ที่ค่าความเค้นนี้ ความทนแรงกระแทกของบริเวณกระแทกจะสูงที่สุด



รูปที่ 5 แผนภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคตามเวลาและอุณหภูมิการเย็นตัว (CCT-Diagram) ของเหล็กกล้า 1.8823 (S 355M), EN 10113 [1]

เหล็กกล้าในรูปที่ 5 ความเค้นที่ยอมให้ได้ไม่เกิน 350 HV มีความทนต่อการกระแทกสูงกว่า เมื่อใช้ระยะเวลาเย็นตัว $t(8/5)$ ในช่วง 800°C ถึง 500°C 6 วินาที

รูปที่ 2 (โลหะที่ 1 ด้านซ้าย) แสดงกลุ่มของเหล็กกล้าผสมและไม่ผสมที่สำคัญ ที่จะเชื่อมตามคำแนะนำนี้ได้ ความสามารถในการเชื่อมได้ของเหล็กกล้าแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี สภาพของกรรมวิธีทางความร้อนก่อนเชื่อม และการมีวิธีทางความร้อนหลังเชื่อม

3.2 ด้านเหล็กกล้าผสมสูง (โลหะที่ 2 ด้านขวา)

ตัวอย่าง: เหล็กกล้าออสเทนไนต์ทนการกัดกร่อนหรือสารเคมี (Austenitic Corrosion Resistant Chromium-Nickel Steels)

กลุ่มที่สำคัญที่สุดของเหล็กกล้าผสมสูงก็คือ:

- 1) เหล็กกล้าออสเทนไนต์ทนการกัดกร่อน (Austenitic Corrosion Resistant Chromium-Nickel Steels)
- 2) เหล็กกล้าเฟอร์ริติก (Ferritic Chromium Steels)
- 3) เหล็กกล้าออสเทนไนต์ทนการคืบหรือยืดตัว (Creep Resistant Austenitic Chromium-Nickel Steels)
- 4) เหล็กกล้าทนความร้อน (Heat Resistant Steels)
- 5) เหล็กกล้าสำหรับใช้งานอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Steels)

เหล็กกล้าออสเทนไนต์ทนการกัดกร่อน ส่วนใหญ่จะถูกใช้เชื่อมต่อกับเหล็กดำ-ขาว (Black-White) ด้วยเหตุนี้จึงจะขอบรรยายถึงการเชื่อมกลุ่มนี้เป็นประการแรก

สำหรับเหล็กกล้าออสเทนไนต์ทนการกัดกร่อนหรือทนสารเคมีตามหลักแล้วจะไม่เกิดรอยร้าวขณะเย็น (หรือการแตกร้าวเนื่องจากไฮโดรเจน) ด้วยเหตุนี้จึงไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนก่อนเชื่อม และในหลายกรณีการให้ความร้อนก่อนเชื่อมจะเกิดผลเสียด้วยซ้ำ

กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อมก็ควรจะเป็นหลีกเลี่ยงเนื่องจากจะเกิดการกัดกร่อนที่ขอบเกรน (Intergranular Corrosion, IGC) ขึ้น

ในการเชื่อมเหล็กกล้าออสเทนไนต์ทนการกัดกร่อนจะต้องพิจารณาหลักเกณฑ์พื้นฐานต่อไปนี้

- 1) จำเป็นหรือไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนก่อนเชื่อม
- 2) ชนิดของโครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด (Full Austenite) หรือโครงสร้างจุลภาคผสมระหว่างออสเทนไนต์กับเดลต้าเฟอร์ไรต์ (Delta Ferrite หรือ Primary-Ferrite เป็นโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ที่แข็งตัวก่อน) ใช่หรือไม่

3) ตำแหน่งของเหล็กในแผนภูมิเชฟเฟอร์ (Schaeffler Diagram) อยู่ตรงไหน

4) การเลือกวัสดุตัวประสาน (เหมือนกับวัสดุชิ้นงานหรืออาจมีส่วนผสมสูงขึ้นหรือเป็นวัสดุที่แข็งตัวเกิดโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ก่อน (Primary-Ferrite))

5) กรรมวิธีเชื่อมและการตั้งค่าต่าง ๆ (การให้ความร้อนที่อิเล็กโทรด รูปทรงของแนวเชื่อม และการหดตัวของชิ้นส่วน การผสมผสานของเนื้อโลหะ จำนวนแนวเชื่อมที่ซ้อนกัน) ถูกต้องหรือไม่

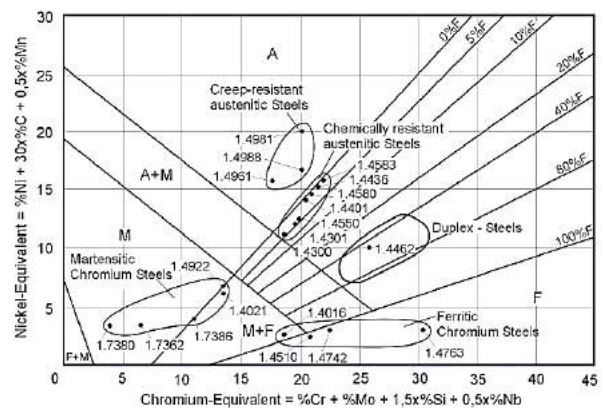
6) เนื้อแนวเชื่อมในแผนภูมิเชฟเฟอร์ อยู่ในบริเวณที่ชี้ว่ามีรอยร้าวขณะร้อน (Hot Cracking, HC) หรือบริเวณที่ชี้ว่าแข็งตัวเกิดโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ก่อน (ไม่ทำให้เกิด HC) หรือไม่

7) กรรมวิธีทางความร้อนหลังการเชื่อม ทำให้เกิดการกัดกร่อนที่ขอบเกรน (IGC) หรือทำให้เกิดโครงสร้างซิกมา (Sigma) หรือไม่

แผนภูมิเชฟเฟอร์จะสามารถบอกส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าซึ่งจะทำให้ทราบถึงการเกิดโครงสร้างจุลภาคผ่านค่านิเกิลเทียบเท่า (Nickel Equivalent) หรือโครเมียมเทียบเท่า (Chromium Equivalent) (ดูรูปที่ 6) ปริมาณเฟอร์ไรต์ที่แข็งตัวก่อน (Primary Ferrite) ซึ่งแสดง

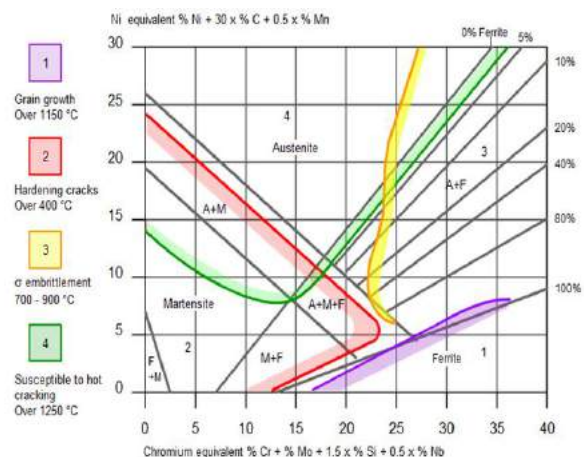
แนวโน้มเกิดรอยร้าวขณะร้อนสามารถประมาณค่าได้ (ปริมาณเฟอร์ไรต์ที่แข็งตัวก่อน หรือเดลต้าเฟอร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมควรอยู่ระหว่าง 3-12% โดยปริมาตร)

ในรูปที่ 7 แสดงถึงข้อผิดพลาดทั้งหลายในเทคนิคการทำงานเชื่อมเหล็กผสมสูง (ตำแหน่ง 2 และตำแหน่ง 4) ในกระบวนการเชื่อมก่อนอื่นจะต้องพิจารณาแนวโน้มในการเกิดรอยร้าวขณะร้อน (HC) ในเนื้อแนวเชื่อมที่เป็นออสเทนไนต์ (Austenite) ล้วน ๆ เป็นอันดับแรก หรืออาจจะเกิดรอยร้าวขณะเย็น (CC) ในส่วนที่เป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ของเหล็กผสมสูงด้วย การรับภาระในสภาพอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานจะไม่เกิดขึ้นในการเชื่อม เนื่องจากมีระยะเวลาที่ได้รับความร้อนสูงของบริเวณกระแทกร้อนเพียงระยะสั้น ๆ



รูปที่ 6 ตำแหน่งของกลุ่มเหล็กกล้าผสมสูงในแผนภูมิเชฟเฟอร์ (A-Austenite, F-Ferrite, M-Martensite) [1]

โครงสร้างจุลภาคซิกมา (Sigma-Phase) การเปราะเนื่องจากซิกมา (Sigma-Embrittlement) ที่ตำแหน่ง 3 ในรูปที่ 7) และการโตของเกรนเฟอร์ไรต์ (Grain-Growth) ที่ตำแหน่ง 1 ในรูปที่ 7) เกิดขึ้นเนื่องจากการทำกรรมวิธีทางความร้อนที่ไม่เหมาะสม



รูปที่ 7 แผนภูมิเชฟเฟอร์แสดงบริเวณที่มีปัญหาในการเชื่อมและการรับภาระที่อุณหภูมิสูงระยะยาว

โดยปกติแล้วการทำงานเชื่อมโดยใช้แผนภูมิเฟสเลอร์ เป็นบรรทัดฐานก็เพียงพอแล้ว สำหรับการหาปริมาณโครงสร้างจุลภาคเฟร์ไรต์ที่แข็งตัวก่อน (Primary Ferrite) จะหาได้ละเอียดมากขึ้นได้จากแผนภูมิเดลลองหรือ WRC (Delong หรือ WRC-Diagram) [2]

3.3 แนวเชื่อม (เนื้อโลหะผสม-โลหะที่ 3)

ตัวอย่าง: เหล็กกล้าออสเทนไนต์ทนการกัดกร่อนหรือสารเคมี (Austenitic Corrosion Resistant Chromium-Nickel Steels)

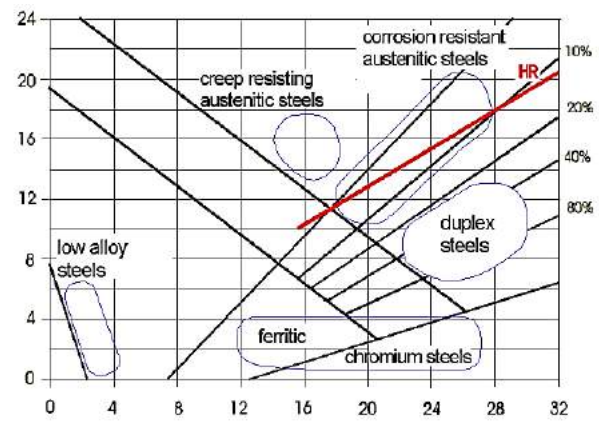
ส่วนสำคัญสำหรับการเชื่อมขาว-ดำ คือ สมบัติและลักษณะของเนื้อแนวเชื่อม ไม่ใช่สมบัติของโลหะพื้นฐานทั้งสองชนิดและบริเวณกระทบร้อน (HEZ) ที่พิจารณากรณีการเชื่อมเหล็กชนิดเดียวกัน

เนื้อโลหะแนวเชื่อมเหล็กกล้าออสเทนไนต์ทนการกัดกร่อนควรจะต้องเป็นออสเทนไนต์และเฟร์ไรต์ก่อน (Primary Ferrite) เพื่อป้องกันการเกิดรอยร้าวขณะร้อน (HC) ควรจะต้องมีปริมาณเฟร์ไรต์แข็งตัวก่อน (Primary Ferrite) หรือเดลต้าเฟร์ไรต์ (Delta Ferrite) น้อยกว่า 12% เพื่อไม่ให้เกิดโครงข่ายเฟร์ไรต์ (Ferrite Network) ที่จะทำให้การทนต่อสารเคมีลดลง

การเกิดรอยร้าวขณะร้อนของเหล็กกล้าโครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมด (Full Austenite) จะเกิดขึ้นได้ ถ้าการออกแบบไม่เหมาะสมโดยมีการขัดขวางการหดตัว (Contraction) และมีการรวมตัวสะสมของสารที่ขอบเกรน (Grain Boundary Segregation) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสะสมเหล็กซัลไฟด์เหลว (FeS – จุดหลอมเหลวประมาณ 960 องศาเซลเซียส) ตรงกลางของแนวเชื่อมหรือการแทรกอยู่ในบริเวณกระทบร้อน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิแข็งตัวของเหล็ก เนื่องจากขอบเกรนเป็นฟิล์มเหลว เป็นลักษณะการแยกตัวของสารออกจากผลึกสาเหตุเกิดจากการรวมตัวของกัมมะถันมากที่ไม่สามารถหลอมรวมละลายในผลึกออสเทนไนต์ได้

เดลต้าเฟร์ไรต์ (Delta Ferrite) สามารถละลายกัมมะถันได้ 4 เท่าและฟอสฟอรัส 12 เท่า จึงเป็นการทำความสะอาดให้กับเนื้อโลหะแนวเชื่อมออสเทนไนต์ (Foam Effect)

ถ้าจะให้ดีต้องเลือกใช้ส่วนผสมทางเคมีได้เส้นที่แสดงไว้ในแผนภูมิเฟสเลอร์ (Schaeffler Diagram) “hot crack line” (ดูรูปที่ 8)

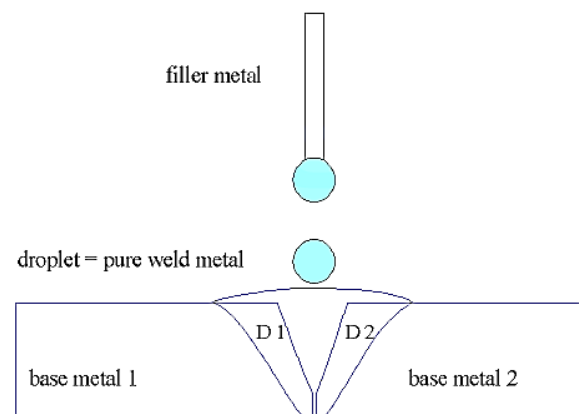


รูปที่ 8 เส้นการเกิดรอยร้าวขณะร้อน (Hot Crack Line, HR) ในโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ (Austenite) ที่มีเดลต้าเฟร์ไรต์ (Delta Ferrite) เล็กน้อย

ส่วนผสมของโครงสร้างจุลภาคในเนื้อแนวเชื่อมจะต้องพิจารณาจากความลึกแนวเชื่อมซึ่งขึ้นกับกรรมวิธีการเชื่อมที่เลือกใช้ (ดูรูปที่ 9) รูปทรงของแนวเชื่อมและอัตราส่วนผสม (Dilution) ของโลหะพื้นฐานทั้งสองและโลหะตัวประสาน ซึ่งสามารถคำนวณได้

welding process	dilution
basic stick electrode	20 - 30 %
rutile electrode	15 - 25 %
back up technique	10 - 20 %
MIG / MAG	10 - 50 %
submerged arc	50 - 70 %
SA strip cladding	10 - 20 %
ES strip cladding	7 - 16 %
TIG	0 - 100 %

รูปที่ 9 อัตราส่วนผสม (Dilution) ของกรรมวิธีการเชื่อมต่าง ๆ

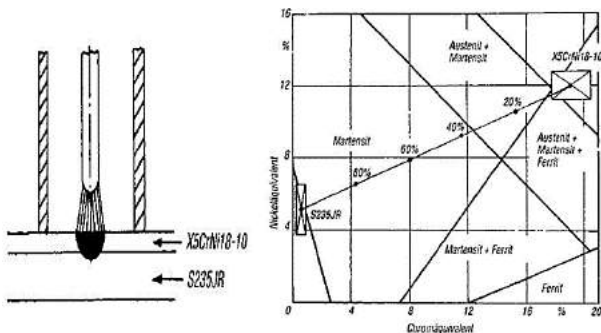


รูปที่ 10 อัตราส่วนผสมในแนวเชื่อม

รูปทรงแนวเชื่อมในรูปที่ 10 แสดงว่าในกรณีนี้อาจมีส่วนผสมเนื้อแนวเชื่อมประกอบด้วย D1 (โลหะพื้นฐาน 1) 15% D2 (โลหะพื้นฐาน 2) 15% โลหะตัวประสานประมาณ 70%

ตัวอย่างที่ 1: เหล็กโครงสร้าง (S235JR) กับเหล็กออสเทนไนต์ (X5CrNi18-10)

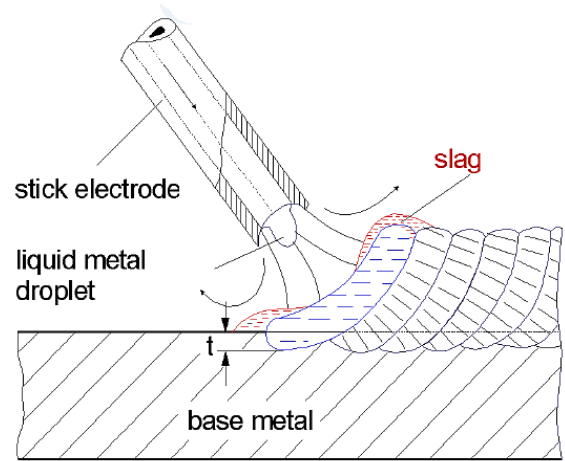
เพื่อให้เข้าใจในวิธีการในรูปที่ 11 จะแสดงตัวอย่างอย่างง่ายของการเชื่อมจุดด้วย WIG (Wolfram Inert Gas) หรือ TIG (Tungsten Inert Gas) แผ่นเหล็กออสเทนไนต์จะถูกเชื่อมติดกับเหล็กโครงสร้างที่จุดหลอมเหลวจุดเดียว เหล็กโครงสร้างที่ไม่ผสมจะอยู่ตรงมุมข้างล่างช่วง Ferrite-Martensite (F-M) ในแผนภูมิเชฟเฟอร์ และเหล็กแผ่นออสเทนไนต์ที่เชื่อมปิดจะอยู่ในบริเวณออสเทนไนต์ (Austenite) ที่มีเดลต้าเฟร์ไรต์ (Delta Ferrite) เล็กน้อย จากรูปที่ 11 การเชื่อมจุดเดียว ตามแนวขวางเนื้อเชื่อมจะมีเนื้อเหล็กโครงสร้างผสมประมาณ 15% ทำให้เนื้อโลหะแนวเชื่อมผสมเมื่อพิจารณาตามเส้นการผสม (Mixing line) ประกอบด้วยโครงสร้างจุลภาคที่เป็นออสเทนไนต์มาร์เทนไซต์ (Austenite Martensite)



รูปที่ 11 การเชื่อมจุดเดียวด้วย WIG หรือ TIG ของแผ่นเหล็กออสเทนไนต์ (X5CrNi18-10) บนแผ่นเหล็กโครงสร้าง (S235JR) [3]

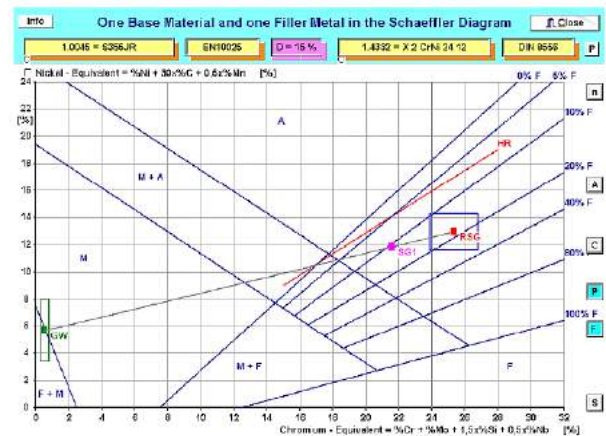
ตัวอย่างที่ 2: การเชื่อมพอกเหล็กออสเทนไนต์ที่มีเดลต้าเฟร์ไรต์ (X2CrNi24-12) บนเหล็กโครงสร้าง (S355JR)

การเชื่อมพอกเหล็กออสเทนไนต์บนเหล็กโครงสร้างจะเป็นการเคลือบผิวเหล็กโครงสร้างให้ทนต่อการกัดกร่อนและทนต่อการเกิดรอยร้าวขณะร้อน การผสมเข้ากันจะเป็นประมาณ 10 ถึง 15% (ดูรูปที่ 12)



Back up welding

รูปที่ 12 การเชื่อมเคลือบผิวเหล็กโครงสร้างด้วยเหล็กออสเทนไนต์ โดยใช้เทคนิคการเชื่อมแบบ "Back up"

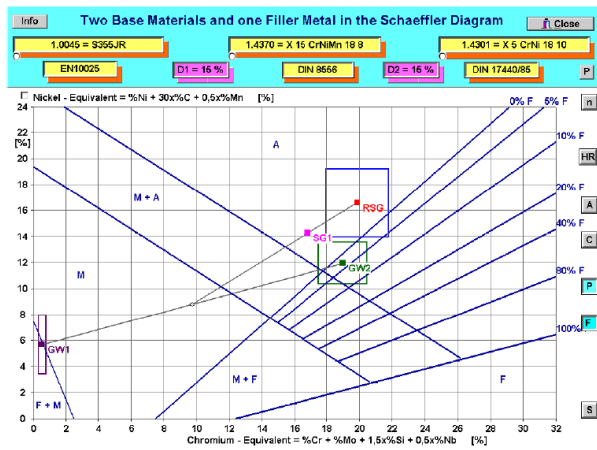


รูปที่ 13 การเชื่อมเคลือบผิวเหล็กโครงสร้างด้วยเหล็กออสเทนไนต์ที่มีเดลต้าเฟร์ไรต์ [1]

เนื่องจากคาดว่าส่วนผสมเนื้อเหล็กโครงสร้างในเนื้อเชื่อมโดยใช้เทคโนโลยีการเชื่อมแบบ Back-up (ดูรูปที่ 12) ประมาณ 10-15% จะต้องเลือกโลหะเติม (RSG) ให้มีโครงสร้างจุลภาคเดลต้าเฟร์ไรต์ (Delta Ferrite) ประมาณ 18% เพื่อให้ได้เนื้อเชื่อมซึ่งทนทานต่อการเกิดรอยร้าวภายใต้เส้น HR หรือเส้นแสดงการทนต่อการเกิดรอยร้าวขณะร้อน ในตัวอย่างจะเห็นได้ว่าบนเส้นผสม (GW-RSG) จะมีเนื้อแนวเชื่อมพอกเป็นโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ที่มีเดลต้าเฟร์ไรต์ 10%

ตัวอย่างที่ 3: การเชื่อมโลหะขาว-ดำ ด้วยโลหะเติม

ในตัวอย่างนี้จะเป็นการเชื่อมเหล็กโครงสร้างไม่เจือกับเหล็กออสเทนไนต์ที่ทนต่อการกัดกร่อนที่มีเนื้อแนวเชื่อมผสมจะต้องเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด (Full Austenite)



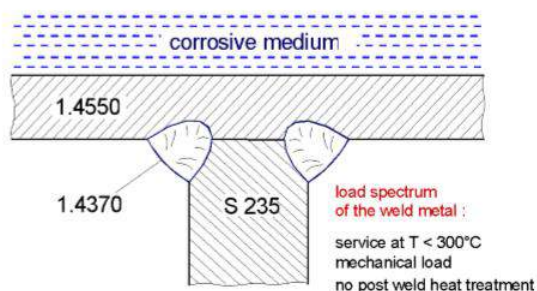
รูปที่ 14 การเชื่อมโลหะพื้นฐานสองชนิดที่ใช้วัสดุเติม

อัตราส่วนผสมจะเลือกให้เข้าใกล้ลักษณะของเนื้อเชื่อมในรูปที่ 10

โลหะพื้นฐานทั้งสองจะผสมกันในอัตราส่วนที่เท่ากัน (50/50) ถ้าไม่ใช้โลหะอื่นเติม เส้นผสมที่โลหะพื้นฐาน GW1 และ GW2 ผสมกันแสดงเนื้อเชื่อมที่เป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ในแผนภูมิเฟสเฟลเลอร์ กรณีนี้รอยร้าวขณะเย็น (CC) จะเกิดขึ้นได้โดยการนำเอาโลหะเติมที่เนื้อเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด (Full Austenite, RSG) ซึ่งมีค่านิเกิล-โครเมียมเทียบเท่า (Ni-Cr Equivalent) สูง ผสมกับเนื้อเชื่อมจาก GW1 และ GW2 ที่เป็นมาร์เทนไซต์ ในอัตราส่วน 70% จะทำให้ได้เนื้อเชื่อม (SG) เป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด (Full Austenite) (ดูรูปที่ 14)

ทั้งนี้แล้วแต่ความต้องการ มีความเป็นไปได้ในการใช้โลหะเติมที่มีค่าโครเมียมเทียบเท่า (Cr-Equivalent) สูง (25%) และค่านิเกิลเทียบเท่า (Ni-Equivalent) ต่ำ (12%) ซึ่งมีปริมาณเตลต้าเฟร์ไรต์ประมาณ 20% เชื่อม GW1 และ GW2 เพื่อให้ได้เนื้อเชื่อมที่ทนต่อการเกิดรอยร้าวขณะร้อน

การออกแบบการเชื่อมเหล็กที่แตกต่างออกไปจากตัวอย่าง เช่นดังรูปที่ 15 สามารถทำได้คล้าย ๆ กันกับตัวอย่างที่ผ่านมา



รูปที่ 15 ตัวอย่างการออกแบบสำหรับการเชื่อมประสานเหล็กโครงสร้างกับเหล็กโครเมียมนิเกิล (Cr-Ni) ที่ทนต่อสารเคมี [1]

4. บทสรุป

การเชื่อมประสานโลหะผสมที่ต่างชนิดกันต้องทราบถึงพฤติกรรมของการเชื่อมของแต่ละโลหะ

ที่สำคัญ ความสำเร็จของงานเชื่อมก็คือ ส่วนผสมของเนื้อเชื่อม ไม่ใช่พฤติกรรมของโลหะพื้นฐานกับบริเวณกระแทกร้อนที่พิจารณากรณีการเชื่อมเหล็กชนิดเดียวกัน ความรู้ในเรื่องสมบัติการเชื่อมของเหล็กเป็นสิ่งจำเป็นเบื้องต้นก่อนที่จะตัดสินใจทำงานเชื่อมเหล็กต่างชนิดกัน

ตามตัวอย่างของเหล็กกล้าออสเทนไนต์ที่ทนทานต่อสารเคมีซึ่งมีการใช้งานกันมาก สามารถนำมาศึกษาถึงวิธีการแก้ปัญหาในการเชื่อมได้อย่างชัดเจน ด้วยการใช้แผนภูมิเฟลเลอร์ช่วย

ในบทความครั้งต่อไป (ส่วนที่ 2) จะนำเสนอกลุ่มเหล็กผสมสูงอื่น ๆ และพฤติกรรมการเชื่อมกับเหล็กที่ต่างกัน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] DVS media, International Welding Engineer Part II: Welding Behaviors of Metals, DVS, Duesseldorf, 2010.
- [2] Beckert, M., "Eignung metallischer Werkstoff zum Schweißen", Kompendium der Schweißtechnik, DVS-Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 128/3, 1997.
- [3] Lothongkum Gobbboon, Hartung Fritz, "Schweisbarkeit", Presentation zur Vorlesung Joining of Metals, Chulalongkorn University Bangkok, 2015.
- [4] Leinhos, E., "Zum Ni-Cr Gefuegediagramm und seine Anwendung in der Praxis". Schweißtechnik Berlin 15(1965), H8 (S.361/69) und H10 (S.439/45).



รองศาสตราจารย์ ดร.บรรเลง ศรีนิล สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมเครื่องกลจากสถาบันเทคโนโลยีโคโลญ (Fachhochschule Cologne) ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี พ.ศ. 2511 ปริญญาโท ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปี พ.ศ. 2520 และได้รับพระราชทานปริญญาดุษฎีบัณฑิตกิตติมศักดิ์ในสาขาการออกแบบและสร้างเครื่องจักรกล เมื่อปี พ.ศ. 2550 เริ่มปฏิบัติงานในเมื่อปี 2506 ที่แผนกช่างท่อและประสาน วิทยาลัยเทคนิคพระนครเหนือ เป็นอธิการบดีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ระหว่างปี 2538-2544 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ที่ปรึกษาราชการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ เป็นอาจารย์ประจำที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตั้งแต่ กย. 2558 ดำรงตำแหน่งหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโลหการครั้งที่ 2 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกทางวิศวกรรมศาสตร์จากมหาวิทยาลัยกองทัพบกเยอรมันเมืองฮัมบูร์กปี 2537 และวิศวกรเชื่อมนานาชาติของ International Institute of Welding (IIW) ปี 2549 ในปี 2555 ได้รับเลือกให้รับรางวัลนักโลหะวิทยาดีเด่นจากที่ประชุมวิชาการโลหะวิทยาแห่งชาติ งานวิจัยที่สนใจ คือ การกัดกร่อนและการเชื่อมโลหะ เหล็กกล้าไร้สนิม โลหะผสมพิเศษ



Prof. Dr. -Ing. Fritz Kurt Hartung

Prof. in the University Dortmund and University of Applied Sciences Trier since 1992. Dr.-Ing. habil., Dr. h.c. Visiting Professor and guest lectureship in UK, USA, Russia, Brazil, South Africa, Bulgaria, Macedonia, Poland, Slovakia. Coordinator for European Asia Link Projects in Laos, Vietnam, Thailand and European Countries. Leading Member in the DVS. German Delegate in the IIW, working group 9 - Metallurgy. Representative of the European Academy of Sciences and Arts in South Eastern Asia (ASEAN-Countries), Australia and New Zealand. Visiting Professor and Researcher at Chulalongkorn University since 2010.

มาตรฐานการตรวจสอบสำหรับ Inspector ที่เกี่ยวข้องกับงาน In-Service Inspection ในอุตสาหกรรม Oil & Gas

สมพล เพชรฤทธิ์^{1*}

¹บริษัท เจอร์มันนิชเชอร์ ลอยด์ อินดัสเตรียล เซอร์วิส (ประเทศไทย) จำกัด

เลขที่ 349 อาคารเอสเจ อินฟินิท วัน ชั้น 15 ห้อง 1501-1503 ถ.วิภาวดีรังสิต แขวงจอมพล เขตจตุจักร 10900

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าอุตสาหกรรม Oil & Gas ของประเทศไทยได้เกิดขึ้นมาหลายสิบปีแล้วนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาอุตสาหกรรมดังกล่าวได้เติบโตอย่างรวดเร็วเมื่อประเทศไทยได้มีการค้นพบและนำก๊าซธรรมชาติในอ่าวไทยมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการพัฒนาอุตสาหกรรมภายในประเทศในรูปแบบอุตสาหกรรมหนัก เช่น แท่นขุดเจาะน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ โรงแยกก๊าซธรรมชาติ อุตสาหกรรมปิโตรเคมีและเคมีภัณฑ์ ซึ่งอุตสาหกรรมดังกล่าวจะมีรูปแบบเป็นหน่วยการผลิตที่มีกระบวนการทางปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้องเป็นหลัก

การดำรงไว้ซึ่งความปลอดภัยในการปฏิบัติงานสำหรับหน่วยการผลิตในอุตสาหกรรม Oil & Gas มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในหน่วยการผลิตให้มีความมั่นใจได้ว่ายังสามารถดำเนินการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย โดยเป็นไปตามมาตรฐานที่จัดวางไว้ในช่วงระยะเวลาการใช้งานที่กำหนดและจะต้องมีการกำหนดและวางแผนการตรวจสอบที่เหมาะสมสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพที่เกิดขึ้นตามความเป็นจริงของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องดังกล่าวไว้ด้วย

2. มาตรฐานการตรวจสอบอุปกรณ์การผลิตของอุตสาหกรรม Oil & Gas ในช่วงเวลา In-Service Inspection

การตรวจสอบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องสำหรับหน่วยการผลิตในอุตสาหกรรม Oil & Gas ในช่วงเวลา In-Service Inspection คือการตรวจสอบอุปกรณ์ในช่วงเวลาที่หน่วยการผลิตดังกล่าวได้เริ่มมีการดำเนินการใช้งานและปฏิบัติตามหน้าที่ที่กำหนดไว้เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ตามต้องการ เช่น ก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันดิบที่สะอาดขึ้นหรือผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมีที่ต้องการ เช่นเดียวกันนั้นการตรวจสอบอุปกรณ์ในช่วงเวลาของ In-Service Inspection จะสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงเวลาที่หน่วยการผลิตหยุดพัก

การปฏิบัติตามหน้าที่เป็นการชั่วคราวเพื่อการบำรุงรักษาตามแผนการที่กำหนดไว้

การตรวจสอบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องสำหรับหน่วยการผลิตในช่วงเวลาของ In-Service Inspection จะมีความแตกต่างกันกับการตรวจสอบอุปกรณ์ในช่วงการดำเนินการก่อสร้างหน่วยการผลิตขึ้นมาใหม่ (New Construction) ซึ่งยังไม่มีมีการเริ่มดำเนินการใช้งานและปฏิบัติการของหน่วยการผลิต และการตรวจสอบอุปกรณ์ในช่วงเวลาของ In-Service Inspection จำเป็นที่จะต้องมีการแยกย่อยชนิดของอุปกรณ์ในหน่วยการผลิตออกเป็นจำพวกต่าง ๆ เพื่อให้เป็นการง่ายแก่การกำหนดวิธีการตรวจสอบปลีกย่อยอื่น ๆ รวมถึงการแบ่งแยกรูปแบบการกำหนดหาข้อมูลที่เป็นตามลักษณะทางกายภาพของชนิดอุปกรณ์ดังกล่าวตามความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาการตรวจสอบนั้น ๆ

มาตรฐานหรือแนวทางสำหรับการตรวจสอบอุปกรณ์และโครงสร้างที่เกี่ยวข้องสำหรับหน่วยการผลิตในช่วงเวลา In-Service Inspection จะมีให้เห็นอย่างเช่น

API (American Petroleum Institute)

1. API Standard 510, Pressure Vessel Inspection Code
2. API Standard 570, Piping Inspection Code
3. API Standard 653, Storage Tank Inspection Code
4. API RP 2SIM, Structure Integrity Management of Fixed Offshore Structure
5. API RP 580, Risk Base Inspection

IIW Guideline for International Inspection Personnel, PERSONNEL WITH QUALIFICATION FOR INSPECTION ACTIVITIES including IN-SERVICE INSPECTION จะกำหนดแนวทางของการตรวจสอบเป็น 5 ประเภทหลัก คือ

1. In the field of pressure equipment
2. In the field of nuclear equipment

3. In the field of constructions (Steel Construction)

4. In the field of Railway components

5. In the field of Transmission Pipeline

Certification Scheme for Personnel, Requirements for the Certification of Plant Inspector (Plant Integrity management) จะมีกำหนดระดับของผู้ตรวจสอบเป็น 3 ระดับ คือ

1. Plant Inspector Level 1

2. Plant Inspector Level 2

3. Plant Inspector Level 3

NORSOK Standard, Standards Norway

- NORSOK N-001, Integrity of offshore structures

- NORSOK N-005, Condition Monitoring of load

bearing structures

- NORSOK N-006, Assessment of structure

integrity for existing offshore load-bearing structures

3. ลักษณะความเสียหายที่สามารถเกิดขึ้นสำหรับอุปกรณ์ของหน่วยการผลิตในอุตสาหกรรม Oil & Gas

เนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปตามกระบวนการผลิตของหน่วยการผลิตในอุตสาหกรรม Oil & Gas โดยเฉพาะลักษณะความเสียหายที่จะเกิดขึ้นแก่อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องของแต่ละหน่วยการผลิตซึ่งมีความแตกต่างกัน ลักษณะความเสียหายดังกล่าวมีโอกาสเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามชนิดของความเสียหายและทวีความรุนแรงของความเสียหายในแต่ละชนิดได้มากขึ้นจากช่วงระยะเวลาการใช้งานของอุปกรณ์ที่ยาวนานขึ้น ลักษณะความเสียหายที่เด่นชัดในอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับหน่วยการผลิต จะมีหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น

- Brittle Fracture
- Thermal Fatigue
- Erosion/Erosion Corrosion
- Mechanical Fatigue
- Corrosion

โดยทั่วไปแล้วความเสียหายจาก Corrosion จะมีได้อีกหลากหลายรูปแบบย่อยลงไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมภายนอกและสภาวะแวดล้อมภายในของตัวอุปกรณ์เอง เช่น อุณหภูมิการทำงานของอุปกรณ์ที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาการทำงาน ความดันที่เกิดขึ้น แรงกระทำที่เกิดขึ้นแก่ตัวอุปกรณ์ทั้งจากแรงภายนอกและแรง

ภายใน สารเคมีหรือชนิดของสารที่อยู่ภายในตัวอุปกรณ์ ฉนวนที่ใช้หุ้มห่ออุปกรณ์ ชนิดของสีหรือสารเคมีที่ใช้ในการเคลือบผิวของอุปกรณ์ทั้งภายนอกและภายใน รวมไปถึงวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตตัวอุปกรณ์เอง ซึ่งสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันนั้นก็สามารก่อให้เกิดลักษณะความเสียหายในแง่ Corrosion ได้อีกมากมายเช่น

- Galvanic Corrosion
- Corrosion under Insulation
- Soil Corrosion
- Caustic corrosion
- Chloride Stress Corrosion Cracking
- Hydrochloric Acid Corrosion
- Amine Stress Corrosion Cracking

4. พื้นฐานการตรวจสอบอุปกรณ์ของหน่วยการผลิตโดยการประเมินถึงความเสี่ยง (Risk Base Inspection)

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นแก่อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับหน่วยการผลิตในอุตสาหกรรม Oil & Gas สามารถเกิดขึ้นได้หลากหลายรูปแบบ จากสาเหตุดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดรูปแบบและวิธีการที่เหมาะสมในการตรวจสอบสำหรับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงประเภทของการตรวจสอบรวมถึงความถี่ที่จะกำหนดไว้ในแผนงานการตรวจสอบในอนาคต เนื่องจากว่าการตรวจสอบอุปกรณ์บางประเภท เช่น ถังรับความดัน (pressure vessel) ในบางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องเปิดช่องทางเข้าไปสู่ภายในตัวอุปกรณ์เพื่อเข้าไปทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพภายในโดย Inspector และการกระทำดังกล่าวนั้น จำเป็นจะต้องหยุดการทำงานของตัวอุปกรณ์ ซึ่งอาจมีผลกระทบทำให้หน่วยกระบวนการผลิตที่ตัวอุปกรณ์นั้นทำงานอยู่หรือหน่วยกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องต่อเนื่องจะต้องหยุดการผลิตในช่วงเวลาของการตรวจสอบอุปกรณ์ดังกล่าว

วิธีการตรวจสอบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องของหน่วยการผลิตในอุตสาหกรรม Oil & Gas ในช่วงเวลา In-Service Inspection ได้มีการวิจัยและพัฒนาในรูปแบบและวิธีการของการตรวจสอบอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด เพื่อลดหรือเพิ่มกระบวนการตรวจสอบหรือการกระทำใด ๆ ให้เหมาะสมตามความจำเป็นในแต่ละช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์นั้น ๆ แต่ยังคงไว้ซึ่งความปลอดภัยรวมถึงมาตรฐานหรือข้อกำหนดอันเป็นที่ยอมรับได้ของผู้ประกอบการและผู้ที่มี

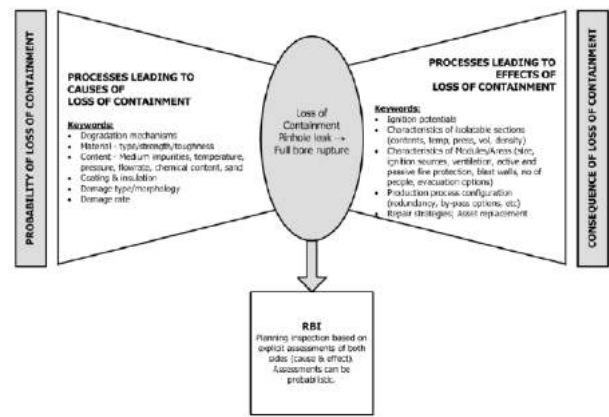
ส่วนเกี่ยวข้องในอุตสาหกรรมดังกล่าว ทั้งนี้การเลือกใช้มาตรฐานหรือหลักการในการตรวจสอบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในช่วงเวลา In-Service Inspection ผู้ประกอบการยังต้องคำนึงถึงและปฏิบัติตามกฎหมายของแต่ละประเทศซึ่งมีข้อกำหนดที่แตกต่างกันออกไปอย่างเคร่งครัดในกรณีที่ผู้ประกอบการรายเดียวกันนี้ได้ดำเนินธุรกิจที่เกี่ยวข้องในอุตสาหกรรม Oil & Gas ในหลายประเทศในเวลาเดียวกัน การหาจำนวนความถี่ในการตรวจสอบที่เหมาะสม การลดจำนวนครั้งในการหยุดการทำงานของตัวอุปกรณ์ซึ่งมีผลกระทบไปถึงการหยุดการทำงานของหน่วยการผลิตที่เกี่ยวข้อง การวิเคราะห์และประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นเพื่อหาวิธีการตรวจสอบต่าง ๆ เช่น การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (NDT) ให้เหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพที่เกิดขึ้นจริงแก่ตัวอุปกรณ์ รวมทั้งการใช้วิธีการคำนวณทางสถิติ ในการกำหนดและวางแผนการตรวจสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ในอนาคต ซึ่งการกระทำดังกล่าวนี้จะช่วยให้ต้นทุนในแง่การบำรุงรักษาตัวอุปกรณ์แต่ละชนิดมีแนวโน้มที่ลดลงได้ในอนาคตและเป็นการลดความเสี่ยงที่อุปกรณ์หรือหน่วยการผลิตจะมีโอกาสเกิดความบกพร่องหรือเสียหายในช่วงเวลาการทำงานอยู่ได้

รูปแบบการประเมินเพื่อให้ได้มาซึ่งวิธีการและแผนการตรวจสอบที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับหน่วยการผลิตในอุตสาหกรรม Oil & Gas ที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบันจะมีหลากหลายรูปแบบด้วยกัน ซึ่งหนึ่งในนั้นคือการใช้รูปแบบการประเมินโดยคำนึงถึงความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นเป็นหลัก

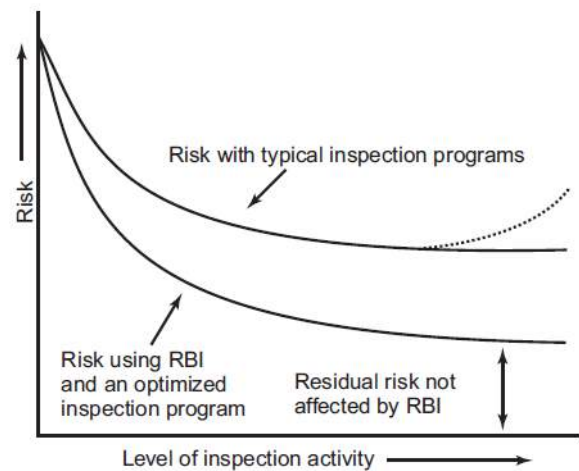
โดยทั่วไปรูปแบบของสมการที่กล่าวถึงความเสี่ยงอันเป็นที่นิยมใช้ในการกำหนดหาแผนการตรวจสอบจะมีดังสมการ

$$\text{Risk} = \text{Consequence of failure (CoF)} \times \text{probability of failure (PoF)}$$

หรือจะกล่าวได้ว่าความเสี่ยงที่เกิดขึ้นได้มาจากผลคูณระหว่างผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความเสียหายและความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นได้ของความเสียหาย



รูปที่ 1 รูปแบบพื้นฐานการประเมินการตรวจสอบโดยคำนึงถึงความเสี่ยง

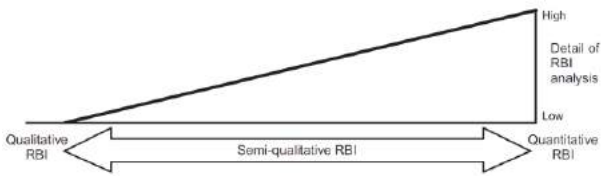


รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเสี่ยงที่เกิดขึ้นและระดับของการตรวจสอบ

หลักการสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการประยุกต์ใช้กระบวนการประเมินการตรวจสอบโดยคำนึงถึงความเสี่ยง (RBI, Risk Base Inspection) สำหรับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับหน่วยการผลิตในอุตสาหกรรม Oil & Gas จะมีหลักการสำคัญ เช่น

- ระบบการจัดการและจัดเก็บข้อมูลและเอกสารที่เกี่ยวข้อง เช่น แบบงาน ข้อมูล วิธีการ และผลการคำนวณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตและการตรวจสอบอุปกรณ์นั้น ๆ อย่างละเอียดจากอดีตจนถึงปัจจุบัน
- การกำหนดวิธีการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความเสียหาย
- การกำหนดวิธีการประเมินความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นได้จากความเสียหาย
- การกำหนดวิธีการจัดการบริหารความเสี่ยงโดยใช้การตรวจสอบที่เหมาะสม

โดยเฉพาะประวัติผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจสอบโดยวิธีการต่าง ๆ ที่ผ่านมาในอดีตของอุปกรณ์นั้น ๆ จะมีความสำคัญอย่างมาก เช่น ค่าความหนาที่เหลืออยู่ของถังรับความดัน (pressure vessel) ตำแหน่งที่ใช้วัดหาค่าความหนา รวมถึงลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง จะต้องมีการตรวจสอบและประเมินโดยผู้ตรวจสอบ (Inspector) ที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐานสากล และทำการบันทึกและจัดเก็บให้ถูกต้องเหมาะสมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวในกระบวนการต่อไป



รูปที่ 3 แสดงสัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างรายละเอียดความต้องการของข้อมูลในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

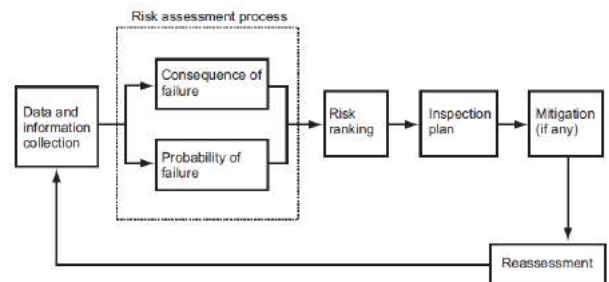
ลักษณะการวิเคราะห์ของข้อมูลที่จะใช้ในกระบวนการประเมินการตรวจสอบโดยคำนึงถึงความเสี่ยง (RBI, Risk Base Inspection) จะเป็นที่กล่าวถึงโดยทั่วไปด้วยกัน สามรูปแบบ คือ

- ข้อมูลเชิงคุณภาพ
- ข้อมูลเชิงปริมาณ
- ข้อมูลเชิงกึ่งปริมาณ

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าความต้องการของข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการประเมินการตรวจสอบโดยคำนึงถึงความเสี่ยง (RBI, Risk Base Inspection) จะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพจะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลตามหลักการทางวิศวกรรมและประสบการณ์ของผู้วิเคราะห์ โดยทั่วไปวิธีการนี้นิยมทำเป็นหมู่คณะเพื่อให้ได้มาซึ่งความคิดเห็นจากผู้มีประสบการณ์ในหลาย ๆ หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น งานด้านวิศวกรรม งานด้านกระบวนการผลิต งานด้านวางแผนการซ่อมบำรุง งานด้านการตรวจสอบและซ่อมบำรุง งานด้านสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย รวมไปถึง หน่วยงานด้านการประเมินและคาดการณ์ราคาผลิตภัณฑ์ในอนาคต

สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณจะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลตามการออกแบบของตัวอุปกรณ์ อ้างอิงถึงข้อมูลสถานะแวดล้อมที่เกิดขึ้นของตัวอุปกรณ์ทั้งในอดีตที่ผ่านมาและปัจจุบันทั้งในแง่การบำรุงรักษาและความเสียหายที่เกิดขึ้น รวมถึงมูลค่าความเสียหายที่สามารถคำนวณหาได้ในกรณีที่มีเหตุการณ์ที่ไม่ได้คาดการณ์ไว้ล่วงหน้าเช่นกรณีอุปกรณ์มีความเสียหายเกิดขึ้นระหว่างการทำงาน



รูปที่ 4 แสดงรูปแบบวัฏจักรการทำงานของการประเมินการตรวจสอบโดยคำนึงถึงความเสี่ยง

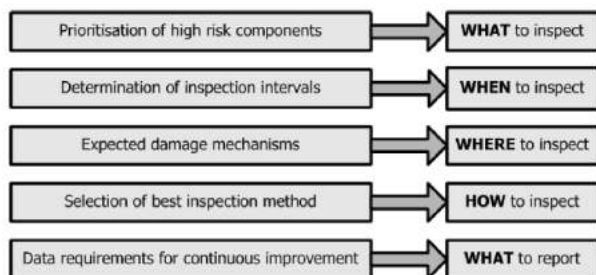
องค์ประกอบหลักที่สำคัญมากสำหรับการประเมินการตรวจสอบโดยคำนึงถึงความเสี่ยงคือ การกำหนดรูปแบบของ Risk Matrix เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินหาค่าความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นแก่อุปกรณ์แต่ละประเภท ซึ่งขนาดของ Risk Matrix จะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ทางผู้ประเมินและผู้ที่เกี่ยวข้องได้มีการกำหนดขึ้นและมีการทำข้อตกลงร่วมกันเพื่อที่จะใช้ Risk Matrix ดังกล่าวในการประเมินเพื่อหาความเสี่ยง เช่นเดียวกันนั้น การกำหนดจำนวนของสีที่จะใช้งานและการกำหนดสีที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ของช่องตารางใน Risk Matrix ก็จำเป็นจะต้องได้รับการยอมรับจากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง

รูปที่ 5 จะแสดงให้เห็นขนาดของ Risk Matrix ในรูปแบบ 5 x 5 และประกอบไปด้วยจำนวนสีที่แตกต่างกันสามสี คือ แดง เหลือง เขียว ซึ่งเป็นตัวแทนของค่าความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้น คือค่าความเสี่ยงสูง (สีแดง) ค่าความเสี่ยงปานกลาง (สีเหลือง) และค่าความเสี่ยงต่ำ (สีเขียว)

PoF Ranking	PoF Description	A	B	C	D	E
5	(1) In a normal operation, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in the location.	YELLOW	RED	RED	RED	RED
4	(1) In a normal operation, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in operating company.	YELLOW	YELLOW	RED	RED	RED
3	(1) Failure has occurred once during the life of the installation for a vessel carrying a small number of components. (2) Failure has occurred in the operating company.	GREEN	YELLOW	YELLOW	RED	RED
2	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a vessel carrying a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW	RED
1	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a vessel carrying a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW
CoF Types	Safety	No injury	Minor injury, Absence < 3 days	Major injury, Absence > 3 days	Single fatality	Multiple fatalities
	Environment	No pollution	Minor local effect, Can be cleaned up easily	Significant local effect, Will take more than 3 man weeks to remove	Pollution has significant effect upon the surrounding community (e.g. contamination of lake or fish)	Pollution that can cause massive and long-term damage to ecosystem
	Business	No downtime or asset damage	< \$ 10,000 damage or downtime < one shift	< \$ 100,000 damage or downtime < 4 shifts	< \$ 1,000,000 damage or downtime < one month	> \$ 1,000,000 damage or downtime > one month
CoF Ranking		A	B	C	D	E

รูปที่ 5 แสดงตัวอย่าง Risk Matrix (ISO 2000)

หลังจากทำการประเมินหาค่าความเสี่ยงของอุปกรณ์ออกมาได้แล้วนั้น อุปกรณ์ตัวใดที่มีค่าความเสี่ยงสูง จะต้องได้รับการพิจารณาอย่างละเอียดถี่ถ้วนเป็นอย่างมากในแง่ของการกำหนดแผนการตรวจสอบและการเลือกสรรวิธีการตรวจสอบที่เหมาะสม องค์ประกอบหลักที่ใช้ในการกำหนดแผนการตรวจสอบและผลลัพธ์ที่ต้องการจะเป็นไปตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์และประเมินข้อมูลของการตรวจสอบโดยคำนึงถึงความเสี่ยงเพื่อใช้ในการกำหนดแผนและวิธีการตรวจสอบที่เหมาะสม

สิ่งหนึ่งที่ต้องระลึกถึงอยู่เสมอสำหรับการประเมินตรวจสอบโดยคำนึงถึงความเสี่ยง (RBI, Risk Base Inspection) คือกระบวนการดังกล่าวได้กำหนดรูปแบบการประเมินหาค่าความเสี่ยงของอุปกรณ์ในลักษณะของวัฏจักร กล่าวคือเมื่ออุปกรณ์นั้น ๆ ได้มาซึ่งระดับความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจากการประเมินรวมถึงแผนการตรวจสอบที่เหมาะสมแล้วนั้น อุปกรณ์ดังกล่าวก็ยังมีค่าความเสี่ยงเป็นอยู่อย่างที่จะต้องทำการประเมินเพื่อหาค่าความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นใหม่ตามข้อตกลงที่ได้กำหนดขึ้นอย่างเหมาะสมจากผู้ประเมินและผู้ที่เกี่ยวข้อง เช่น การหาค่าความเสี่ยงใหม่ทุก ๆ ครั้งของอุปกรณ์หลังจากที่ผ่านการซ่อมบำรุงใหญ่

ตามแผนกำหนดการทุก ๆ 3 หรือ 5 ปี การหาค่าความเสี่ยงใหม่ทุก ๆ ครั้งหลังจากผ่านการซ่อมบำรุงโดยมีความเสียหายที่ค่อนข้างร้ายแรงเกิดขึ้นกับตัวอุปกรณ์แต่ไม่ได้คาดการณ์ดังกล่าวมาก่อน การหาค่าความเสี่ยงใหม่ของตัวอุปกรณ์ในกรณีที่ตัวอุปกรณ์มีความเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นซึ่งมีผลกระทบต่อการทำงานของตัวอุปกรณ์เป็นอันมากเช่น การเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการทำงาน การเปลี่ยนแปลงวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตตัวอุปกรณ์

บทสรุป

ในการกำหนดแผนการตรวจสอบอุปกรณ์เกี่ยวข้องสำหรับหน่วยการผลิตในอุตสาหกรรม Oil & Gas ในช่วงเวลา In-Service Inspection สำหรับ Inspector และผู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการทำงานนั้น จะเห็นได้ว่าการกำหนดวิธีการและช่วงเวลาในการทำการตรวจสอบที่เหมาะสมและมีมาตรฐานรองรับที่ดี เช่นการประเมินการตรวจสอบโดยคำนึงถึงความเสี่ยง จะมีการวิเคราะห์ซึ่งความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องต่อเนื่องกัน ทั้งในแง่ผลกระทบทางธุรกิจที่เกิดจากการเสียหายของตัวอุปกรณ์และนำไปสู่การหยุดการทำงานของหน่วยผลิตนั้น ๆ ผลกระทบทางด้านความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานรวมถึงผู้ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง และมีการคำนึงถึงความเสี่ยงในรูปแบบที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นได้ในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งกล่าวได้ว่าการเลือกใช้มาตรฐานการประเมินการตรวจสอบโดยคำนึงถึงความเสี่ยง เป็นการลดค่าใช้จ่ายในระยะยาวในการตรวจสอบและบำรุงรักษาอุปกรณ์ได้เป็นอย่างดีในกรณีที่ผู้ทำการประเมินได้ทำการวิเคราะห์หาสาเหตุและลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องและทำการกำหนดแผนการตรวจสอบอุปกรณ์ได้อย่างเหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

- [1] API (2014), API 510 – Pressure Vessel Inspection Code; In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration, 10th Edition, American Petroleum Institute (API), Washington, DC., USA
- [2] API (2016), API 570 – Piping Inspection Code; In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration, 4th Edition, American Petroleum Institute (API), Washington, DC., USA

- [3] API (2014), API 653 – Storage Tank Inspection Code; In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration, 5th Edition, American Petroleum Institute (API), Washington, DC., USA
- [4] API (2014), API RP 2SIM, Structure Integrity Management of Fixed Offshore Structure, First Edition, American Petroleum Institute (API), Washington, DC., USA
- [5] API (2009), API RP 580, Risk Base Inspection, Second Edition, American Petroleum Institute (API), Washington, DC., USA
- [6] IAB-358-15, IIW Guideline for International Inspection Personnel, PERSONNEL WITH QUALIFICATION FOR INSPECTION ACTIVITIES including IN-SERVICE INSPECTION, July 2015, EWF/IIW-IAB Secretariat. Portugal
- [7] Certification Scheme for Personnel, Document no. CSWIP-PI-11-01, Requirements for the Certification of Plant Inspectors (Plant Integrity Management), 5th Edition, May 2012, TWI Certification Ltd. UK
- [8] Standard Norway (2012), NORSOK Standard N-001, 8 Edition, Integrity of offshore structures
- [9] Standard Norway (1997), NORSOK Standard N-005, First Edition, Condition Monitoring of load bearing structures
- [10] Standard Norway (2009), NORSOK Standard N-006, First Edition, Assessment of structure integrity for existing offshore load-bearing structures
- [11] DNV (2010), Recommendation Practice DNV-RP-G101 – Risk Based Inspection of Offshore Topsides Static Mechanical Equipment [12]
DNV (2011), Recommendation Practice DNV-RP-G103 – Non-Intrusive Inspection



สมพล เพชรฤทธิ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2544 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือปี เมื่อ พ.ศ. 2549 ปัจจุบันปฏิบัติงานที่ บริษัท เจอร์มันนิชเชอร์ลอยด์อินดัสเตรียล เซอร์วิส (ประเทศไทย) จำกัด ตั้งแต่วันที่ พ.ศ. 2551 โดยดำรงตำแหน่ง วิศวกรโครงการอาวุโส

ลวดเชื่อมมีสารพอกหุ้มสำหรับเหล็กกล้าไม่เจือ (Covered Electrode for Non-Alloy Steels)

ยุคล จุลอุทัย

โทร 081-614-9049

1. วัสดุเชื่อมสิ้นเปลืองเบื้องต้น (Basic Welding Consumables)

การเชื่อมอาร์กไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมมีสารพอกหุ้มที่ใช้กัน นับมาจนถึงปัจจุบัน ไม่น้อยกว่า 100 ปี อย่างไรก็ตามกระบวนการเชื่อมที่ถูกบันทึกครั้งแรกถูกค้นพบเมื่อประมาณ 5,820 ปีมาแล้ว โดยช่างตีเหล็กชื่อ Tubal-Cain และถูกบันทึกไว้ในหนังสือ Genesis โดยให้ความร้อนที่ปลายของโลหะ 2 ชิ้น จนกระทั่งเริ่มหลอมแล้วตีด้วยค้อนให้ติดกัน เมื่อโลหะเย็นลง โลหะ 2 ชิ้นก็เชื่อมติดกัน กระบวนการนี้รู้จักกันดีว่าการเชื่อมทุบ (Forge Welding) และใช้กันมาหลายศตวรรษ

ในปี ค.ศ. 1800 ชาวฝรั่งเศสชื่อ Volta ใช้แบตเตอรี่หลายใบ เพื่อผลิตอาร์กไฟฟ้าที่ร้อนเพียงพอ เพื่อหลอมลวด (Wire) นี่คือการเริ่มต้นของการเชื่อมอาร์กไฟฟ้าแต่หลังจากนั้นมา 60 ปี ชาวอังกฤษชื่อ Wilde เชื่อมเหล็กชิ้นเล็ก ๆ เข้าด้วยกันด้วยอาร์กไฟฟ้า จากการประดิษฐ์ของ Wilde ได้รับการจดสิทธิบัตรการเชื่อมอาร์กไฟฟ้าครั้งแรกของโลกในปี ค.ศ. 1865

ในประเทศรัสเซีย ในต้นปี ค.ศ. 1890 outhouse Baltic Shipyards ใช้ลวดเชื่อมเปลือยสำหรับการเชื่อม อย่างไรก็ตามงานเชื่อมก็ยังไม่ประสบความสำเร็จและอุปกรณ์ยุ่งยากมาก ปัญหาใหญ่ที่เผชิญในเวลานั้นคือ ไม่มีการป้องกันโลหะหลอมเหลวที่ดึงออกซิเจนและไนโตรเจนจำนวนมากจากอากาศรอบ ๆ เขารวมตัวในเนื้อเชื่อมทำให้เนื้อโลหะเชื่อมไม่แข็งแรง

ในปี ค.ศ. 1902 ช่างกลเรือชาวสวีเดน ชื่อ ออสการ์ คเจลเบิร์ก (Oscar Kjellberg) ประดิษฐ์วิธีป้องกันแนวเชื่อมหลอมเหลวจากแก๊สในอากาศได้สำเร็จโดยใช้วิธีหุ้มลวดเชื่อมด้วยฟลักซ์ (ส่วนประกอบเคมี) ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนโดยการเชื่อมอาร์กที่ร้อนและเข้มข้นมากจะไหม้เป็นควัน หรือเป็นแก๊สปกป้อง ป้องกันมิให้อากาศเข้าไปรวมกับโลหะเชื่อมหลอมเหลวได้ด้วยการหุ้มลวดด้วยฟลักซ์ที่พัฒนาโดย Kjellberg ในปี ค.ศ. 1902 นี้ ได้รับการจดสิทธิบัตร

ในปี ค.ศ. 1906 และทำให้เป็นพื้นฐานของการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ซึ่งยังคงใช้กันจนถึงทุกวันนี้

2. ขอบเขตการใช้งาน (Field of Use)

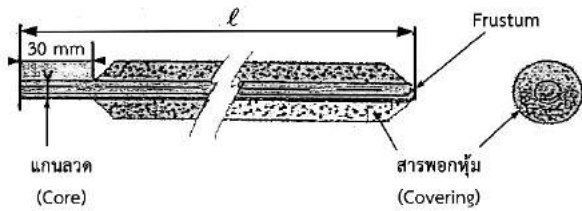
กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (MMAW) เป็นกระบวนการเชื่อมอเนกประสงค์ (Multipurpose Process) ที่ใช้ได้ง่ายและสะดวกในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และถูกนำมาใช้ในทุกระดับ และทุกชนิดของอุตสาหกรรม เช่น ใช้กับงานโลหะแผ่น, โรงงานปฏิกรณ์

3. ลวดเชื่อมมีสารพอกหุ้ม (Covered Electrode)

ลวดเชื่อมที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (MMAW) จะเป็นลวดเชื่อมที่มีสารพอกหุ้ม (รูปที่ 1) แกนเหล็กอยู่ตรงกลางเป็นแท่งกลมมีขนาดความโต และความยาวเป็นขนาดมาตรฐาน (ตารางที่ 1) มีฟลักซ์หุ้มแกนกลาง โดยทั่วไปจะเป็นโลหะชนิดเดียวกับโลหะชิ้นงาน เช่น เหล็กกล้าไม่เจือ (Unalloyed steel), เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) แต่ก็มีบางชนิดที่ไม่เหมือนกัน เช่น เป็นแกนนิเกิล (Ni) ที่ใช้สำหรับเชื่อมเหล็กหล่อ (Cast Iron)

ตารางที่ 1 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของลวดเชื่อม

Ø (mm)	L (mm)
1.6	350 ถึง 200
2	
2.5	
3.2	450 ถึง 300
4	
5	
6	



รูปที่ 1 แสดงส่วนต่าง ๆ ของลวดเชื่อมมีสารพอกหุ้ม [2]

4. สารพอกหุ้มแกนลวด (Flux)

สารพอกหุ้มมีหลายชนิดซึ่งมีความแตกต่างกันไปวัสดุที่นำมาใช้ทำฟลักซ์มีส่วนผสมของสารหลายชนิดที่สามารถช่วยให้เกิดประสิทธิภาพและคุณภาพของเนื้อโลหะเชื่อม ซึ่งถูกกำหนดเป็นมาตรฐานตาม มอก.49/ISO 2560 ซึ่งเป็นลวดเชื่อมเหล็กกล้าอะลูมิเนียม หรือเหล็กกล้าไม่เจือ (Unalloyed Steel)

4.1 ภาระหน้าที่ของสารพอกหุ้มแกนลวด (รูปที่ 2)

สารพอกหุ้มแกนลวดให้มีความสำคัญตามภาระหน้าที่ดังนี้

4.1.1 ช่วยให้เกิดการสร้างระยะเปลวอาร์กเรียบสม่ำเสมอ

- จุดประกายอาร์กได้ง่ายขึ้น
- ช่วยให้คุณสมบัติการเชื่อมดีขึ้น

4.1.2 ช่วยในการสร้างสแลก (Slag)

- ช่วยให้หยดน้ำโลหะมีขนาดโตขึ้น
- ช่วยป้องกันมิให้เกิดสารมลทินจากอากาศ

เข้าร่วมตัวกับหยดน้ำโลหะ และเนื้อโลหะเชื่อม

- ช่วยให้เกิดเกล็ดรอยเชื่อมเรียบ
- ช่วยมิให้เนื้อโลหะเชื่อมเย็นตัวเร็วเกินไป

4.1.3 ช่วยในการสร้างแก๊สปกป้อง

- ได้จากสารออร์แกนิก
- ได้จากสารคาร์บอเนต (CaCO_3)

4.1.4 ช่วยเติมและรักษาสสมบัติของธาตุเจือ

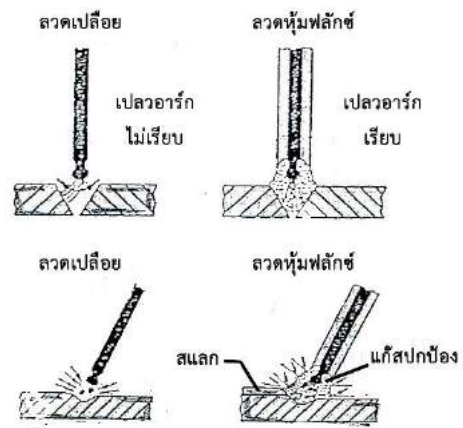
4.2 สมบัติและส่วนประกอบของสารพอกหุ้ม

ในบทความฉบับนี้ขอเสนอ 3 ชนิด คือ ชนิดกรด (A) ชนิดรูไทล์ (R) และชนิดด่าง (B)

4.2.1 ฟลักซ์ชนิดกรด (A) แสดงในรูปที่ 3

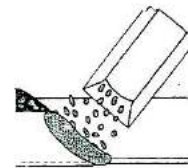
- การหยดของโลหะเหลว: หยดละเอียดถึงเป็นฝอย

- การหลอมลึก: มาก
- สแลก: กรอบ, พูนมาก

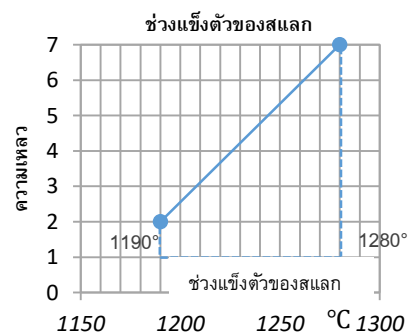


รูปที่ 2 ช่วยเป็เปลวอาร์กเรียบและทำหน้าที่ป้องกันมิให้ออกซิเจนและไนโตรเจนจากอากาศเข้าผสมกับเนื้อโลหะเชื่อม [5]

- ส่วนประกอบของสารพอกหุ้ม (โดยประมาณ) ได้แก่ แมกนีไทต์ (Magnetite; Fe_3O_4) 50%, ควอร์ซ (Quarz; SiO_2) 20%, แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate; CaCO_3) 10%, เฟอโรแมงกานีส (Ferromanganese; FeMn) 20%, น้ำประสานหรือน้ำแก้ว (Sodium silicate)



รูปที่ 3 แสดงฟลักซ์ชนิดกรด (A) [1]



กราฟที่ 1 ผลต่างอุณหภูมิ 90°C

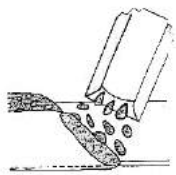
จากกราฟที่ 1 แสดงการหลอมของฟลักซ์ชนิดกรดที่ตำแหน่งหลอมเหลวสูงที่สุดที่เลข 7 ณ อุณหภูมิ 280°C และจะแข็งตัวที่ตำแหน่งเลข 2 ณ อุณหภูมิ 1190°C จะได้ช่วงแข็งตัวของสแลกมีผลต่างของอุณหภูมิถึง 90°C สามารถทำให้เชื่อมได้ง่ายกว่าชนิดรูไทล์และชนิดด่าง

4.2.2 ฟลักซ์ชนิดรูไทล์ (R) แสดงในรูปที่ 4

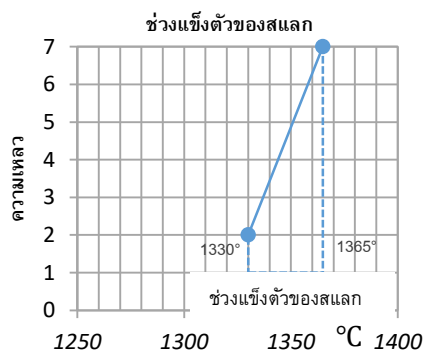
- การหดยของโลหะเหลว: ปานกลางถึงหดยละเอียด

- การหลอมลึก: น้อยถึงมาก
- สแลก: บางส่วนเป็นผลึก, พรุณ
- ส่วนประกอบของสารพอกหุ้ม (โดยประมาณ)

ได้แก่ รูไทล์ (Rutile; TiO_2) 45%, แมกนีไทต์ (Magnetite; Fe_3O_4) 10%, ควอร์ซ (Quartz; SiO_2) 20%, แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate; CaCO_3) 10%, เฟอร์โรแมงกานีส (Ferromanganese; FeMn) 5%, น้ำประสานหรือน้ำแก้ว (Sodium silicate)



รูปที่ 4 แสดงฟลักซ์ชนิดรูไทล์ (R) [1]



กราฟที่ 2 ผลต่างอุณหภูมิ 35°C

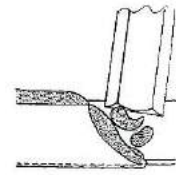
จากกราฟที่ 2 แสดงการหลอมของฟลักซ์ชนิดรูไทล์ ที่มีตำแหน่งหลอมเหลวที่เลข 7 ณ อุณหภูมิ 1365°C และจะแข็งตัวของสแลกที่ตำแหน่งเลข 2 ณ อุณหภูมิ 1330°C มีผลต่างของช่วงการแข็งตัวของสแลกอยู่ที่อุณหภูมิ 35°C จะพบว่าช่วงการแข็งตัวของสแลกชนิดรูไทล์น้อยกว่าชนิดกรด จะเชื่อมได้ยากกว่าชนิดกรด

4.2.3 ฟลักซ์ชนิดต่าง (B) แสดงในรูปที่ 5

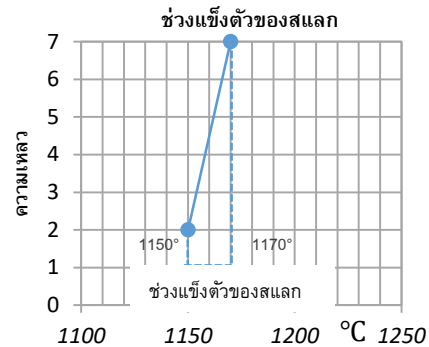
- การหดยของโลหะเหลว: ปานกลางถึงขนาดโต
- การหลอมลึก: ต่ำถึงปานกลาง
- สแลก: เป็นผลึก, แน่น
- ส่วนประกอบของสารพอกหุ้ม (โดยประมาณ)

ได้แก่ ฟลูออโรสปาร์ (Fluorspar; CaF_2) 45%, แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate; CaCO_3) 40%, ควอร์ซ

(Quartz; SiO_2) 10%, เฟอร์โรแมงกานีส (Ferromanganese; FeMn) 5%, น้ำประสานหรือน้ำแก้ว (Sodium silicate)



รูปที่ 5 แสดงฟลักซ์ชนิดต่าง (B) [1]



กราฟที่ 3 ผลต่างอุณหภูมิ 20°C

จากกราฟที่ 3 แสดงการหลอมของฟลักซ์ชนิดต่าง มีตำแหน่งการหลอมเหลวที่เลข 7 ณ อุณหภูมิ 1170°C และจะเกิดการแข็งตัวของสแลกที่ตำแหน่งเลข 2 ณ อุณหภูมิ 1150°C จะพบว่าผลต่างของช่วงการแข็งตัวของสแลกอยู่ที่อุณหภูมิ 20°C ซึ่งน้อยที่สุดของฟลักซ์ชนิดกรดและชนิดรูไทล์ ฟลักซ์ชนิดนี้จึงเชื่อมได้ยาก เปลวอาร์กสั่นปลิวลวดจะซัดติดชิ้นงานได้ง่าย

สมบัติ ส่วนประกอบ หน้าที่ของสารพอกหุ้มแกนลวด และการนำไปใช้งาน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2 ถึง 4

4.3 การผลิตลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ

กระบวนการผลิตลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (รูปที่ 6, 7) แบ่งเป็นส่วนย่อย 2 ส่วนคือ ส่วนของสารพอกหุ้มและส่วนของแกนลวด โดยสารพอกหุ้มเริ่มจากการนำวัตถุดิบสำหรับทำผงฟลักซ์มาผ่านการบดให้เป็นผงที่ละเอียด และใช้แม่เหล็กแยกวัสดุละเอียด และกรองโดยใช้ตะแกรง จากนั้นชั่งน้ำหนักและนำเข้าถังเก็บ ก่อนนำมาผสมจะมีการตรวจสอบอุณหภูมิและชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เมื่อผสมแล้วผู้ผลิตทำการตรวจสอบและนำไปผสมเบี่ยง จึงจะถือว่าเป็นการสิ้นสุดการผลิตสารพอกหุ้มหรือฟลักซ์หุ้ม

ตารางที่ 2 หน้าหลักและหน้าที่รองของสารพอกหุ้มแกนลวด

ชนิดของสารพอกหุ้ม	หน้าที่หลัก	หน้าที่รอง	นิยมใช้
เซลลูโลส (Cellulose - C) จากสารอินทรีย์ที่ติดไฟได้	สร้างแก๊สปกคลุม	เพิ่มแรงดันอาร์ก ให้การอาร์กรุนแรง	ทำตั้งเชื่อมลง (PG)
รูไทล์ (Rutile - R) จากไทเทเนียมออกไซด์ -TiO ₂	ให้สแลก และหลุตรอนได้ง่าย	การอาร์กสม่ำเสมอ ให้แนวเรียบ	ทุกท่าเชื่อมยกเว้นตำแหน่ง แนวตั้งเชื่อมลง (PJ)
กรด (Acid - A) จากเหล็กออกไซด์ (Fe ₃ O ₄)	ให้สแลกกรอบ มีรูพรุนมาก	ถ่ายโอนโลหะเม็ดละเอียด ให้แนวแบนเรียบ ,	จำกัดตำแหน่งทำเชื่อม เกิด รอยร้าวขณะร้อน
ด่าง (Basic - B) จากฟลูออไรด์ (CaF ₂) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃)	ให้สแลกเป็นผลึกแน่น ให้ปริมาณ H ₂ ต่ำ <15 ml/100g อบที่ 300°C/1 ชม.	ให้หยดโลหะเหลว ขนาดปาน กลางถึงขนาดโต ทนต่อการ แตกร้าว	ทุกท่าเชื่อม AC/DC+
รูไทล์หนา (Thickness Rutile - RR) สารพอก หุ้มหนา ≥1.6 เท่าแกนลวด มีรูไทล์สูง	ให้สแลกหนา หลุตรอนง่าย	เริ่มต้นอาร์กใหม่ได้ดี เกิด เชื่อมละเอียด	ทุกท่าเชื่อม AC/DC±
รูไทล์ - เซลลูโลส (Rutile - Cellulose - RC) มี ปริมาณเซลลูโลสมากกว่ารูไทล์	ให้สแลกและแก๊สปกคลุม	ให้หยดโลหะขนาดปานกลางถึง ละเอียด	เหมาะกับเชื่อมทำตั้ง เชื่อม ลง
รูไทล์ - กรด (Rutile - Acid - RA) เหล็กออกไซด์ + ไททาเนียมออกไซด์	ให้สแลกมาก	ให้การอาร์กสม่ำเสมอ	เชื่อมได้ทุกตำแหน่ง ยกเว้น เชื่อมลง
รูไทล์ - ด่าง (Rutile - Basic - RB) มีด่างมากกว่า	มีสแลกหนาและแก๊สคลุมมาก	ให้สมบัติทางกลดี อาร์กสม่ำเสมอ	เชื่อมได้ทุกตำแหน่ง ยกเว้น เชื่อมลง

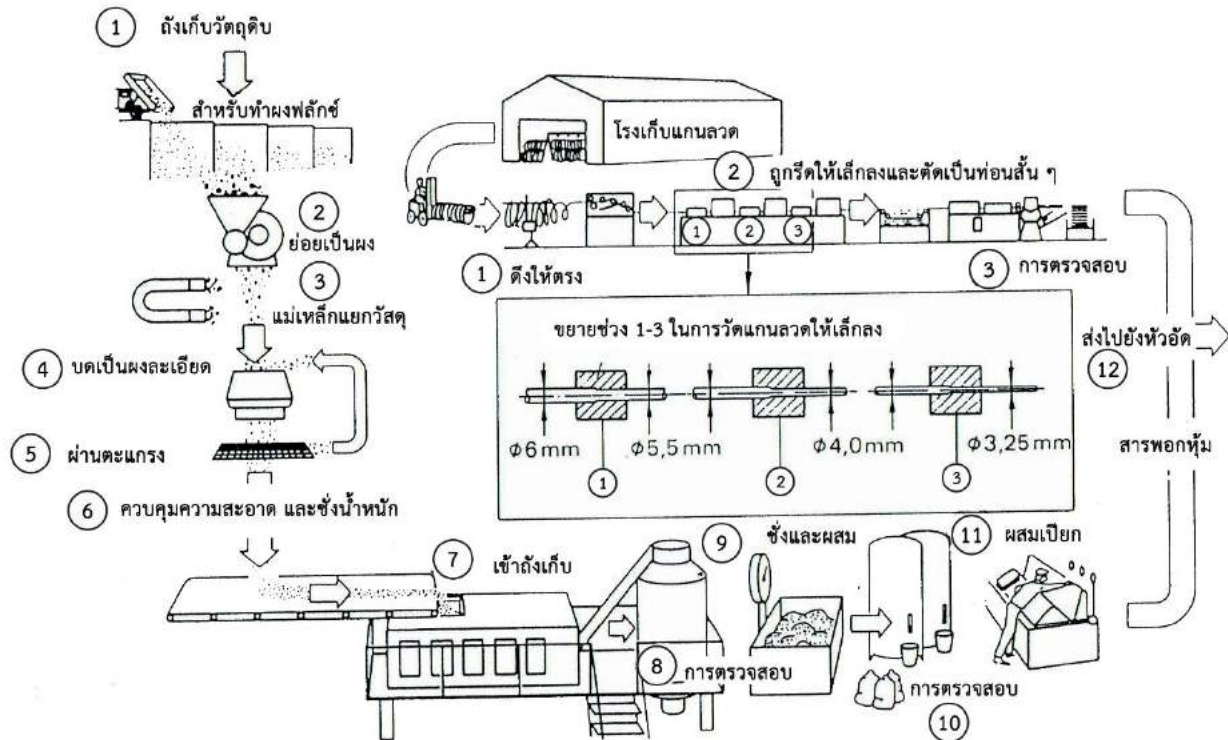
ตารางที่ 3 สมบัติของสารพอกหุ้มแกนลวดอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ

ชนิดของสารพอกหุ้ม	กรด (A)	รูไทล์(R)	ด่าง (B)	เซลลูโลส (C)
ชนิดกระแส/ขั้วเชื่อม	AC/DC-	AC/DC-	DC+	AC/DC+
การถ่ายเทหยดน้ำโลหะ	หยดละเอียดสเปร์เป็นฝอย	ปานกลางถึงหยดละเอียด	ปานกลางถึงหยดขนาดโต	ปานกลางถึงหยดขนาดโต
การเสริมร่องรอยต่อ	ปกติ	ดี	ดี	ดีมาก
ตำแหน่งทำเชื่อม	ทุกท่าเชื่อม	ทุกท่าเชื่อมยกเว้นท่าลง	ทุกท่าเชื่อม	เฉพาะทำเชื่อมลง
ค่าทนต่อแรงกระทบ	สูง	ต่ำ	ต่ำมาก	ต่ำ
การแตกเย็น	สูง	ต่ำ	ธรรมดา	ธรรมดา
ผิวรอยเชื่อม	ดี	ดี	ธรรมดา	ดี
สแลกออกง่าย	ดีมาก	ดีมาก	ธรรมดา	ดี
สมรรถนะ	เกิดรอยแห้วขอบแนวสูง	ใช้ได้อเนกประสงค์	รอยแห้วขอบแนวน้อย ต้องอบแห้งก่อนใช้งาน	เป็นฝอย เกิดสแลกน้อย ให้ผิวรอยเชื่อมหยาบ

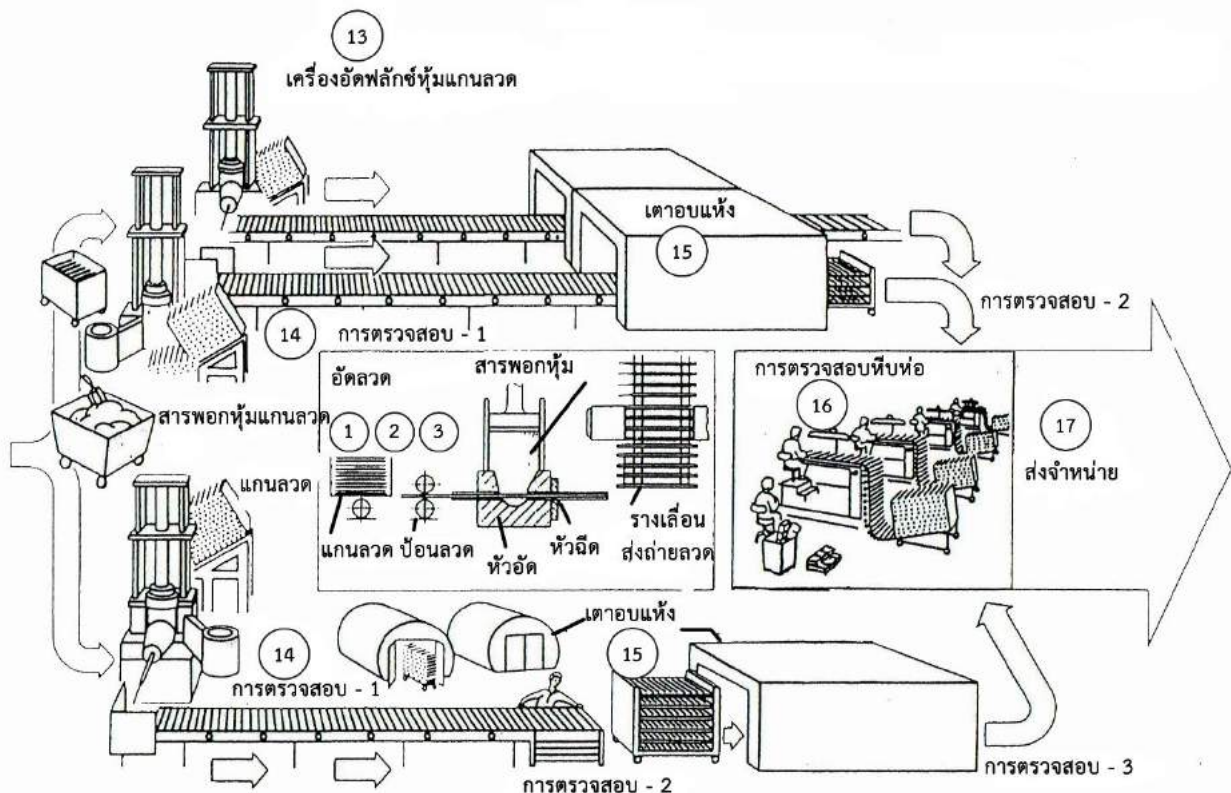
ตารางที่ 4 พิจารณาการนำไปใช้งาน

ลวดอิเล็กทรอนิกส์สำหรับ	DIN	ISO
เหล็กไม่เจือ และเหล็กเจือต่ำ	1931	2560
เหล็กเจือสูง	8529	
เหล็กทนความร้อน	8575	
เหล็กไม่เปราะสนิม และเหล็กทนความร้อนสูง	8556	
เชื่อมพอกผิว	8555	
อะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมเจือ	1732	
ทองแดง และทองแดงเจือ	1733	
นิกเกิล และนิกเกิลเจือ	1736	

การเตรียมแกนลวดเชื่อมเริ่มจากการดึงลวดเชื่อมให้ตรง นำมาผ่านกระบวนการรีดให้เล็กลงตามขนาดที่ต้องการนำไปใช้งาน จากนั้นนำมาตัดเป็นท่อนสั้น ๆ และตรวจสอบก่อนจะส่งไปยังหัวอัดฟลักซ์หุ้มแกนลวดของเครื่องอัดผู้ผลิตทำการตรวจสอบ และนำเข้าเตาอบแห้ง และทำการตรวจสอบ บรรจุหีบห่อ ตรวจสอบ และส่งจำหน่าย



รูปที่ 6 ขั้นตอนการผลิตผงฟลักซ์และการเตรียมแกนลวดเชื่อม



รูปที่ 7 การผลิตลวดเชื่อมแบบมีสารฟลักซ์

5. ลวดเชื่อมมีสารฟลักซ์

ตาม AWS A 5.1 แบ่งได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

5.1 ลวดเชื่อมเย็นเร็ว (Fast Freeze Electrode)

ลวดเชื่อมเย็นเร็วมีส่วนประกอบเพื่อให้เนื้อโลหะ

เชื่อมแข็งตัวอย่างรวดเร็วหลังจากหลอมโดยการอาร์ก และโดยเหตุนี้มีแนวโน้มพิเศษสำหรับการเชื่อมในท่าตั้งเชื่อมลง และท่าเหนือศีรษะ แม้ว่าอัตราการฟลักเนื้อเชื่อมไม่สูงเท่าลวดเชื่อมชนิดอื่น ลวดเชื่อมชนิดเย็นเร็วจะใช้สำหรับการ

เชื่อมท่าราบ และใช้เป็นลวดเชื่อมอเนกประสงค์ที่สามารถใช้สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าอะลูมิเนียมทุกอย่าง อย่างไรก็ตาม การเชื่อมที่ทำด้วยลวดนี้ทำได้ช้า และต้องการช่างเชื่อมที่มีทักษะสูง

ลวดเชื่อมเย็นเร็วให้การหลอมลึก และมีสารเจือสูงให้สแลกบางและควบคุมอาร์กง่าย มีสารเซลลูโลสผสมเป็นหลัก

5.1.1 การใช้งาน (Application)

- อเนกประสงค์สำหรับงานสร้างประกอบ และงานซ่อมบำรุง มีสะเก็ดเชื่อมขนาดเล็ก ๆ จำนวนมาก
- ทุกตำแหน่งโดยเฉพาะการเชื่อมทำตั้งเชื่อมลง และทำเหนือศีรษะ แผ่นงานที่ต้องการคุณภาพโดยถ่ายภาพรังสี

- การเชื่อมท่อ อาทิ ท่อผ่านเมือง ท่อในโรงงาน และท่อทั่วไป

- การเชื่อมเหล็กอบสังกะสี เหล็กทาสี หรือพื้นผิวที่ไม่สะอาด

- รอยต่อที่ต้องการหลอมลึกมาก (Deep Penetration) เช่น ต่อชนหน้าฉาก

- การเชื่อมโลหะแผ่น เช่น ต่อขอบ ต่อมุม

และต่อชน

5.1.2 คุณสมบัติ (Characteristic)

- เชื่อมได้ทุกตำแหน่งทำเชื่อม โดยเฉพาะ PJ, PD และ PE

- ให้การหลอมลึก

- ให้เม็ดโลหะกระเด็นขนาดเล็ก ๆ จำนวนมาก

- ให้แนวเชื่อมแบนราบ เกล็ดหยาบ

- มีสแลกบาง เคาะออกได้ยาก

- เชื่อมได้ดีกับตำแหน่ง PJ, PD และ PE

ลวดเชื่อมเย็นเร็ว ได้แก่ E6010, E6011, E6022, E7010-A1, E7010-G

5.2 ลวดเชื่อมเติมเร็ว (Fast Fill Electrodes)

ลวดเชื่อมเติมเร็วมีส่วนประกอบช่วยให้เติมเนื้อเชื่อมเร็วในความร้อนของอาร์ก ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการเชื่อมความเร็วสูงบนพื้นผิวแนวระดับ โลหะเชื่อมแข็งตัวค่อนข้างจะช้า โดยเหตุนี้ลวดเชื่อมชนิดนี้ไม่เหมาะที่จะเชื่อมในทำนอกท่าเชื่อม (Out of Position) อย่างไรก็ตาม ในท่าเชื่อมลาดลงเล็กน้อยพอรับได้ ปกติรอยต่อส่วนมากของลวดเติมเร็วประกอบด้วยต่อชน ฟิวเล็ท เกย และการเชื่อมมุมในแผ่นหนา 5 มม. หรือหนากว่า รอยต่อเหล่านี้สามารถ

ประกอบบ่อหลอมขนาดใหญ่ของโลหะเชื่อมจนเย็นตัว ให้การหลอมลึกโลหะอาร์กต้น แนวเชื่อมเรียบ ไม่มีเกล็ด และแบนหรือนูนเล็กน้อย เม็ดโลหะกระเด็นน้อย สแลกก่อตัวหนา และสแลกเคาะออกง่าย

5.2.1 การใช้งาน (Application)

- ผลิตแนวเชื่อมบนแผ่นที่มีความหนา 5 มม. หรือมากกว่า

- การเชื่อมท่าราบและท่าระดับ ฟิวเล็ท เกย และต่อชนบากร่อง

- เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางประเภทไวต่อการแตกร้าวพอได้ ถ้าไม่สามารถจัดลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำได้ (การอุ่นงานก่อนเชื่อมอาจต้องการ)

5.2.2 คุณสมบัติ (Characteristic)

- มีผงเหล็ก (Iron Powder) ให้อัตราการเติมเนื้อลวดเชื่อมได้สูง

- เชื่อมได้ใน PA และ PB ฟิวเล็ท

- การหลอมลึกตื้น (Shallow Penetration)

- ผิวหน้าและเกล็ดเชื่อมดีเยี่ยม

- มีเม็ดโลหะกระเด็นน้อย

- ให้สแลกหนา เคาะออกได้ง่าย

ลวดเชื่อมเย็นเร็ว ได้แก่ E7024, E7024-1, E6027, E7020-A1

5.3 ลวดเชื่อมเติมเย็น (Fill Freeze Electrodes)

ลวดเชื่อมเติมเย็นมีส่วนประกอบจัดให้อยู่กึ่งกลางระหว่างลักษณะเด่นของลวดเชื่อมเย็นเร็วและเติมเร็ว และจัดให้อัตราการเติมเนื้อเชื่อมปานกลางและการหลอมลึกปานกลาง โดยเหตุนี้ให้การเชื่อมเร็วแบบกึ่งอาร์ค การสูญเสียเม็ดโลหะกระเด็นน้อย การกัดแหว่งขอบแนวน้อย ให้สแลกบาง ลวดเชื่อมนี้มีลักษณะเด่นโดยเฉพาะที่ทำการเชื่อมโลหะแผ่น (Sheet Metal) ดังนั้นบ่อยครั้งที่ลวดเชื่อมเติมเย็น เรียกกันว่า “ลวดเชื่อมโลหะแผ่น” (Sheet Metal Electrodes) แนวเชื่อมที่ปรากฏของลวดเชื่อมกลุ่มนี้เปลี่ยนจากเรียบและไม่มีเกล็ดไปจนมีเกล็ดที่เด่นชัด ลวดเชื่อมเติมเย็นสามารถใช้ในการเชื่อมทุกท่า แต่ส่วนมากใช้กันในการทำระดับหรือตำแหน่งลาดลง

5.3.1 การใช้งาน (Application)

- เดินแนวฟิวเล็ทและแนวเกย

- แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอหรือแนวเชื่อมสัน ๆ ที่เปลี่ยนทิศทางหรือตำแหน่ง

- การเชื่อมโลหะแผ่นแนวเกยและฟิวเล็ท

- แนวต่อที่ประกอบไม่ดี

- การเชื่อมอเนกประสงค์ในทุกท่าเชื่อม

5.3.2 คุณสมบัติ (Characteristic)

- เชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม นิยมใช้เชื่อมท่า PA
- ให้อัตราการหลอมลวดปานกลาง ให้การหลอมลึกปานกลาง เหมาะกับการเชื่อมโลหะแผ่น (Sheet Metal)
- ผิวหน้าและเกล็ดเชื่อมเรียบสม่ำเสมอถึงเกล็ดหยาบ
- มีสแลกปกคลุมหน้าปานกลาง เคาะออกได้ง่าย

5.4 ลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำ (Low Hydrogen Electrodes)

ลวดเชื่อมธรรมดาอาจไม่เหมาะสมที่ต้องการคุณภาพระดับ X-Ray ที่มีแนวโน้มต่อการแตกร้าว และในการเชื่อมชิ้นงานหนา หรือโลหะชิ้นงานที่มีสารเจือปนสูงกว่าเหล็กกล้าละมุน จึงนิยมเลือกใช้ลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำ

ลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำ จัดหาได้ทั้งลักษณะเติมเร็วหรือเติมเย็น มีส่วนประกอบเพื่อให้การเชื่อมสมบูรณ์ คุณภาพเอ็กซ์เรย์และให้ความเหนียวหีบ (Notch Toughness) ดีเยี่ยม และมีความสามารถดัดงอดีเยี่ยม ลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำยังลดอันตรายของการร้าวในแนว และการร้าวเล็ก ๆ (Micro Cracking) บนชิ้นงานหนา และบนเหล็กกล้าเจือต่ำ ต้องการอุ่นงานก่อนเชื่อมน้อยกว่าลวดเชื่อมชนิดอื่น

ลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำทั้งหมดบรรจุอยู่ในภาชนะที่ผนึกแน่น ซึ่งปกติสามารถเก็บไว้ไม่มีกำหนด โดยปราศจากอันตรายของการดูดซับความชื้น แต่เมื่อใดที่ภาชนะถูกเปิด จะต้องใช้ลวดเชื่อมโดยฉับพลัน หรือเก็บในตู้อบ

รหัส "R" สำหรับลวดเชื่อม เช่น E7018R บ่งชี้ถึงสารพอกหุ้มดูดซับความชื้นน้อย เพื่อคุณภาพสำหรับลวดเชื่อมที่มีรหัส "R" ถ้านำออกจากหีบห่อที่เปิดใหม่ หรือที่เปิดให้กระทบความชื้นสัมพัทธ์ 80% และอุณหภูมิ 21°C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ความชื้นหลังจากการเปิดนี้จะแพร่ซึมมากกว่า 0.4% ของน้ำหนัก

5.4.1 การใช้งาน (Application)

- แนวเชื่อมคุณภาพ X-Ray หรือแนวเชื่อมที่ต้องการสมบัติทางกลสูง
- แนวเชื่อมที่ต้านทานการแตกร้าวในเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางถึงเหล็กกล้าคาร์บอนสูง แนวเชื่อมที่ต้องการการต้านทานการแตกร้าวในเหล็กกล้าเชื่อมที่ต้องการการต้านทานการแตกร้าวในเหล็กกล้าฟอสฟอรัส

และแนวเชื่อมที่เกิดรูพรุนน้อยที่สุดในเหล็กกล้าซัลเฟอร์ (Sulphur steel)

- แนวเชื่อมในชิ้นงานหนาหรือในรอยต่อที่จำกัดในเหล็กกล้าละมุนและเหล็กกล้าเจือ ความเค้นจากการหดตัวอาจส่งผลให้เกิดแนวเชื่อมแตกร้าว

- แนวเชื่อมเหล็กกล้าเจือต้องการความแข็งแรง 70,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว หรือมากกว่า

- แนวเชื่อมทำดัดและทำเหวี่ยงในเหล็กกล้าละมุนสามารถเชื่อมได้หลายเที่ยวเชื่อม

5.4.2 คุณสมบัติ (Characteristic)

- เหมาะกับการเชื่อมกับเหล็กกล้าซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัสสูงและเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางถึงสูง ช่วยยับยั้งการเกิดรูพรุน และแตกร้าวได้แนวเชื่อม

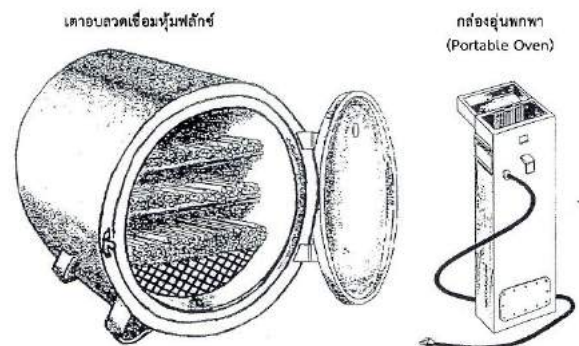
- ใช้ได้ดีเช่นเดียวกับลวดเชื่อมเติมเร็ว (Fast Fill Electrode) และลวดเชื่อมเติมเย็น (Fill Freeze Electrode)

- ให้คุณภาพระดับ X-Ray และสามารถให้ความเหนียวหีบ (Toughness) และความเหนียว (Ductility)

ลวดเชื่อมไฮโดรเจนต่ำ ได้แก่ E7016, E7018, E7018-1, E7028

6. การจัดเก็บรักษาลวดเชื่อม

ผู้ปฏิบัติงานเชื่อมควรปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิต ควรเก็บลวดเชื่อมไว้ในที่แห้ง ไม่ควรเก็บไว้ในที่เปียกชื้น ก่อนใช้ควรนำมาอบแห้งด้วยอุณหภูมิที่ผู้ผลิตกำหนด (ตารางที่ 5) หรือในอุณหภูมิ 250°F (120°C) การเก็บต้องแบ่งกลุ่มลวด เช่น แบ่งตามชนิดของลวดเชื่อม ไม่ควรเก็บรวมกัน และทำเครื่องหมายเป็นพวก ๆ ไว้



รูปที่ 8 เตาอบร้อน (250°C – 350°C) และกล่องอุ่น (100°C – 150°C)

ตารางที่ 5 อุณหภูมิในการเก็บรักษาลวดเชื่อม

ชนิดลวดเชื่อม AWSA 5.1	ห้องเก็บปรับอากาศก่อนเปิดกล่อง RH ความชื้น (Relative Humidity)	อบแห้งในเตา หลังจากเปิดกล่อง °C	เวลาและอุณหภูมิการอบไล่ความชื้นมีผลต่อคุณภาพ ของการเชื่อม	
			ชั้นแรก	ชั้นที่ 2
ผงเหล็กไฮโดรเจนต่ำ E XX 18 E XX 28 ฟลักซ์ประเภทไฮโดรเจน E XX 15 E XX 16	32°C (90°F ± 20°) ความชื้น (RH) 50% สูงสุด	150°C (300°F ± 50°F)	260° - 315°C (500° - 600°F) 1 ชั่วโมง	370°C (700°F ± 50°) 1.5 ชั่วโมง
แรงดึงต่ำ แรงดึงสูง E XX 15 E XX 16	32°C (90°F ± 20°) ความชื้น (RH) 50% สูงสุด	120° - 230°C (250° - 450°F)	260° - 315°C (500° - 600°F) 1 ชั่วโมง	340°C (650°F ± 50°) 1.5 ชั่วโมง
			1 – 1.5 ชั่วโมง	

7. เสนอแนะการเลือกใช้ลวดเชื่อมมีสารฟอกหุ้ม

(Guide to Common filler metal selection)

การเลือกใช้ลวดเชื่อมมีสารฟอกหุ้มโดยทั่วไปสำหรับกระบวนการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าเจือที่นิยมใช้กันส่วนใหญ่ซึ่งแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การเลือกใช้ลวดเชื่อมมีสารฟอกหุ้มโดยทั่วไปสำหรับกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (MMAW) กับโลหะฐานที่เป็นกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าเจือต่ำ

Base Material	Carbon Steel	Carbon-Molybdenum	1&1/4Cr-1/2 Mo Steel	2 1/4Cr-1 Mo Steel	5Cr-1/2 Mo Steel	9Cr-1 Mo Steel	2 1/4 Nickel Steel	3 1/2 Nickel Steel	9% Nickel Steel
Carbon Steel	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AJ	AK	*
Carbon-Molybdenum Steel		C	CD	CE	CF	CH	*	*	*
1&1/4Cr-1/2 Mo Steel			D	DE	DF	DH	*	*	*
2 1/4Cr-1 Mo Steel				E	EF	EH	*	*	*
5Cr-1/2 Mo Steel					F	FH	*	*	*
9Cr-1 Mo Steel						H	*	*	*
2 1/4 Nickel Steel							J	JK	LM
3 1/2 Nickel Steel								K	LM
9% Nickel Steel									LM

คำอธิบาย (Legend)

A – AWS A5.1 Classification E 70XX Low hydrogen⁵B – AWS A5.1 Classification E 6010 for root pass⁵

C – AWS A5.5 Classification E 70XX-A1 Low hydrogen

D – AWS A5.5 Classification E 70XX-B2L or E 80XX-B2 Low hydrogen

E – AWS A5.5 Classification E 80XX-B6 or E 90XX-B3 Low hydrogen

F – AWS A5.5 Classification E 80XX-B6 or E 80XX-B6L Low hydrogen

G – AWS A5.5 Classification E 80XX-B7 or E 80XX-B7L Low hydrogen

H – AWS A5.5 Classification E 80XX-B8 or E 80XX-B8L Low hydrogen

I – AWS A5.5 Classification E 80XX-C1 or E 80XX-C1L Low hydrogen

K – AWS A5.5 Classification E 80XX-C2 or E 80XX-C2L Low hydrogen

L – AWS A5.11 Classification ENiCrMo-3

M – AWS A5.11 Classification ENiCrMo-6

* An unlikely or unsuitable combination. Consult the purchaser if this combination is needed.

หมายเหตุ (Note):

- ตารางนี้ไม่ครอบคลุมโลหะเจือโครเมียมโมลิบดีนัม (Cr-Mo Alloy)

- ⁵ดู API RP 582 Section 6.1.3

8. บทสรุป

สถานประกอบการ หรืออุตสาหกรรมที่มีการผลิต การซ่อมบำรุงชิ้นส่วนที่เป็นโลหะจึงจำเป็นต้องมีงานเชื่อม เข้ามาใช้ ซึ่งในปัจจุบันภายในประเทศยังนิยมใช้ กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (Manual Metal Arc Welding) และต้องใช้ลวดเชื่อมมีสารพอกหุ้มเป็นหลัก จุดสำคัญก็คือประวัติและความเป็นมาของกระบวนการ เชื่อมนี้และโยงไปถึงลวดเชื่อมที่มีสารพอกหุ้มก็สามารถที่จะ ตั้งคำถามได้ว่า สารพอกหุ้ม (Flux) มีหน้าที่และมีความสำคัญอย่างไร มีกี่ชนิด มีสารอะไรบ้างที่มาผสมกัน และให้คุณสมบัติที่แตกต่างกันอย่างไรการผลิตลวดเชื่อม หุ้มฟลักซ์ทำอย่างไรก็ได้ถูกนำเสนอไว้ ผู้เขียนหวังว่า บทความนี้จะประโยชน์กับผู้อ่านและผู้ปฏิบัติงานเชื่อม จึงได้นำเสนอเนื้อหาเรื่องนี้เพื่อเป็นความรู้และเพื่อให้ ผู้ปฏิบัติงานสามารถเลือกใช้ได้อย่างถูกต้อง หากท่านมีข้อ สงสัยหรือมีข้อเสนอแนะ โปรดติดต่อได้ที่



Asst. Prof. Yukol Julupai received Bsc. Ed. Ind. In Mechanical Engineering from King Monkut's Institute of Technology North Bangkok (KMITNB)., Bangkok, Thailand in 1974.

He has got Welding Engineer, SLV Mannheim Diploma from Germany in 1978. He was a Teacher since 1976 at King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok (KMITNB). He was a President of Thai Welding Society during 2001-2007.

9. เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- [1] Dr. Günter-Henle-Str. 8. (2012, January25). EWM Welding Dictionary (version 1) [Online]. Available: <https://www.ewm-group.com/en/component/rokdwnloads/downloads/english/brochures-handouts-and-manuals/1371-ewm-welding-dictionary.html>.
- [2] ลวดเชื่อมไฟฟ้ามีสารพอกหุ้มใช้เชื่อมเหล็กกล้าไม่เจือและเกรนละเอียดด้วยการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.), กรุงเทพฯ, 2556.
- [3] The Processes Handbook of Arc Welding. 2nd ed., The Lincoln Electric Co., Ohio, USA, 2012.
- [4] Guide to Welding Deutcher verlag für Scheißen, Germany
- [5] เอกสารประกอบการฝึก International Fillel welder ศูนย์ฝึกอบรมงานเชื่อมมาตรฐานสากล สถาบันพัฒนาฝีมือแรงงานภาค 1 สมุทรปราการ กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน กระทรวงแรงงาน.

กระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์กับอุตสาหกรรมต่อเรือ

Submerged arc welding process and ship building industry

ธนวัฒน์ ศิริสถียร (Tanawat Sirisatien)^{1*}, วิทยา รัตนสุภา (Vithaya Rattanasupa)², กิตติชัย โสจิพันธ์ (Kittichai Sojiphan)¹

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเชื่อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² บริษัท อิตัลไทยมา린 จำกัด

(tanawat.sirisatien@gmail.com)^{*}, (vaitm@hotmail.com), (kittichai.s@cit.kmutnb.ac.th)

บทคัดย่อ

กระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์เป็นวิธีการเชื่อมที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่อเรือ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมประกอบตัวเรือ อันเนื่องมาจากความสะดวกรวดเร็วในการเชื่อมและความสม่ำเสมอทางกายภาพของแนวเชื่อม บทความนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ที่พบเจอได้บ่อยในงานประกอบตัวเรือโดยเฉพาะปัญหาที่เกิดจากการบิดตัวของชิ้นงานที่เกิดจากการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ และข้อกำหนดต่าง ๆ ของสถาบันจัดชั้นเรือสากลที่เกี่ยวข้องกับการบิดตัวของชิ้นงานในการประกอบตัวเรือ

คำสำคัญ: กระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์, อุตสาหกรรมต่อเรือ, ตัวเรือ, การบิดตัว

Abstract

Submerged arc welding process has been used widely in shipbuilding industry especially in hull welding and fabrication process. Advantages of submerged arc welding process include its high productivity rate and its ability to produce uniform and consistent weld profiles. This article explains the theory of submerged arc welding process and common problem regarding the hull distortion produced by submerged arc welding process. Furthermore, the requirement of International association classification society (IACS) as related distortion in hull fabrication is discussed.

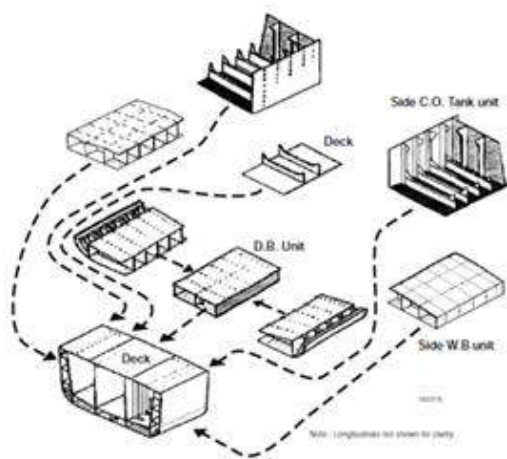
Keyword: Submerged arc welding process, Ship building industry, Hull, Distortion

1. บทนำ

กระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding Process, SAW) เป็นกระบวนการเชื่อมที่นิยมใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่อเรือเพราะสามารถเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนาและความยาวต่อเนื่องโดยไม่ต้องเปลี่ยนลวดเชื่อมบ่อย ๆ นอกจากนี้ยังมีการหลอมลึกที่ดี อัตราการหลอมละลายสูง แนวเชื่อมมีความสมบูรณ์สม่ำเสมอ ไม่มีการกระเด็นของเม็ดโลหะ (Spatter) อันเนื่องมาจากการปกคลุมแนวเชื่อมที่เกิดจากผงฟลักซ์ ลวดเชื่อมที่ใช้มีขนาดใหญ่ และควบคุมการเชื่อมโดยระบบอัตโนมัติ และเชื่อมได้เฉพาะท่าราบ การนำกระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ไปใช้ในงานต่อเรือ จะใช้ในการเชื่อมประกอบแผ่นฝากระโปรง (Bulkhead) แผ่นเปลือกเรือ (Shell Plate) และแท่นฐานของเครื่องจักร (Machinery Foundation) ต่าง ๆ ภายในเรือ ปัญหาที่พบเจอได้บ่อยในกระบวนการเชื่อมคือการบิดงอของชิ้นงาน (Distortion) ซึ่งมีสาเหตุมาจากหลาย ๆ องค์ประกอบ ไม่ว่าจะเป็นปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม (Heat Input) การกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดจากการเชื่อม (Temperature Distribution) รูปร่างของรอยบากชิ้นงาน (Groove Shape) และคุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties) ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ นี้จะทำให้เกิดความเค้น (Stress) ในแนวเชื่อมซึ่งถ้าเมื่อใดที่ความเค้นมีมากจนเกินจุดคราก (Yield Point) ของวัสดุก็จะทำให้เกิดการบิดงออย่างถาวร (Plastics Deformation) และจะเกิดความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ในแนวเชื่อมตามมา ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมในระหว่างการต่อเรือเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะความเค้นตกค้างเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการแตกหัก และทำให้เพิ่มการโก่งเดาะ (Buckling Strength) ของชิ้นส่วนโครงสร้างตัวเรือ ซึ่งจะทำให้เรือมีความคงทนทะเลที่ลดลง

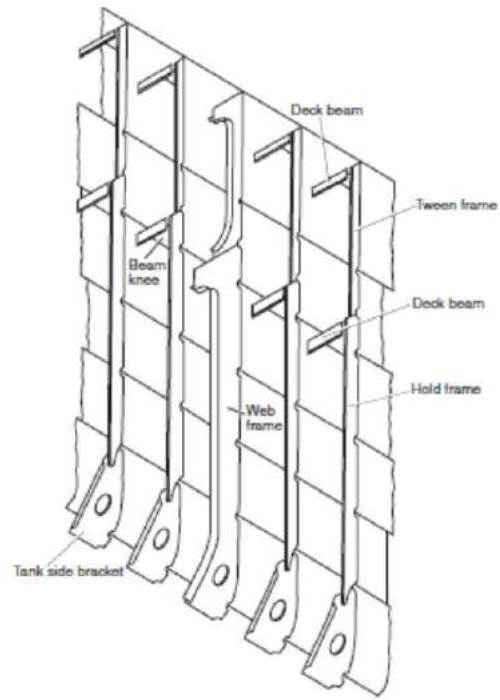
2. การประกอบตัวเรือ

การประกอบตัวเรือจะเริ่มจากการเตรียมส่วนชิ้นงานที่จะประกอบกันเป็นบล็อก (Block) ซึ่งจะประกอบไปด้วยการประกอบและเชื่อมต่อ Panel ต่าง ๆ เช่น ฝาผนังผนึกน้ำ (Watertight Bulkhead) ฝาผนังต่าง ๆ ที่อยู่ในส่วนที่พักอาศัยของเรือ (Accommodation Deck) เป็นต้น ในปัจจุบันการประกอบตัวเรือโดยใช้วิธีการประกอบแบบบล็อก (Block) เป็นวิธีการประกอบตัวเรือที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน อันเนื่องจากมีความรวดเร็ว ลดเวลาในการประกอบตัวเรือ สามารถพลิกหรือเคลื่อนย้ายได้สะดวกและสามารถประกอบได้ในโรงงานประกอบตัวเรือ ง่ายต่อการเข้าไปทำงาน และนอกจากนี้ยังสามารถติดตั้งท่อ (Piping) และอุปกรณ์อื่น ๆ (Outfitting) รวมทั้งงานทำสีบล็อก [1] ซึ่งวิธีการประกอบบล็อกจะเริ่มจากการตัดเตรียมส่วนชิ้นงาน (Part Preparation) ให้ได้ตามรูปร่างที่ปรากฏในแบบต่อเรือจริง หลังจากนั้นนำชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ได้จากการตัดนำไปประกอบเป็นบล็อก (รูปที่ 1) ขั้นตอนนี้จะทำการเชื่อมประสานชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ทางผู้ต่อเรือ (Shipyard) จะต้องทำการควบคุมการเยื้องศูนย์ (Misalignment) ของชิ้นงานที่ประกอบเข้าด้วยกันให้ได้ตามเกณฑ์การยอมรับตามมาตรฐานหรือข้อกำหนดของการต่อเรือ



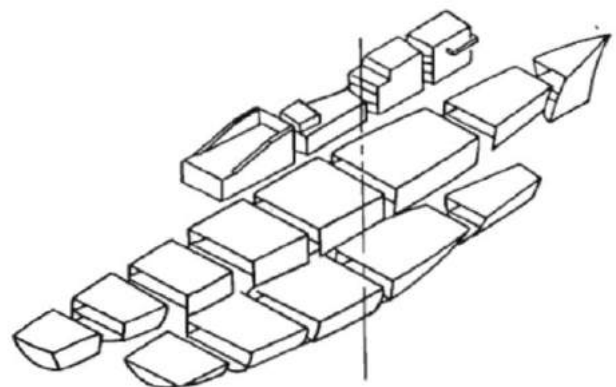
รูปที่ 1 ขั้นตอนการประกอบบล็อก (Block) ของเรือบรรทุกน้ำมัน [1]

สำหรับขั้นตอนในการเชื่อมประสานตัวเรือที่มีลักษณะโค้ง (Curved) โดยทั่วไปแล้วจะเริ่มการเชื่อมประสานจากวงเรือ (Frame) เข้ากับแผ่นเปลือกเรือ (Shell Plate) หลังจากนั้นทำการเชื่อมประสานส่วนล่างสุดของวงเรือ (รูปที่ 2) ขนาดใหญ่ (Web frame) เข้ากับแผ่นเปลือกเรือ ไปยังตำแหน่งบนสุด [2]



รูปที่ 2 โครงสร้างของวงเรือ (Frame) และวงเรือขนาดใหญ่ (Web Frame) เมื่อประกอบเข้ากับแผ่นเปลือกเรือ (Shell Plate) [3]

เมื่อบล็อกต่าง ๆ ได้ประกอบและเชื่อมประสานชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ และรวมไปถึงการติดตั้งท่อ และอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ ครบสมบูรณ์แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการประกอบตัวเรือ (Erection) ขั้นตอนนี้ต้องนำบล็อกต่าง ๆ มาประกอบและเรียงต่อกันเป็นลำเรือ ซึ่งขั้นตอนนี้จะอาศัยการเชื่อมประสานตรงบริเวณรอยต่อของแต่ละบล็อก และจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการควบคุมการเยื้องศูนย์ให้อยู่ในเกณฑ์การยอมรับของการประกอบตัวเรือ ซึ่งขั้นตอนในการประกอบตัวเรือได้แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การประกอบบล็อก (Block) ต่าง ๆ ของเรือที่พร้อมจะประกอบกันเป็นตัวเรือ (Hull) [2]

3. แผ่นเหล็กสำหรับต่อเรือ

แผ่นเหล็กสำหรับต่อเรือที่ใช้กันในปัจจุบันมีปริมาณเปอร์เซ็นต์คาร์บอน (Carbon Content) ตั้งแต่ 0.15 จนถึง 0.23 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน และมีปริมาณธาตุมลทิน (Impurity) ในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำกว่า 0.05 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถ้าหากมีปริมาณธาตุมลทินที่สูงจะทำให้เกิดความเสียหายต่อการเชื่อม นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการเกิดรอยร้าว (Crack) ในระหว่างกระบวนการรีดเหล็กอีกด้วย

ในปัจจุบันสถาบันจัดชั้นเรือสากล (International Association Classification Society, IACS) ได้มีการแบ่งค่าความแข็งแรงของแผ่นเหล็กต่อเรือออกเป็น 2 ค่าความแข็งแรงคือ ค่าความแข็งแรงแบบปกติ (Normal Strength Steel) และ ค่าความแข็งแรงแบบสูง (Higher Strength Steel) สำหรับแผ่นเหล็กต่อเรือที่มีค่าความแข็งแรงแบบปกติ (Normal Strength Steel) จะมีค่าความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength) ไม่ต่ำกว่า 235 N/mm² และมีการแบ่งเกรดออกเป็นทั้ง 4 เกรดคือ เกรด A, B, D และ E ซึ่งแต่ละชนิดจะมีค่าพลังงานการกระแทก (Impact Energy) ที่แตกต่างกันออกไปซึ่งได้แสดงตามตารางที่ 1 สำหรับแผ่นเหล็กต่อเรือที่มีค่าความแข็งแรงชนิดสูง สถาบันจัดชั้นเรือสากล ได้แบ่งค่าความแข็งแรงที่จุดคราก ออกเป็น 3 ค่าความแข็งแรงคือ 315, 355 และ 390 N/mm² ซึ่งการจำแนกคุณสมบัติทางกล, เกรดและค่าพลังงานการกระแทก ของแผ่นเหล็กต่อเรือนี้สามารถดูได้จากตารางที่ 2

นอกจากนี้ข้อกำหนดของสถาบันจัดชั้นเรือสากล ได้กำหนดค่าต่าง ๆ ขององค์ประกอบทางเคมีและการกำจัดออกซิเจนออกจากเหล็ก (Deoxidation) ที่เกี่ยวกับของแผ่นเหล็กต่อเรือทั้ง 2 ชนิดคือ ชนิดค่าความแข็งแรงแบบปกติ และ ชนิดค่าความแข็งแรงแบบสูง ไว้ดังปรากฏในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กต่อเรือชนิดค่าความแข็งแรงแบบปกติ (Normal Strength Steel) [4]

Grade	Minimum Yield Strength (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Test Temp °C	Minimum Average Impact Energy (J) t ≤ 50 mm Long	Minimum Average Impact Energy (J) 50 mm ≤ t ≤ 70 mm Long	Minimum Average Impact Energy (J) 70 mm ≤ t ≤ 100 mm Long
A	235	400/520	22	20	NA	34	41
B				0	27	34	41
D				-20	27	34	41
E				-40	27	34	41

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกลของแผ่นเหล็กต่อเรือชนิดค่าความแข็งแรงแบบสูง (Higher Strength Steel) [4]

Grade	Minimum Yield Strength (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Test Temp °C	Minimum Average Impact Energy (J) t ≤ 50 mm Long	Minimum Average Impact Energy (J) 50 mm ≤ t ≤ 70 mm Long	Minimum Average Impact Energy (J) 70 mm ≤ t ≤ 100 mm Long
A32	315	400/520	22	0	31	38	46
D32				-20	31	38	46
E32				-40	31	38	46
F32				-60	31	38	46
A36	355	400/520	21	0	34	41	50
D36				-20	34	41	50
E36				-40	34	41	50
F36				-60	34	41	50
A40	390	400/520	20	0	39	46	55
D40				-20	39	46	55
E40				-40	39	46	55
F40				-60	39	46	55

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีและการกำจัดออกซิเจนออกจากเหล็ก (Deoxidation) ของแผ่นเหล็กต่อเรือชนิดค่าความแข็งแรงแบบปกติ (Normal Strength Steel) [4]

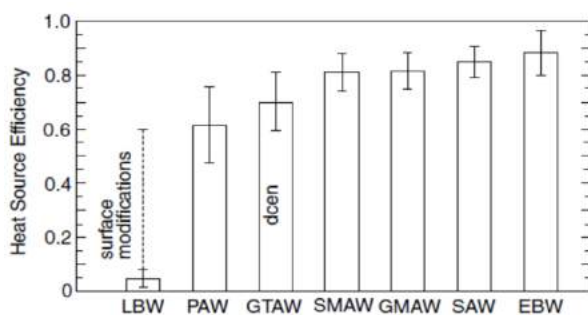
Grade	A	B	D	E
Deoxidation Practice	For t ≤ 50 mm Any method except rimmed steel	For t ≤ 50 mm Any method except rimmed steel	For t ≤ 25 mm Killed	Killed and fine grain treated
	For t > 50 mm Killed	For t > 50 mm Killed	For t > 50 mm Killed and fine grain treated	
Chemical Composition % (C plus 1/6 Mn not to exceed 0.40%)				
C max.	0.21	0.21	0.21	0.18
Mn min.	2.5%C	0.8	0.6	0.7
Si max.	0.5	0.35	0.35	0.35
P max.	0.035	0.035	0.035	0.035
S max.	0.035	0.035	0.035	0.035
Al (acid soluble min)	-	-	0.015	0.015

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีและการกำจัดออกซิเจนออกจากเหล็ก (Deoxidation) ของแผ่นเหล็กต่อเรือชนิดค่าความแข็งแรงแบบสูง (High strength steel) [4]

Grade	A32	D32	E32	F32
	A36	D36	E36	F36
	A40	D40	E40	F40
Deoxidation Practice	Killed and fine grain treated			
Chemical Composition % (C plus 1/6 Mn not to exceed 0.40%)				
C max.	0.18		0.16	
Mn	0.90-1.60		0.90-1.60	
Si max.	0.5		0.5	
P max.	0.035		0.025	
S max.	0.035		0.025	
Al (acid soluble min)	0.015		0.015	
Nb	0.02-0.05		0.02-0.05	
V	0.05-0.10		0.05-0.10	
Ti max.	0.02		0.02	
Cu max.	0.35		0.35	
Cr max.	0.2		0.2	
Ni max.	0.4		0.8	
Mo max.	0.08		0.08	
N max.	-		0.009 (0.012 if Al is presented)	

4. การเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding)

ในปัจจุบันการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์เป็นกระบวนการเชื่อมที่ใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรม ซึ่งกรรมวิธีการเชื่อมแบบนี้จะใช้ผงฟลักซ์ปกคลุมบ่อหลอมเหลวของแนวเชื่อม ซึ่งเมื่อผงฟลักซ์หลอมละลายจะไปทำปฏิกิริยากับเนื้อโลหะที่หลอมเหลวระหว่างการเชื่อม ทำให้อากาศไม่สามารถเข้าไปยังแนวเชื่อม นอกจากนี้ผงฟลักซ์ที่ปกคลุมแนวเชื่อมยังสามารถช่วยลดการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมได้อีกด้วย ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ประสิทธิภาพของแหล่งความร้อน (Heat Source Efficiency) ของการเชื่อมใต้ฟลักซ์มีค่าที่ค่อนข้างสูง ดังแสดงในรูปที่ 3

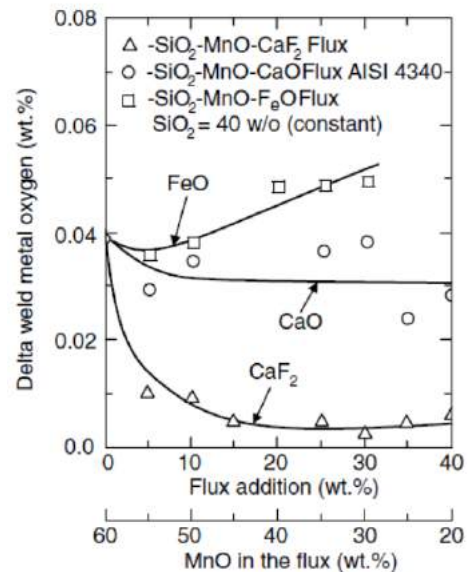


รูปที่ 3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแหล่งความร้อนของกระบวนการเชื่อมแบบต่าง ๆ [5]

4.1 อิทธิพลของฟลักซ์ที่มีผลกระทบต่อเนื้อโลหะของแนวเชื่อม (Weld Metal)

Sindo Kou [5] ได้ศึกษาผลกระทบของฟลักซ์ที่มีต่อองค์ประกอบของแนวเชื่อม โดยทำการเชื่อมโลหะชนิด AISI 4304 ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ โดยใช้ฟลักซ์ชนิด Manganese Silicate ซึ่งมี SiO_2 คงที่ที่ 40 wt% และได้เพิ่มธาตุ CaF_2 , CaO และ FeO โดยแยก MnO ออกจากส่วนผสมของ Manganese Silicate พบว่าธาตุ FeO ที่เพิ่มเข้าไปนั้นจะทำให้ปริมาณ Oxygen ถ่างเตไปเนื้อโลหะของแนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากความเสถียรของ FeO ที่น้อยกว่า MnO เป็นผลให้ FeO เกิดการสลายและผลิต Oxygen ขึ้นมาในระหว่างการอาร์ก นอกจากนี้ธาตุ CaO ที่เพิ่มเข้าไปพบว่ามีค่าความเสถียรที่มากกว่า MnO ทำให้ลดปริมาณการถ่างเต Oxygen ไปยังเนื้อโลหะของแนวเชื่อม สำหรับอิทธิพลของธาตุ CaF_2 ที่เพิ่มเข้าไปพบว่ามีผลลดปริมาณการถ่างเต Oxygen ไปยังเนื้อโลหะของแนวเชื่อม เช่นเดียวกับ CaO แต่มีปริมาณที่การลดลงของ Oxygen ที่มากกว่า ซึ่งผลกระทบของธาตุประกอบของฟลักซ์แต่ละชนิดที่มีต่อเนื้อโลหะของแนวเชื่อม ได้แสดงในรูปที่ 4 นอกจากนี้ผงฟลักซ์ที่มีสาร CaF_2 และ CaO ผสมอยู่

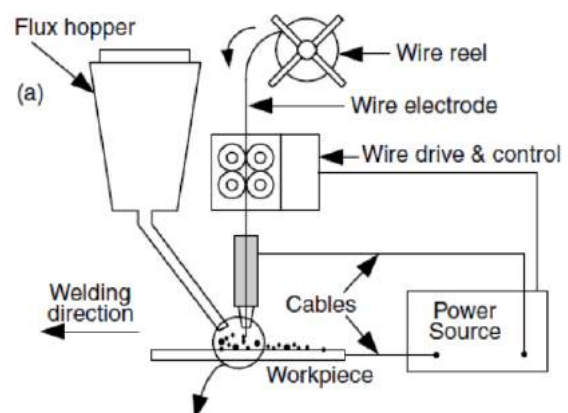
เป็นหลัก จะเป็นผงฟลักซ์ชนิดต่าง (Basic-B) จะดูจากความชื้นไว้สูง จึงควรทำการอบร้อนที่อุณหภูมิ 350 °C อย่างน้อย 1 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปใช้งาน



รูปที่ 4 อิทธิพลของธาตุผสมต่าง ๆ ใน Manganese Silicate ที่มีผลกระทบต่อปริมาณ Oxygen ในเนื้อโลหะของแนวเชื่อม สำหรับกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ [5]

4.2 ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์สำหรับกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์

ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดพลังงาน (Power Source), หัวเชื่อม (Weld Head) และอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ (Accessories) ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ [5]

4.2.1 แหล่งกำเนิดพลังงาน (Power Source) ในกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์สามารถเลือกใช้แหล่งกำเนิดพลังงานได้ทั้งชนิด CC (Constant Current) และ CV (Constant Voltage) ในบางครั้งแหล่งกำเนิดพลังงานของกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์สามารถมีได้ทั้งสองชนิด สำหรับชนิดของขั้วกระแสไฟฟ้า (Polarity) ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์มีดังต่อไปนี้คือ AC, DCEP และ DCEN ซึ่งกระแสไฟฟ้าทั้งสามชนิดมีแหล่งจ่ายไฟที่ต่างกัน กระแสไฟฟ้า AC ได้มาจากแหล่งจ่ายไฟแบบ Transformer สำหรับแหล่งจ่ายไฟแบบ DCEP และ DCEN ได้มาจากแหล่งจ่ายไฟแบบ Transformer- rectifier

Ali Moarrefzadeh [6] ได้เปรียบเทียบความแตกต่างของขั้วกระแสไฟฟ้า (Polarity) แต่ละชนิดสำหรับกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ กระแสไฟฟ้าชนิด DCEP เป็นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดต่อการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ อีกทั้งยังง่ายต่อการควบคุมการอาร์ก ที่ดีกว่าขั้วกระแสไฟชนิดอื่น ๆ สำหรับขั้วกระแสไฟชนิด DCEN จะให้ผลของ Deposition Rate ที่สูง แต่จะไปลดคุณสมบัติการหลอมละลาย ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ขั้วกระแสไฟชนิด DCEN เหมาะกับการเชื่อมแบบพอกผิว (Surfacing) และขั้วกระแสไฟแบบ AC อาจมีการนำไปใช้งานบ้างแต่การควบคุมการอาร์กยังดีไม่เท่ากับขั้วกระแสไฟฟ้าชนิด DCEP

4.2.2 ชุดหัวเชื่อม (Weld Head) เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบขึ้นจากตัวป้อนลวด (Wire Feed), หัวเชื่อม (Torch) และ ท่อนำกระแส (Contact Tip), และท่อสำหรับส่งฟลักซ์ (Flux Nozzle) หน้าที่หลักของหัวเชื่อม คือ นำลวดเชื่อม (Guide Direction) และฟลักซ์มีท่อส่งฟลักซ์ไปยังชิ้นงาน นอกจากนี้ ชุดหัวเชื่อมยังมีหน้าที่คอยยึดท่อนำกระแส เพื่อให้กระแสส่งถ่ายเข้าสู่ลวดอิเล็กโทรดเมื่อเกิดการอาร์กกับชิ้นงานก็จะเกิดการหลอมละลายขึ้นในระหว่างการเชื่อม [6]

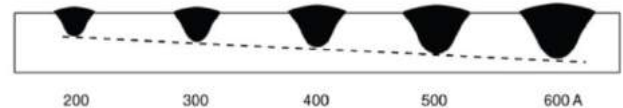
4.2.3 อุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ (Accessories) ได้แก่ อุปกรณ์ขับเคลื่อน (Travel Equipment) และหน่วยคืนสภาพฟลักซ์ (Flux Recovery Units)

4.3 ตัวแปรและผลกระทบสำหรับการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์

Mandal [7] ได้เสนอผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ สำหรับกระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ที่ส่งผลต่อลักษณะรูปร่างของแนวเชื่อมซึ่งประกอบด้วย ปริมาณกระแสไฟฟ้า (Current), ค่าแรงดัน (Volt), ความเร็วในการเชื่อม (Travel

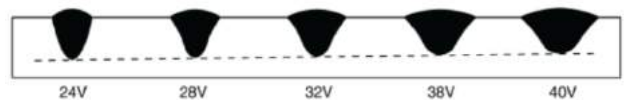
Speed) และส่วนยื่นอิเล็กโทรด (Electrode Extension) ซึ่งแต่ละตัวแปรให้ผลทางกายภาพของแนวเชื่อมที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดของแต่ละตัวแปรได้ดังต่อไปนี้

4.3.1 ปริมาณกระแสไฟฟ้า (Current) เป็นตัวควบคุมอัตราการหลอมละลาย (Melting Rate) นอกจากนี้การหลอมลึกของการเชื่อมก็มีผลกระทบมาจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมอีกด้วย



รูปที่ 6 อิทธิพลของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่อการหลอมลึกของแนวเชื่อม [8]

4.3.2 ปริมาณค่าแรงดันเชื่อม (Welding Voltage) ส่งผลกระทบบนโดยตรงต่อรูปร่างของบริเวณหลอมละลายของแนวเชื่อม (Fusion Zone) และความกว้างของแนวเชื่อม (Bead Width) แต่มีผลกระทบต่อการหลอมลึกน้อยมากเมื่อเทียบกับผลกระทบจากกระแสไฟฟ้า (Current)



รูปที่ 7 อิทธิพลของปริมาณแรงดันเชื่อมที่มีผลกระทบต่อการรูปร่างของแนวเชื่อม [8]

4.3.3 ความเร็วในการเชื่อม (Travel Speed) มีผลกระทบต่อนิยามของรูปร่างและการหลอมลึกของแนวเชื่อม ถ้าหากทำการเชื่อมโดยใช้ความเร็วที่สูง จะทำให้ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม (Heat Input) ต่อกันหน่วยมีปริมาณที่ลดลง, รูปร่างของแนวเชื่อม (Weld Bead) มีขนาดเล็ก, เกิดความไม่สมบูรณ์ของแนวเชื่อม เช่น เกิดรอยแห้วขอบแนว (Undercut) และถ้าหากใช้ความเร็วในการเชื่อมที่ต่ำลง จะทำให้ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะช่วยเพิ่มการหลอมลึกของแนวเชื่อม และเพิ่มความหนาของแนวเชื่อม (Reinforcement)

4.3.4 ส่วนยื่นอิเล็กโทรด (Electrode Extension) หรือ ระยะจากปลายลวดที่ยื่นถึงปลายท่อนำกระแส [9] ช่วยเพิ่มอัตราการหลอมละลาย อันเนื่องมาจากความต้านทาน ก็จะเกิดความร้อนขึ้นที่อิเล็กโทรด (Electrode) ระหว่างท่อนำกระแส กับตำแหน่งการอาร์ก ดังนั้น อัตราการหลอมละลาย จะเพิ่มขึ้น 25% - 50% โดยประมาณเมื่อใช้ระยะ

ส่วนยื่นของอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งไม่มีผลกระทบใด ๆ ต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม

5. ปัญหาในงานเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ สำหรับการประกอบตัวเรือ

ปัญหาหลักที่พบเจอได้บ่อยของการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ในงานประกอบตัวเรือคือการบิดตัวของชิ้นงาน ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากค่าความเค้นอันเนื่องมาจากความร้อน (Thermal Stress) ที่เกิดจากการขยายตัว (Expansion) และการหดตัว (Contraction) ของแนวเชื่อม ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมจะส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation) ผลกระทบดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดการบิดตัวเชิงมุม (Angular Distortion) และการหดตัว (Shrinkage) ในแนวตามขวางและทิศทางเดียวกับแนวเชื่อม [10]



รูปที่ 8 ตาดฟ้าเรือ (Deck plating) ที่เกิดการบิดตัวภายใต้กระบวนการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์

ตารางที่ 5 เกณฑ์การยอมรับการบิดตัว (Distortion) จำแนกตามพื้นที่และส่วนต่าง ๆ ของเรือ [11]

Item		Standard	Limit
Shell plate	Parallel part (side & bottom shell)	4 mm	8 mm
	Fore and aft part	5 mm	
Tank top plate		4 mm	
Bulkhead	Long. Bulkhead	6 mm	8 mm
	Trans. Bulkhead		
	Swash Bulkhead		
Strength deck	Parallel part	4 mm	8 mm
	Fore and aft part	6 mm	9 mm
	Covered part	7 mm	9 mm
Second deck	Bare part	6 mm	8 mm
	Covered part	7 mm	9 mm
Forecastle deck	Bare part	4 mm	8 mm
Poop deck	Covered part	6 mm	9 mm
Super structure deck	Bare part	4 mm	6 mm
	Covered part	7 mm	9 mm
House wall	Outside wall	4 mm	6 mm
	Inside wall	6 mm	8 mm
	Covered part	7 mm	9 mm
Interior member (web of girder, etc.)		5 mm	7 mm
Floor and girder in double bottom		5 mm	8 mm

สถาบันจัดชั้นเรือสากล (International Association Classification Society, IACS) ได้กำหนดเกณฑ์การยอมรับในกรณีที่ชิ้นส่วนมีการบิดตัวซึ่งได้แบ่งตามพื้นที่และส่วนต่าง ๆ ของเรือ ซึ่งได้จำแนกออกเป็นรายละเอียดดังปรากฏในตารางที่ 5

6. บทสรุป

บทความนี้ได้กล่าวถึงกระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ในอุตสาหกรรมต่อเรือ การประกอบตัวเรือ แผ่นเหล็กสำหรับต่อเรือ และปัญหาที่พบในงานเชื่อมในอุตสาหกรรมต่อเรือ ซึ่งพบว่าปัญหาส่วนใหญ่ที่พบในการประกอบโครงสร้าง คือการบิดตัวของชิ้นงาน ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการเลือกใช้ และควบคุมตัวแปรในการเชื่อมที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณกระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม และระยะส่วนยื่นอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อควบคุมปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม รวมถึงขนาดของแนวเชื่อมให้ผ่านตามเกณฑ์การยอมรับของสถาบันจัดชั้นเรือสากลต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. S. J. Cooper, "Surveying Hull New Construction: A General Overview," LR Technical Association, Paper No.7, 1998-1999.
- [2] Harold G. Acker, Francis G. Bartlett, "Ship Construction," Ship Design and Construction, 1980.
- [3] D J Eyres, "Ship Construction," Fifth Edition, 2001.
- [4] International Association of Classification Society, "Material and Welding," W11 Normal and Higher Strength Hull Structure Steel, Rev.8, Apr 2014.
- [5] Sindo Kou, "Welding Metallurgy," Second Edition, 2002.
- [6] Ali Moarrefzadeh, "Numerical Simulation of Copper Temperature Field in Submerged Arc Welding (SAW) Process," International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering, Vol. 2, No. 2, May 2011.
- [7] N R Mandal, "Welding and Distortion Control," 2004.

- [8] P. T. Houldcroft, Submerged arc welding, Woodhead Publishing Limited, 1990.
- [9] AWS A3.0M/A3.0:2010. Standard Welding Terms and Definitions.
- [10] Lloyd's Register, "Ship New Construction." 2014.
- [11] International Association of Classification Society (IACS), Recommendation No.47, "Shipbuilding and Repair Quality Standard," Revision 7, 2013.



ธนวัฒน์ ศิริเสถียร สำเร็จการศึกษา
ระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรม
เครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ประสบการณ์การทำงาน ปัจจุบันดำรง

ตำแหน่ง Marine Surveyor ประจำแผนก Marine บริษัท
Lloyd's Register Asia, สำนักงานกรุงเทพมหานคร, ประเทศ
ไทย และกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาเทคโนโลยี
วิศวกรรมการเชื่อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

ความสนใจ: Ship New Construction, Welding and Marine
Component.



วิทยา รัตนสุภา ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง
ผู้จัดการฝ่ายผลิต บริษัท อิตัลไทยมารีน
จำกัด

ความสนใจ: Ship New Construction
and Steel Structure



กิตติชัย โสจิพันธุ์ ได้รับทุนรัฐบาล
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
เพื่อศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี-โท-เอก
ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อปี พ.ศ. 2543
สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขา

Materials Science and Engineering และปริญญาตรี สาขา
Manufacturing Engineering จาก Northwestern University
ประเทศสหรัฐอเมริกา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท
และปริญญาเอก สาขา Welding Engineering จาก The
Ohio State University ประเทศสหรัฐอเมริกา ปัจจุบันดำรง
ตำแหน่งอาจารย์ สังกัดภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการ
เชื่อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การแข่งขันฝีมือแรงงานอาเซียน



สำนักงานโครงการพัฒนาฝีมือแรงงานแห่งภาคพื้นทีเอเซียและแปซิฟิก (ILO/APSDEP) ได้จัดประชุมประเทศสมาชิก ระหว่างวันที่ 7 – 17 กันยายน 2536 ณ เมืองชิบา ประเทศญี่ปุ่น และตกลงที่จะจัดให้มีการแข่งขันฝีมือแรงงานระหว่างกลุ่ม ประเทศสมาชิกอาเซียนขึ้น ดังนั้นการแข่งขันฝีมือแรงงานอาเซียนเป็นกิจกรรมหนึ่งของประเทศสมาชิกสมาคมประชาชาติแห่ง เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ หรืออาเซียน (The Association of Southeast Asian Nations-ASEAN) ซึ่งได้จัดให้มีการแข่งขันฝีมือ แรงงานในสาขาอาชีพต่าง ๆ ขึ้น 2 ปีต่อครั้ง โดยมีวัตถุประสงค์ของการแข่งขันประกอบด้วย

1. เพื่อพัฒนาทักษะการประกอบอาชีพและค่านิยมที่ดีของการทำงานในกลุ่มเยาวชน และแรงงานฝีมือ
2. เพื่อส่งเสริมให้ประเทศสมาชิกร่วมมือกันทั้งด้านการศึกษาและฝึกอบรมด้านอาชีพ
3. เพื่อกระตุ้นให้เกิดความร่วมมืออย่างใกล้ชิดระหว่างหน่วยงานภาครัฐ ภาคอุตสาหกรรม องค์กรนายจ้างและลูกจ้าง อีกทั้งสถานศึกษาด้านวิชาชีพต่าง ๆ
4. เพื่อเป็นเวทีที่สร้างการยอมรับในความเป็นเลิศด้านฝีมือ อีกทั้งช่วยพัฒนาแรงงาน รุ่นใหม่ให้มีฝีมืออยู่ในระดับสูง

การแข่งขันฝีมือแรงงานอาเซียนเป็นกิจกรรมหนึ่งของประเทศสมาชิกกลุ่มอาเซียนที่ต้องการความร่วมมือกันพัฒนาฝีมือ แรงงานในระดับภูมิภาคให้ทัดเทียมกับระดับนานาชาติโดยประเทศสมาชิกได้กำหนดข้อตกลงเบื้องต้นของการแข่งขัน ดังนี้

1. จัดการแข่งขัน 2 ปีต่อครั้ง โดยประเทศสมาชิกผลัดกันทำหน้าที่เป็นเจ้าภาพผู้จัดการแข่งขัน โดยการลงมติเลือก ประเทศที่จะรับเป็นเจ้าภาพ
2. แบบแข่งขัน (Test Projects) ที่ใช้ในการแข่งขัน ประเทศสมาชิกอาเซียนตกลงกันที่จะใช้แบบแข่งขันครั้งล่าสุดของ องค์กรแข่งขันฝีมือแรงงานนานาชาติ หรือ WorldSkills (ซึ่งมีสมาชิกทั่วโลกประมาณ 50 ประเทศและจัดการแข่งขันทุก ๆ 2 ปี) แบบทดสอบ WorldSkills ทุกสาขา จัดทำขึ้นโดย ผู้เชี่ยวชาญซึ่งส่วนใหญ่มาจากภาคอุตสาหกรรมชั้นนำของประเทศสมาชิก โดยเนื้อหาของแบบทดสอบจะสะท้อนถึงเทคโนโลยีล่าสุดและความต้องการทักษะแรงงานของตลาดโลก โดยมีความเชื่อว่าผู้ที่ สามารถทำแบบทดสอบในสนามแข่งขันได้ ก็ย่อมจะสามารถทำงานในสถานประกอบการได้เช่นกัน เนื่องจากแบบทดสอบของ WorldSkills มีการปรับปรุงแก้ไขทุกครั้งที่มีการแข่งขันครั้งใหม่ การจัดการแข่งขันฝีมือแรงงานอาเซียน ซึ่งยึดแบบทดสอบของ WorldSkills ครั้งล่าสุด จึงเป็นวิธีการที่ตัวอย่างหนึ่งที่ช่วยให้เยาวชนในกลุ่มประเทศอาเซียนได้ฝึกฝนฝีมือให้ก้าวทันกระแสโลกอยู่ เสมอ

3. ผู้แข่งขันต้องมีอายุไม่เกิน 22 ปี แต่ละประเทศส่งเข้าแข่งขันไม่เกินสาขาละ 2 คน โดยกำหนดระยะเวลาแข่งขัน 3 วัน (ภายในระยะเวลา 15 – 18 ชั่วโมง)

นับจนถึงปัจจุบันมีการจัดการแข่งขันฝีมือแรงงานอาเซียนจำนวน 10 ครั้ง ดังนี้

ครั้งที่	ประเทศเจ้าภาพ	ช่วงเวลา
1	ประเทศมาเลเซีย กรุงกัวลาลัมเปอร์	วันที่ 12 – 23 สิงหาคม 2538
2	ประเทศฟิลิปปินส์ กรุงมะนิลา	วันที่ 10 – 17 ธันวาคม 2539
3	ประเทศไทย กรุงเทพมหานคร	วันที่ 16 – 18 มีนาคม 2544
4	ประเทศอินโดนีเซีย กรุงจาการ์ตา	วันที่ 1 – 10 ตุลาคม 2545
5	ประเทศสาธารณรัฐเวียดนาม กรุงฮานอย	วันที่ 21 - 30 กันยายน 2547
6	ประเทศเนการาบรูไนดารุสซาลาม กรุงบันดาร์เสรี เบกาว์วัน	วันที่ 3 - 12 กันยายน 2549
7	ประเทศมาเลเซีย กรุงกัวลาลัมเปอร์	วันที่ 10 - 19 พฤศจิกายน 2551
8	ประเทศไทย กรุงเทพมหานคร	วันที่ 19 - 21 พฤศจิกายน 2553
9	ประเทศอินโดนีเซีย กรุงจาการ์ตา	วันที่ 11 - 20 พฤศจิกายน 2555
10	ประเทศสาธารณรัฐเวียดนาม กรุงฮานอย	วันที่ 19 - 29 ตุลาคม 2557
*11	ประเทศมาเลเซีย กรุงกัวลาลัมเปอร์	วันที่ 19 – 29 กันยายน 2559

ผลงานผู้เข้าแข่งขันสาขาเทคโนโลยีงานเชื่อม ในการแข่งขันฝีมือแรงงานอาเซียน

ครั้งที่ 1 มาเลเซีย 2538

ระดับเหรียญทอง	นายอรุณศักดิ์ เท่าสิงห์ (535)
ประกาศนียบัตรฝีมือยอดเยี่ยม	นายอมรเดช นันทประภาภรณ์ (510)

ครั้งที่ 2 ฟิลิปปินส์ 2539

ระดับเหรียญทองแดง	นายวัชร เอี่ยมพงษ์ (510)
ประกาศนียบัตรฝีมือยอดเยี่ยม	นายบัญชา มั่นเพ็ง (505)

ครั้งที่ 3 ไทย 2544

ระดับเหรียญทอง	นายสิงห์คำ สุดดมสินโรจน์ (537)
ระดับเหรียญเงิน	นายสันต์ จันทูล (532)

ครั้งที่ 4 อินโดนีเซีย 2545

ระดับเหรียญทอง	นายณัฏชัย วิริยานุกูล (561)
ระดับเหรียญเงิน	นายอนุพงศ์ เชียงจิ่ง (530)

ครั้งที่ 5 สาธารณรัฐสังคมนิยมเวียดนาม 2547

ระดับเหรียญทอง	นายอักษร โปร่งอากาศ (555)
ระดับเหรียญเงิน	นายสำเร็จ แก้วสุวรรณ (547)

ครั้งที่ 6 เนการาบรูไนดารุสซาลาม 2549

ระดับเหรียญทอง	นายทวีศักดิ์ เอี่ยมพงษ์ (546)
	นายไตรรัตน์ บัวสุข (545)

ครั้งที่ 7 มาเลเซีย 2551

ระดับเหรียญทอง	นายสมชาย พรหมมี
----------------	-----------------

ครั้งที่ 8 ไทย 2553

ระดับเหรียญทอง	นายอัศรพล มะพงษ์เพ็ง
	นายอเนก สุนทรารักษ์

ครั้งที่ 9 อินโดนีเซีย 2555

ระดับเหรียญทอง	นายปรีชา หาญชนะ
ระดับเหรียญเงิน	นายประเวศ บุญศรี

ครั้งที่ 10 สาธารณรัฐสังคมนิยมเวียดนาม 2557

ระดับเหรียญทอง	นายสุรรัตน์ รัตนพันธ์
ระดับเหรียญทองแดง	นายจักรกริช เนียมนาภา

“ คุณภาพด้านการบริการ พร้อมประสานการอนุรักษ์ ”

“ Quality Service with Care for Global Assets ”



ประกอบเครื่อง
Turbine Compressor



ติดตั้งระบบเพิ่มแรงดัน NGV
ที่อ่าวไทย



หอแยก Condensate
เพื่อใช้ผลิต Gas Offshore

ประสบการณ์ยาวนานเกือบ 2 ทศวรรษ ด้านนโยบาย "ลูกค้าพอใจ"

เราเป็นผู้ดำเนินการให้บริการ แก่อุตสาหกรรมน้ำมันและก๊าซในอ่าวไทยด้วยบุคลากรที่มีทักษะสูง
พร้อมเครื่องมือ-อุปกรณ์คุณภาพ



Control Room
เพื่อการผลิต Gas Offshore

สร้างและซ่อมบำรุง

บริการของเรา : ทั้งบนฝั่งและในทะเล ตั้งแต่ต้นทางถึงปลายทางของกระบวนการผลิต โดยครอบคลุมทุกระบบ
รวมถึงการให้เช่าเรือ และบริการเรือสำหรับพักในทะเลพร้อมอาหารและสิ่งอำนวยความสะดวก



บริษัท เอ็กซ์เพิร์ท ทีม จำกัด

110,112,114 ถนนพระราม 2 แขวงแสมดำ เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร 10150

โทร. 0-2898-6001 แฟกซ์. 0-2898-6451

Website: www.experteam.co.th E-mail: extec@experteam.co.th



SK NDT & INSPECTION CO., LTD.

850/12 Latkrabang Rd., Soi 30/5, Ket/Klang Latkrabang, Bangkok 10250 THAILAND
Tel: (662) 327-4422 (auto) Fax: (662) 327-4028 Web: www.skndt.com
Email: center@skndt.com, suchin@skndt.com



Radiographic Testing



Magnetic Particle Testing



Liquid Penetrant Testing



Ultrasonic Testing

Our Major Services **FOR ONSHORE AND OFFSHORE**

AA) Nondestructive Testing & Related Services

- Radiography (RT) by Gamma Ray & X Ray in various techniques including (Directional, Panoramic for Spherical & Cylindrical components and Crawler machine for pipelines)
- Ultrasonic Examination (UT) by Manual and Automatic Flaw Detectors & AUT Phased Array and TOFD Services
- Liquid Penetrant Examination (PT)
- Magnetic Particle Examination (MT) by Dry and Wet Method
- Visual Examination (VT)
- Eddy Current Examination (ET)
- ASNT and PCN/EN-473/ISO-9712 NDT Level III Service
- Advance NDT Testing Service

CC) Manpower Training, Certification & Supply

- Educational & Practical Training of Industrial Field such as Welding NDT, Painting Quality Assurance & QA/QC System
- Manpower Supply
 - a) QA/QC Welding Engineer and Inspector
 - b) NDT Engineer, Inspector and ASNT Level II & Level III Technicians
 - c) QA/QC Document Controller & Operator
 - d) Qualified and Skilled Welder for Process Piping Pipeline, Steel Structure, Storage Tanks in all welding processes e.g. GTAW, SMAW, GMAW, SAW, etc.

BB) Inspection & Testing Services

- Ultrasonic Thickness Measurement (UTM)
- Positive Material Identification (PMI)
- Hydrostatic Testing
- Hardness Testing
- Ferrite Testing
- Mechanical and WPS, PQR, WQT Services
- Holiday Detector Testing for pipelines and other components
- Third Party Inspection Service
- Independent Inspection and Testing Service
- Welding Inspection and Consultancy Services
- Industrial Video Borescope, Auto Visual Inspection Services
- Vibration Measurement
- Tank Floor Scanning
- Plant Inspection, Annual Turnover, shutdown works, etc.
- LPG, LNG, CNG Tank, Piping & Pipeline Testing

DD) Inspection Work related to Government Sector (DOEB, CD, ED & Other)

- New Construction of LPG Sphere Tanks, Yearly Testing, Annual Inspection of LPG Storage Tanks, Sphere Tanks and Bullet Tanks
- Oil Storage Tank Inspection and License Services
- Visual Oil & Gas Tank Calibration, Certification, Inspection and Testing as per Excise Dept., Customs Dept. and DOEB
- Oil & Gas Station & Trucks Inspection and License Service



PMI Testing



Head Office, Bangkok



Training and Certification



Tank Calibration and Hydrostatic Testing