การศึกษาปัจจัยในกระบวนการเชื่อมต่อชนเหล็กกล้าเกรด SKD 11 ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกล

Study of Factors in the Butt Welding Process of SKD11 Steel Affecting Microstructure and Mechanical Properties

พิชิตรี ทองดี* อุกฤษฎ์ ธนทรัพย์ทวี และ มาโนช นำฟู

Phichitree Thongdee* Ukrit Thanasuptawee and Manoch Numfu

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก ตาก 63000 ประเทศไทย

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Tak 63000, Thailand

*E-mail: Topup@rmutl.ac.th

Received: Mar 11, 2026

Revised: May 14, 2026

Accepted: Jun 08, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยในกระบวนการเชื่อมต่อชนเหล็กกล้าเกรด SKD 11 ที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อม โดยใช้หุ่นยนต์แขนกลในการเชื่อมมิก พร้อมลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ ขนาด 1.2 มิลลิเมตร ชิ้นงานมีความหนา 6 มิลลิเมตร เชื่อมแบบต่อชนบากร่องตัววีมุมรวม 60 องศา กำหนดระยะ Root Face 2 มิลลิเมตร และ Root Opening 2 มิลลิเมตร โดยทำการทดลอง 3 ปัจจัย ได้แก่ ระยะโผล่ลวด (10, 12, 14 มิลลิเมตร) อัตราการป้อนลวด (5, 6, 7 เมตรต่อนาที) และอุณหภูมิการอบคืนตัวก่อนการเชื่อม (300, 600, 900 องศาเซลเซียส) เพื่อตรวจสอบผลต่อค่าความเค้นแรงดึงของชิ้นงานเชื่อม และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธี Analysis of Variance (ANOVA) ผลการวิเคราะห์พบว่า ภายในช่วงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษานี้ ยังไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองและกราฟ Surface Plot แสดงให้เห็นแนวโน้มว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนลวดและอุณหภูมิในการอบส่งผลต่อค่าความเค้นแรงดึงและลักษณะการหลอมรวมของแนวเชื่อม โดยค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดจากการทดลองมีค่าเท่ากับ 180.00 เมกะปาสคาล ที่ระยะโผล่ลวด 14 มิลลิเมตร อัตราการป้อนลวด 6 เมตรต่อนาที และอุณหภูมิการอบ 600 องศาเซลเซียส ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคพบว่า บริเวณรอยเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) มีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย เพิร์ลไลต์ (Pearlite) เฟอร์ไรต์ (Ferrite) และคาร์ไบด์ (Carbide) รวมทั้งพบการตกผลึกของคาร์ไบด์ในหลายบริเวณ โดยเฉพาะเมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้เกิดกระบวนการคืนตัวของโครงสร้างโลหะมากขึ้น ช่วยลดความเค้นตกค้างและเพิ่มเสถียรภาพของเนื้อโลหะภายหลังการเชื่อม

คำสำคัญ: เหล็กกล้าเกรด SKD11 การเชื่อมมิก การอบคืนตัว

Abstract

This research aims to investigate the factors in the butt welding process of SKD 11 steel that affect the microstructure and mechanical properties of the weld joint. Gas Metal Arc Welding (GMAW) was performed using a robotic welding arm with a 1.2 mm flux-cored wire electrode. The specimens had a thickness of 6 mm and were prepared with a single V-groove butt joint configuration with an included angle of 60°, a root face of 2 mm, and a root opening of 2 mm. Three experimental factors were investigated, including wire stick-out distance (10, 12, and 14 mm), wire feed rate (5, 6, and 7 m/min), and preheating temperature before welding (300, 600, and 900°C), in order to evaluate their effects on the tensile strength of the welded specimens. The obtained data were analyzed using Analysis of Variance (ANOVA). The statistical analysis revealed that, within the parameter ranges investigated in this study, no statistically significant differences were observed at the 95% confidence level. However, the

experimental results and Surface Plot analysis indicated that variations in wire feed rate and preheating temperature tended to influence tensile strength and weld fusion characteristics. The maximum tensile strength obtained from the experiments was 180 MPa at a wire stick-out distance of 14 mm, a wire feed rate of 6 m/min, and a preheating temperature of 600°C. Microstructural analysis showed that the weld zone and the Heat Affected Zone (HAZ) consisted mainly of pearlite, ferrite, and carbide phases. In addition, carbide precipitation was observed in several regions, particularly at elevated preheating temperatures. These conditions promoted tempering of the metallic structure, reduced residual stress, and improved the metallurgical stability of the welded joint.

Keywords: SKD11 grade steel, MIG welding, Tempering

1. บทนำ

อุตสาหกรรมชิ้นส่วนเครื่องจักรกลมีบทบาทสำคัญต่อภาคการผลิต เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของกระบวนการผลิต วัสดุที่นิยมใช้ในการผลิต ได้แก่ เหล็กกล้าเกรด SKD 11 ซึ่งมีคุณสมบัติด้านความแข็งและความทนทานต่อการสึกหรอสูง อย่างไรก็ตาม เมื่อชิ้นส่วนดังกล่าวเกิดความเสียหาย การซ่อมแซมด้วยกระบวนการเชื่อมมักประสบข้อจำกัด เนื่องจากความเค้นตกค้างและการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคจากอิทธิพลความร้อน อาจนำไปสู่การแตกร้าวหรือการเสียรูป ส่งผลให้สมบัติเชิงกล โดยเฉพาะความต้านทานแรงดึง ลดลง อีกทั้งกระบวนการยังมีความซับซ้อนและต้นทุนสูง ซึ่งกระบวนการเชื่อมแบบมิก (Metal Inert Gas: MIG) หรือแมก (Metal Active Gas: MAG) เป็นหนึ่งในเทคนิคที่ได้รับความนิยมในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถให้แนวเชื่อมที่มีประสิทธิภาพสูง ควบคุมพารามิเตอร์ได้ง่าย และเหมาะสำหรับการทำงานร่วมกับระบบอัตโนมัติหรือหุ่นยนต์ อย่างไรก็ตาม สำหรับเหล็กกล้าเกรด SKD 11 ซึ่งมีความสามารถในการชุบแข็งสูง การเชื่อมด้วยกระบวนการดังกล่าวยังคงมีความเสี่ยงต่อการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ในบริเวณเขตได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat-affected zone: HAZ) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความแข็งสูงและความเปราะ ส่งผลให้มีแนวโน้มเกิดการแตกร้าว โดยเฉพาะการแตกร้าวเย็น การเชื่อมเหล็กกล้าเกรด SKD 11 ด้วยการเชื่อม MIG จำเป็นต้องมีการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องอย่างเป็นระบบ เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมและได้คุณภาพงานเชื่อมที่ดี จากข้อจำกัดดังกล่าว ส่งผลให้หลายอุตสาหกรรมเลือกเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่แทนการซ่อมแซม [1]

จากการศึกษาในการทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลของเหล็ก SKD 11 เมื่อชิ้นส่วนมีการชำรุดหรือสึกหรอแล้ว วิศวกรส่วนใหญ่จะไม่นิยมนำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลไปทำการซ่อมแซม เนื่องจากชิ้นงานดังกล่าวจะเกิดความเค้นความเครียดจากการใช้งานมาแล้ว จึงทำให้เกิดการแตกร้าว เสียรูป สึกหรอ ได้ง่าย เมื่อนำไปทำการเชื่อมจะต้องมีการเป่าแก๊สเพื่อให้ความร้อนที่สม่ำเสมอตลอดการเชื่อม จึงทำให้เกิดต้นทุนในการซ่อมบำรุงสูงไปด้วย จึงมีแนวคิดโดยการนำชิ้นงานมาให้ความร้อนหรือเรียกว่า การอบคืนตัว ก่อนการเชื่อมที่อุณหภูมิ 300 600 และ 900 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานไปเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ด้วยการเชื่อมมิก แล้วนำไปอบคืนตัว (Tempering) [2], [3] การอบคืนตัวช่วยลดความแข็งได้ แต่มีผลต่อการเพิ่มความต้านทานการแตกร้าวเย็นได้ หลังจากนั้นนำชิ้นงานทั้งหมดไปทดสอบด้านแรงดึงและตรวจสอบโครงสร้างเพื่อดูโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าเกรด SKD11 [4] ทั้งนี้ผลงานวิจัยสามารถนำไปใช้ในการออกแบบกระบวนการเชื่อมเพื่อลดความเสี่ยงการแตกร้าวในงานอุตสาหกรรม

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาปัจจัยในกระบวนการเชื่อมต่อชนเหล็กกล้าเกรด SKD 11 ที่มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลด้านแรงดึง [5] โดยอาศัยหลักการทางโลหะวิทยาเชิงกายภาพ (Physical metallurgy) ที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุภายใต้วัฏจักรความร้อนจากกระบวนการเชื่อม ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการเกิดเฟสต่าง ๆ เช่น มาร์เทนไซต์ (Martensite) คาร์ไบด์ (Carbide) และออสเทนไนต์ (Austenite) คงเหลือ รวมถึงทฤษฎีเขตได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) [6] ที่ส่งผลต่อความแข็ง ความเปราะ และความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม นอกจากนี้ยังอาศัยแนวคิดความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การเชื่อมกับพลังงานความร้อน (Heat input) ซึ่งถูกควบคุมโดยอัตราการป้อนลวด ระยะโผล่ลวด และอุณหภูมิในการอบ อันมีผลต่ออัตราการเย็นตัวและโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้น

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

เหล็กกล้าเกรด SKD 11 เป็นเหล็กกล้าตามมาตรฐาน JIS ของญี่ปุ่น มีส่วนผสมของคาร์บอน และโครเมียมสูง ทำให้มีความแข็ง ความเหนียว และความทนทานต่อการสึกหรอสูง ชุบแข็งได้ง่าย มีความเหนียว และความทนทานต่อการสึกหรอสูง ขนาดความกว้าง 75 มิลลิเมตร ความยาว 160 มิลลิเมตร ความหนา 6 มิลลิเมตร ส่วนผสมหลักของเหล็กกล้าเกรด SKD 11 ประกอบด้วย 1.44%C 0.31%Si 0.40%M 11.55%Cr [7]

เครื่องเชื่อมมิก Fronius รุ่น TPS 320i ใช้ปรับอัตราการป้อนลวดเชื่อม อัตราการไหลก๊าซ และระยะอาร์ค และในส่วนกระแสไฟเครื่องจะปรับให้อัตโนมัติ

ลวดเชื่อมฟลักซ์คอร์ G71T1 ขนาด 1.2 มิลลิเมตร

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้ในการปกคลุมแนวเชื่อม

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง SOPTOP รุ่น BH200M ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของชิ้นงานทดสอบ

เครื่องทดสอบทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine (UTM) ใช้ในการทดสอบแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่นำมาทดสอบใช้แรงดึงที่ 7,000 นิวตัน และใช้ความเร็วในการดึง 1 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งเป็นความเร็วต่ำ เหมาะสำหรับการทดสอบที่ต้องการความแม่นยำสูง (Quasi-static test) เพื่อควบคุมสภาวะการทดสอบให้คงที่และได้ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่เชื่อถือได้ ถ้าดึงเร็วเกินไป วัสดุอาจดูแข็งแรงเกินจริง ถ้าดึงช้าจะได้ค่าที่ใกล้เคียงสภาพใช้งานจริงมากกว่า

2.2. การออกแบบการทดลอง

ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยกำหนดปัจจัยการทดลองจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ ระยะโผล่ลวด อัตราการป้อนลวดเชื่อม และอุณหภูมิในการอบก่อนเชื่อม โดยแต่ละปัจจัยกำหนดไว้ 3 ระดับ ดังแสดงใน Table 1 และกำหนดชุดการทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง ดังแสดงใน Table 2 เพื่อให้ครอบคลุมช่วงสภาวะการเชื่อมที่ใช้ในการทดลองจริง หลังจากดำเนินการทดลองแล้ว ข้อมูลค่าความเค้นแรงดึงถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Regression Rnalysis และ Analysis of Variance (ANOVA) โดยใช้โปรแกรม Minitab รวมทั้งใช้กราฟ Surface Plot เพื่อศึกษาความสัมพันธ์และแนวโน้มของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงของชิ้นงานเชื่อม [8]

2.3. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานในงานเชื่อม

นำเหล็กไปทำการบากร่องตัววี (V) ผิวหน้ารอยต่อของชิ้นงานคู่ขนานส่วนตรงที่ฐาน (Root Face) 2 มิลลิเมตร จากนั้นทำการบากร่องตัววี (V) โดยมีมุมรวม (Groove Angle) 60 องศา ผิวหน้ารอยต่อของชิ้นงานคู่ขนานส่วนตรงที่ฐาน (Root Face) 2 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างรอยต่อของชิ้นงานทั้งสองที่ฐาน (Root Opening) 2 มิลลิเมตร [9] ดังแสดงใน Figure 1

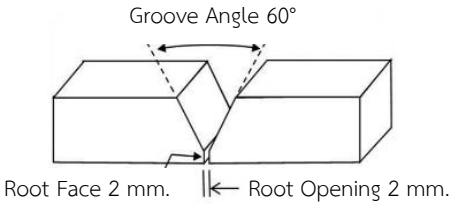


Figure 1 The characteristics of a V-shaped groove (V)

Table 1 Level of experimental factors

Factor	Factor level			Unit
Wire distance	10	12	14	mm
feed rate	5	6	7	m/min
temperature	300	600	900	℃

Table 2 Experimental design schedule

Number	Wire distance (mm)	Feed rate (m/min)	Temperature (°C)
1	10	5	300
2	14	5	300
3	12	6	300
4	10	7	300
5	12	6	300
6	14	6	600
7	12	5	600
8	12	7	600
9	10	6	600
10	14	6	600
11	10	5	900
12	12	6	900
13	10	5	900
14	14	7	900
15	12	6	900

นำเหล็กที่ทำการบากร่องเสร็จแล้วมาทำการตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพาน ให้ได้ขนาด ความกว้าง 75 ยาว 30

มิลลิเมตร ทำการอบคืนตัวชิ้นงานก่อนการเชื่อม ที่อุณหภูมิ 300, 600 และ 900 องศาเซลเซียส [10]-[12] ดังแสดงใน Figure 2



Figure 2 Tempering the workpiece before welding

การตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เครื่องเชื่อม ได้แก่ ความเร็วเดินเชื่อม อัตราการป้อนลวดเชื่อม และอัตราการไหลก๊าซ ตามการออกแบบการทดลอง ทั้งนี้ในส่วนของกระแสเครื่องเชื่อมมิก Fronius รุ่น TPS 320i จะคำนวณกระแสมาให้อัตโนมัติ อยู่ที่ 190 แอมป์ ดังแสดงใน Figure 3



Figure 3 Setting the welding machine parameters according to the experimental design

ทำการวัดระยะโผล่ของลวด วัดจากปลอกหัวเชื่อมหรือนอซเซิล (Nozzle) ออกมา 14 มิลลิเมตร ดังแสดงใน Figure 4



Figure 4 Measuring the wire protrusion distance

ทำการปรับตั้งค่าในการเชื่อมและทำการเชื่อมชิ้นงานตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้จะได้ชิ้นงานหลังผ่านการเชื่อม ดังแสดงใน Figure 5



Figure 5 Appearance of the workpiece after welding

2.4. ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกล

ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่ผ่านกระบวนการเชื่อม จากนั้นนำไปทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8M [13] เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความเค้นแรงดึง ดังแสดงใน Figure 6

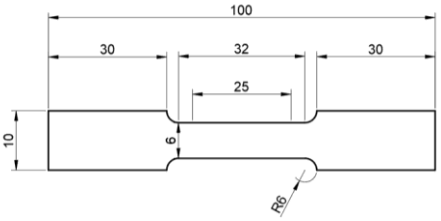


Figure 6 Dimensions and tensile strength of the tested specimens conform to ASTM E8M standard

ลักษณะชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าเกรด SKD 11 หลังผ่านการกัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M ดังแสดงใน Figure 7

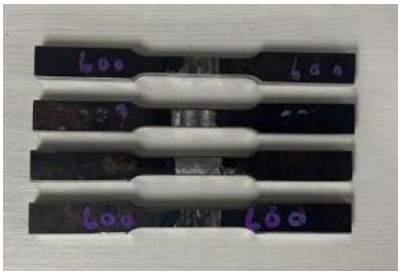


Figure 7 Test pieces after machining according to ASTM E8M standard at temperatures of 300, 600, and 900°C

จากการเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8M ขั้นตอนต่อไปคือ การนำชิ้นงานมาทดสอบแรงดึง ดังแสดงใน Figure 8

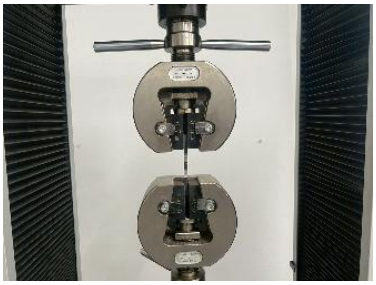


Figure 8 Tensile test

ลักษณะชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบแรงดึง ดังแสดงใน Figure 9

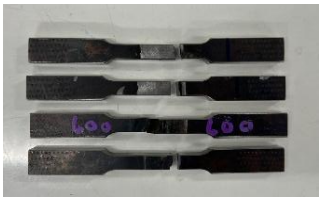


Figure 9 Tensile test piece

2.5. ขั้นตอนในการตรวจสอบโครงสร้าง

นำชิ้นงานมาขัดโดยใช้กระดาษทรายน้ำเบอร์ 150, 220, 320, 400, 500, 600, 800 และ1,000 ตามลำดับและขัดสักหลาดจนชิ้นงานขึ้นเงา หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการกัดด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ และทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อศึกษาโครงสร้างระหว่างปัจจัยที่กำหนดในการทดลองนั้นแปรผันไปในทิศทางใด

3. ผลการวิจัย

3.1. ผลการทดสอบค่าความเค้นแรงดึง

การทดสอบหาค่าความเค้นแรงดึง โดยใช้แรงดึง 7,000 นิวตัน ความเร็วในการดึงทดสอบอยู่ที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาที โดยมีการทดลองจำนวน 15 ครั้ง ผลการทดสอบแรงต้านทานแรงดึงสูงสุด โดยจะทำการดึงทดสอบชิ้นทดสอบจนกระทั่งหักหรือขาด ถ้าแบ่งตาม ลักษณะของชิ้นทดสอบจัดว่าเป็นการทดสอบแบบทำลาย (Destructive Testing) เพื่อหาความแข็งแรงของวัสดุและสมบัติต่าง ๆ หรือถ้าดูตามลักษณะของแรงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบขณะทำการทดสอบก็จัดว่าเป็นการทดสอบแบบแรงคงที่ การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบวัสดุที่สำคัญที่สุด ทั้งนี้เพราะในการออกแบบส่วนใหญ่จะใช้ค่าซึ่งได้จากการทดสอบนี้ไปใช้ในการคำนวณเพื่อกำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน วัตถุประสงค์เพื่อหาสมบัติทางกลของวัสดุ เช่น ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ดังแสดงใน Table 3

Table 3 Tensile stress test results

Number	Wire distance (mm)	Feed rate (m/min)	Temperature (°C)	Tensile strength (MPa)
1	10	5	300	169.77
2	**14**	**5**	**300**	**111.58**
3	12	6	300	114.83
4	10	7	300	128.75
5	12	6	300	161.64
6	14	6	600	170.70
7	12	5	600	168.80
8	12	7	600	150.00
9	**10**	**6**	**600**	**180.00**
10	14	6	600	163.61
11	10	5	900	143.95
12	12	6	900	123.10
13	10	5	900	130.00
14	14	7	900	133.00
15	12	6	900	137.57

จากการทดสอบหาค่าความเค้นแรงดึงโดยมีการทดสอบทั้งหมด 15 การทดลองพบว่าปัจจัยที่ได้ค่าความเค้นแรงดึงมากที่สุดในการทดลอง โดยมีปัจจัย คือ ระยะโผล่ลวด 10 มิลลิเมตร อัตราการป้อนลวด 6 เมตรต่อนาที อุณหภูมิในการอบ 600 องศาเซลเซียส มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 180.00 เมกะปาสกาล และปัจจัยที่ได้ค่าความเค้นแรงดึงต่ำที่สุดในการทดลอง โดยมีปัจจัยคือ ระยะโผล่ลวด 14 มิลลิเมตร อัตราการป้อนลวดเชื่อม 5 เมตรต่อนาที อุณหภูมิในการอบ 300 องศาเซลเซียส มีค่าความเค้นแรงดึงต่ำที่สุดเฉลี่ย 111.58 เมกะปาสกาล (Table 3)

3.2. ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี Analysis of Variance (ANOVA) ดัง Table 4 โดยใช้โปรแกรม Minitab เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงของชิ้นงานเชื่อม พบว่า ภายในช่วงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ ระยะโผล่ลวด 10-14 มิลลิเมตร อัตราการป้อนลวด 5-7 เมตรต่อนาที และอุณหภูมิในการอบ 300-900 องศาเซลเซียส ยังไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากค่า P-value ของทุกปัจจัยมีค่ามากกว่า 0.05 เมื่อพิจารณาค่า Lack-of-Fit พบว่ามีค่า P-value มากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองเชิงเส้นยังสามารถใช้อธิบายแนวโน้มของข้อมูลได้ในระดับที่ยอมรับได้ ทั้งนี้ ผลการทดลองและกราฟ Surface Plot ยังแสดงให้เห็นแนวโน้มว่าการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์การเชื่อมส่งผลต่อการกระจายความร้อน ลักษณะการหลอมรวมของแนวเชื่อม และโครงสร้างจุลภาคบริเวณเขตได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ)

Table 4 Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	152.44	50.81	0.08	0.968
Wire distance	1	61.07	61.07	0.10	0.758
Feed rate	1	30.27	30.27	0.05	0.828
Temperature	1	35.91	35.91	0.06	0.813
Error	11	6747.28	613.39		
Lack-of-Fit	7	5424.57	774.94	2.34	0.214
Pure Error	4	1322.71	330.68		
Total	14	6899.72			

DF = Degree of freedom; Adj SS = Adjusted Sum of Squares;
Adj MS = Adjusted Mean Square

3.3. การเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงด้วยกราฟ Surface Plot

หลังจากทำการทดลองหาความเค้นแรงดึงจะแสดงภาพรวมเป็นกราฟของค่าความเค้นแรงดึงโดยใช้กราฟ Surface Plot [14] เปรียบเทียบด้วยปัจจัยการทดลอง 3 ปัจจัย ระยะโผล่ลวดเชื่อม อัตราการป้อนลวดเชื่อม และอุณหภูมิในการอบชิ้นงาน ได้การทดลองดังนี้

เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงด้วยกราฟ (Surface Plot) ระหว่างปัจจัย ค่า Tensile จะมีค่าสูงสุดเมื่อค่า ระยะโผล่ลวดเชื่อม มีค่าเท่ากับ 14 มิลลิเมตร อัตราการป้อนลวดเชื่อม มีค่าเท่ากับ 6 เมตรต่อนาที และจะลดลงเมื่อค่าทั้งสองนี้มีค่าต่ำหรือสูงเกินไป โดยจุดสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 250 เมกะปาสกาล และจุดต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 100 ถึง 150 เมกะปาสกาล ทำให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสามนี้เป็นแบบไม่ใช่เชิงเส้น และมีจุดที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุดเพียงจุดเดียว เพื่อให้ได้ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ควรตั้งระยะโผล่ลวดเชื่อม เท่ากับ 14 และอัตราการป้อนลวดเชื่อมเท่ากับ 6 เมตรต่อนาที แต่ต้องยืนยันด้วยการทดลองซ้ำ และวิเคราะห์เชิงสถิติก่อนนำไปใช้เป็นพารามิเตอร์ในการเชื่อม ดังแสดงใน Figure 10

Surface Plot tensile ของระยะโผล่ลวดเชื่อม มีค่าเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และอัตราการป้อนลวดเชื่อม มีค่าเท่ากับ 6 เมตรต่อนาที

เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงด้วยกราฟ (Surface Plot) ระหว่างปัจจัย โผล่ลวดเชื่อมและอุณหภูมิในการอบชิ้นงาน ค่า Tensile จะมีค่าสูงสุดเมื่อค่า ระยะโผล่ลวดเชื่อม

มีค่าเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และอุณหภูมิในการอบชิ้นงาน มีค่าเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส และค่าจะต่ำลงเมื่อค่าทั้งสองลดลง โดยรวมแล้วพื้นผิวจะลาดขึ้นจากบริเวณที่ค่าระยะโผล่ลวด และอุณหภูมิการอบต่ำที่สุด ไปยังบริเวณที่ค่าทั้งสองสูงที่สุด พื้นผิวแสดงรูปแบบยอดเดียว หมายความว่ามีจุดค่ากลางที่ให้ผลดีที่สุด ไม่เป็นเส้นตรงหรือหลายยอด เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ให้ใช้ ระยะโผล่ลวดเท่ากับ 14 และอุณหภูมิการอบเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส แต่ควรยืนยันด้วยการทดลองซ้ำและวิเคราะห์เชิงสถิติก่อนนำไปใช้เป็นพารามิเตอร์ในการเชื่อม ดังแสดงใน Figure 11

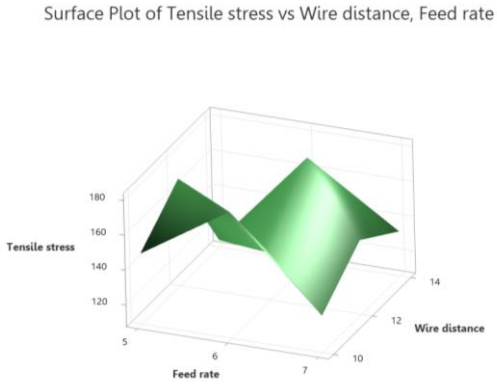


Figure 10 Graph showing effect of wire distance and feed rate on tensile stress

Surface Plot tensile ของระยะโผล่ลวดเชื่อม มีค่าเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และอุณหภูมิในการอบชิ้นงาน มีค่าเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส

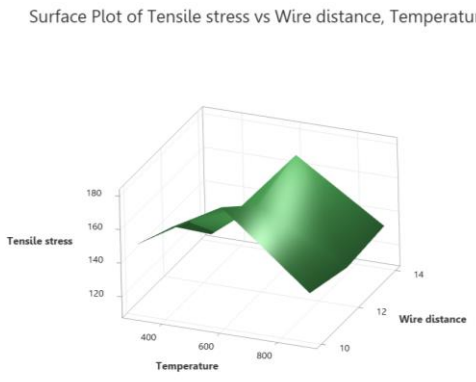


Figure 11 Graph showing effect of wire distance and temperature on tensile stress

เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงด้วยกราฟ (Surface Plot) ระหว่างปัจจัย อัตราการป้อนลวดเชื่อม และอุณหภูมิในการอบ ค่า Tensile จะมีค่าสูงสุดเมื่อค่าอัตราการป้อนลวดเชื่อมมีค่าเท่ากับ 6 เมตรต่อนาที และอุณหภูมิในการอบชิ้นงาน มีค่าเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส กราฟแสดงให้เห็นว่า ความเค้นดึงมีค่าสูงสุดบริเวณกึ่งกลางของพื้นผิว ค่าความเค้นดึงจะลดลงเมื่อค่าอัตราการป้อนลวดเชื่อม และอุณหภูมิในการอบห่างจากช่วงค่าดังกล่าว จากกราฟพื้นผิว (Surface Plot) แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนลวดเชื่อม และอุณหภูมิการอบ เพิ่มขึ้น โดยค่าที่ให้ผลสูงสุดอยู่บริเวณ อัตราการป้อนลวดเชื่อม ประมาณ 6 เมตรต่อนาที และอุณหภูมิการอบประมาณ 600 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นค่าความเค้นแรงดึงจะลดลงเมื่อทั้งสองตัวแปรเกินช่วงดังกล่าว พื้นผิวของกราฟมีลักษณะเป็นผิวโค้งแบบนูนขึ้น มีจุดยอดเดียว แสดงถึงความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ระหว่างปัจจัยระหว่างอัตราการป้อนลวดเชื่อม และอุณหภูมิการอบ ซึ่งมีจุดสมดุลของกระบวนการเชื่อมและการอบที่ให้คุณสมบัติเชิงกลสูงสุดในบริเวณนั้น ดังแสดงใน Figure 12

Surface Plot tensile ของอัตราการป้อนลวดเชื่อม เท่ากับ 6 เมตรต่อนาที และอุณหภูมิในการอบชิ้นงาน มีค่าเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส

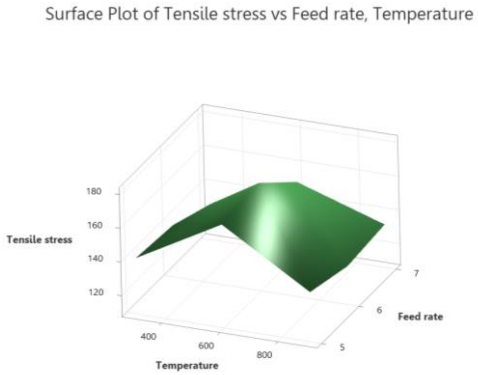
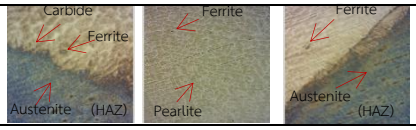


Figure 12 Graph showing effect of feed rate and temperature on tensile stress

3.4. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นงานระดับจุลภาค

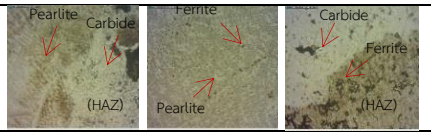
อุณหภูมิอบคืนตัวก่อนเชื่อม 300 องศาเซลเซียส ระยะโผล่ลวดเชื่อม 14 มิลลิเมตร และ อัตราการป้อนลวดเชื่อม มีค่าเท่ากับ 6 เมตรต่อนาที โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมประกอบด้วย ออสเทนไนต์ (Austenite) เฟอร์ไรต์ (Ferrite) และคาร์ไบด์ (Carbide) ในบริเวณแนวเชื่อม เฟอร์ไรต์ (Ferrite) กับ ออสเทนไนต์ (Austenite) ในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) [15] และ เพิร์ลไลต์ (Pearlite) ในเนื้อโลหะพื้นฐานแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมที่อุณหภูมินี้ ช่วยลดความแข็งและความเค้นตกค้างในแนวเชื่อมแต่ยังคงโครงสร้างผสมของเฟสต่าง ๆ อยู่ในแต่ละบริเวณอย่างชัดเจน ดังแสดงใน Table 5

Table 5 Microstructure of the welded workpiece after pre-welding annealing, with a tempering temperature of 300°C

Tempering	Structure		
(°C)	HAZ 1	Weld metal	HAZ 2
300			

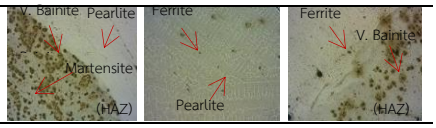
อุณหภูมิอบคืนตัวก่อนเชื่อม 600 องศาเซลเซียส ระยะโผล่ลวดเชื่อม 14 มิลลิเมตร และ อัตราการป้อนลวดเชื่อม มีค่าเท่ากับ 6 เมตรต่อนาที โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมเปลี่ยนไปในทิศทางของเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ที่มีการตกผลึกของคาร์ไบด์ (Carbide) เพิ่มขึ้นในหลายบริเวณ โดยเขตบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) มีความชัดเจนและโครงสร้างมีการคืนตัวมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้เนื้อโลหะมีความเสถียรมากขึ้น ลดความเค้นตกค้าง และทำให้โครงสร้างละเอียดขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ดังแสดงใน Table 6

Table 6 Microstructure of the welded workpiece after pre-welding annealing, with a tempering temperature of 600°C

Tempering	Structure		
(°C)	HAZ 1	Weld metal	HAZ 2
600			

อุณหภูมิอบคืนตัวก่อนเชื่อม 900 องศาเซลเซียส ระยะโผล่ลวดเชื่อม 14 มิลลิเมตร และ อัตราการป้อนลวดเชื่อม มีค่าเท่ากับ 6 เมตรต่อนาที โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมประกอบด้วย เพิร์ลไลต์ (Pearlite) เฟอร์ไรต์ (Ferrite) มาร์เทนไซต์ (Martensite) และวี-เบนไนต์ (V.Bainite) ในหลายบริเวณ โดยใกล้แนวเชื่อมจะมีเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite) และวี-เบไนต์ (V.Bainite) ปรากฏเด่นชัด ในขณะที่บริเวณกลางแนวเชื่อมจะเห็นเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ชัดเจน และบริเวณโลหะพื้นฐานมีวี-เบนไนต์ (V.Bainite) และเฟอร์ไรต์ (Ferrite) แสดงให้เห็นว่าการอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูงมากนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสและปรับสมดุลของโครงสร้างอย่างชัดเจน ส่งผลให้โครงสร้างแตกต่างกันตามระยะห่างจากแนวเชื่อม ดังแสดงใน Table 7

Table 7 Microstructure of the welded workpiece after pre-welding annealing, with a tempering temperature of 900°C

Tempering	Structure		
(°C)	HAZ 1	Weld metal	HAZ 2
900			

4. อภิปรายผลการวิจัย

ปัจจัยในกระบวนการเชื่อมมิก สำหรับวัสดุเหล็กกล้าเกรด SKD 11 โดยมีปัจจัย 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ ได้แก่ ระยะโผล่ลวด อัตราการป้อนลวดเชื่อม และอุณภูมิในการอบก่อนเชื่อม ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

ผลการทดลองพบว่าอัตราการป้อนลวดเชื่อมและอุณหภูมิในการอบมีอิทธิพลต่อความความเค้นแรงดึง โดยพบว่าปัจจัยที่ได้ค่าความเค้นแรงดึงมากที่สุดในการทดลอง โดยมีปัจจัยคือ ระยะโผล่ลวด 14 มิลลิเมตร อัตราการป้อนลวด 6 เมตรต่อนาที อุณหภูมิในการอบ 600 องศาเซลเซียส มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 180.00 เมกะปาสกาล พบว่ามีรอยเชื่อมที่ค่อนข้างสมบูรณ์ ไม่มีรอยแตกร้าวในบริเวณรอยเชื่อม เนื้อเชื่อมของลวดเชื่อม FLUXCORE G71T1 ขนาด 1.2 มิลลิเมตร เข้ากับวัสดุเหล็กกล้าเกรด SKD 11 ได้ค่อนข้างดี เมื่อสังเกตที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ไม่มีเส้นแบ่งเขตอย่างชัดเจนในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เนื่องจากมีการกระจายความร้อนที่ดี เนื้อเชื่อมค่อย ๆ ละเอียดไล่เข้าไปตามเนื้อของวัสดุเหล็กกล้าเกรด SKD 11 จึงทำมีค่าความเค้นแรงดึงสูงที่สุด และปัจจัยที่ได้ค่าความเค้นแรงดึงต่ำที่สุดในการทดลอง คือ ระยะโผล่ลวด 14 มิลลิเมตร อัตราการป้อนลวดเชื่อม 5 เมตรต่อนาที อุณหภูมิในการอบ 300 องศาเซลเซียส มีค่าความเค้นแรงดึงต่ำที่สุดเฉลี่ย 111.58 เมกะปาสกาล พบว่ามีรอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ มีรอยแตกร้าวในบริเวณรอยซึมลึกของรอยเชื่อม เนื้อเชื่อมของลวดเชื่อม FLUXCORE G71T1 ขนาด 1.2 มิลลิเมตร หลอมรวมเข้ากับเนื้อของวัสดุเหล็กกล้าเกรด SKD 11 ได้ไม่ดีเท่าที่ควร เมื่อสังเกตที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) มีเส้นแบ่งเขตอย่างชัดเจนลักษณะคือ มีเส้นสีดำในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เนื่องจากมีการกระจายความร้อนที่ไม่ดีเหมือนกับพารามิเตอร์ที่ได้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด

จากภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการกระบวนการเชื่อม โดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ขนาดขยาย 10 เท่า จะพบโครงสร้างต่าง ๆ ของของเหล็กกล้าเกรด SKD 11 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีการกระจายตัวของเกรนหลาย ๆ เหลี่ยมหรือทรงกลมที่เท่า ๆ กัน เช่น อุณหภูมิที่ 300 องศาเซลเซียส จะพบเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite) เป็นส่วนมากของโครงสร้าง ต่อมาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะพบเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และคาร์ไบด์ (Carbide) ที่มีความแข็งแรงและเปาะลดลง พร้อมทั้งมีความเหนียวและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิที่ 900 องศาเซลเซียส จะพบออสเทไนต์ (Austenite) เป็นการละลายของของแข็งระหว่างคาร์บอนในธาตุเหล็กที่มีอุณหภูมิสูง เมื่อเหล็กเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) จะเปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และซีเมนไทต์ (Cementite) ที่รวมตัวกันเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า เพิร์ลไลต์ (Pearlite)

5. บทสรุป

ผลทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงและการทดสอบโครงสร้างจุลภาค แสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนลวดเชื่อม และอุณหภูมิในการอบ เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อค่าความเค้นแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมโดยจะเห็นได้ว่าจากงานวิจัยที่ผ่านมา ตัวแปรในด้านงานเชื่อมนั้นมีผลต่อการปรับเปลี่ยนไปทั้งทางด้านคุณสมบัติทางและโครงสร้างจุลภาคไปในทิศทางเดียวกัน โดยพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงที่สุด ประกอบด้วย ระยะโผล่ลวด 14 มิลลิเมตร อัตราการป้อนลวด 6 เมตรต่อนาที และอุณหภูมิอบ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้เงื่อนไขนี้ชิ้นงานให้ค่าความเค้นแรงดึงเฉลี่ย 180.00 เมกะปาสกาล พร้อมทั้งแสดงลักษณะรอยเชื่อมที่สมบูรณ์ ไม่มีการแตกร้าว เนื้อเชื่อมหลอมรวมกับเหล็กกล้า SKD 11 ได้ดี และบริเวณ HAZ ไม่มีเส้นแบ่งเขตชัดเจน แสดงถึงการกระจายความร้อนที่เหมาะสม ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสูง ในทางตรงกันข้าม ชุดพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความเค้นแรงดึงต่ำที่สุด ได้แก่ ระยะโผล่ลวด 14 มิลลิเมตร อัตราการป้อนลวด 5 เมตรต่อนาที และอุณหภูมิอบ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่าความเค้นแรงดึงเฉลี่ยเพียง 111.58 เมกะปาสกาล รอยเชื่อมที่ได้มีความไม่สมบูรณ์ เนื้อเชื่อมหลอมรวมกับเหล็กกล้า SKD 11 ได้ไม่ดี อีกทั้งบริเวณ HAZ ปรากฏเส้นแบ่งเขตสีดำชัดเจน บ่งบอกถึงการกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ ด้านโครงสร้างจุลภาคเมื่อส่องด้วยกล้องกำลังขยาย 10 เท่า พบว่าเหล็กกล้า SKD 11 มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตามอุณหภูมิที่อบก่อนการเชื่อม ได้แก่ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส พบโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite) เป็นส่วนใหญ่ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ปรากฏโครงสร้างเฟอร์ไรต์และคาร์ไบด์ (Carbide) ซึ่งช่วยเพิ่มความเหนียวและความแข็งแรง และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบโครงสร้างออสเทไนต์ (Austenite) ซึ่งเมื่อเย็นตัวลงจะเปลี่ยนกลับเป็นเฟอร์ไรต์ และซีเมนไทต์ (Cementite) รวมตัวกันเป็นเพิร์ลไลต์ (Pearlite) และในส่วนผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าระยะโผล่ลวดเพียงอย่างเดียวไม่ได้กำหนดคุณภาพรอยเชื่อม แต่ต้องสัมพันธ์กับอัตราการป้อนลวด กระแส อุณหภูมิหรือองค์ประกอบอื่น ๆ [16] เพื่อสร้างสมดุลของการเชื่อมต่อวัสดุ หากอัตราการป้อนลวดสูงเกินไปที่อุณหภูมิต่ำ จะเกิดรอยซึมลึกไม่สมบูรณ์และเกิดความเค้นสะสม

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการทดลองเพื่อทำวิจัยในครั้งนี้

7. References

[1] Nurinram, K., Phaoniam, R. and Peansukmanee, S. 2025. Weld cold cracking susceptibility in SKD 11 die steel during MAG welding using implant testing. **Solid State Phenomena.** 378: 3-11.

[2] Chaowakarnkool, S. and Hwanseang, W. 2024. The study examines factors influencing the weldability of SKD 11 grade steel used in mold manufacturing through the Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) process. **Journal of Research on Technology and Innovation.** 8(1): 13-26. (*in Thai*)

[3] Mukhammad, A.F.H. and et al. 2023. Determination of the ballistic performance ramie-fiber-reinforced epoxy composite-sic ceramic in multilayered armor system. **Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.** 2(12): 55-63.

[4] Sutrisno, Nurtanto, F. and Darmanto, S. 2023. Analysis of the effect of tempering temperature

on the formation of microstructure and hardness values in SKD11 steel. **International Journal of Multidisciplinary Research and Analysis.** 6(1): 45-50.

[5] Saeng-in, S. 2017. Effect of heat dissipation on weld profile in carbon steel at different thickness by Gas Metal Arc Welding (GMAW). **Journal of Applied Science.** 16(2): 23-36. (*in Thai*)

[6] Kaewsupat, C. and et al. 2018. Influence of heat on steel grade SKD11 through the Mig welding. In: **Proceedings of the 2nd Conference on Innovation Engineering and Technology for Economy and Society,** 16 December 2018. Bangkok, Thailand.

[7] Murakami, Y. 2019. **Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions. 2nd edition.** Cambridge: Academic Press.

[8] Wirotrattanaphaphisan, K. and et al. 2023. The prediction of optimal parameters in the TIG welding of AISI 304 stainless steel using an artificial neural network. **Kasem Bundit University Research Journal.** 13(2): 85-106. (*in Thai*)

[9] Shunmugam, M.S. and Kanthababu, M. 2020. **Advances in Simulation, Product Design and Development: Proceedings of AIMTDR 2018.** Singapore: Springer Nature.

[10] Canale, L.C.F., Mesquita, R.A. and Totten, G.E. 2008. **Failure Analysis of Heat Treated Steel Components.** Almere: ASM International.

[11] Mac, T.B. and et al. 2021. A study on mechanical properties of SKD11 steel at elevated temperatures. In: **Proceedings of the International Conference on Advanced Mechanical Engineering, Automation, and Sustainable Development 2021,** 4-7 November 2021. Ha Long, Vietnam.

[12] Prasad, K.S. and et al. 2012. Unconstrained optimization for maximizing ultimate tensile strength of pulsed current micro plasma arc welded Inconel 625 sheets. In: **Proceedings of the International Conference on Information Systems Design and Intelligent Applications 2012,** 5-7 January 2012. Visakhapatnam, India.

[13] Ekpemogu, A.I. and et al. 2021. Mechanical properties of gas metal arc weldments of AISI 304 stainless steel using different shielding gas compositions. **International Journal of Engineering Research in Africa.** 54: 1-11.

[14] Vasudevan, H., Kottur, V.K.N. and Raina, A.A. 2019. **Proceedings of International Conference on Intelligent Manufacturing and Automation.** Singapore: Springer Nature.

[15] Surapunt S. and Kanchanasangthong T. 2016. Mechanical property evaluation of gas-metal-arc welded SKD 61 hot work tool steel. In: Ochsner, A. and Altenbach, H. (eds.) **Machining, Joining and Modifications of Advanced Materials.** Singapore: Springer Nature.

[16] Somani, C.A. and Lalwani, D.I. 2018. Experimental investigation of gas metal arc welding (GMAW) process using developed articulator. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.** 455: 012073.