



## การเปรียบเทียบข้อของกระแสน้ำที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการสึกหรอของโลหะพอกแข็งด้วยการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ที่มีการเติมผงโลหะ

บันเทิง ศรีคะรินทร์\*

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

ประภาศ เมืองจันทร์บุรี

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องแม่เหล็กและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9725 9290 อีเมล: buntoeng.sr@wu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.10.004

รับเมื่อ 8 กรกฎาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 31 สิงหาคม 2563 ตอรับเมื่อ 10 กันยายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 19 ตุลาคม 2564

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบชนิดของข้อของกระแสน้ำระหว่างกระแสน้ำตรงข้อบวก (DCEP) กับกระแสน้ำกลับ (AC) ที่ส่งผลต่อสมบัติทางโลหวิทยา และสมบัติทางกลของโลหะพอกแข็งชนิดมาร์เทนไซต์ที่เชื่อมลงบนเหล็กกล้าผสมโครเมียมต่ำ สภาวะการเชื่อมแบ่งเป็นการเชื่อมโลหะพอกแข็ง 1 ชั้น และ 3 ชั้น ด้วยกระแส DCEP และกระแส AC ซึ่งเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ที่มีการเติมผงโลหะ จากนั้นทำการศึกษาส่วนผสมทางเคมีโครงสร้างมหภาค และโครงสร้างจุลภาคของโลหะพอกแข็ง การทดสอบความแข็ง และการสึกหรอถูกใช้สำหรับการตรวจสอบสมบัติทางกลของโลหะพอกแข็ง นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบลักษณะผิวที่สึกหรอของโลหะพอกแข็งด้วยเช่นกัน ผลการศึกษาพบว่า โลหะพอกแข็งของการเชื่อมด้วยกระแส AC มีความหนาแน่นมากกว่าการเชื่อมด้วยกระแส DCEP โครงสร้างจุลภาคของทุกสภาวะการเชื่อมประกอบด้วยโครงสร้างมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ ผิวที่เกิดการสึกหรอส่วนใหญ่เป็นการสึกหรอแบบการตัดและการไถ การเชื่อมพอกแข็งด้วยกระแส AC เกิดการเงาจางน้อยกว่าการเชื่อมด้วยกระแส DCEP ทำให้โลหะพอกแข็งของการเชื่อมด้วยกระแส AC มีเฟสมาร์เทนไซต์มากกว่า ส่งผลให้ความแข็งและความต้านการสึกหรอมีมากกว่า ดังนั้นการเชื่อมพอกแข็งด้วยกระแส AC จึงเหมาะสมกว่าการเชื่อมด้วยกระแส DCEP

**คำสำคัญ:** การเชื่อมพอกแข็ง ข้อของกระแสน้ำ การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ การเติมผงโลหะ การสึกหรอ



## The Comparison of Welding Polarities on Microstructures and Wear Behaviour of Hardfacing Metal Using Submerged Arc Welding with Added Metal Powder

Buntoeng Srikarun\*

School of Engineering and Technology, Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand

Prapas Muangjunburee

Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 08 9725 9290, E-mail: buntoeng.sr@wu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.10.004

Received 8 July 2020; Revised 31 August 2020; Accepted 10 September 2020; Published online: 19 October 2021

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

The objective of this research is to compare the types of welding polarities between direct current electrode positive (DCEP) and alternating current (AC) that affect the metallurgical and mechanical properties of martensitic weld deposits onto a low chromium alloy steel. The welding conditions can be divided into 1 layer and 3 layers using DCEP and AC welded by submerge arc welding with metal powder addition. Then, the chemical composition, macrostructure, and microstructure of the deposited layers were studied. Hardness and wear testing for mechanical properties and worn surface characteristics of the hardfaced deposits were examined as well. The results showed that the deposited layer using AC polarity was thicker than that using DCEP polarity. The microstructure of the deposited layer for all welding conditions consisted of martensite and austenite. The worn mechanisms of the hardfaced surfaces were mainly cutting and plowing. Hardfacing with AC polarity led to less dilution than that with DCEP polarity. As a result, the deposited microstructure using AC polarity contained higher martensite phase resulting in higher hardness and wear resistance. Therefore, AC polarity is more suitable for hardfacing application than DCEP polarity.

**Keywords:** Hardfacing, Welding Polarity, Submerged Arc Welding, Powder Addition, Wear

Please cite this article in press as: B. Srikarun and P. Muangjunburee, "The comparison of welding polarities on microstructures and wear behaviour of hardfacing metal using submerged arc welding with added metal powder," *The Journal of KMUTNB*, 2021 (in Thai), doi: 10.14416/j.kmutnb.2021.10.004.

## 1. บทนำ

การสึกหรอ (Wear) ถือเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมปิโตรเลียม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) ที่เกิดขึ้นมากที่สุดของการสึกหรอทั้งหมด [1], [2] ทำให้เกิดความสูญเสียเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก เพื่อแก้ปัญหาเรื่องนี้จึงได้มีการพัฒนาโลหะพอกแข็ง และเทคโนโลยีการเชื่อมชั้นสูงเพื่อใช้ต้านทานการสึกหรอจากอนุภาคขัดถูต่างๆ เช่น ถ่านหิน กรวด หิน ททราย หรือแร่ [3], [4] การเชื่อมพอกแข็ง (Hardfacing) ด้วยลวดเชื่อมชนิดโลหะแข็งหรือโลหะผสมเป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และแพร่หลายที่สุดในการบำรุงรักษาวัสดุที่สึกหรอเพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาวัสดุ และเทคโนโลยีการเชื่อมพอกแข็งที่มีประสิทธิภาพ และมีความยืดหยุ่นโดยการปรับปรุงวัสดุให้มีความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูและการสึกหรอแบบกระแทกเพื่อให้สามารถใช้งานในอุตสาหกรรมได้หลากหลายยิ่งขึ้น [5], [6]

เหล็กกล้ามาร์เทนซิติก (Martensitic Steel) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมค่อนข้างมากในการใช้เป็นวัสดุสำหรับการเชื่อมพอกแข็งเพื่อการซ่อมแซมชิ้นส่วนที่สึกหรอจากการใช้เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ และออสเทนไนต์ที่สามารถต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู และการกระแทกได้ดี [7], [8] อย่างไรก็ตาม เหล็กกล้าชนิดนี้สามารถเชื่อมพอกแข็งได้ค่อนข้างยากเนื่องจากมีแนวโน้มที่มีการแตกร้าวที่รุนแรง ดังนั้นจะต้องมีการออกแบบทั้งองค์ประกอบทางเคมี และเทคโนโลยีการเชื่อมพอกแข็งอย่างระมัดระวัง ถึงแม้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของลวดเชื่อมจะมีอิทธิพลต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของโลหะพอกแข็งแต่ก็ต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้กับโลหะฐานด้วย [9] เพื่อแก้ปัญหาการเชื่อมโลหะรองพื้น จึงเข้ามามีบทบาทที่สำคัญ การเชื่อมโลหะรองพื้นก่อนการพอกแข็งในงานซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรด้วยโลหะเชื่อมชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีทั้งความแกร่ง (Toughness) และความเหนียว (Ductility) สามารถช่วยต้านทานการแตกได้เป็นอย่างดีทั้งยังเป็นตัวประสานที่ดีระหว่างโลหะฐานกับโลหะพอกแข็ง [10], [11]

กรรมวิธีการเชื่อมพอกแข็งสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การเชื่อมแก๊ส (OAW) การเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลัก (SMAW) การเชื่อมอาร์กแก๊สปกคลุม (GMAW) การเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (FCAW) และการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (SAW) ทั้งนี้การเลือกใช้งานก็ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการเชื่อมต่างๆ เช่น องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อมที่ไม่เปลี่ยนแปลง ปริมาณความร้อนเข้าที่ใช้ ความหลากหลายของชนิดลวดเชื่อม และความยืดหยุ่นในการเชื่อม [12], [13] โดยในปัจจุบันกรรมวิธีการเชื่อมพอกแข็งด้วยการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นอย่างมาก เพราะมีอัตราการเติมเนื้อโลหะเชื่อมสูง และยังเป็น การเชื่อมอัตโนมัติอีกด้วย นอกจากนี้ยังได้มีการเชื่อมที่มีการเติมผงโลหะเพื่อปรับปรุงสมบัติของโลหะเชื่อมพอกแข็งให้ดียิ่งขึ้น [14], [15]

ชนิดของขั้วกระแสเชื่อม (Welding Polarity) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางโลหวิทยา และสมบัติทางกลของโลหะพอกแข็ง เนื่องจากขั้วกระแสเชื่อมแต่ละชนิดมีผลต่อความร้อนเข้าที่เกิดขึ้น [16] สำหรับการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ด้วยกระแสตรงขั้วลบ (DCEN) จะทำให้ได้โลหะเชื่อมที่มีบริเวณโลหะหลอมลึก (Penetration) น้อยแต่มีบริเวณโลหะพอก (Reinforcement) มาก ในขณะที่การเชื่อมด้วยกระแสสลับ (AC) จะทำให้เกิดความสมดุลระหว่างบริเวณโลหะหลอมลึกกับบริเวณโลหะพอก [17] เมื่อเปรียบเทียบการเชื่อมระหว่างการใช้กระแส AC และกระแส DCEP พบว่าการเชื่อมด้วยกระแส AC สามารถควบคุมการเงาของโลหะเชื่อมได้และยังทำให้เกิดความร้อนเข้าในระหว่างการเชื่อมน้อยกว่ากระแส DCEP ทั้งนี้การเชื่อมด้วยกระแส DCEP ยังทำให้เกิดการเงาของโลหะเชื่อมสูงอีกด้วย [18], [19] ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อความต้านทานการสึกหรอของโลหะเชื่อม

การเชื่อมยังพบว่า มีปัญหาที่สำคัญอีกอย่างคือ การเงา (Dilution) ของโลหะเชื่อมกับโลหะฐานหรือโลหะเชื่อมที่อยู่ติดกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมพอกแข็งที่จำเป็นต้องมีการเชื่อมโลหะรองพื้นก่อนการเชื่อมโลหะพอกแข็งที่

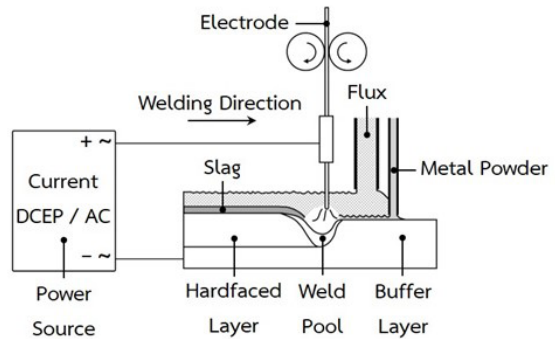
ทำให้โลหะพอกแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางโลหวิทยา และทางกลของโลหะพอกแข็ง [20] เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว การเชื่อมพอกแข็งมากกว่า 1 ชั้น จึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สามารถลดผลกระทบจากการเจือจางลงได้ [21]

งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ทำการเปรียบเทียบชนิดของขั้วกระแสเชื่อมที่ต่างกันสำหรับการเชื่อมพอกแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ที่มีการเติมผงโลหะ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้เขียนจึงมีแนวคิดในการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบสมรรถนะของโลหะพอกแข็งชนิดมาร์เทนไซต์ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของขั้วกระแสเชื่อมที่ต่างกันระหว่างกระแส DCEP และกระแส AC และจำนวนชั้นโลหะพอกแข็งที่ต่างกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติด้านการสึกหรอของโลหะพอกแข็งเพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเชื่อมพอกแข็งในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

เหล็กกล้าผสมโครเมียมต่ำ (Low Chromium Alloy Steel) ถูกใช้เป็นโลหะฐานสำหรับการเชื่อมพอกแข็ง โดยมีขนาดกว้าง 76.2 มิลลิเมตร ยาว 254.0 มิลลิเมตร และหนา 19.05 มิลลิเมตร เหล็กกล้าผสมโครเมียมต่ำชนิดนี้มีค่าคาร์บอนเทียบเท่า (Carbon Equivalent) 1.19% ดังนั้นจึงต้องมีการให้ความร้อนก่อนเชื่อมอย่างน้อย 350 °C

การเชื่อมพอกแข็งเป็นการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ที่มีการเติมผงโลหะ โดยมีฟลักซ์ชนิดความเป็นด่างสูง (High Basic Flux) ทำหน้าที่ปกคลุมแนวเชื่อม

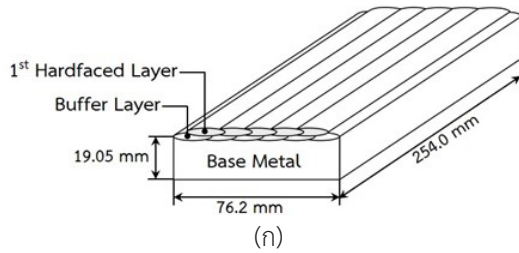


รูปที่ 1 การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ที่มีการเติมผงโลหะ

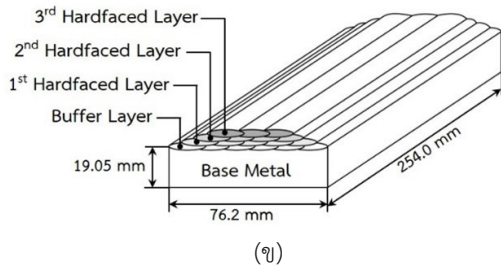
โลหะพอกแข็งเกิดจากการใช้โลหะเติมหรือลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) ผสมกับผงโลหะ (Metal Powder) ซึ่งถูกเติมลงไประหว่างการเชื่อม แสดงดังรูปที่ 1 ก่อนการเชื่อมโลหะพอกแข็งจำเป็นต้องมีการเชื่อมโลหะรองพื้นด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก (Austenitic Stainless Steel) จำนวน 1 ชั้น เพื่อให้เกิดการยึดเกาะที่ดีระหว่างโลหะฐานกับโลหะพอกแข็ง สำหรับส่วนผสมทางเคมีของโลหะฐาน โลหะรองพื้น โลหะเติม และผงโลหะแสดงดังตารางที่ 1 การเชื่อมพอกแข็งแบ่งออกเป็น การเชื่อมโลหะพอกแข็ง 1 ชั้น และ 3 ชั้น โดยใช้ขั้วกระแสเชื่อมชนิดต่างกันระหว่างกระแสตรงขั้วบวก (DCEP) และกระแสสลับ (AC) ที่มีแนวเชื่อมซ้อนทับกันประมาณ 25–30% แสดงดังรูปที่ 2 และ 3 นอกจากนี้ยังได้ควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานเชื่อมระหว่างการเชื่อมไม่ให้ต่ำกว่า 350 °C สำหรับสถานะการเชื่อมและตัวแปรการเชื่อมทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 2 หลังการเชื่อมเสร็จแล้ว ชิ้นงานถูกปล่อยให้เย็นตัวจนในอากาศถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงถูกนำไปเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบทางโลหวิทยาและทางกล

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะฐาน โลหะรองพื้น โลหะเติม และผงโลหะ (% โดยน้ำหนัก)

Materials	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Fe
Low Chromium Alloy Steel	0.39	0.41	0.56	0.02	3.13	0.31		Balance
Austenitic Stainless Steel	0.04	0.66	6.00	9.47	19.95	-	-	Balance
Low Carbon Steel	0.10	0.20	1.00	-	-	-	-	Balance
Metal Powder	3.17	1.39	6.74	0.14	47.34	2.47	2.19	Balance



(ก)



(ข)

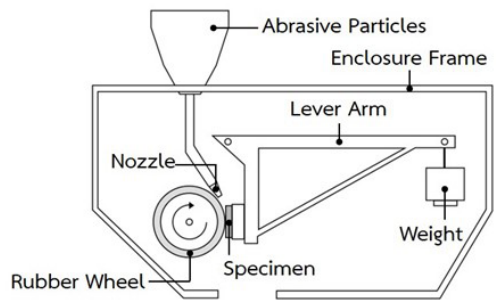
รูปที่ 2 การเชื่อมพอกแข็ง (ก) โลหะพอกแข็ง 1 ชั้น และ (ข) โลหะพอกแข็ง 3 ชั้น

งานวิจัยนี้ได้มีการใช้เครื่องตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี (OES) เพื่อวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของโลหะพอกแข็งที่บริเวณผิวด้านบน ชิ้นงานทดสอบสำหรับตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ถูกเตรียมมาจากโลหะพอกแข็งที่บริเวณผิวด้านบน โครงสร้างจุลภาคของโลหะพอกแข็งที่บริเวณภาคตัดขวางถูกตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) สารละลายที่ใช้สำหรับการกัดชิ้นรอยเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค คือ สารละลายวิลเลลา (Vilella's Reagent) ซึ่งประกอบด้วย กรดพิคริก 2 กรัม กรดไฮโดรคลอริก 5 มิลลิลิตร และเมทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร

ทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งชนิด



รูปที่ 3 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมพอกแข็ง

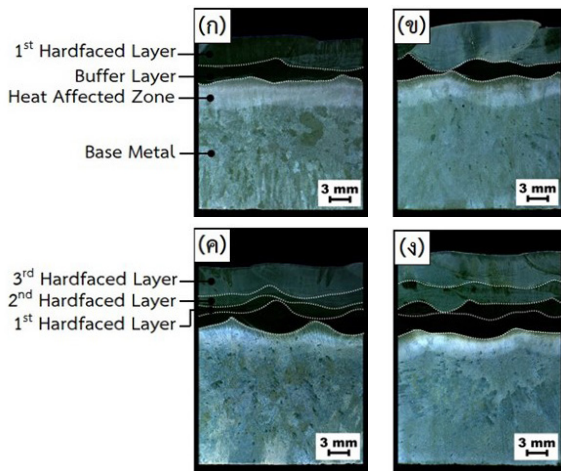


รูปที่ 4 เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบขัดถูตามมาตรฐาน ASTM G65

ไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness Tester) โดยทดสอบที่บริเวณผิวด้านบนของโลหะพอกแข็งด้วยแรงกด 0.2 กิโลกรัม (HV0.2) สำหรับการทดสอบการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear Test) ใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G65 แสดงดังรูปที่ 4 ชิ้นงานทดสอบการสึกหรอถูกเตรียมมาจากบริเวณผิวด้านบนของโลหะพอกแข็งซึ่งมีขนาดกว้าง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 76.2 มิลลิเมตร และหนา 12.7 มิลลิเมตร อนุภาคขัดถูที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอเป็นทรายควอตซ์ที่มีขนาดระหว่าง 212-300 ไมโครเมตร ตัวแปรการทดสอบการสึกหรอแสดงดังตารางที่ 3 ก่อน และ

ตารางที่ 2 ตัวแปรการเชื่อมของแต่ละสภาวะการเชื่อม

Condition	Hardfaced Layer(s)	Polarity	Powder Addition (g/cm)	Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
1H-DCEP	1	DCEP	0.5	600	30	60	18
1H-AC	1	AC	0.5	600	30	60	18
3H-DCEP	3	DCEP	0.5	600	30	60	18
3H-AC	3	AC	0.5	600	30	60	18



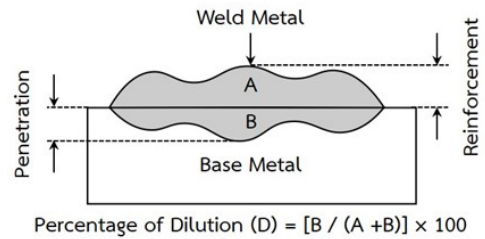
รูปที่ 5 โครงสร้างมหภาคที่บริเวณภาคตัดขวางของการเชื่อมพอกแข็งสภาวะต่างๆ (ก) 1H-DCEP (ข) 1H-AC (ค) 3H-DCEP และ (ง) 3H-AC

หลังการทดสอบการสึกหรอต้องชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียด 0.0001 กรัม เพื่อใช้สำหรับการคำนวณปริมาณมวลที่หายไป (Mass Loss) ของชิ้นงานทดสอบ ผลที่ได้จากการทดสอบการสึกหรอเป็นค่าเฉลี่ยจากชิ้นงานทดสอบจำนวน 3 ชิ้น ของแต่ละสภาวะการเชื่อม หลังการทดสอบการสึกหรอได้มีการตรวจสอบลักษณะผิวที่สึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 โครงสร้างมหภาค

โครงสร้างมหภาคที่บริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น และ 3 ชั้น แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นบริเวณโลหะฐาน (Base Metal, BM) บริเวณกระหกรร้อน (Heat Affected Zone) บริเวณโลหะรองพื้น (Buffer Layer)



รูปที่ 6 การคำนวณเปอร์เซ็นต์การเจือจางของโลหะ

และบริเวณโลหะพอกแข็ง (Hardfaced Layer) จากรูปพบว่าบริเวณโลหะพอกแข็ง 1 ชั้น มีความหนาน้อยกว่าโลหะพอกแข็ง 3 ชั้น โครงสร้างมหภาคของการเชื่อมพอกแข็งด้วยกระแส DCEP [รูปที่ 5 (ก) และ (ค)] มีความหนาบริเวณโลหะพอกแข็งน้อยการเชื่อมด้วยกระแส AC [รูปที่ 5 (ข) และ (ง)] เนื่องจากการเชื่อมด้วยกระแส DCEP อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากชิ้นงานไปยังลวดเชื่อม ทำให้ชิ้นงานเกิดความร้อนมากส่งผลให้โลหะเชื่อมเกิดการหลอมลึกมากทำให้ความหนาของโลหะเชื่อมจึงมีน้อย ในขณะที่การเชื่อมด้วยกระแส AC อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในลักษณะสมมูลระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อม ความร้อนที่เกิดขึ้นจึงเท่ากัน ส่งผลให้บริเวณโลหะหลอมลึก และบริเวณโลหะพอกมีขนาดเท่ากัน [22]

รูปที่ 6 แสดงแผนภาพการเจือจางของโลหะเชื่อม และวิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์การเจือจางของโลหะเชื่อม จากผลการวิจัยทำให้ทราบว่า การเชื่อมพอกแข็งด้วยกระแส DCEP มีการเจือจาง 51.57% ในขณะที่การเชื่อมด้วยกระแส AC มีการเจือจาง 47.06% ซึ่งช่วยทำให้ทราบว่า การเชื่อมด้วยกระแส DCEP มีค่าความร้อนเข้าสู่สูงกว่ากระแส AC โดยค่าความร้อนเข้าที่สูงทำให้เกิดการเจือจางของโลหะเชื่อมสูงตามไปด้วย และจากเหตุผลดังกล่าวทำให้ความหนาบริเวณโลหะพอกแข็งของการเชื่อมด้วยกระแส DCEP จึงน้อยกว่าการเชื่อมด้วยกระแส AC

ตารางที่ 3 ตัวแปรการทดสอบการสึกหรอแบบขัดถูตามมาตรฐาน ASTM G65

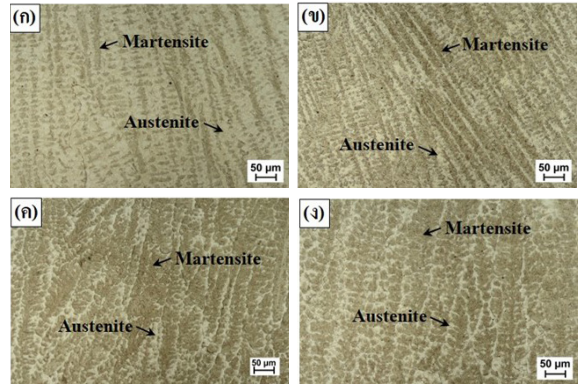
Procedure	Wheel Distance (m)	Velocity (rpm)	Load (N)	Abrasive Particles Type	Abrasive Particles Flow Rate (g/min)
A	4,309	200	130	Quartz	350

### 3.2 ส่วนผสมทางเคมี

ส่วนผสมทางเคมีของโลหะพอกแข็งแสดงดังตารางที่ 4 โดยพบว่า ส่วนผสมทางเคมีของโลหะพอกแข็ง 1 ชั้น มีปริมาณธาตุแมงกานีส นิกเกิล และโครเมียมมากกว่าโลหะพอกแข็ง 3 ชั้น อย่างชัดเจน เนื่องจากโลหะพอกแข็ง 1 ชั้น เกิดการเจือจางกับโลหะรองพื้นมากกว่า ส่วนโลหะเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น มีปริมาณธาตุที่ใกล้เคียงกับที่คาดการณ์ไว้ ซึ่งคาดว่าบริเวณนี้ไม่มีการเจือจางกับโลหะรองพื้นแล้ว ผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นว่าโลหะพอกแข็งของการเชื่อมด้วยกระแส DCEP มีปริมาณธาตุผสมที่เกิดจากการเจือจางมากกว่าการเชื่อมด้วยกระแส AC เนื่องจากการเชื่อมด้วยกระแส DCEP ทำให้เกิดค่าความร้อนเข้าสู่สูงกว่ากระแส AC ทำให้การเชื่อมด้วยกระแส DCEP เกิดการเจือจางของโลหะเชื่อมพอกแข็งมากกว่ากระแส AC

### 3.3 โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของโลหะพอกแข็งที่บริเวณภาคตัดขวางของการเชื่อมโลหะพอกแข็ง 1 ชั้น และ 3 ชั้น แสดงดังรูปที่ 7 จากรูปพบว่า ทุกสภาวะการเชื่อมมีโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) และออสเทนไนต์ (Austenite) ที่มีลักษณะการแข็งตัวแบบคอลัมน์นาร์เดนไดรต์ (Columnar Dendrite) โดยที่เฟสมาร์เทนไซต์คือบริเวณที่มีสีเข้ม ส่วนเฟสออสเทนไนต์คือ บริเวณที่มีสีสว่าง สาเหตุที่ทุกสภาวะการเชื่อมมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ และออสเทนไนต์เนื่องจากโลหะพอกแข็งมีปริมาณธาตุคาร์บอน โครเมียม แมงกานีส นิกเกิล และธาตุอื่นๆ อยู่เพียงพอที่ทำให้เกิดโครงสร้างชนิดนี้ได้ [23], [24] เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของโลหะพอกแข็ง 1 ชั้น กับ 3 ชั้น พบว่า โลหะพอกแข็ง 1 ชั้น มีเฟสออสเทนไนต์มากกว่า 3 ชั้น สาเหตุมาจากโลหะ



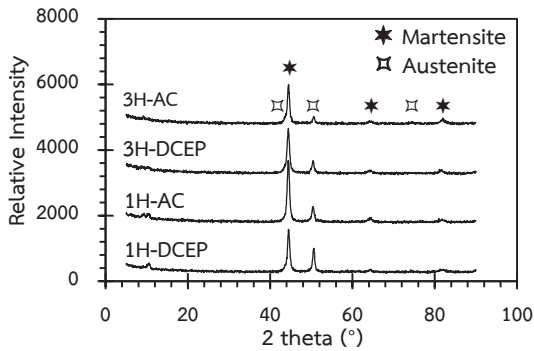
รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกแข็งที่บริเวณภาคตัดขวางของการเชื่อมสภาวะต่างๆ (ก) 1H-DCEP (ข) 1H-AC (ค) 3H-DCEP และ (ง) 3H-AC

พอกแข็ง 1 ชั้น เกิดการเจือจางกับโลหะรองพื้นที่ทำให้ธาตุแมงกานีส และนิกเกิลเข้ามาผสมในโลหะพอกแข็ง โดยธาตุทั้งสองเป็นธาตุที่สร้างเสถียรภาพให้กับเฟสออสเทนไนต์ [25] ส่วนโลหะพอกแข็งชั้นที่ 3 เป็นบริเวณที่อยู่ห่างจากโลหะรองพื้นทำให้เฟสออสเทนไนต์เกิดขึ้นน้อย

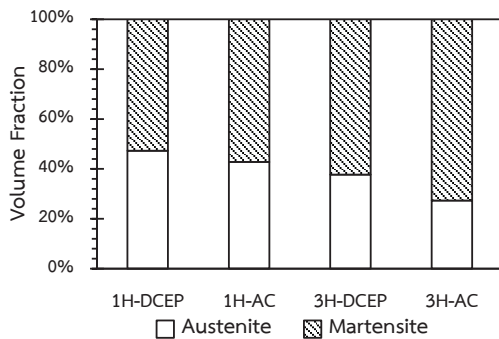
รูปที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของโลหะพอกแข็ง ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ามีโครงสร้างผลึกแบบบอดีเซนเตอร์เตตระโกนอล (BCT) ซึ่งก็คือ เฟสมาร์เทนไซต์ และโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (FCC) ซึ่งก็คือ เฟสออสเทนไนต์ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ของเฟสออสเทนไนต์บริเวณโลหะพอกแข็ง 1 ชั้น สูงกว่า 3 ชั้น และเช่นเดียวกันกับโลหะพอกแข็งที่เชื่อมด้วยกระแส DCEP ที่มีค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ของเฟสออสเทนไนต์สูงกว่าการเชื่อมด้วยกระแส AC

ตารางที่ 4 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะพอกแข็งที่ได้จากเครื่อง OES (% โดยน้ำหนัก)

Condition	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Fe
1H-DCEP	0.36	0.60	3.01	2.83	11.12	0.33	0.22	0.09	Balance
1H-AC	0.30	0.81	2.98	2.78	9.64	0.27	0.16	0.10	Balance
3H-DCEP	0.47	0.56	2.37	0.94	9.13	0.42	0.33	0.14	Balance
3H-AC	0.43	0.86	2.32	0.68	7.55	0.35	0.29	0.16	Balance



รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของโลหะพอกแข็ง

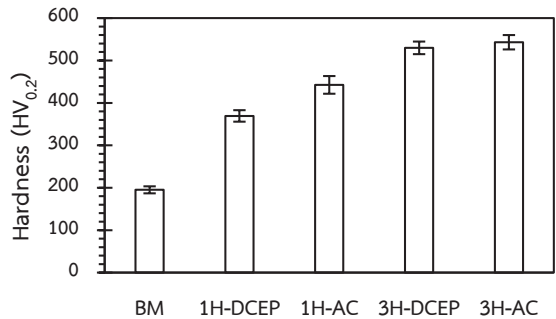


รูปที่ 9 สัดส่วนของโครงสร้างมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ของโลหะพอกแข็ง

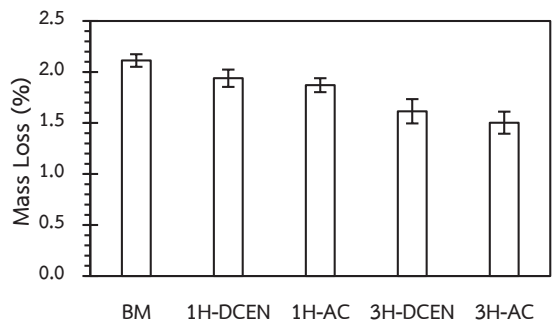
เพื่อหาปริมาณสัดส่วนโครงสร้างจุลภาคของโลหะพอกแข็ง จึงได้ใช้วิธีการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโลหะพอกแข็ง 1 ชั้น มีสัดส่วนของเฟสออสเทนไนต์มากกว่าโลหะพอกแข็ง 3 ชั้น เนื่องจากโลหะพอกแข็ง 1 ชั้น มีปริมาณธาตุผสมที่สร้างเสถียรภาพให้กับเฟสออสเทนไนต์มากกว่าโลหะพอกแข็ง 3 ชั้น โลหะพอกแข็งที่เชื่อมด้วยกระแส DCEP มีสัดส่วนของเฟสออสเทนไนต์มากกว่าการเชื่อมด้วยกระแส AC ซึ่งสอดคล้องกับผลเปอร์เซ็นต์การเจือจางและส่วนผสมทางเคมีของโลหะพอกแข็ง

### 3.4 ผลการทดสอบความแข็ง

ผลการทดสอบความแข็งที่บริเวณผิวด้านบนของโลหะ



รูปที่ 10 ความแข็งของโลหะฐานและโลหะพอกแข็ง



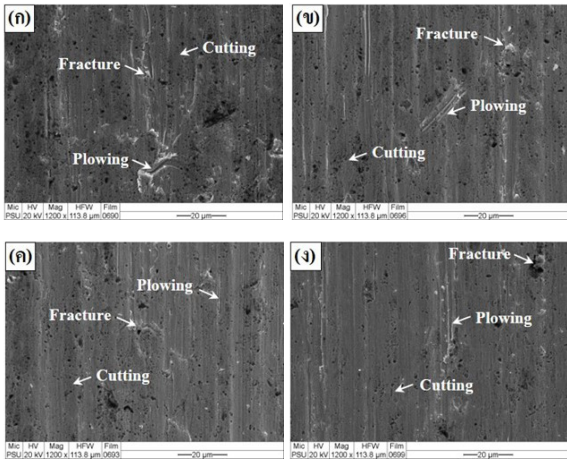
รูปที่ 11 มวลที่หายไปของโลหะฐานและโลหะพอกแข็ง

พอกแข็งแสดงดังรูปที่ 10 โดยปรากฏว่าความแข็งของการเชื่อมด้วยกระแส DCEP มีค่าต่ำกว่าการเชื่อมด้วยกระแส AC ทั้งโลหะพอกแข็ง 1 ชั้น และ 3 ชั้น สาเหตุเนื่องจากการเชื่อมด้วยกระแส DCEP มีปริมาณเฟสออสเทนไนต์ที่เกิดจากการเจือจางกับโลหะรองพื้นมากกว่าการเชื่อมด้วยกระแส AC โดยที่เฟสออสเทนไนต์เป็นเฟสที่มีความแข็งต่ำกว่าเฟสมาร์เทนไซต์มาก [23]

### 3.5 ผลการทดสอบการสึกหรอ

ปริมาณของมวลที่หายไปหลังการทดสอบการสึกหรอแบบขัดถูที่บริเวณผิวด้านบนของโลหะพอกแข็งแสดงดังรูปที่ 11 โดยพบว่า โลหะพอกแข็ง 1 ชั้น มีปริมาณมวลที่หายไปมากกว่า 3 ชั้น ในทุกสภาวะการเชื่อม เนื่องจากโลหะพอกแข็ง 1 ชั้น มีความแข็งต่ำกว่า 3 ชั้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าโลหะพอกแข็งของการเชื่อมด้วยกระแส DCEP มีมวลที่หายไปมากกว่าการเชื่อมด้วยกระแส AC เนื่องจากโลหะพอกแข็งของ





รูปที่ 12 ลักษณะผิวที่สึกหรอของโลหะพอกแข็งที่สภาวะการเชื่อมต่างๆ (ก) 1H-DCEP (ข) 1H-AC (ค) 3H-DCEP และ (ง) 3H-AC

การเชื่อมด้วยกระแส DCEP มีปริมาณเฟสออสเทนไนต์มากกว่าการเชื่อมด้วยกระแส AC โดยเฟสออสเทนไนต์นั้น เป็นเฟสที่มีความแข็งแรงต่ำจึงสามารถถูกสร้างเสียหายจากอนุภาคขีดสีได้มากกว่าเฟสมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งแรงสูงกว่า [21]

### 3.6 ผิวที่สึกหรอ

รูปที่ 12 แสดงลักษณะผิวที่เกิดการสึกหรอของโลหะพอกแข็งของการเชื่อมพอกแข็งสภาวะต่างๆ โดยพบว่า มีลักษณะการสึกหรอที่เกิดจากกลไกการสึกหรอที่ประกอบด้วย การตัด (Cutting) การไถ (Plowing) และการแตก (Fracture) ผลการวิจัยปรากฏว่ากลไกการสึกหรอส่วนใหญ่เป็นการตัดและการไถเนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของโลหะพอกแข็งมีทั้งเฟสมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งแรงสูง และเฟสออสเทนไนต์ที่มีความเหนียวทำให้การแตกเกิดขึ้นได้น้อย การสึกหรอแบบขีดถูยังสร้างความเสียหายให้กับโลหะพอกแข็ง 1 ชั้น มากกว่า 3 ชั้น และเช่นกันการเชื่อมพอกแข็งด้วยกระแส DCEP มีการสึกหรอมากกว่าการเชื่อมด้วยกระแส AC โดยสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าบริเวณผิวที่สึกหรอของโลหะพอกแข็งที่เชื่อมด้วยกระแส DCEP มีลักษณะความเสียหายซึ่งเกิดจากการตัดและการไถมากกว่าการเชื่อมด้วยกระแส AC

จากผลการวิจัยสามารถเห็นได้ถึงความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และมวลที่หายไปของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ที่มีการเติมผงโลหะโดยใช้ชนิดของขั้วกระแสเชื่อมที่ต่างกัน โดยพบว่า ปริมาณของโครงสร้างมาร์เทนไซต์มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับค่าความแข็ง กล่าวคือ เมื่อโลหะพอกแข็งมีปริมาณโครงสร้างมาร์เทนไซต์เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งก็เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบอีกว่าค่าความแข็งมีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผกผันกับมวลที่หายไป กล่าวคือ เมื่อโลหะพอกแข็งมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ปริมาณมวลที่หายไปก็ลดลง ดังนั้น ปริมาณโครงสร้างมาร์เทนไซต์จึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความแข็งและปริมาณของมวลที่หายไปของโลหะพอกแข็ง การเชื่อมพอกแข็งยังแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งและความต้านทานการสึกหรอซึ่งให้ผลที่ดีกว่าโลหะฐานที่ไม่ผ่านการเชื่อมพอกแข็ง

### 4. สรุป

การเชื่อมพอกแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ที่มีการเติมผงโลหะเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากชนิดของขั้วกระแสเชื่อมที่ต่างกัน มีข้อสรุปดังนี้

- 1) บริเวณโลหะพอกแข็งมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์
  - 2) โลหะพอกแข็ง 1 ชั้น เกิดการเงือจางกับโลหะรองพื้นมากกว่าโลหะพอกแข็ง 3 ชั้น
  - 3) กระแส DCEP ทำให้เกิดค่าความร้อนเข้าสูงกว่ากระแส AC ทำให้การเชื่อมด้วยกระแส DCEP เกิดการเงือจางของโลหะเชื่อมมากกว่าการเชื่อมด้วยกระแส AC
  - 4) กลไกการสึกหรอของโลหะพอกแข็งส่วนใหญ่เป็นการสึกหรอแบบการตัดและการไถ
  - 5) การเชื่อมพอกแข็งด้วยกระแส AC โดยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ที่มีการเติมผงโลหะให้ผลการวิจัยที่ดีกว่าการเชื่อมด้วยกระแส DCEP
- ข้อเสนอแนะ การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ด้วยกระแสตรงขั้วลบ (DCEN) สำหรับการเชื่อมพอกแข็งเป็นสิ่งที่น่าสนใจสำหรับการทำวิจัยในอนาคต



## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบการสนับสนุนทุนวิจัยจากศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านโลหะและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Rendón and M. Olsson, "Abrasive wear resistance of some commercial abrasion resistant steels evaluated by laboratory test methods," *Wear*, vol. 267, no. 11, pp. 2055–2061, 2009.
- [2] A. Sundström, J. Rendón, and M. Olsson, "Wear behaviour of some low alloyed steels under combined impact/abrasion contact conditions," *Wear*, vol. 250, no. 1–12, pp. 744–754, 2001.
- [3] W. Zhang, Z. Zhong, and S. Kang, "Microstructures and mechanical properties of a martensitic steel welded with flux-cored wires," *International Journal of Coal Science & Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 254–260, 2015.
- [4] E. O. Correa, N. G. Alcântara, L. C. Valeriano, N. D. Barbedo, and R. R. Chaves, "The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe–Cr–C–Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process," *Surface and Coatings Technology*, vol. 276, pp. 479–484, 2015.
- [5] R. Bendikiene and L. Kavaliauskiene, "The effect of plastic deformation rate on the wear performance of hardfaced coatings," *Welding in the World*, vol. 61, no. 5, pp. 893–900, 2017.
- [6] E. Badisch and C. Mitterer, "Abrasive wear of high speed steels: Influence of abrasive particles and primary carbides on wear resistance," *Tribology International*, vol. 36, no. 10, pp. 765–770, 2003.
- [7] Z. Pei, R. Song, Q. Ba, and Y. Feng, "Dimensionality wear analysis: three-body impact abrasive wear behavior of a martensitic steel in comparison with Mn13Cr2," *Wear*, vol. 414, pp. 341–351, 2018.
- [8] A. Botes, A. S. Bolokang, I. Kortidis, and V. Matjeke, "Structure-property relationship of the laser clad medium carbon steel: The use of butter layer between the substrate and the top clad layer," *Surfaces and Interfaces*, vol. 14, pp. 296–304, 2019.
- [9] J. H. Bulloch and J. L. Henderson, "Some considerations of wear and hardfacing materials," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 46, no. 3, pp. 251–267, 1991.
- [10] R. V. Prado, B. Uquillas, J. Y. Aguilar, Y. Aguilar, and F. Casanova, "Abrasive wear effect of sugarcane juice on sugarcane rolls," *Wear*, vol. 270, no. 1–2, pp. 83–87, 2010.
- [11] G. Chakraborty, C. R. Das, S. K. Albert, A. K. Bhaduri, S. Murugesan, and A. Dasgupta, "Effect of alloy 625 buffer layer on hardfacing of modified 9Cr-1Mo steel using nickel base hardfacing alloy," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 25, no. 4, pp. 1663–1672, 2016.
- [12] 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*, vol. 40, no. 9–10, pp. 887–897, 2009.
- [13] 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*, vol. 2, no. 11, pp. 6507–6510, 2010.
- [14] B. Gülenç and N. Kahraman, “Wear behaviour of bulldozer rollers welded using a submerged arc welding process,” *Materials & design*, vol. 24, no. 7, pp. 537–542, 2003.
- [15] P. F. Mendez, N. Barnes, K. Bell, S. D. Borle, S. S. Gajapathi, S. D. Guest, H. Izadi, A. K. Gol, and G. Wood, “Welding processes for wear resistant overlays,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 16, no. 1, pp. 4–25, 2014.
- [16] R. P. Singh, R. K. Garg, and D. K. Shukla, “Mathematical modeling of effect of polarity on weld bead geometry in submerged arc welding,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 21, pp. 14–22, 2016.
- [17] R. E. Toma, S. D. Brandi, A. C. Souza, and Z. Morais, “Comparison between DC (+) and square wave AC SAW current outputs to weld AISI 304 for low-temperature applications,” *Welding Journal*, vol. 90, no. 9, pp. 44-1-44-8, 2011.
- [18] S. D. Borle, I. Le Gall, and P. F. Mendez, “Primary chromium carbide fraction control with variable polarity SAW,” *Welding Journal*, vol. 94, no. 1, pp. 1–7, 2015.
- [19] A. Sharma, A. K. Chaudhary, N. Arora, and B. K. Mishra, “Estimation of heat source model parameters for twin-wire submerged arc welding,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 45, no. 11–12, pp. 1096–1103, 2009.
- [20] H. Om and S. Pandey, “Effect of heat input on dilution and heat affected zone in submerged arc welding process,” *Sadhana*, vol. 38, no. 6, pp. 1369–1391, 2013.
- [21] J. J. Coronado, H. F. Caicedo, and A. L. Gómez, “The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits,” *Tribology International*, vol. 42, no. 5, pp. 745–749, 2009.
- [22] H. Z. Oo, B. Srikarun, and P. Muangjunburee, “The effects of heat input and polarity on wear resistance of Fe-3.5% Cr steel hardfaced using submerged arc welding,” *Materials Research Express*, vol. 6, no. 10, pp. 1–11, 2019.
- [23] R. Hossain, F. Pahlevani, and V. Sahajwalla, “Effect of small addition of Cr on stability of retained austenite in high carbon steel,” *Materials Characterization*, vol. 125, pp. 114–122, 2017.
- [24] E. E. T. ELsawy, M. R. EL-Hebeary, and I. S. E. El Mahallawi, “Effect of manganese, silicon and chromium additions on microstructure and wear characteristics of grey cast iron for sugar industries applications,” *Wear*, vol. 390, pp. 113–124, 2017.
- [25] R. L. Klueh, P. J. Maziasz, and A. E. Lee, “Manganese as an austenite stabilizer in Fe–Cr–Mn–C steels,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 102, no. 1, pp. 115–124, 1988.