

**การประเมินความต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัว
ในเนื้อเชื่อมภายใต้เส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูง**

**EVALUATION OF WELD SOLIDIFICATION CRACKING RESISTANCE
BASED ON HIGH TEMPERATURE DUCTILITY CURVE**

ฤทธิชัย เภาเนียม¹ ไพศาล อินประจง² และ เจษฎา แก้ววิชิต³

¹อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ, 2 ถ.นางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120, rittichai.p@mail.rmutk.ac.th

^{2,3}นักวิจัย, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ, 2 ถ.นางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120, ²paisan_20@hotmail.com, ³Jesada.kt@hotmail.com

Rittichai Phaoniam¹, Paisan Inprachong² and Jesada Kaewwichit³

¹Lecturer, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, 2 Nanglinchee Rd. Thungmahamek, Sathorn, Bangkok 10120, Thailand, rittichai.p@mail.rmutk.ac.th

^{2,3}Researcher, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, 2 Nanglinchee Rd. Thungmahamek, Sathorn, Bangkok 10120, Thailand, ²paisan_20@hotmail.com, ³Jesada.kt@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการประเมินความต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัวของเนื้อเชื่อม โดยพิจารณาภายใต้ค่าขอบเขตของเส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูง (High Temperature Ductility Curve) ซึ่งแนวทางนี้สามารถอธิบายถึงปัจจัยสำคัญด้านช่วงอุณหภูมิการแตกร้าว (SCTR) ระดับความเครียดวิกฤต และความไวต่อการแตกร้าวขณะเชื่อมด้วย เนื้อเชื่อมที่ศึกษามี 2 ชนิด ได้แก่ พอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 และความแข็งแรงสูง AWS ER70S-6 ในการทดลองประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบทรานส์วาเรสแตนต์ (Trans-Varestraint Test) เพื่อหาความยาวรอยแตกสูงสุดในช่วงอุณหภูมิการแข็งตัวของเนื้อเชื่อมซึ่งถูกกระตุ้นจากการตัดโค้งทันทีที่ทันใดขณะเชื่อมด้วยทั้งสแตนเลสเนื้อยิปซัมผสม ณ ระดับความเครียด 0.7-4.1 % และส่วนต่อมาเป็นการวัด

อัตราเป็นตัวของบ่อหลอมขณะเชื่อมเพื่อประมาณค่าอุณหภูมิสิ้นสุดการแตกร้าว จากผลทดลองได้ความสัมพันธ์ระหว่างการแตกร้าวสูงสุดในช่วงอุณหภูมิการแข็งตัว ณ ระดับความเครียดต่างๆ ซึ่งสามารถประเมินค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้าว ณ อุณหภูมิสูง หรือเส้นโค้งความเหนียวได้ ผลการทดลองพบว่าที่ระดับความเครียดเท่ากันเนื้อเชื่อม MSG 6 GZ-60 มีความยาวรอยแตกร้าว สูงสุดมากกว่า ในขณะที่เนื้อเชื่อม AWS ER70S-6 มีการกระจายตัวของจำนวนรอยแตกมากกว่าในทุกระดับความเครียด เมื่อพิจารณาความไวต่อการแตกร้าวขณะแข็งตัวภายใต้เส้นโค้งความเหนียว จากช่วงอุณหภูมิ SCTR และอัตราความเครียดวิกฤต ผลบ่งชี้ว่าเนื้อเชื่อม MSG 6 GZ-60 มีโอกาสเกิดการแตกร้าวมากกว่าเนื้อเชื่อม AWS ER70S-6 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยา

คำสำคัญ: ความต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัว, วิธีการทดสอบทรานส์วาเรสเตรนจ์, เส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูง

ABSTRACT

This research aims to evaluate weld solidification cracking resistance based on high temperature ductility curve. This approach is able to elucidate the essential factors, namely solidification cracking temperature range (SCTR), critical strain, solidification cracking susceptibility during welding. Two (2) kinds of the weld metals were investigated as a hardfacing MSG 6 GZ-60 and a high strength AWS ER70S-6. Experiments were divided into two (2) parts. Firstly, trans-varestraint test was carried out in order to determine maximum crack length in SCTR. Solidification cracking were stimulated through immediately bending during GTAW welding. Bending strain levels of 0.7-4.1% were employed. Secondly, cooling rate during welding was measured so as to estimate a certain temperature value at the cracking tip. From the relationships between maximum cracking during SCTR and critical strain levels could establish the high temperature ductility curve. It was found that the hardfacing weld metal MSG 6 GZ-60 produced the longest crack. In addition, the high strength weld metal AWS ER70S-6 induced more cracking distributions on entire strain levels. Based on high temperature ductility curve, cracking susceptibility considered through the extensive SCTR, as well as the critical strain, it indicated the most susceptibility, namely MSG 6 GZ-60 and AWS ER70S-6 respectively. Those results was reasonably related to their metallurgical weld morphology.

KEYWORDS: solidification cracking resistance, trans-varestraint test, high temperature ductility curve

1. บทนำ

การแตกร้าวขณะแข็งตัวในรอยเชื่อม (Weld Solidification Cracking) เป็นปัญหาสำคัญส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเชื่อมด้านความสมบูรณ์แข็งแรงของชิ้นส่วนโครงสร้างต่างๆ [1-3] โดยจะเกิดขึ้นในระหว่างช่วงสุดท้ายของการแข็งตัว (Final Stages of Solidification) หรือในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Mushy Zone) ซึ่งปัจจัยกระตุ้นสำคัญคือการสะสมพลังงานความเครียดและการเกิดฟิล์มของเหลวอยู่ตามขอบเกรน รอยแตกร้าวจะเกิดบริเวณตามขอบเกรน (Intergranular Cracking) หรือ ขอบเดนไดรต์ [4-7] จากการวิจัยที่ผ่านมา [8-12] สามารถแบ่งการทดสอบหาความไว (Susceptibility) ในการแตกร้าวขณะแข็งตัวได้เป็น การแตกร้าวขณะร้อนเนื่องจากแรงกระตุ้นของรูปร่างชิ้นงานทดสอบเอง (Self-Restraint Hot Cracking Test) เช่น วิธี Houldcroft ซึ่งมักถูกใช้ในอลูมิเนียม วิธี Double Fillet Weld Test ในงานเชื่อมฟิลเลท วิธี Sigmajig Test สามารถทราบอิทธิพลระดับการจับยึดขณะเชื่อมได้ เป็นต้น อีกประเภทเป็นการแตกร้าวขณะร้อนเนื่องจากแรงกระตุ้นจากภายนอก (Externally Loaded Hot Cracking Test) เช่น วิธี Programmed Deformation Rate Test (PVR-Test) วิธี Hot Deformation Rate (HDR)-Test และการทดสอบทรานส์ วาเรสเตรนต (Trans-Varestraint Test) [13, 14] เป็นต้น อย่างไรก็ตามผลการศึกษาซึ่งประยุกต์ใช้วิธีดังกล่าวเป็นเพียงการเปรียบเทียบระดับความเสี่ยงในแต่ละวัสดุเท่านั้น โดยพิจารณาความยาวรอยแตกร้าวสูงสุด จำนวนรอยแตกทั้งหมด เป็นต้น ในขณะที่ทฤษฎีของ Prokhorov และ Matsuda [5, 15] ซึ่งเน้นการทำนายการแตกร้าวขณะเชื่อมในทางปฏิบัติ โดยได้อธิบายถึงช่วงอุณหภูมิการแตกร้าวขณะแข็งตัว (Solidification Cracking Temperature Range, SCTR) ที่ระดับความเครียดวิกฤตต่างๆ ซึ่งประกอบขึ้นเป็นขอบเขตการต้านทานการแตกร้าวที่อุณหภูมิสูง หรือ เส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูง (High Temperature Ductility Curve) โดยถ้ามีการสะสมพลังงานความเครียดขณะเชื่อมมากกว่าขอบเขตเส้นโค้งความเหนียวนี้ก็จะทำให้เกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัวขึ้นนั่นเอง จากงานวิจัยของ Matsuda ประยุกต์ใช้วิธี "Means of In-Situ Observation, MISO" ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สังเกตการแตกร้าวขณะแข็งตัวของโลหะเชื่อมจากวิดีโอความเร็วสูง ซึ่งทำให้สามารถหาค่าความเครียดวิกฤตเฉพาะที่ (Local Strain) และวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งเริ่มการแตกร้าวได้ จึงส่งผลให้การประมาณเส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูงได้อย่างแม่นยำขึ้น อย่างไรก็ตามแนวทางดังกล่าวนี้ต้องใช้เครื่องมืออุปกรณ์ราคาแพงและวิธีการที่ซับซ้อนเช่น กล้องบันทึกความเร็วสูง (High Speed Camera) ซอฟต์แวร์ตรวจจับความเคลื่อนไหว เป็นต้น อีกทั้งข้อมูลศึกษาในเนื้อ

เชื่อมมีค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง และพอกผิวแข็ง ซึ่งใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เป็นต้น

ดังนั้นจากปัญหาดังที่กล่าวมานี้ คณะผู้วิจัยจึงมีความมุ่งหมายศึกษาการประเมินการแตกร้าวขณะแข็งตัวของตัวภายใต้ขอบเขตช่วงอุณหภูมิของ SCTR และนำเสนอวิธีการทดสอบเพื่อประมาณค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัวของเนื้อเชื่อมภายใต้เส้นโค้งความเหนียว อนุกรมสูง ซึ่งข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์ในการประเมินปัจจัยสำคัญด้านช่วงอุณหภูมิการแตกร้าวขณะแข็งตัว ระดับความเครียดวิกฤต รวมทั้งความไวต่อการแตกร้าวด้วย เพื่อคาดการณ์การแตกร้าวขณะเชื่อมต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

การทดลองเชิงเปรียบเทียบประกอบด้วยเนื้อเชื่อม 2 ชนิดจากลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 ตามมาตรฐาน DIN 8555 เปรียบเทียบกับลวดเชื่อมความแข็งแรงสูง เกรด AWS ER70S-6 ซึ่งถูกเชื่อมลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด A 36 ขนาด 200 x 75 x 6 mm เตรียมร่องบากมุม 60 องศา โดยกระบวนการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW) ด้วยอัตราการเจือจาง (Dilution Ratio) ระหว่าง 11-16 % และผิวหน้ารอยเชื่อมถูกตัดเรียบด้วยงานเครื่องมือกลอีกครั้ง ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานและเนื้อเชื่อมจาก เครื่องตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Emission Spectrometer) สำหรับงานวิจัยนี้

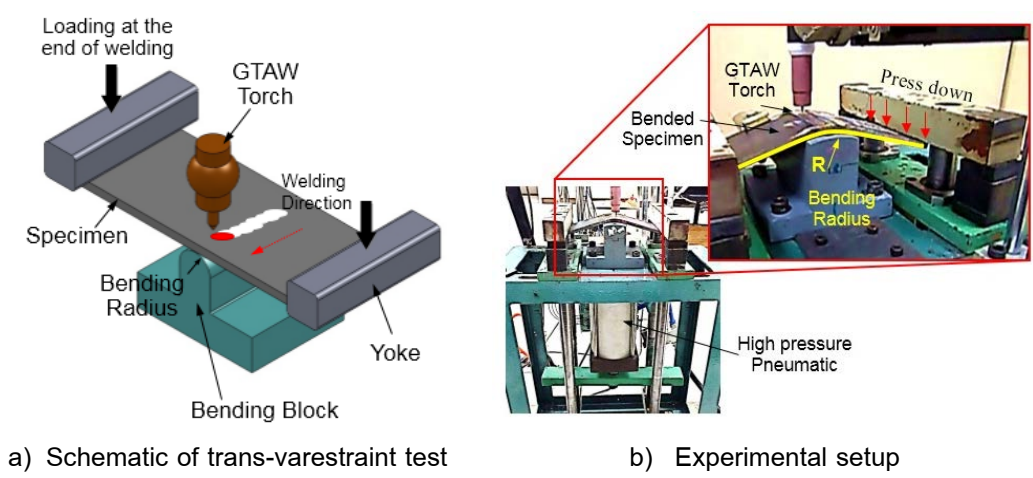
ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานและลวดเชื่อม (% โดยน้ำหนัก)

	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cu	%Cr	%Ni	%Mo	%V	%N
Base Metal: Mild steel	0.141	0.450	0.016	0.001	0.006	0.005	0.012	0.022	0.001	0.002	0.003
Filler Wire: MSG 6 GZ-60	0.371	0.417	1.797	0.008	0.019	0.085	5.777	0.095	0.027	0.023	-
Filler Wire: ER70S-6	0.088	0.994	0.469	0.013	0.011	0.180	0.054	0.034	0.008	0.002	0.015

2.2 การทดสอบการแตกร้าวขณะแข็งตัว

เมื่อเตรียมชิ้นงานจากขั้นตอนที่แล้ว เนื้อเชื่อมดังกล่าวถูกกระตุ้นให้เกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัวด้วยวิธีการทดสอบทรานส์วาเรสเตรนธ์ ดังแสดงในรูปที่ 1 (a) กล่าวคือ เนื้อเชื่อมจะถูกเชื่อมซ้ำแบบไม่เติมลวดด้วยกระบวนการเชื่อมทั้งสแตนแก๊สเฉื่อยปกคลุม (Autogenous GTAW) เพื่อจำลองการเกิดสภาวะขณะแข็งตัว (Mushy Zone) ของบ่อหลอมเชื่อม จนกระทั่งปลายบ่อ

หลอมเคลื่อนที่อยู่ประมาณกึ่งกลางชิ้นงาน จากนั้นการแตกร้าวจะถูกทำให้เกิดด้วยความเครียดจากการดัดโค้งชิ้นงานอย่างทันทีทันใด แสดงในรูปที่ 1 (b) การทดลองใช้รัศมีการดัด (Bending Radius) แตกต่างกัน 5 รัศมีคือ R70 R120 R200 R300 และ R400 mm ซึ่งถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้เปอร์เซ็นต์ความเครียดเนื่องจากรัศมีการดัดโค้งครอบคลุมการทำให้เกิดจุดเริ่มแตกร้าวและการแตกร้าวสูงสุดในระหว่างบ่อหลอมเชื่อมแข็งตัวโดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1 ขณะที่ตัวแปรต้นหรือเปอร์เซ็นต์ความเครียด พารามิเตอร์การเชื่อมและเงื่อนไขการทดลอง ทรานส์วาเรสเตรนต์ แสดงดังตารางที่ 2 โดยเงื่อนไขการทดลองถูกทำซ้ำด้วยชิ้นงาน 3 ชิ้น แล้วใช้ค่าเฉลี่ยของรอยแตกร้าวสูงสุด



รูปที่ 1 วิธีการทดสอบทรานส์ วาเรสเตรนต์ (Trans-Varestraint Test)

ความเครียดที่เกิดขึ้นจากรัศมีการดัดโค้ง (R) แตกต่างกัน สามารถคำนวณดังสมการที่ 1

$$\epsilon\% = \frac{t}{2R+t} \times 100 \tag{1}$$

โดย $\epsilon\%$ คือ เปอร์เซ็นต์ความเครียด t คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (mm) และ R คือ รัศมีการดัดโค้ง (Bending Block Radius) (mm)

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์การเชื่อมและการทดลอง Trans-Varestraint Test

เงื่อนไขการทดลอง Trans-Varestraint Test	
รัศมีดัดโค้ง (mm)	R70, R120, R200, R300, และ R400
ความเครียด (Augment Strain), %	4.1%, 2.3%, 1.5%, 1.0%, 0.7%
ทิศทางการกด	ขวางแนวเชื่อม (Transverse)
พารามิเตอร์การเชื่อม (Welding Parameters)	
กระบวนการเชื่อม	GTAW
อิเล็กโทรด	W-2ThO ₂ , ϕ 2.4 mm
กระแสไฟ (Current), แอมแปร์	150
ขั้วไฟฟ้า (Polarity)	DCEN
ความเร็วเชื่อม (Welding Speed), mm/sec	0.7
แก๊สปกคลุม (Shielding Gas)	อาร์กอน 99.9% อัตราการไหล 10 L/min

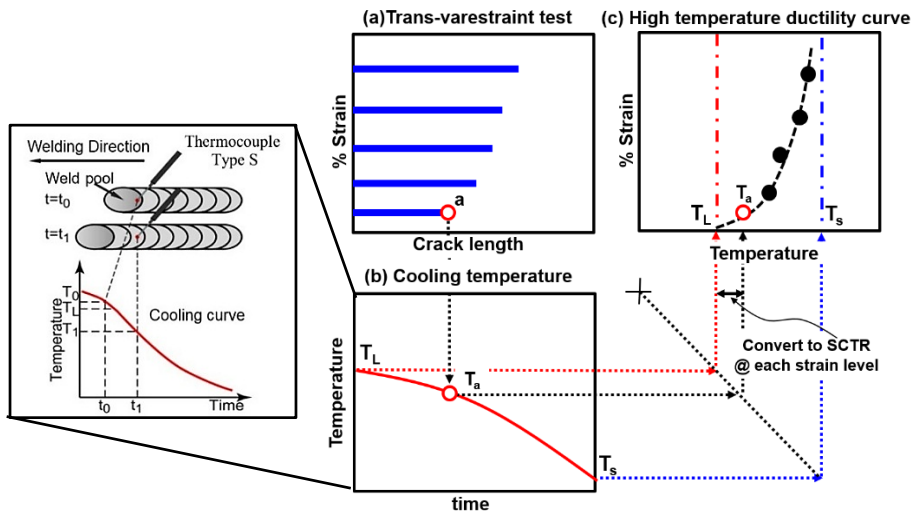
2.3 การหาค่าขอบเขตการแตกร้าว ณ อุณหภูมิสูง จากเส้นโค้งความเหนียว

หลังจากทดสอบทรานส์วาเรสเตรนจ์แล้ว ความยาวรอยแตกร้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับความเครียดจะถูกวัดขนาดตามแนวยาวรอยเชื่อมด้วยกล้องไมโครสโคป (Optical Microscope) และโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Material Plus Image Analysis ต่อมาภายใต้พารามิเตอร์การเชื่อมเดียวกัน อุณหภูมิการเย็นตัวขณะเชื่อม (Cooling Curve) ณ ตำแหน่งกึ่งกลางแนวเชื่อมถูกวัดด้วยการจุ่มเทอร์โมคัปเปิล Type S ลงในบ่อหลอม (Weld Pool) อย่างทันทีทันใด และบันทึกในอุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data Logger) ยี่ห้อ MIDI Logger รุ่น GL900 ดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนั้นจากความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยแตกร้าวสูงสุดที่ระดับความเครียดใดๆและอุณหภูมิการเย็นตัวตลอดกึ่งกลางแนวเชื่อมจะสามารถนำมาประมาณค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัว ณ อุณหภูมิต่างๆได้ ยกตัวอย่างเช่น ที่ระดับความเครียดใดๆเกิดความยาวรอยแตกร้าวสูงสุดเท่ากับ a (รูปที่ 2a) จากนั้นประมาณค่าอุณหภูมิลิ้นสุดการขยายตัวของรอยแตกร้าวนี้จากเส้นโค้งการเย็นตัวของแนวเชื่อมได้เท่ากับ T_a (รูปที่ 2b) จากนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงอุณหภูมิเกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัว (SCTR) ณ ระดับความเครียดนั้นๆ ขณะเชื่อม (รูปที่ 2c) โดยจะทำซ้ำเช่นนี้ ณ ระดับความเครียดอื่นไปเรื่อยๆ ซึ่งจะสามารถสร้างเส้นโค้งความเหนียวของการแตกร้าวขณะแข็งตัวนั่นเอง

โดยความไวในการแตกร้าวขณะแข็งตัวเชิงปริมาณจะถูกประเมินผ่านเส้นโค้งความเหนียวนี้ ซึ่งสามารถอธิบายอิทธิพลทั้งด้านช่วงอุณหภูมิ SCTR ของเนื้อเชื่อมและขีดจำกัดความเครียดขณะ

เชื่อม เช่น ระดับการจับยึด การหดตัว การออกแบบรอยต่อที่เหมาะสม เป็นต้น ช่วงอุณหภูมิเกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัว (SCTR) สามารถคำนวณหาจากความสัมพันธ์ของอัตราการเย็นตัว (CR) ความยาวรอยแตกร้าว (CL) และความเร็วเชื่อม (Vw) ดังสมการที่ 2 ต่อไปนี้

$$SCTR = CR \times \frac{CL}{Vw} \tag{2}$$

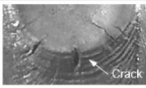
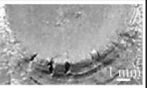
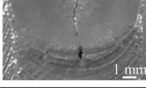

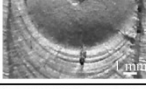
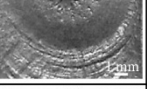
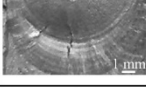
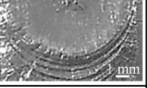
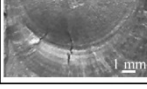
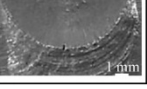


รูปที่ 2 การประมาณค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัว SCTR

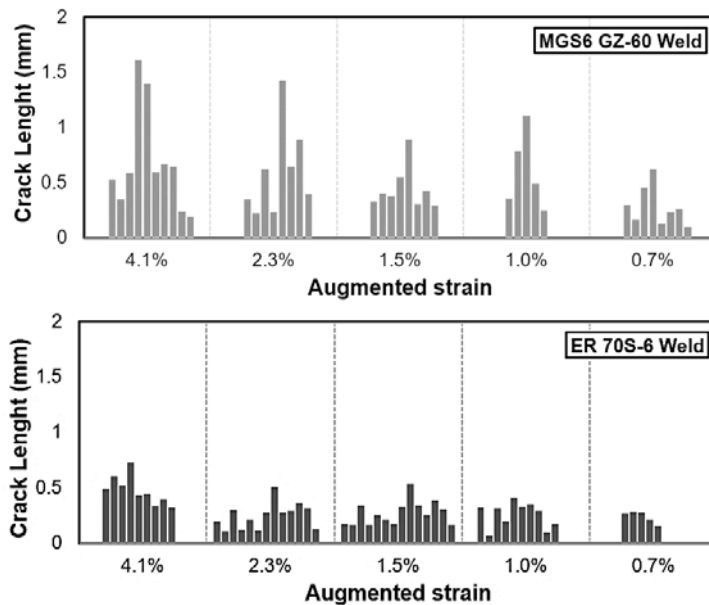
3. ผลการวิจัย

3.1 การประเมินการแตกร้าวขณะแข็งตัว

รูปที่ 3 แสดงลักษณะการกระจายตัวของรอยแตกร้าวของเนื้อเชื่อมทั้ง 2 ชนิด ณ ระดับความเครียด 0.7-4.1 % หลังการทดสอบด้วยทรานส์วาเรสเตรนด พบว่าเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 ปรากฏรอยแตกร้าวขณะแข็งตัวอย่างชัดเจนในทุกระดับความเครียด รอยแตกร้าวมีขนาดยาวกว่าและขยายเข้าไปในบริเวณบ่อหลอมเชื่อม ซึ่งบ่งชี้ถึงความรุนแรงต่อการเกิดแตกร้าวขณะแข็ง อย่างไรก็ตามเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 รอยแตกร้าวปรากฏชัดเจนที่ระดับความเครียดสูงตั้งแต่ 2.3 % ขึ้นไปรวมทั้งมีขนาดที่สั้นกว่า

Augmented strain	Tested materials	
	Hard facing MSG 6 GZ-60	High strength ER70S-6
4.1%		
2.3%		
1.5%		
1.0%		
0.7%		

รูปที่ 3 เปรียบเทียบรอยแตกในตัวเชื่อม 2 ชนิด ณ ระดับความเครียดต่าง ๆ



รูปที่ 4 เปรียบเทียบการกระจายตัวของรอยแตกในตัวเชื่อม

เมื่อเปรียบเทียบเชิงปริมาณด้วยกล่องไมโครสโคปและโปรแกรมวิเคราะห์ภาพดังในรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนและความยาวรอยแตกที่ระดับความเครียดต่าง ๆ พบว่าเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 เผยลักษณะการแตกในตัวเชื่อมช่วงโลหะแข็งตัวหลังบ่อหลอม

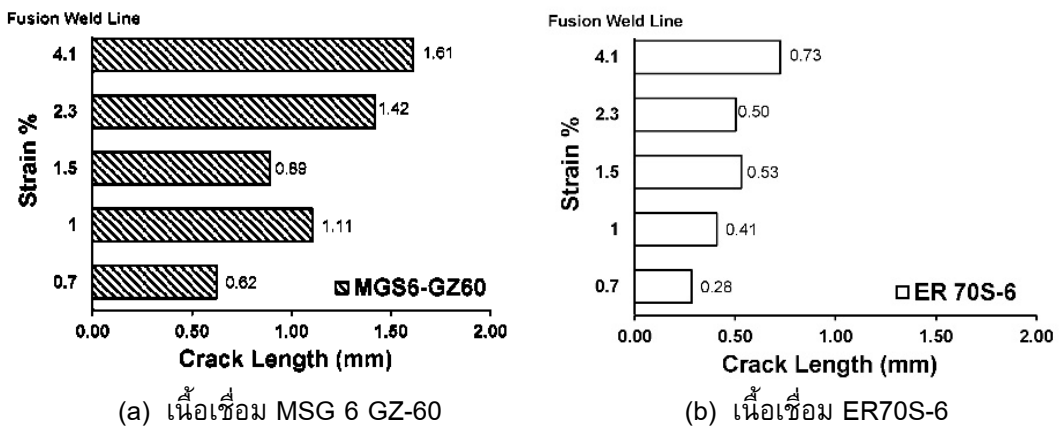
(Mushy Zone) มีจำนวนรอยแตกร้าวกระจายทั้งหมด 39 รอยแตก และมีความยาวสูงสุด 1.61 mm ที่ระดับความเครียด 4.1% โดยความยาวรอยแตกร้าวสูงสุดของแต่ละระดับความเครียดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระดับความเครียดที่สูงขึ้น ขณะที่เนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 เกิดรอยแตกกระจายจำนวนมากกว่าคือ 51 รอยแตก แต่ความรอยแตกร้าวสูงสุดเพียง 0.73 mm สังเกตได้ว่าถึงแม้เนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 จะมีการแตกร้าวที่รุนแรงซึ่งขนาดยาวสูงสุดประมาณสองเท่าของเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 ในทางตรงกันข้ามเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 มีโอกาสเกิดรอยแตกกระจายตัวในปริมาณมากกว่าที่ระดับแรงกระตุ้นโดยการโค้งดัดขณะเชื่อมเท่ากัน

3.2 การประเมินขอบเขตความต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัวด้วยเส้นโค้งความเหนียว อุณหภูมิสูง

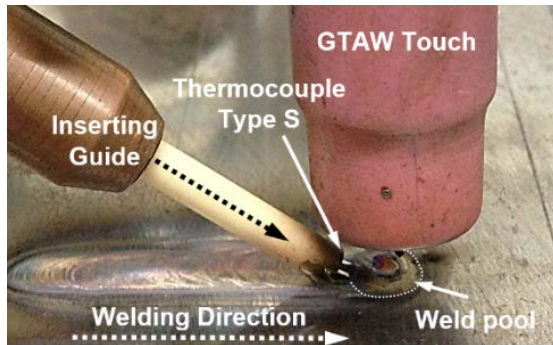
ดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 2.3 ความยาวรอยแตกร้าวสูงสุดในแต่ละระดับความเครียดตั้งแต่ 0.7-4.1% ถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5 สังเกตได้ว่าเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 มีการขยายตัวของรอยแตกร้าวมากกว่าในทุกระดับแรงกระตุ้น ขณะที่เนื้อเชื่อม ER70S-6 ขนาดรอยแตกร้าวค่อนข้างคงที่เมื่อระดับความเครียดสูงกว่า 1.0 % ขึ้นไป อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบความไวในการแตกร้าว (Cracking Susceptibility) โดยพิจารณาเฉพาะความยาวรอยแตกร้าวอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอ เนื่องจากการแตกร้าวจะขยายตัวสูงสุดภายในช่วงอุณหภูมิโลหะแข็งตัวซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเช่น สมบัติทางการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ขนาดของบ่อหลอมเชื่อม ช่วงอุณหภูมิที่แข็งกึ่งเหลว เป็นต้น ดังนั้นเพื่อพิจารณาปัจจัยต่างๆ นี้จึงได้ทดลองวัดอุณหภูมิการเย็นตัวหลังบ่อหลอมเชื่อมด้วยการจุ่มเทอร์โมคัปเปิลอย่างทันทีทันใด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางแนวเชื่อมดังในรูปที่ 6 ผลจากเส้นโค้งการเย็นตัว (Temperature History) ดังรูปที่ 7 ซึ่งเมื่ออาศัยความชันระหว่างผลต่างของอุณหภูมิต่อเวลา (Differential Temperature to Time) ทำให้ทราบตำแหน่งเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอิทธิพลความร้อนแฝง (Latent Heat) ซึ่งสามารถประมาณจุดหลอมเหลวของเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 เท่ากับ 1394 °C และเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 เท่ากับ 1476 °C โดยอุณหภูมิเย็นตัวภายหลังจุดหลอมเหลวนี้ถูกนำมาคาดการณ์ขอบเขตการขยายตัวของปลายรอยแตกร้าวต่างๆ หรือขอบเขตความต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัวนั่นเอง

จากรูปที่ 8 แสดงเส้นการประมาณค่าขอบเขตช่วงอุณหภูมิเกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัวที่ระดับความเครียดวิกฤติที่อุณหภูมิสูง หรือ เส้นโค้งความเหนียว พบว่าเส้นค่าขอบเขต SCTR ของเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG6 GZ-60 มีขอบเขตที่กว้างกว่าเนื้อเชื่อม ER70S-6 ขณะเดียวกันก็มีขอบเขตการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำด้วย ซึ่งส่งผลต่อโอกาสเกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัวเนื่องจากค่า

ขอบเขต SCTR ที่กว้างขึ้นแสดงถึงช่วงสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่มากตามไปด้วยทำให้มีแนวโน้มที่ขอบเกรนจะแยกจากกันได้ง่ายขึ้นขณะกำลังแข็งตัว (Solidification) [16] ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาแรงกระตุ้นจากอัตราการความเครียดวิกฤติต่ำสุดที่จะเกิดการแตกร้าว (Critical strain for temperature drop, CST) พบว่าเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 มีค่าเท่ากับ 0.005 /°C ขณะที่เนื้อเชื่อม ER70S-6 ใช้แรงกระตุ้นมากกว่าคือ 0.006 /°C จากผลดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 มีค่าต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัวที่ต่ำกว่าเนื่องจากช่วงอุณหภูมิการแข็งตัวที่กว้างและอัตราการความเครียดวิกฤติน้อย



รูปที่ 5 ความยาวรอยแตกร้าวสูงสุดที่ระดับความเครียดต่าง ๆ

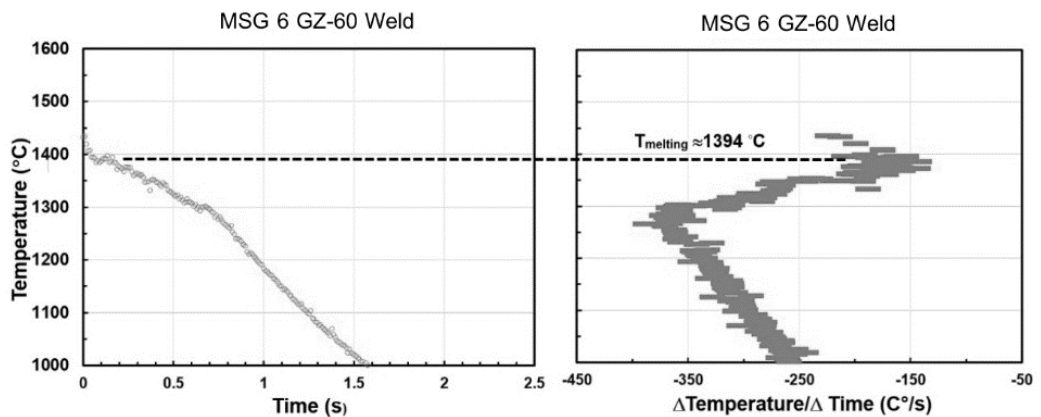


รูปที่ 6 การวัดอัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อม

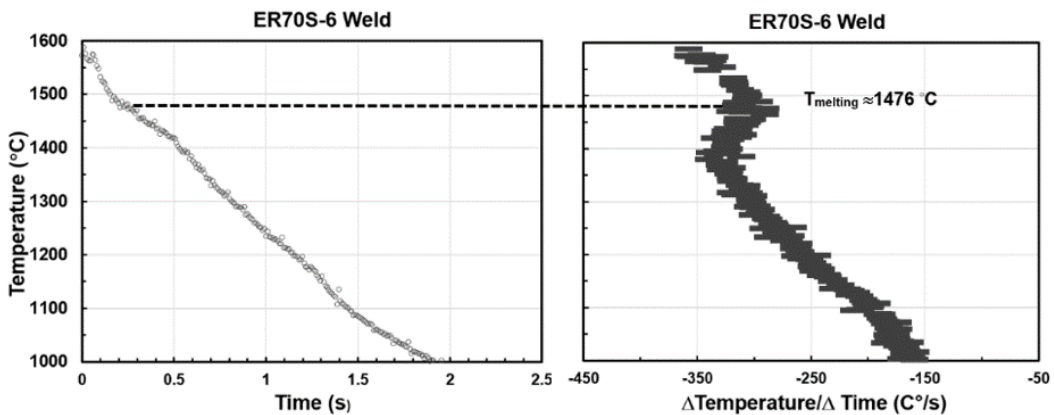
3.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

ภายหลังทดสอบ Trans-Varestraint Test ผิวด้านบนรอยแตกร้าวถูกขัดลีกลงประมาณ 0.5 mm เพื่อตรวจพินิจทางจุลภาคดังรูปที่ 9 และ 10 แสดงโครงสร้างทางจุลภาครอยแตกร้าว ณ

ตำแหน่งประมาณกึ่งกลางเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 และ ER70S-6 ตามลำดับ ที่ระดับความเครียด 4.1 % ลักษณะเป็นการแตกร้าวตามขอบเกรน (Intergranular Cracking) และค่อนข้างโค้งมนตามขอบรอยแตกหัก จากหลักฐานดังกล่าวบ่งชี้ว่าการแตกร้าวนี้เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิขณะแข็งตัว (Solidification Temperature Range) เมื่อพิจารณาเนื้อเชื่อม MSG 6 GZ-60 พบว่าจะปรากฏขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าและการขยายตัวของรอยแตกร้าวกะจายรอบขอบเกรน เมื่อเทียบกับเนื้อเชื่อม ER70S-6 ที่มีเกรนขนาดเล็กละเอียดกว่าซึ่งบ่งชี้ว่าเกรนละเอียดมีความต้านทานการแตกร้าวนั้นร้อนได้ดีกว่านั่นเอง [17]

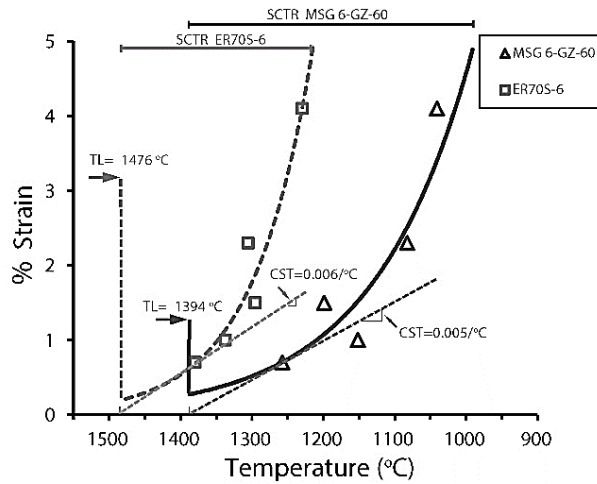


(a) เนื้อเชื่อม MSG 6 GZ-60

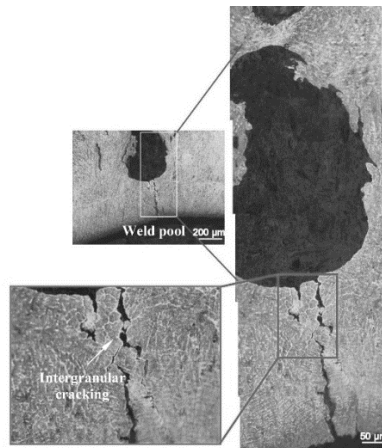


(b) เนื้อเชื่อม ER70S-6

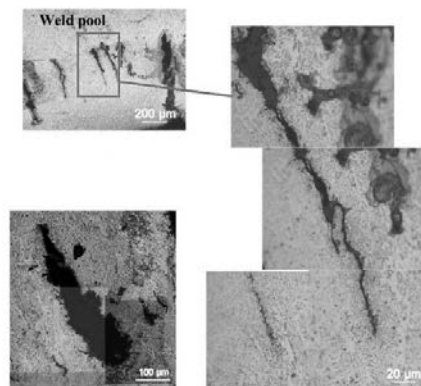
รูปที่ 7 อุณหภูมิการเย็นตัวของแนวเชื่อม (เนื้อเชื่อม MSG 6 GZ-60)



รูปที่ 8 ขอบเขตความต้านทานการแตกร้าขณะแข็งตัว



รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาค ณ บริเวณรอยแตกร้าในเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60



รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาค ณ บริเวณรอยแตกร้าในเนื้อเชื่อม ER70S-6

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการวิจัยการประเมินค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้าาขณะแข็งตัวของเนื้อเชื่อม 2 ชนิด ภายใต้เส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการทดสอบทรานส์วาเรสเตรนธ์พบว่าเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 มีการขยายตัวของรอยแตกร้าาสูงสุดมากกว่าเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 แต่ในทางกลับกันเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 มีการกระจายตัวของจำนวนรอยแตกร้าามากกว่าเกือบทุกระดับความเครียด

2. การประเมินค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้าาขณะแข็งตัวของเนื้อเชื่อมภายใต้เส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูง บ่งชี้ว่า ขอบเขตเส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูงของเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 มีช่วงอุณหภูมิ SCTR ที่กว้างและอุณหภูมิต่ำกว่า รวมทั้งเมื่อพิจารณาแรงกระตุ้นจากอัตราความเครียดวิกฤติต่ำสุด (CST) บ่งชี้ถึงโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าาจากการแยกตัวตามขอบเกรนได้ง่ายกว่าขณะแนวเชื่อมเย็นตัว

3. ผลทางโครงสร้างทางจุลภาคของรอยแตกร้าาของเนื้อเชื่อมบ่งชี้ว่าเป็นการแตกร้าาขณะแข็งตัวเกิดขึ้นตามขอบเกรน เนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 มีเกรดโตและหยาบกว่าเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 มีผลทำให้การแตกร้าาขยายตัวได้ง่ายกว่าขณะร้อนซึ่งสอดคล้องกับผลการประเมินค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้าาขณะแข็งตัวหรือขอบเขตเส้นโค้งความเหนียว

ข้อมูลค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้าาขณะแข็งตัวของการวิจัยนี้จะมีประโยชน์ในการคาดการณ์การแตกร้าาขณะแข็งตัว เมื่อทราบค่าอัตราความเครียดขณะเชื่อม เช่น จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Computational Simulation) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ออกแบบรอยเชื่อมเพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าาขณะเชื่อมต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาและสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมืออุปกรณ์และสนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

References

- [1] Hashimoto T, Terasaki H, Komizo Y-i. Solidification cracking susceptibility of alloy tool steel under rapid solidification. Quarterly Journal of the Japan Welding Society 2009;27(2):126s-9s.

- [2] Liu W. Computational analysis and prediction of weld-solidification cracking. *Computational Materials Science* 1995;4(3):211-9.
- [3] Matsuda F et al. Quantitative evaluation of solidification brittleness of weld metal during solidification by means of In-Situ observation and measurement (Report I): Development of the MISO Technique (Materials, Metallurgy & Weldability). *Transactions of JWRI* 1983;12(1):65-72.
- [4] Lippold JC. *Welding metallurgy and weldability*. New Jersey: John Wiley & Sons; 2015.
- [5] Prokhorov NN. The technological strength of metals while crystallizing during welding. *Welding Production* 1962;9(4):1-8.
- [6] Liu R-p, Dong Z-j, Pan Y-m. Solidification crack susceptibility of aluminum alloy weld metals. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2006;16(1):110-6.
- [7] Pisan I, Jesada K, Sutham S, Rittichai P, editor *Evaluation of Solidification Cracking Susceptibility in S50C and SS400 Carbon Steels Based on Solidification Cracking Temperature Range The Conference of Thailand Welding and Inspection Thailand (TWIT2017)* 2017; 11-12 November 2017, Sand Dunes Chaolao Beach Resort, Chanthaburi, Thailand.
- [8] Houldcroft PT. A simple cracking test for use with argon-arc welding. *Brit Weld J* 1955;2: 471-5.
- [9] DIN EN ISO 17641 *Destructive tests on welds in metallic materials-hot cracking tests for weldments-arc welding processes part 1-3*; 2005.
- [10] Goodwin GM. Development of a new hot-cracking test - the Sigmajig. *Weld J* 1987;66: 33-8.
- [11] Kannengiesser T, Boellinghaus T. Hot cracking tests - an overview of present technologies and applications. *Welding in the World* 2014;58(3):397-421.
- [12] Phaoniam R, Shinozaki K, et al. Solidification cracking susceptibility of modified 9Cr1Mo steel weld metal during hot-wire laser welding with a narrow gap groove. *Welding in the World* 2014;58(4):469-76.
- [13] Lippold JC et al. Weld Solidification Cracking in Solid-Solution Strengthened Ni-Base Filler Metals. In: Böllinghaus T, Herold H, Cross CE, Lippold JC, editors. *Hot Cracking Phenomena in Welds II*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2008. p. 147-70.

- [14] Lippold JC. Recent Developments in Weldability Testing. In: Böllinghaus T, Herold H, editors. Hot Cracking Phenomena in Welds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2005. p. 271-90.
- [15] Matsuda F et al. Quantitative evaluation of solidification brittleness of weld metal during solidification by in-situ observation and measurement (Rpt. 3). Transactions JWRI 1986; 15(2).
- [16] Aucott L, et al. A Three-Stage Mechanistic Model for Solidification Cracking During Welding of Steel. Metallurgical and Materials Transactions A 2018;49(5):1674-82.
- [17] Lei Z, et al. Mechanism of the crack formation and suppression in laser-MAG hybrid welded 30CrMnSiA joints. Journal of Materials Processing Technology 2017;239:187-94.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ฤทธิชัย เปาเนียม ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ E-mail: rittichai.p@mail.rmutk.ac.th



ไพศาล อินประจง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ E-mail: paisan_20@hotmail.com



เจษฎา แก้ววิจิตร ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ E-mail: Jesada.kt@hotmail.com