

# การพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อมพอกผิวต่อการต้านทานการสึกหรอด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คแบบลวดร้อนโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

สิทธิชัย เจริญราช\* ยอดเปรม ภูกำเนิด และ สุริยา ประสมทอง

สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม

\* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Akecharone@npu.ac.th

วันที่รับบทความ: 29 มีนาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 6 กรกฎาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 16 กรกฎาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 30 สิงหาคม 2564

**บทคัดย่อ:** การพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อมพอกผิวแข็งโดยใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง โดยทำการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนเพื่อศึกษาผลของปัจจัย 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟในการเชื่อม กระแสไฟลวดร้อน และความเร็วเดินเชื่อมต่อการต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อม จากการทดลองพบว่าปัจจัยในการทดลองทั้ง 3 ปัจจัย ส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง ข้อมูลการทดลองที่ได้มีความเหมาะสมกับสมการควอดราติก เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจสูง (ร้อยละ 97.80) เมื่อนำสมการที่ได้มาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองสามมิติของปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมและกราฟโครงร่างเพื่อพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อม พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อม คือ กระแสไฟในการเชื่อมที่ 200.505 Amp กระแสไฟลวดร้อน 180 Amp และความเร็วในการเชื่อมที่ 80 mm/min ให้ปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมต่ำกว่า  $3.4366 \text{ mm}^3$  จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าที่เหมาะสมและการทดสอบจริง ผลการเปรียบเทียบพบว่ามีความสอดคล้องกัน

**คำสำคัญ:** สภาวะที่เหมาะสม; ลวดร้อน; วิธีพื้นผิวตอบสนอง

# Consideration of the Optimizing Condition in Welding Hardfacing on Wear Resistance with Hot-Wire Gas Tungsten Arc Welding Process by Response Surface Methodology (RSM)

Sittichai Charoenrat\*, Yodprem Pookamnerd and Suriya Prasomthong

Division of Industrial Technology, Faculty of industrial Technology, Nakhon Phanom University

\* Corresponding author, E-mail: Akecharone@npu.ac.th

Received: 29 March 2021; Revised 6 July 2021; Accepted: 16 July 2021

Online Published: 30 August 2021

**Abstract:** Response Surface Methodology (RSM) was used to determine optimum condition for welding hardfacing. Box-Behnken experimental design was applied to optimize the welding current, hot wire current and welding speed on wear resistant of weld. The results showed that these three factors affected on wear rate of welding hardfacing. The obtained experimental data were suitable for the quadratic equation because it showed high coefficient of determination (97.80 %). The 3D response surface plot and the contour plot derived from the mathematical models were applied to determine the optimal condition. The optimum welding condition were follows: welding current 200.505 amp, hot wire current 180 amp, and welding speed 80 mm/min, the wear rate lower of weld was 3.4366 mm<sup>3</sup>. The optimization and experiment results were then compared. The results of the comparison showed a good correspondence.

**Keywords:** Optimization; Hot wire; Response Surface Methodology



## 1. บทนำ

การเชื่อมพอกผิวแข็ง (Welding Hardfacing) อาศัยการเกิดสารประกอบรวมกันระหว่างโลหะเติม และโลหะเชื่อมเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลให้กับแนวเชื่อม [1] โดยการเชื่อมพอกผิวแข็งในปัจจุบันที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมีหลากหลายกระบวนการ เช่น การเชื่อมลวดหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal Arc Welding, SMAW) การเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding, GMAW) การเชื่อมแก๊สทังสเตนอาร์ค (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) การเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding, SAW) การเชื่อมพลาสมา (Plasma Transferred Arc Welding, PTA) [2-5] ซึ่งความแตกต่างของกระบวนการเชื่อมเหล่านี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการเชื่อมและอัตราการเงาของแนวเชื่อม การต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งมักพบในแนวเชื่อมที่มีความแข็งสูงแต่ข้อเสียคือความเหนียวต่ำ และมีรายงานว่า การต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อมที่ดีต้องมีทั้งความแข็งและความเหนียวที่เพียงพอ [6-8] ซึ่งสมบัติทางกลทั้งสองที่กล่าวมามีขึ้นอยู่กับการยึดเกาะของแนวเชื่อม [9-11] กระบวนการเชื่อม SMAW, GMAW, SAW และ PTA ล้วนแล้วแต่ให้ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูง ซึ่งกระบวนการเหล่านี้มีพื้นที่แนวการหลอมละลายและพื้นที่ที่กระทบร้อนขนาดใหญ่อาจส่งผลให้เกิดการเสียรูปของโลหะเชื่อมได้ง่าย เช่น การบิดงอ ที่เกิดจากความเค้นตกค้าง ตลอดจนความร้อนที่สูงเกินไปมักทำให้เกิดโครงสร้างวิตแมนสแตทเทนเฟอร์ไรต์ (Widmanstätten Ferrite) บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนหลังจากการเย็นตัวของแนวเชื่อมซึ่งไม่ส่งผลดีต่อแนวเชื่อม

กรณีรับแรงกระแทกเนื่องจากโครงสร้างวิตแมนสแตทเทนเฟอร์ไรต์มักมีความเปราะเมื่อเทียบกับโครงสร้างอื่น อีกทั้งความร้อนที่สูงเกินไปส่งผลให้ระยะเวลาในการเย็นตัวของแต่ละชั้นในแนวเชื่อมนานทำให้ลดประสิทธิภาพด้านเศรษฐศาสตร์จากกระบวนการที่ยาวนานขึ้น [12] ส่วนกระบวนการเชื่อม GTAW เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น แต่ไม่ได้รับความนิยมในการเชื่อมที่มีอัตราการเติมสูง เนื่องจากไม่สามารถเติมลวดเชื่อมได้อย่างต่อเนื่อง

ปัจจุบันกระบวนการเชื่อม GTAW ถูกออกแบบให้สามารถเติมลวดเชื่อมได้อย่างอัตโนมัติ โดยมีชุดป้อนลวดแยกออกจากแหล่งพลังงานสามารถปรับระดับความเร็วในการเติมลวดเข้าสู่บ่อหลอมได้โดยลวดเชื่อมวิ่งผ่านชุด Contact Tube ที่สามารถปรับกระแสไฟจากชุดให้ความร้อนลวดเชื่อม (Wire Heating Power source) ซึ่งเป็นตัวสร้างความต้านทานให้ลวดเชื่อมก่อนเข้าสู่บ่อหลอมละลาย เรียกว่ากระบวนการเชื่อมแก๊สทังสเตนอาร์คแบบลวดร้อน (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW-Hot Wire) จึงเป็นไปได้ว่าการเชื่อมที่ให้ความร้อนกับลวดเชื่อมก่อนเข้าสู่บ่อหลอมละลายจะช่วยให้การอาร์คเสถียรและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของแนวเชื่อมได้ โดย Schreiber และคณะวิจัย [13] ได้เปรียบเทียบขนาดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบลวดร้อนพบว่าปริมาณความร้อนในแนวเชื่อมส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมกล่าวคือความร้อนในแนวเชื่อมต่ำขนาดของทังสเตนคาร์ไบด์ในแนวเชื่อมมีขนาดใหญ่ แต่เมื่อความร้อนในแนวเชื่อมสูงขึ้นขนาดของทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กลง ซึ่งขนาดของโครงสร้างจุลภาคที่



เหล็กงิลโหะหมักจะมีความแข็งและความแข็งแรงสูงขึ้น Gao และคณะวิจัย [14] ได้พัฒนากระบวนการเชื่อม แก๊สทั้งสแตนเลสอาร์คแบบลวดร้อนในการเชื่อมพอกผิวแข็ง ด้วยลวดเชื่อมทั้งสแตนเลสอาร์คพบว่ากระแสลวดร้อน สามารถเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ในแนวเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ Huan และคณะวิจัย [15] ได้ศึกษากระบวนการเชื่อมอลูมิเนียมกับเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้ลวดเชื่อมคู่ระหว่างลวดทองแดงกับลวดอลูมิเนียมแบบลวดร้อนพบว่าความแข็งแรงแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นกว่ากรณีการใช้ลวดแบบปกติ และมีหลากหลายงานวิจัยที่กล่าวถึงประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อมแบบ GTAW-Hotwire

จากที่กล่าวมาเบื้องต้นพบว่ากระบวนการเชื่อม GTAW-Hot wire เริ่มมีบทบาทในกระบวนการเชื่อม โลหะเพิ่มสูงขึ้นในอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงมีความจำเป็น อย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาค้นคว้าวิจัยในการเชื่อม เช่น กระแสไฟเชื่อม กระแสไฟลวดร้อน ความเร็วในการเชื่อม ฯลฯ เพื่อเป็นข้อมูลในกระบวนการผลิตที่จะเกิดขึ้นทั้งในปัจจุบันและอนาคต โดยการหาปัจจัยที่เหมาะสมนิยมใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) [16] มาช่วยในการวิเคราะห์ซึ่งวิธี RSM เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดหรือความเหมาะสมต่อผลนั้น ทำให้ง่ายในการจัดการและการอธิบายผลเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น เช่น Ragavendran และคณะวิจัย [17] ตรวจสอบสภาวะที่เหมาะสมของการเชื่อม

โดยใช้ความร้อนร่วมระหว่างเลเซอร์กับการเชื่อม TIG ทำการตรวจสอบการซึมลึกของแนวเชื่อมด้วยวิธี RSM พบว่าความแม่นยำของแบบจำลองอยู่ในเกณฑ์ดี Kiaee และคณะวิจัย [18] ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรกระบวนการเชื่อม GTAW ที่ส่งผลต่อแรงดึงและความแข็งแรงของแนวเชื่อมด้วยวิธี RSM จากการตรวจสอบพบว่ากระแสไฟในการเชื่อม 130 Amp ความเร็วในการเชื่อม 9.4 cm/min และอัตราการไหลของแก๊ส 15.1 L/min ให้ค่าแรงดึงและความแข็งแรงเชื่อมที่ดีที่สุด Selvamani และคณะวิจัย [19] ประยุกต์ใช้วิธี RSM สำหรับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการต่อเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน พบว่าวิธีการ RSM สามารถออกแบบกระบวนการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ Srivastava และคณะวิจัย [20] ศึกษาสภาวะตัวแปรกระบวนการที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อม GMAW ด้วยวิธี RSM จากการดำเนินการพบว่า RSM สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังมีหลากหลายงานวิจัยที่กล่าวถึงการหาสภาวะในการเชื่อมที่เหมาะสมด้วยวิธี RSM [21-22] ดังนั้นเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยในการเชื่อมต่อปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อม ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้วิธี RSM และการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design, BBD) [16] มาวิเคราะห์ปัจจัยในการเชื่อม ได้แก่ กระแสไฟเชื่อม กระแสไฟลวดร้อน และความเร็วในการเชื่อมโดยคาดหวังว่าวิธี RSM จะสามารถออกแบบกระบวนการเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นประโยชน์สำหรับผู้ผลิต ตลอดจนการศึกษาดำเนินงานเชื่อมต่อไป



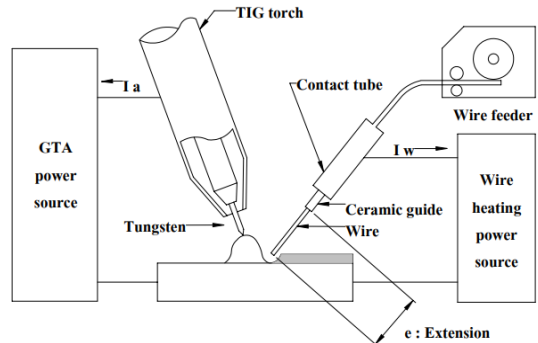
## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 วัสดุและกระบวนการเชื่อม

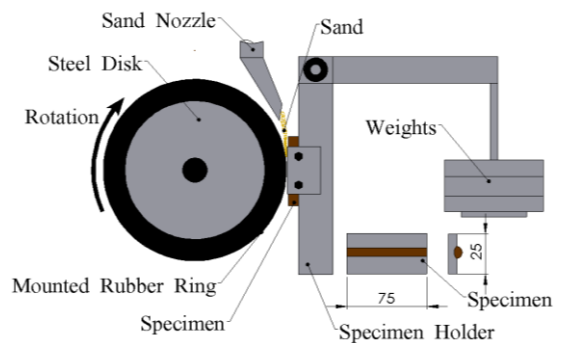
รูปที่ 1 แสดงระบบการเชื่อม GTAW-Hot wire ในการทดลองใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในการเชื่อมเป็นแบบรักษาระยะแฉงที่ใช้ทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรดขนาด 3.2 mm. มุมอิเล็กโทรด 30° ด้วยการต่อขั้วไฟฟ้าแบบ DCEN แก๊สคลูมอาร์กอน 99 % อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 L/min เติมลวดแบบอัตโนมัติความเร็วในการเติม 100 mm/min ใช้เครื่องเชื่อม GTAW-Hot wire ยี่ห้อ EWM รุ่น T351 Tetrix ระบบแรงดันคงที่ขนาด 300 Amp ทำการเชื่อมแบบแนวเดี่ยวนบนเหล็กกล้าคาร์บอน เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์พอกผิวแข็งกลุ่มเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 mm ส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1

### 2.2 การตรวจสอบการสึกหรอแนวเชื่อม

การทดสอบการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-G65 / Procedure A ชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นผ้าขนาด 75 x 25 mm ขัดด้วยทรายละเอียดอัตราการไหลของทราย 300 g/min เวลาในการทดสอบ 30 min น้ำหนักทดสอบ 130 N สำหรับการทดสอบการสึกหรอแสดงดังรูปที่ 2 และการเตรียมชิ้นทดสอบแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 ระบบการเชื่อม GTAW – Hot wire [23]

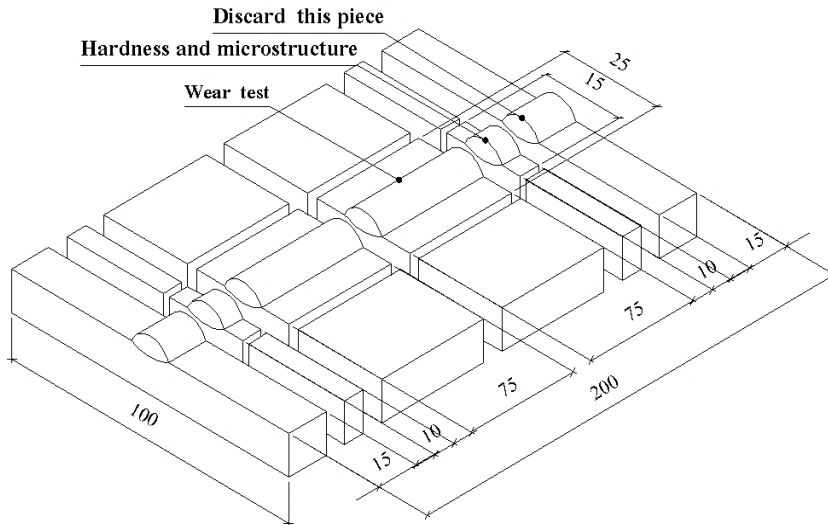


รูปที่ 2 การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM-G65 [23]

อุปกรณ์ควบคุมความเร็วในการเชื่อมคงที่ดัดแปลงจากเครื่องตัดโลหะแผ่นด้วยแก๊สทำให้การเชื่อมเป็นแบบอัตโนมัติ สามารถปรับตั้งความเร็วการเคลื่อนหัวเชื่อมได้

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมและวัสดุในการทดลอง

Material	Element (% wt)						
	C	Cr	Mn	Si	V	Mo	Fe
EN 14700T Fe8	0.500	8.500	1.500	2.500	-	-	Bal.
Carbon steel	0.420	0.560	0.510	0.360	0.110	0.005	Bal.



รูปที่ 3 การเตรียมชิ้นทดสอบสมบัติแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง [23]

### 2.3 การออกแบบการทดลอง

การทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design, BBD) ที่มี 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟในการเชื่อม (Welding Current, X1) กระแสไฟลวดร้อน (Hot wire Current, X2) และ ความเร็วในการเชื่อม (Welding Speed, X3) โดยการกำหนดระดับของปัจจัยพิจารณาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและข้อจำกัดของเครื่องมือในการทดลอง ซึ่งระดับของปัจจัยในการทดลองมี 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับปานกลาง (0) และระดับสูง (1) แสดงดังตารางที่ 2 และลำดับการทดลองดังตารางที่ 3 การวิเคราะห์ผลการทดลองใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้แก่ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) และ

การวิเคราะห์ความแปรปรวน จากนั้นสร้างสมการทำนายปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมโดยนำค่าของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยของการสึกหรอแนวเชื่อมให้อยู่ในรูปของสมการที่ (1) เมื่อ Y คือ ค่าผลตอบสนอง (การสึกหรอของแนวเชื่อม) ในส่วนของการสร้างพื้นผิวตอบสนองของปริมาณการสึกหรอที่ได้จากการทดลองทำการเปรียบเทียบปัจจัยในการทดลอง คือ กระแสไฟในการเชื่อมกับกระแสไฟลวดร้อน และความเร็วในการเชื่อมด้วย ตลอดจนหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด และใช้วัดความพึงพอใจของผลตอบ (Composite Desirability : D) ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ถ้า D มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ [24]

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$



ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับของปัจจัยแต่ละการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ		
	-1	0	1
Welding Current ( $X_1$ ) (Amp)	150	200	250
Hot wire current ( $X_2$ ) (Amp)	120	150	180
Welding Speed ( $X_3$ ) (mm/min)	80	100	120

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการสึกหรอ

ตารางที่ 3 แสดงผลการตรวจสอบการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งพบว่ามีความแปรปรวนการสึกหรอ (Volume loss) อยู่ในช่วง 3.4935 – 11.0031 mm<sup>3</sup> การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยค่าการตอบสนองใช้แบบจำลองการถดถอยที่ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  พบว่าการจำลองแบบ quadratic มีความเหมาะสมโดยพิจารณาจากค่า p-value ( $p < 0.05$ ) lack of fit ( $p \geq 0.05$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) สูงจากการวิเคราะห์ค่า R-Sq ในตารางที่ 4 แสดงการวิเคราะห์การถดถอยจะเห็นได้ว่าค่า R-Sq มีค่าร้อยละ 97.80 หมายความว่าตัวแปรอิสระ (กระแสไฟในการเชื่อม กระแสไฟลวดร้อน และความเร็วในการเชื่อม) สามารถอธิบายความแปรผันหรือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร แสดงว่าแบบจำลองสามารถนำไปสร้างสมการทำนายหาค่าผลตอบได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการตรวจสอบความผันแปรของแบบจำลองจากการ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าค่า p-value ของเทอมอันตรกิริยาเท่ากับ 0.046 และค่าเทอมกำลังสองมีค่าเท่ากับ 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด แสดงว่ามีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่พื้นผิวตอบสนองอาจกล่าวได้ว่าสามารถใช้สมการแบบจำลองกำลังสองสำหรับการทำนายอัตราการสึกหรอของแนวเชื่อมจากการตรวจสอบการสึกหรอ การสร้างสมการทำนายปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งโดยนำค่าของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยการสึกหรอแสดงในตารางที่ 4 มาเขียนแสดงดังสมการที่ (2) เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-Fit) ในตารางที่ 5 พบว่าค่า p-value ของ Lack-of-Fit มีค่าเท่ากับ 0.074 ซึ่งมีใกล้เคียงและมีค่ามากกว่า 0.05 [25] อาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองนี้มีความเพียงพอของตัวแปรในสมการ จึงสามารถนำสมการมาทำนายปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งได้

$$\text{Volume loss} = 4.634 + 0.602X_1 - 1.295X_2 - 0.324X_3 + 0.521X_2^2 - 0.149X_3^2 - 0.712X_1X_2 \quad (2)$$



ตารางที่ 3 ปัจจัยและพารามิเตอร์ในการทดลอง

Run	Factor of Experimental			Volume loss (mm <sup>3</sup> )
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	
1	200(0)	150(0)	100(0)	4.524
2	200(0)	150(0)	100(0)	4.521
3	150(-1)	180(1)	100(0)	8.061
4	250(1)	180(1)	100(0)	7.011
5	150(-1)	150(0)	80(-1)	7.342
6	200(0)	150(0)	100(0)	5.174
7	200(0)	120(-1)	80(-1)	7.301
8	250(1)	150(0)	120(1)	8.865
9	150(-1)	150(0)	120(1)	6.923
10	200(0)	180(1)	80(-1)	3.493
11	200(0)	150(0)	100(0)	4.488
12	150(-1)	120(-1)	100(0)	9.205
13	250(1)	150(0)	80(-1)	9.469
14	200(0)	150(0)	100(0)	4.464
15	250(1)	120(-1)	100(0)	11.003
16	200(0)	180(1)	120(1)	3.904
17	200(0)	120(-1)	120(1)	5.323

ตาราง 4 การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นผิวตอบสนอง

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	4.634	0.226	20.53	0.000
Welding Current	0.602	0.178	3.37	0.012
Hot wire current	-1.295	0.178	-7.26	0.000
Welding Speed	-0.324	0.178	-1.81	0.113
(Hot wire current)*( Hot wire current)	0.521	0.246	2.12	0.072
(Welding Speed)*( Welding Speed)	-0.149	0.246	-0.61	0.563
(Welding Current)*( Welding Speed)	-0.712	0.252	-2.82	0.026

S = 0.504824, R-sq = 97.80 %, R-sq (adj) = 94.98 %





ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	79.368	8.818	34.60	0.000
Linear	3	17.160	5.720	22.45	0.001
Square	3	58.746	19.582	76.84	0.001
Interaction	3	3.461	1.153	4.53	0.046
Error	7	1.783	0.254		
Lack-of-Fit	3	1.416	0.472	5.15	0.074
Pure Error	4	0.367	0.091		
Total	16	81.152			

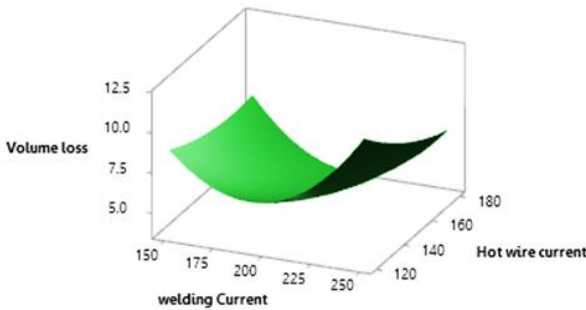
การสร้างพื้นผิวตอบสนองของปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมเมื่อได้สมการสำหรับการทำนายปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมแล้วจึงนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 4 จากกราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งรูปที่ 4 (ก) แสดงระดับของกระแสไฟในการเชื่อมกับระดับของกระแสไฟลวดร้อนพบว่าเมื่อระดับของกระแสไฟในการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นแนวโน้มของปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น แต่พบว่าเมื่อระดับของกระแสไฟลวดร้อนเพิ่มขึ้นแนวโน้มของการสึกหรอแนวเชื่อมลดลง อาจเกิดจากกระแสไฟเชื่อมสูงแนวโน้มของปริมาณการเงาจึงเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ขนาดปริมาณการเงาจึงระหว่างโลหะเชื่อมกับวัสดุเชื่อมมากเกินไปทำให้ความแข็งของแนวเชื่อมลดลง จากนั้นเมื่อนำกราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองอิทธิพลร่วมระหว่างกระแสไฟในการเชื่อมกับกระแสไฟลวดร้อนดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) มาแสดงในลักษณะกราฟโครงร่าง จะเห็นความสัมพันธ์ของกระแสไฟในการเชื่อมกับกระแสไฟลวดร้อนต่อปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear effect) ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) โดยเส้นโค้ง

ด้านบนสุดในพื้นที่สีน้ำเงินเข้มแสดงการสึกหรอของแนวเชื่อมต่ำกว่า 4 mm<sup>3</sup> ส่วนเส้นโค้งที่ต่ำลงมาแสดงอัตราการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่เพิ่มขึ้นเป็น 4 6 และ 8 mm<sup>3</sup> ตามลำดับ

รูปที่ 5 แสดงพื้นผิวตอบสนองปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมระหว่างกระแสเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมพบว่าปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมต่ำสุดที่กระแสไฟเชื่อมระดับกลางแต่เมื่อลดหรือเพิ่มกระแสไฟเชื่อมแนวโน้มของปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นซึ่งแตกต่างจากความเร็วเชื่อมเมื่อทำการลดหรือเพิ่มความเร็วยุติจะไม่ส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) จากนั้นนำอิทธิพลร่วมของกระแสไฟเชื่อมกับความเร็วเชื่อมมาแสดงในลักษณะกราฟโครงร่าง จะเห็นความสัมพันธ์ของกระแสไฟเชื่อมกับความเร็วเชื่อมส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 5 (ข) โดยที่เส้นโค้งบริเวณกึ่งกลางแสดงถึงปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมต่ำสุดที่ 5 m<sup>3</sup> ส่วนเส้นโค้งถัดออกไปจะแสดงถึงปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมที่เพิ่มสูงขึ้น คือ 5 6 7 และ 8 mm<sup>3</sup> ตามลำดับ

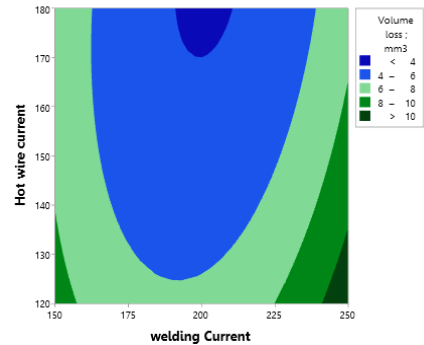


Surface Plot of Volume loss ; mm3 vs Hot wire current, welding Current



(ก)

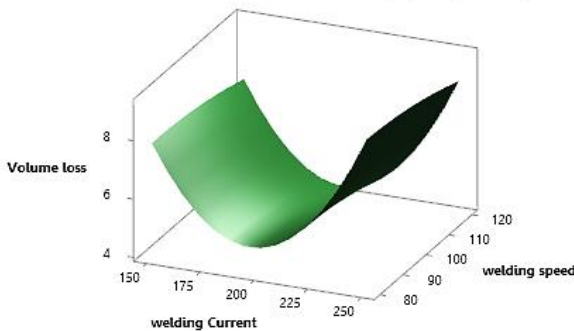
Contour Plot of Volume loss ; mm3 vs Hot wire current, welding Current



(ข)

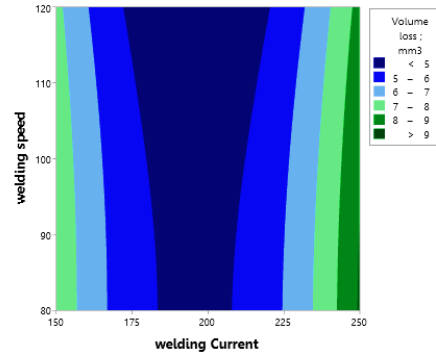
รูปที่ 4 แสดงการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (ก) พื้นผิวตบสนอง (ข) กราฟโครงสร้าง ระหว่างกระแสไฟในการเชื่อมและกระแสไฟลวดร้อน

Surface Plot of Volume loss ; mm3 vs welding speed, welding Current



(ก)

Contour Plot of Volume loss ; mm3 vs welding speed, welding Current



(ข)

รูปที่ 5 แสดงการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (ก) พื้นผิวตบสนอง (ข) กราฟโครงสร้าง ระหว่างกระแสไฟในการเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม

จากนั้นทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของปัจจัยระหว่างกระแสไฟลวดร้อนและความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลต่อ ดังรูปที่ 6 พบว่าปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมลดลงเมื่อเพิ่มกระแสไฟลวดร้อนสูงขึ้น แต่ความเร็วในการเชื่อมไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมมากนัก ดังรูปที่ 6

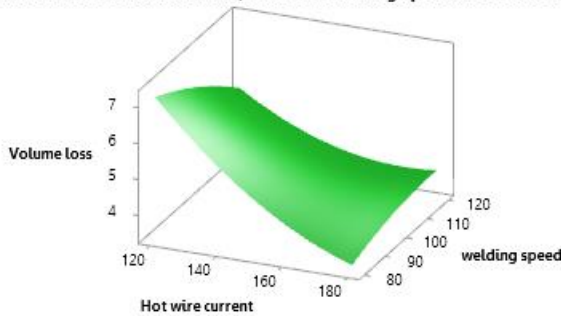
(ก) จากนั้นนำกราฟพื้นผิวตบของอิทธิพลระหว่างกระแสไฟลวดร้อนกับความเร็วในการเชื่อมมาแสดงในลักษณะกราฟโครงสร้าง ดังรูปที่ 6 (ข) พบว่ากระแสไฟลวดร้อนและความเร็วในการเชื่อมมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง โดยที่เส้นโค้งทางขวาสุดของกราฟแสดงถึงปริมาณอัตราการสึกหรอแนวเชื่อมน้อยกว่า 4 mm<sup>3</sup>



ส่วนเส้นโค้งตัดออกไปแสดงปริมาณการสึกหรอของการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้อัตราการสึกหรอของแนวเชื่อมต่ำสุดโดยใช้ฟังก์ชัน response optimizer พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการดำเนินการสึกหรอของแนวเชื่อม คือ กระแสไฟใน

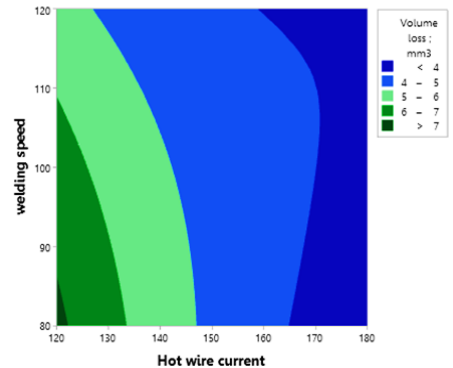
แนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นเป็น 4 5 และ 6 mm<sup>3</sup> ตามลำดับ การเชื่อมที่ 200.505 Amp กระแสไฟลวดร้อน 180 Amp และความเร็วในการเชื่อมที่ 80 mm/min ให้ปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมต่ำสุดเฉลี่ยที่ 3.4366 mm<sup>3</sup> โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 7

Surface Plot of Volume loss ; mm3 vs welding speed, Hot wire current



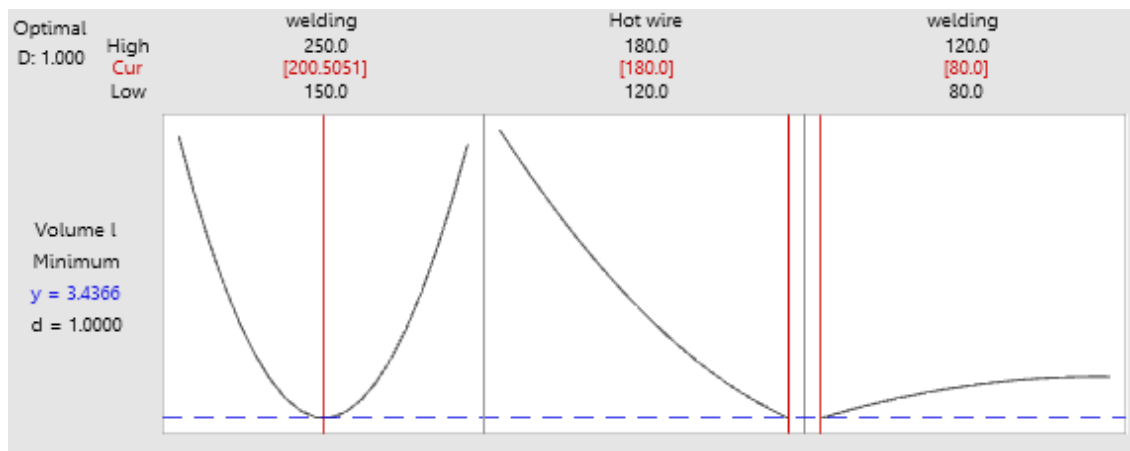
(ก)

Contour Plot of Volume loss ; mm3 vs welding speed, Hot wire current



(ข)

รูปที่ 6 แสดงการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (ก) พื้นผิวตอบสนอง (ข) กราฟโครงร่าง ระหว่างกระแสไฟในการเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม



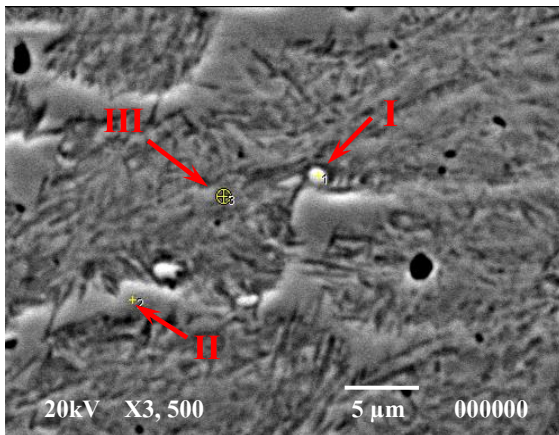
รูปที่ 7 การวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยต่อการสึกหรอของแนวเชื่อมพอก



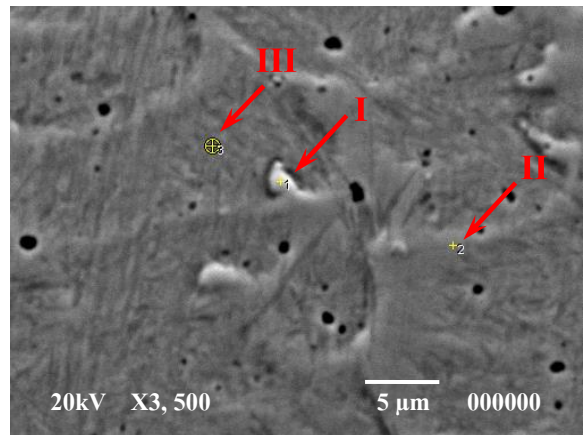
### 3.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น JEOL Scanning electron microscope JSM-5410LV จากการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองดังแสดงในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าปัจจัยที่ให้ค่าการต้านทานการสึกหรอต่ำสุด คือ การทดลองที่ 10 ให้ค่าการต้านทาน

การสึกหรอที่  $3.4935 \text{ mm}^3$  และปัจจัยการทดลองที่ให้ค่าการต้านทานการสึกหรอสูงสุด คือ การทดลองที่ 15 ให้ค่าการต้านทานการสึกหรอที่  $11.0031 \text{ mm}^3$  จึงนำปัจจัยทั้งสองมาการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 8 จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ให้อัตราการสึกหรอต่ำสุดซึ่งเป็นลำดับการทดลองที่ 10 คือ กระแสไฟในการเชื่อม 200 Amp กระแสไฟลวดร้อน 180 Amp และความเร็วในการเดินเชื่อม 100 mm/min



(ก) ลำดับการทดลองที่ 10



(ข) ลำดับการทดลองที่ 15

รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคและตำแหน่งการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีแนวเชื่อม

(ก) ลำดับการทดลองที่ 10 และ (ข) ลำดับการทดลองที่ 15

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความส่วนผสมทางเคมีแนวเชื่อมลำดับการทดลองที่ 10

Point	Main Element (%wt)					
	C	Si	V	Cr	Mn	Fe
I	0.74	2.45	0.11	7.62	1.85	87.23
II	0.61	1.48	0.10	5.41	0.30	92.10
III	0.64	1.37	-	5.14	0.40	92.45



ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ความส่วนผสมทางเคมีแนวเชื่อมลำดับการทดลองที่ 15

Point	Main Element (%wt)					
	C	Si	V	Cr	Mn	Fe
I	0.57	0.60	0.08	6.90	1.29	90.56
II	0.52	0.39	-	4.77	0.58	93.74
III	0.54	0.71	0.06	4.94	0.48	93.27

พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย โครงสร้างซีเมนไทต์ และลักษณะคล้ายคาร์ไบด์แทรก ขึ้นบนพื้นหลักของเบไนต์ (Bainitic Matrix) ดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) และเมื่อทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีแนวเชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 6 พบปริมาณธาตุผสมหลักในแนวเชื่อมทั้งสามจุดที่ตรวจสอบมีปริมาณสูง เช่น คาร์บอน ซิลิคอน วาเนเดียม โครเมียม และแมงกานีส ส่งผลให้มีการต้านทานการสึกหรอที่ดี ซึ่งแตกต่างจากลำดับการทดลองที่ 15 คือ กระแสไฟเชื่อมที่ 250 Amp กระแสไฟลวดร้อน 120 Amp และความเร็วในการเดินเชื่อม 100 mm/min จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคลักษณะคล้ายโครงสร้างซีเมนไทต์ และคาร์ไบด์แทรกขึ้นบนพื้นหลักของเพอร์ไลต์ (Pearlitic Matrix) ดังรูปที่ 8 (ข) จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 7 ซึ่งปริมาณธาตุผสมหลักมีปริมาณลดลง ส่งผลให้การต้านทานการสึกหรอลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Ayadi และ Hadji [26] กล่าวว่า การกระจายตัวของโครเมียม วาเนเดียม และแมงกานีสสูงขึ้นจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและการต้านทานการสึกหรอที่ดี

### 5. สรุปผลการทดลอง

การประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยในการเชื่อมที่เหมาะสมต่อการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken พบว่าทั้ง 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟในการเชื่อม (X1) กระแสไฟลวดร้อน (X2) และความเร็วในการเชื่อม (X3) มีผลต่อปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อม โดยทั้ง 3 ปัจจัยมีผลเกี่ยวเนื่องกัน ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบของสมการทำนายปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อม คือ  $Volume\ loss = 4.634 + 0.602X_1 - 1.295X_2 - 0.324X_3 + 0.521X_2^2 - 0.149X_3^2 - 0.712X_1X_2$  โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจร้อยละ 97.80 เมื่อพิจารณาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อม คือ กระแสไฟในการเชื่อมที่ 200.505 Amp กระแสไฟลวดร้อน 180 Amp และความเร็วในการเชื่อมที่ 80 mm/min ให้ปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมต่ำสุดเฉลี่ยที่  $3.4366\ mm^3$  โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 1



## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D.G. Ahn, Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: a review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(7), 1271-1283.
- [2] Y.S. Tarnng, S.C Juang and C.H. Chang, The use of grey-based Taguchi methods to determine submerged arc welding process parameters in hardfacing, *Journal of materials processing technology*, 2002, 128(1-3), 1-6.
- [3] V.Balasubramanian, R . Varahamoorthy, C. S Ramachandran and C. Muralidharan, Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 40, 887-897.
- [4] G.R.C. Pradeep, A. Ramesh and B.D. Prasad, A review paper on hardfacing processes and materials, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, 2(11), 6507-6510.
- [5] J.J. Coronado, H.F. Caicedo and A.L. Gómez, The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits. *Tribology International*, 2019, 42(5), 745-749.
- [6] S.H. Kim and Y.S. Kim, Effect of ductility on dry sliding wear of medium carbon steel under low load conditions, *Metals and Materials*, 1999, 5(3), 267-271.
- [7] A.P. Modi, Effects of microstructure and experimental parameters on high stress abrasive wear behaviour of a 0.19 wt% C dual phase steel, *Tribology International*, 2007, 40(3), 490-497.
- [8] M.R. Chen, S.J. Lin, J.W. Yeh, M.H. Chuang, S.K. Chen and Y.S. Huang, Effect of vanadium addition on the microstructure, hardness, and wear resistance of Al 0.5 CoCrCuFeNi high-entropy alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006. 37(5), 1363-1369.
- [9] M. Sadeghian, M. Shamanian and A. Shafyiei, Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints between super duplex stainless steel and high strength low alloy steel, *Materials & Design*, 2014, 60, 678-684.
- [10] H. Dong, X. Hao and D. Deng, Effect of welding heat input on microstructure and mechanical properties of HSLA steel joint, *Metallography, microstructure, and analysis*, 2014, 3(2), 138-146.



- [11] H. Vashishtha, R.V. Taiwade, S. Sharma and A.P. Patil, Effect of welding processes on microstructural and mechanical properties of dissimilar weldments between conventional austenitic and high nitrogen austenitic stainless steels, *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 25, 49-59.
- [12] F. Wang, S. Williams, P. Colegrove and A. Antonysamy, Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V, *Metallurgical and materials transactions A*, 2003, 44(2), 968-977.
- [13] F. Schreiber, B. Allebrodt and T. Erpel, Hardfacing material solutions for high performance coatings in wear and corrosion applications. *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 2019, 64(1), 11-21.
- [14] S. Gao, H. Nakashin, M. Yamamoto, K. Shinozaki, K. Kadoi, H. Watanabe, and G. AP, Development of WC hard-facing welding process using pulse heated hot-wire gas tungsten arc welding system, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2013, 31(4), 57s-60s.
- [15] H. He, C. Wu, S. Lin and C. Yang, Pulsed TIG welding–brazing of aluminum–stainless steel with an Al-Cu twin hot wire, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(2), 1180-1189.
- [16] S.K. Shihab, Optimization of WEDM process parameters for machining of friction-stir-welded 5754 aluminum alloy using Box–Behnken design of RSM, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2018, 43(9), 5017-5027.
- [17] M. Ragavendran, N. Chandrasekhar, R. Ravikumar, R. Saxena, M. Vasudevan and A.K. Bhaduri, Optimization of hybrid laser–TIG welding of 316LN steel using response surface methodology (RSM), *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 94, 27-36.
- [18] N. Kiaee and M.A. Khafri, Optimization of gas tungsten arc welding process by response surface methodology, *Materials and Design* (2014), 54, 25-31.
- [19] S.T. Selvamani, S. Divagar and M. Vigneshwar, Application of response surface methodology (RSM) in friction welding AISI 1020 grade steel joints, *International Journal of Engineering Research in Africa*, 2015, 16, 38-44.
- [20] S. Srivastava and R.K. Garg, Process parameter optimization of gas metal arc welding on IS:2062 mild steel using response surface methodology, *Journal of Manufacturing Processes*, 2017,25, 296-305.



- [21] P.M. Ajith, T.A. Husain, P. Sathiya and S. Aravindan, Multi-objective optimization of continuous drive friction welding process parameters using response surface methodology with intelligent optimization algorithm, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2015, 22(10), 954-960.
- [22] R. Paventhan, P.R. Lakshminarayanan and V. Balasubramanian, Prediction and optimization of friction welding parameters for joining aluminium alloy and stainless steel, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(7), 1480-1485.
- [23] S. Prasomthong and S. Namkaew, The influence of adding aluminum welding wire on Properties and chemical composition of the welding hardfacing welded low carbon steel by gas tungsten arc welding process, *The Journal of Industrial Technology*, 2019, 15(1), 27-36. (in Thai)
- [24] K. Hinkelmann and O. Kempthorne, *Design and analysis of experiments, Volume 1: Introduction to experimental design 1st ED.*, John Wiley and Sons, Inc., NY, USA, 1994.
- [25] I. Worapun, C. Chooppava and C. Thinwongpituk, Optimal conditions of friction welding process for AISI 1015 steel using response surface methodology, *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, 2013, 18(6), 909-924. (in Thai)
- [26] S. Ayadi and A. Hadji, Effect of Chemical composition and heat treatments on the microstructure and wear behavior of manganese steel, *International Journal of Metal casting*, (2021), 15: 510-519.