ผลของสารเติมและกระแสไฟเชื่อมต่อความแข็งของโลหะเชื่อมในกระบวนการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์

Effect of Additives and Welding Current on the Hardness of Weld Metal in the Submerged Arc Welding Process

ปริญญวัตร ทินบุตร[1] สำเภา โยธี[1*] นราธิป สุพัฒน์ธนานนท์[1] และ ธีรวุฒิ ศรีพันธ์ชาติ[2]

Parinyawatr Dhinnabutra[1] Sumpao Yotee[1*] Naratip Supattananon[1] and Teerawut Sripanchat[2]

[1]สาขาครุศาสตร์อุตสาหการเชื่อมประกอบ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

[2]สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

[1]Department of Welding Technical Education, Faculty of Technical Education,

Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus

[2]Department of Industrial Technical Education, Faculty of Technical Education,

Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus

*E-mail: sumpao.yo@rmuti.ac.th

Received: Sep 27, 2023

Revised: Oct 30, 2023

Accepted: Nov 01, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารเติม และกระแสไฟเชื่อมต่อความแข็งของโลหะเชื่อมในกระบวนการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ โดยชนิดของสารเติมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 ชนิด คือ คาร์บอน ซิลิคอนคาร์ไบด์ และคาร์บอนผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ ปริมาณของสารเติมแต่ละชนิดที่ใช้ในการศึกษานี้มี 3 ระดับ คือ 1, 2 และ 3 กรัม และกระแสไฟเชื่อมที่ใช้ในการศึกษานี้มี 3 ระดับ คือ 430, 500 และ 570 แอมแปร์ ในการเชื่อมมีการควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าเชื่อม และความเร็วของการเชื่อมคงที่ เท่ากับ 30 โวลต์ และ 15 นิ้วต่อนาที ตามลำดับ หลังจากการเชื่อม นำชิ้นงานโลหะเชื่อมมาวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และความแข็งแบบร็อกเวลซี ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมโดยมีการเติมคาร์บอน ปริมาณ 3 กรัม และใช้กระแสไฟเชื่อมเท่ากับ 430 แอมแปร์ เป็นชิ้นงานที่มีความแข็งมากที่สุด คือ โดยมีค่าความแข็งเท่ากับ 47 HRC และมีปริมาณคาร์บอนมากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.34 เปอร์เซ็นต์ ชิ้นงานนี้จัดเป็นเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอย ซึ่งมีโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยเพิลไลท์ และคาร์ไบด์ จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความแข็งของเนื้อโลหะเชื่อม คือ ปริมาณสารเติม และอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณสารเติมกับกระแสไฟเชื่อม

คำสำคัญ: การเชื่อมพอกแข็ง การเชื่อมใต้ฟลักซ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ คาร์บอน

Abstract

This research aimed to examine the effect of type and mass of additives and welding current on the hardness of weld metal in the submerged arc welding process. Three types of additives were used in this research including carbon, silicon carbide and carbon-silicon carbide mixture. Three amounts of each additive were used in this research including 1, 2 and 3 grams. Three welding currents were used in this research including 430, 500 and 570 amperes. During welding, the welding voltage and welding speed were kept constant at 30 V and 15 inches per minute, respectively. After welding, weld metal specimens were subjected to chemical composition analysis, microstructure examination and Rockwell C hardness testing. The results demonstrated that the

specimen derived from the welding with 3 grams of carbon addition and 430 amperes of welding current was the specimen having the highest hardness value of 47 HRC and the highest carbon content of 1.34%. This specimen was hypereutectoid steel whose microstructure consisted of pearlite and carbide. From the statistical analysis, it was found that the main factors influencing the hardness of weld metal were mass of additives and the interaction effect between mass of additives and welding current.

Keywords: Hard facing, Submerge arc welding, Silicon carbide, Carbon

1. บทนำ

การเชื่อมพอกแข็ง (Hard facing) ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมน้ำตาล และอุตสาหกรรมอื่น ๆ เพื่อเพิ่มความแข็งป้องกันการสึกหรอและยืดอายุการใช้งาน [1] เมื่อชิ้นส่วนมีความเสียหายเกิดขึ้นจำเป็นต้องเปลี่ยนหรือแทนที่ด้วยอะไหล่ชิ้นใหม่อย่างไรก็ตามชิ้นส่วนที่เสียหาย บางส่วนอาจได้รับการซ่อมแซมโดยวิธีการเชื่อม เนื่องจากมี ความสะดวก รวดเร็ว [2]

การเชื่อมพอกแข็งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสำหรับการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ เกิดการสึกหรอเนื่องจากมีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์มากกว่าการเปลี่ยนอะไหล่ทดแทน ซึ่งการเชื่อมพอกแข็งต้องเลือกลวดเชื่อมและวิธีการเชื่อมให้เหมาะสมเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อมจึงมีความจำเป็น [3]

โดยทั่วไปมีการศึกษาการเชื่อมพอกแข็งด้วยกระบวนการที่หลากหลาย เช่น กระบวนการเชื่อมด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ [4] การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ (Flux core arc welding, FCAW) [5] กระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนก๊าซคลุม (Gas Tungsten Arc Welding) [6] อย่างไรก็ตามกระบวนการเชื่อมที่กล่าวมาให้อัตราการเติมเนื้อโลหะเชื่อมที่ต่ำเมื่อเทียบกับการเชื่อมกระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged arc welding, SAW) ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมที่นิยมใช้กันมาก ในงานอุตสาหกรรม เหมาะกับการเชื่อมงานที่หนางานที่มีความยาวหรืองานที่ต้องการคุณภาพของแนวเชื่อมสูง [7]

การเชื่อมพอกแข็งสามารถเติมธาตุต่าง ๆ ลงไปในเนื้อเชื่อมเพื่อเพิ่มความแข็งและความทนต่อการเสียดสี เช่น การเชื่อมเติมลวดอลูมิเนียม [8] เติมซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide, SiC) ที่ผิว [9] กระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนก๊าซคลุม [8], [9] การเติมโครเมียม (Chromium) [3] การเติมเฟอร์โรโครเมียม (Ferro chromium) เฟอร์โรคาร์บอน (Ferro carbon) [10] ด้วยกระบวนการเชื่อมเชื่อมใต้ฟลักซ์ [3], [10]

ซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นอนุภาคที่น่าสนใจในการเติมลงไปในบริเวณเนื้อเชื่อมเนื่องจากหาได้ง่ายโดยทั่วไปและสามารถเพิ่มความแข็งและความทนต่อการเสียดสีได้ดี เนื่องจากซิลิคอนคาร์ไบด์รวมตัวกับเหล็กเกิดเป็นสารประกอบ Fe_8Si_2C [9] นอกจากนี้คาร์บอนเป็นอีกธาตุหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติทางกลด้านความแข็งในเหล็ก โดยทั่วไปมักเติมคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยวิธีการแพคคาร์บูไรซิง (Pack carburizing) [11]-[14] ซึ่งคาร์บอนที่เติมทำให้เหล็กมีโครงสร้างเพิลร์ไลท์ (Pearlite) มากขึ้น [12] ส่งผลต่อความแข็งที่เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งความแข็งที่ได้ขึ้นกับปริมาณที่เติม นอกจากนี้ตัวแปรในการเชื่อมก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแข็งโดยเฉพาะกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ซึ่งพบว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันส่งผลส่งผลต่อความแข็งที่แตกต่างกัน [4] ดังนั้นผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาการเติมคาร์บอนและซิลิคอนคาร์ไบด์ ด้วยกระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์เพื่อศึกษาผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งของเนื้อเชื่อมประกอบด้วย 3 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดธาตุหรือชนิดของสารเติม (Additive) ปริมาณการเติม และกระแสไฟเชื่อม เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มความแข็งให้กับเนื้อโลหะเชื่อม นำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการเชื่อม เป็นการยืดอายุการใช้งานชิ้นส่วนเครื่องจักร

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. วัสดุชิ้นงานในการทดลอง

วัสดุที่เลือกใช้ในการทดลองนี้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำโดยมีส่วนผสมเคมีดัง (Table 1) [3] ตัดชิ้นเชื่อมให้มีขนาดความกว้าง 100 มิลลิเมตร ความยาว 200 มิลลิเมตร และความหนา 12 มิลลิเมตร

Table 1 Chemical composition of low carbon steel

C	Si	Mn	P/S	Fe
0.13	0.16	0.05	0.05	Bal.

2.2. สารเติม

สารเติม (Additive) ที่ใช้เติมที่ผิวชิ้นงานมี 3 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (Carbon, C) ซิลิคอนคาร์ไบด์ และคาร์บอนผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ ในอัตราส่วน 1:1 ขนาดสารเติม 44 ไมโครเมตร โรยสารเติมลงบนผิวหน้าชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำความกว้าง 15 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร ตามทิศทางแนวเชื่อม (Figure 1) โดยผู้วิจัยได้ทดลองเชื่อมเบื้องต้นพบว่าการโรยเติมที่ผิวชิ้นงาน 1 กรัม สามารถครอบคลุมพื้นที่บริเวณแนวเชื่อมที่ต้องการศึกษาและได้เพิ่มการศึกษาอีก 2 ระดับ คือ ปริมาณ 2 กรัม และ 3 กรัม ตามลำดับ

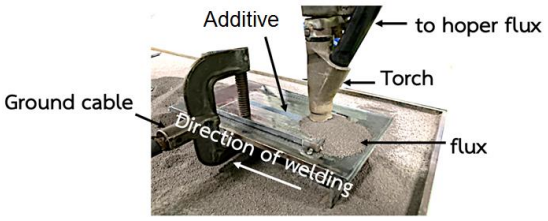

Figure 1 Addition of additive on low carbon steel

2.3. การเชื่อมชิ้นงาน

เชื่อมชิ้นงานด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์ (Submerged arc welding) ด้วยลวดเชื่อม A5.17-EM 12 K (Table 2) ใช้ผงฟลักซ์ Lincoln 780 (Table 3) การกำหนดตัวแปรในการเชื่อม ผู้วิจัยได้ทดลองเชื่อมชิ้นงานจากกระแสไฟเชื่อมสูงสุดที่สามารเชื่อมชิ้นงานความหนา 10 มิลลิเมตร ที่กระแสไฟเชื่อม 570 แอมแปร์ จากนั้นเลือกศึกษาระดับกระแสไฟเชื่อม 3 ระดับ ปรับค่าตัวแปรแรงดันไฟฟ้าเชื่อมและความเร็วเชื่อมเพื่อให้ได้ตัวแปรในการทดลอง ดังแสดงใน Table 4

Table 2 Chemical composition of electrode wire

C	Si	Mn	P	S	Cu
<0.15	<0.35	<1.25	0.030	0.030	0.35

Table 3 Chemical composition of flux

SiO_2	MnO	CaF_2	Na_2O	AL_2O_3	CaO	TiO_2
9	16	11	2	45	1	9

Table 4 Welding parameters

Welding parameter	Value
Current	430, 500, 570 A
Voltage	30 V
Speed	15 inches/min

2.4. การตัดชิ้นงานทดสอบคุณสมบัติทางกล

ตัดชิ้นขนาดความกว้าง 20 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบความแข็ง ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี (Figure 2)

2.5. การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งใช้การทดสอบแบบร็อกเวลซี (Hardness Rockwell C) บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมโดยกำหนดตำแหน่งในการทดสอบจำนวน 5 จุด (Figure 3)

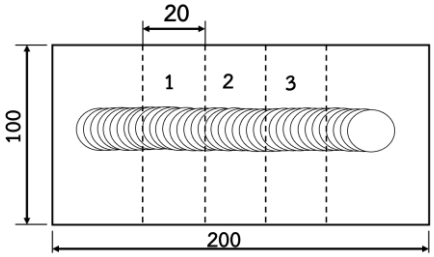

Figure 2 Specimen cutting for tests (sizes in mm) 1 Hardness test, 2 Microstructure examination, 3 Chemical composition test

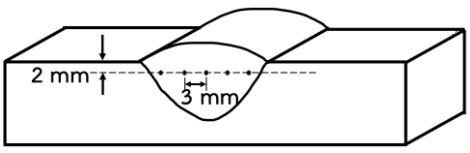

Figure 3 Positions for hardness test

2.6. การวิเคราะห์ทางโลหะวิทยา

การวิเคราะห์ทางโลหะวิทยาประกอบด้วยการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (Scanning electron microscope)

2.7. การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อม 3 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดสารที่เติม ปริมาณสารที่เติม และกระแสไฟฟ้าเชื่อม โดยเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full factorial) ในการวิเคราะห์สถิติใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3. ผลการวิจัย

3.1. ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

จากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีพบว่าการเติมคาร์บอนและซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยวิธีการเชื่อมใต้ฟลักซ์ช่วยเพิ่มปริมาณคาร์บอนและซิลิคอนในแนวเชื่อมได้เมื่อเปรียบเทียบกับการเชื่อมปกติ ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนและปริมาณซิลิคอนเพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมทุกค่ากระแสเชื่อม (Table 5, Table 6) ส่วนการเติมคาร์บอนผสมกับซิลิคอนคาร์ไบด์และการเติมคาร์บอนเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนและซิลิคอนเพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่แน่นอน ไม่ขึ้นกับปริมาณการเติมและกระแสไฟเชื่อม การทดลองนี้พบว่าการเติมคาร์บอนปริมาณ 3 กรัม สามารถเติมคาร์บอนในแนวเชื่อมได้สูงที่สุด 1.34 เปอร์เซ็นต์ และการเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ 3 กรัม สามารถเติมซิลิคอนในแนวเชื่อมได้สูงสุด 0.81 เปอร์เซ็นต์ ที่กระแสไฟเชื่อม 430 แอมแปร์ ซึ่งชิ้นงานที่เชื่อมด้วยตัวแปรดังกล่าวจะนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในขั้นตอนต่อไป

3.2. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่เติมคาร์บอน 3 กรัม สามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนได้สูงถึง 1.34 เปอร์เซ็นต์ จัดอยู่ในกลุ่มเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอย (Hypereutectoid steel) โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเพิร์ลไลท์และซีเมนไตท์ (Cementite) หรือคาร์ไบด์ (Carbide) (Figure 4) ส่วนชิ้นงานที่เติมซิลิคอนคาร์ไบด์และคาร์บอนผสมซิลิคอนคาร์ไบด์มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์ จัดอยู่ในกลุ่มเหล็กไฮโปยูเทคตอย (Hypoeutectoid steel) โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยโครงสร้างเพิร์ลไลท์ และเฟอร์ไรท์ (Figure 5, Figure 6)

Table 5 Percentage of carbon content of weld metals from the welding with different types and amounts of additives and different welding currents

Additive	Mass (g)	Carbon content (%)		
		430 A	500 A	570 A
Carbon	0	0.15	0.15	0.15
	1	0.28	0.32	0.58
	2	0.32	0.34	0.54
	3	1.34	0.32	0.36
Silicon carbide	0	0.15	0.16	0.17
	1	0.21	0.20	0.21
	2	0.26	0.21	0.21
	3	0.30	0.22	0.23
Carbon-silicon carbide mixture	0	1.13	0.15	0.14
	1	0.33	0.36	0.37
	2	0.38	0.45	0.44
	3	0.34	0.23	0.36

Table 6 Percentage of silicon content of weld metals from the welding with different types and amounts of additives and different welding currents

Additive	Mass (g)	Silicon content (%)		
		430 A	500 A	570 A
Silicon carbide	0	0.19	0.19	0.19
	1	0.29	0.28	0.34
	2	0.62	0.36	0.38
	3	0.81	0.37	0.40
Carbon-silicon carbide mixture	0	0.21	0.17	0.17
	1	0.31	0.32	0.34
	2	0.33	0.35	0.41
	3	0.28	0.23	0.32

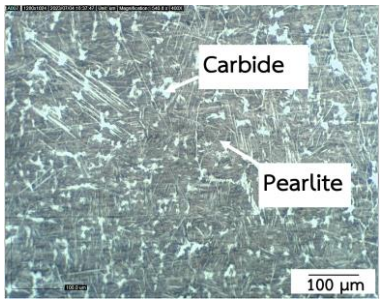

Figure 4 Microstructure of weld metal (carbon 3 g, welding current 430 A)

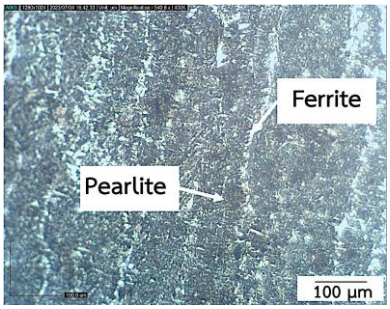

Figure 5 Microstructure of weld metal (silicon carbide 3 g, welding current 430 A)

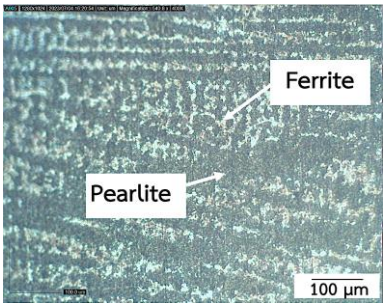

Figure 6 Microstructure of weld metal (carbon-silicon carbide mixture 3 g, welding current 430 A)

3.3. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ

การวิเคราะห์การกระจายตัวของอะตอมธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ผู้วิจัยเลือกวิเคราะห์ในชิ้นงานที่เติมสารชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 3 กรัม ที่กระแสไฟเชื่อม 430 แอมป์แปร์ ซึ่งเป็นตัวแปรทดลองที่ให้ความแข็งสูงสุดจากการทดลองในครั้งนี้ ซึ่งพบว่าเนื้อเชื่อมที่เติมคาร์บอนนั้นมีการกระจายตัวของคาร์บอนในปริมาณ 46.58 เปอร์เซ็นต์ และซิลิคอน 2.05 เปอร์เซ็นต์ (Figure 7) เนื้อเชื่อมที่เติมซิลิคอนคาร์ไบด์มีการกระจายตัวของคาร์บอนลดลงอยู่ที่ 37.71 เปอร์เซ็นต์ ส่วนซิลิคอนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอยู่ที่ 2.30 เปอร์เซ็นต์ (Figure 8) เนื้อโลหะเชื่อมที่เติมซิลิคอนคาร์ไบด์ผสมคาร์บอนมีการกระจายตัวของคาร์บอน 46.39 เปอร์เซ็นต์ และซิลิคอน 2.22 เปอร์เซ็นต์ (Figure 9)

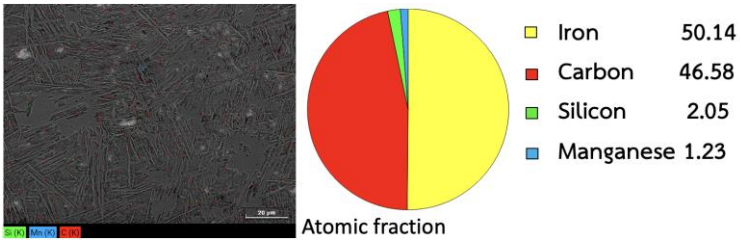

Figure 7 Distribution of carbon and silicon on weld metal (carbon 3 g, welding current 430 A)

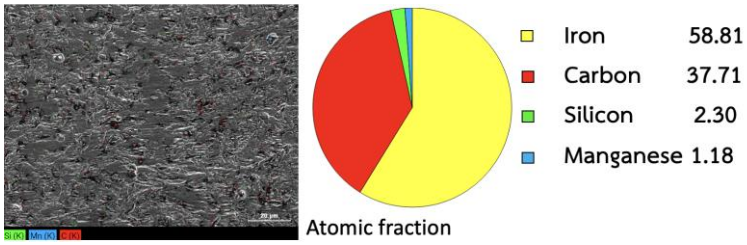

Figure 8 Distribution of carbon and silicon on weld metal (silicon carbide 3 g, welding current 430 A)

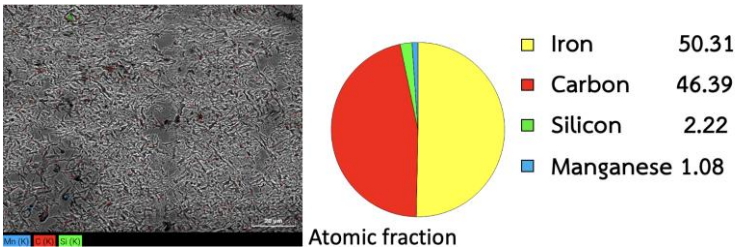

Figure 9 Distribution of carbon and silicon on weld metal (carbon-silicon carbide mixture 3 g, welding current 430 A)

3.4. ผลการทดสอบความแข็ง

จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปได้ลำดับขั้นตอนการทดลองและผลการทดสอบค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Table 7)

ความแข็งความแข็งเนื้อโลหะเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารที่เติม การเติมสารในปริมาณ 3 กรัมและเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 430 แอมแปร์ ให้ค่าความแข็งสูงสุด การเติมคาร์บอนได้ค่าความสูงที่สุด 47 HRC (Figure 10) การเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ค่าความแข็งสูงสุด 26 HRC (Figure 11) และการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ผสมคาร์บอนได้ค่าความแข็งสูงสุด 30 HRC (Figure 12)

Table 7 Hardness of weld metal from the welding with different types and amounts of additives and different welding currents studied by full factorial designed experiment

No	Additive	Current (A)	Mass (g)	Hardness (HRC)
1	SiC	430	2	20
2	C	500	2	17
3	C+SiC	430	2	27
4	C+SiC	430	3	30
5	SiC	570	0	11
6	C	430	2	17
7	C+SiC	500	3	26
8	C	570	3	21
9	C	570	0	11
10	C	570	1	15
11	C+SiC	570	0	11
12	SiC	500	1	21
13	C+SiC	570	2	24
14	SiC	500	3	22
15	C	430	3	47
16	C+SiC	430	1	18
17	SiC	570	3	25
18	SiC	500	2	21
19	C+SiC	430	0	13
20	C+SiC	570	1	19
21	C+SiC	570	3	25
22	C	500	0	12
23	C+SiC	500	0	12
24	SiC	430	1	20
25	SiC	570	2	23
26	SiC	430	0	10
27	SiC	430	3	27
28	C	500	1	15
29	C	570	2	16
30	C+SiC	500	1	16
31	SiC	500	0	12
32	C	430	0	13
33	C	430	1	16
34	C+SiC	500	2	26
35	C	500	3	27
36	SiC	570	1	22

C = carbon, SiC = Silicon carbide, C+SiC = carbon-silicon carbide mixture

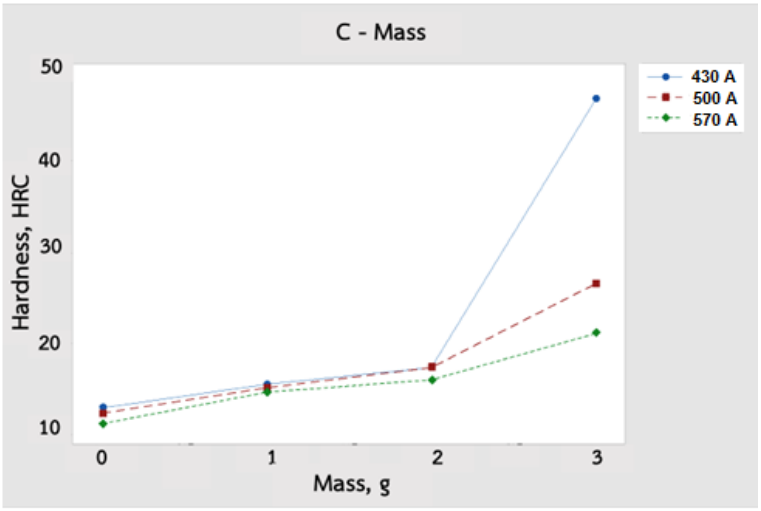

Figure 10 Relationship between mass of carbon and hardness

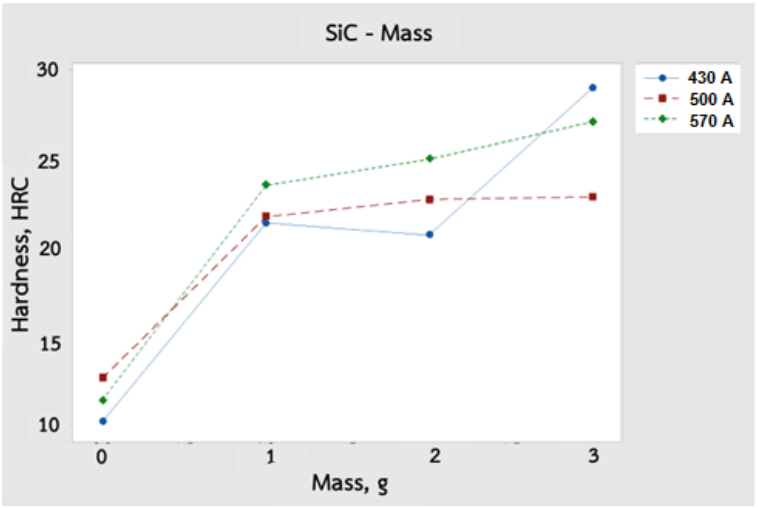

Figure 11 Relationship between mass of silicon carbide and hardness

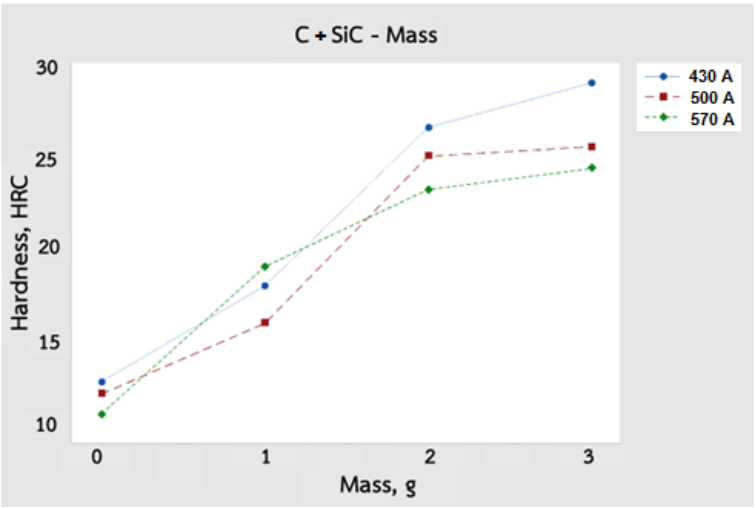

Figure 12 Relationship between mass of carbon-silicon carbide mixture and hardness

3.5. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การตรวจสอบคุณภาพของข้องมูลจากกราฟ พบว่า P-value มีค่า 0.055 แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ข้อมูลมีการกระจายกระจายตัวรอบค่าเฉลี่ย 0 หมายถึงข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นปกติ (Figure 13) การทดสอบส่วนตกค้างกับค่าพยากรณ์ เพื่อดูความอิสระของข้อมูล พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวคนละทิศทางไม่เป็นแนวโน้ม หรือวัฏจักร จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระกัน (Figure 14) จากกราฟพบว่าข้อมูลมีการกระจายกระจายตัวรอบค่าเฉลี่ย 0 หมายถึงข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นปกติ การทดสอบส่วนตกค้างกับค่าพยากรณ์ เพื่อดูความอิสระของข้อมูล พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวคนละทิศทางไม่เป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระกัน (Figure 15)

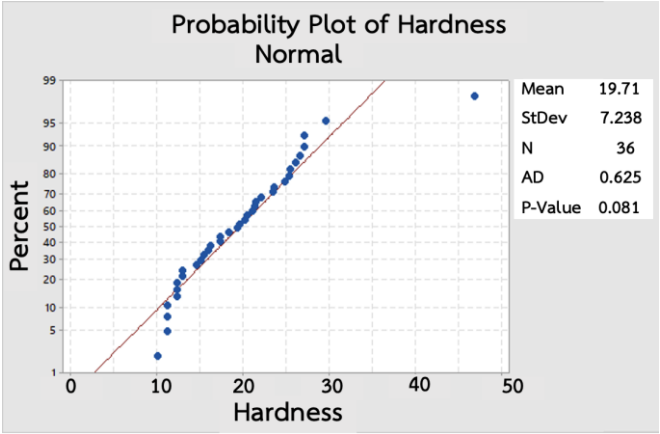

Figure 13 Probability plot of hardness.

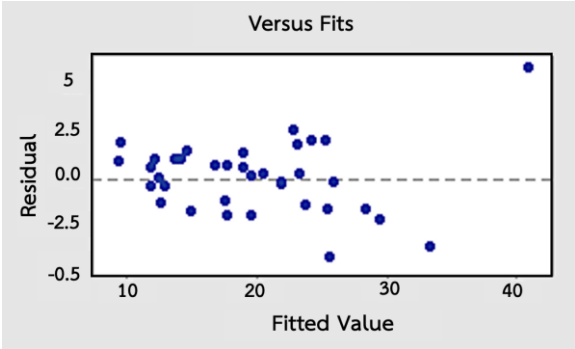

Figure 14 Residual versus fits plot

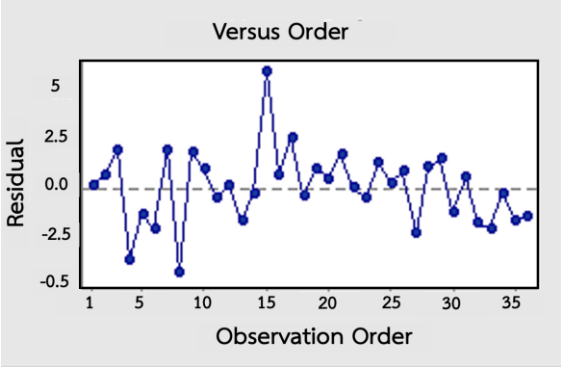

Figure 15 Residual versus order plot

โมเดล R-sq มีค่า 92.99% และค่า R-sq(adj) มีค่า 79.54% ซึ่งค่ามากกว่า 70% แสดงว่ามีค่าเหมาะสม [15], [16] (Table 8)

Table 8 Model Summary

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.27381	92.99%	79.54%	36.87%

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยชนิดธาตุสารที่เติมมีค่า P-value 0.471 มากกว่า 0.05 สรุปได้ว่าปัจจัยชนิดสารที่เติมไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งของเนื้อโลหะเชื่อมปัจจัยปริมาณการเติม (Mass) ค่า P-value มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (0) ซึ่งน้อยกว่า 0.05 สรุปได้ว่าปัจจัยปริมาณการส่งผลต่อค่าความแข็งของเนื้อโลหะเชื่อม และปัจจัยกระแสไฟฟ้าเชื่อม (Current) มีค่า P-value 0.11 สรุปได้ว่าปัจจัยชนิดสารที่เติมไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งของเนื้อโลหะเชื่อมมีค่า 0.005 ซึ่ง น้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าทั้งสองปัจจัยส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อม ในส่วน ปฏิสัมพันธ์หรืออิทธิพลร่วม (Interactions) มีเพียงปัจจัยของชนิดสารเติมกับปริมาณเติมที่ส่งผล โดยมีค่าค่า P-value มีค่า 0.034 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Table 9)

ปัจจัยชนิดปัจจัยปริมาณสารที่เติม (C) และInteraction ระหว่างชนิดสารเติมกับปริมาณเติม (A*C) มีค่าสูงกว่าเส้นวิกฤติ แสดงว่าทั้ง 2 ปัจจัย ส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ (Figure 16)

กราฟแสดงการยืนยันปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมใช้ Main effects plot พบว่า ปัจจัยปริมาณสารที่เติมส่งผลต่อค่าความแข็งของเนื้อโลหะเชื่อมอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารที่เติม (Figure 17)

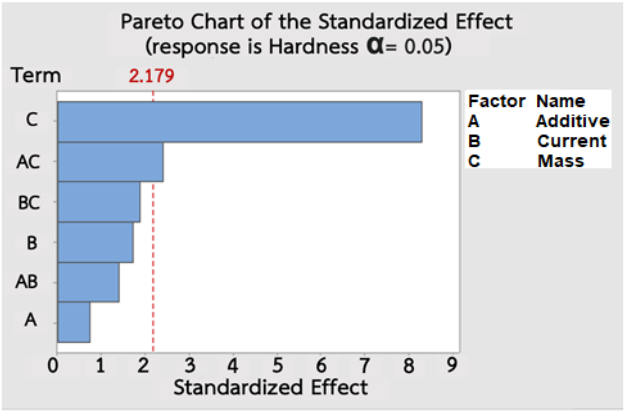

Figure 16 Pareto chart of standardized effect

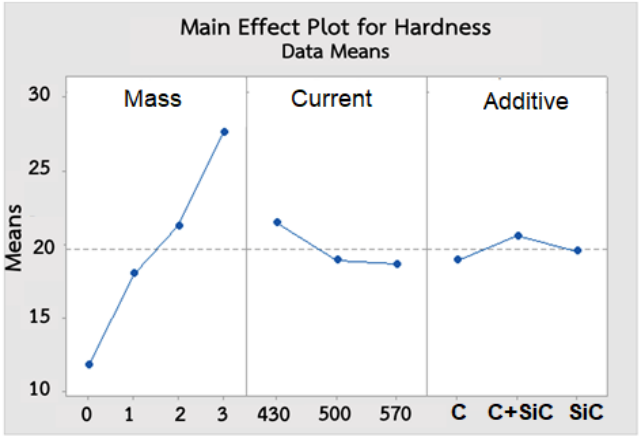

Figure 17 Main effects plot for hardness

Table 9 Analysis of variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	23	1705.07	74.133	6.92	0.001
Linear	7	1248.14	178.306	16.64	0
Additive	2	17.21	8.605	0.8	0.471
Current	2	57.32	28.658	2.67	0.11
Mass	3	1173.62	391.206	36.5	0
2-Way Interactions	16	456.92	28.558	2.66	0.046
Additive*Current	4	78.15	19.537	1.82	0.189
Additive*Mass	6	218.98	36.496	3.41	0.034
Current*Mass	6	159.8	26.633	2.48	0.085
Error	12	128.61	10.718		
Total	35	1833.68			

4. การอภิปรายผล

ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมคือปริมาณสารที่เติมในเนื้อโลหะเชื่อม การเติมคาร์บอนในปริมาณ 3 กรัม ส่งผลต่อค่าความแข็งสูงที่สุดเนื่องจากสามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนได้สูงถึง 1.34 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่จัดในกลุ่ม เหล็กกล้าคาร์บอนสูง โดยปกติแล้วเหล็กกลุ่มนี้จะเกิดคาร์ไบด์แบบตาข่าย (Network carbide) [17] ทำให้มีค่าคามแข็งสูง ส่วนการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์และคาร์บอนผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ นั้นสามารถเพิ่มคาร์บอนได้ในปริมาณน้อยกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปริมาณดังกล่าวไม่ทำให้เนื้อโลหะเชื่อมเกิดคาร์ไบด์แบบตาข่ายส่งผลให้ค่าความแข็งน้อยกว่าเนื้อโลหะเชื่อมที่เติมคาร์บอนเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามเมื่อผ่านกระบวนการเชื่อม ซิลิคอนคาร์ไบด์จะหลอมละลายรวมกับเนื้อเชื่อมเกิดเป็นสารประกอบ Fe_8Si_2C ซึ่งมีความแข็งและช่วยลดการสึกหรอจากการเสียดสีได้ดี [9] อีกหนึ่งปัจจัยร่วมที่ส่งผลคือกระแสไฟเชื่อม จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเชื่อมด้วยกระแสต่ำ เนื่องจากมีปริมาณความร้อนป้อนเข้า (Heat in put) ที่ต่ำทำให้ชิ้นงานเชื่อมมีอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแสไฟสูง อัตราการเย็นตัวของเนื้อเชื่อมส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็ง โดยพบว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟต่ำส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีความละเอียดส่งผลให้เนื้อโลหะเชื่อมมีความแข็งที่สูงกว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟที่สูง [4] สำหรับเนื้อโลหะเชื่อมที่มีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 0.3 เปอร์เซ็นต์ จัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) สามารถทำกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment) ด้วยกระบวนการชุบแข็ง (Hardening) ซึ่งจะได้โครงสร้างจุลภาคเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่มีความแข็งสูงเหมาะสำหรับการใช้งานในสภาพการเสียดสี

5. บทสรุป

จากการศึกษานี้สรุปได้ว่าการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ คาร์บอน และคาร์บอนผสมซิลิคอนคาร์ไบด์ในเนื้อโลหะเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมใต้ฟลักซ์สามารถเพิ่มความแข็งของเนื้อโลหะเชื่อมได้ โดยค่าความแข็งแปรผันตามปริมาณสารเติม การเพิ่มปริมาณสารเติมส่งผลให้ค่าความแข็งที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งสูงที่สุดคือการเติมสารที่ปริมาณ 3 กรัม ในส่วนของปัจจัยกระแสไฟฟ้าเชื่อมสรุปได้ว่า การเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 430 แอมป์แปร์ ส่งผลให้เนื้อเชื่อมมีค่าความแข็งสูงที่สุด การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความแข็งคือ ปัจจัยปริมาณสารเติม และปัจจัยที่มีปฏิสัมพันธ์หรืออิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณสารเติมกับกระแสไฟเชื่อม

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 จากการวิจัยนี้สังเกตได้ว่าการโรยสารชนิดต่าง ๆ ที่ผิวชิ้นงานนั้น สารเติมไปกั้นการสัมผัสระหว่างลวดเชื่อมกับผิวหน้าชิ้นงาน ส่งผลให้การอาร์คเริ่มต้นเชื่อมไม่ดี ดังนั้นควรเริ่มต้นเชื่อมห่างจากตำแหน่งที่โรยสารเติมเล็กน้อย

6.2 ผลการศึกษานี้ ค่าความแข็งมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการเติม สูงสุดที่ปริมาณการเติม 3 กรัม การศึกษาการเติมสารในปริมาณที่สูงขึ้นมีความน่าสนใจในการศึกษาในครั้งต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหการเชื่อมประกอบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการวิจัย

8. References

[1] Tuiprae, M. and kaewpad, K. 2017. Characterization hard surfacing of Cr-Nb-Ni-Fe based and Cr-Mo-W-Fe based cored wires fabricated by gas metal arc welding. **Journal of Industrial Technology.** 13(1): 1-15. (*in Thai*)

[2] Phonpud, I. and et al. 2022. Effect of filler metals on creep properties of 2.25Cr-1Mo steel weld joints prepared by TIG process. **Journal of Engineering and Innovation.** 15(3): 82-91. (*in Thai*)

[3] Srikarun, B. and Muangjunburee, P. 2019. The Effect of chromium addition in weld metal by submerged arc welding process. **Engineering journal Ching Mai University.** 26(1): 148-157. (*in Thai*)

[4] Dhinnabutra, P., Yotee, S. and Khaongam, K. 2020. Influence of welding current on the hardness of hard faced metal of cold work tool steels JIS SKD11 by shielded metal arc welding In: **Proceedings of The 4th Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi Conference,** 23-24 April 2020. Nonthaburi, Thailand. (*in Thai*)

[5] Treeparee, T. and Muangjunburee, P. 2019. The study of wear behavior of hardfacing layer on 3.5% Cr steel by flux cored wire arc welding process. **Engineering Journal Ching Mai University.** 26(2): 28-35. (*in Thai*)

[6] Charoenrat, S., Pookamnerd, Y. and Prasomthong, S. 2021. Consideration of the optimizing condition in welding hardfacing on wear resistance with hot-wire gas tungsten arc welding process by response surface methodology (RSM). **The Journal of Industrial Technology.** 17(2): 87-102. (*in Thai*)

[7] Keawpirom, K., Songsorn, K. and Lubphoo, Y. 2017. Influence of flux-slag mixture on mechanical properties of hardfacing in submerged arc welding process. In: **Proceedings of Industrial Engineering Network Conference 2017,** 12-15 July 2017. Ching Mai, Thailand. (*in Thai*)

[8] Prasomthong, S. and Namkaew, S. 2019. The influence of adding aluminum welding wire on mechanical properties and chemical composition of the welding hardfacing welded low carbon steel by gas tungsten arc welding process. **The Journal of Industrial Technology.** 15(1): 28-40. (*in Thai*)

[9] Lin, Y.C., Chen, H.M. and Chen, Y.C. 2013. Analysis of microstructure and wear performance of SiC clad layer on SKD61 die steel after gas tungsten arc welding. **Materials and Design.** 47(2013): 828-835.

[10] Srikarun, B. and Muangjunburee, P. 2018. Microstructure and wear behavior of hardfacing with ferro-alloy powder addition using submerged arc welding. **Chiang Mai Journal of Science.** 45(5): 2034-2047.

[11] Pitsuwan, P. and et al. 2018. Influence of catalyst on surface hardening of low carbon steel by pack carburizing with mangrove charcoal powder. **Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University.** 8(2): 1-12. (*in Thai*)

[12] Kongsong, P., Jansom, N. and Faonongdu, S. 2019. The comparison of energizer between the rubber wood ash and $CaCO_3$ in the pack carburizing process with rubber wood charcoal powder. **Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal.** 11(2): 208-218. (*in Thai*)

[13] Runkratok, P. and et al. 2017. Design of experiments that affect to pack carburizing cutting molds. In: **Proceedings of Industrial Engineering Network Conference 2017,** 12-15 July 2017. Ching Mai, Thailand. (*in Thai*)

[14] Thammachot, N. and et al. 2021. Optimum carburizing temperature and time in hardening big knife by pack carburizing process using golden apple snail shells as an energizer. **UBU Engineering Journal.** 14(4): 116-128. (*in Thai*)

[15] Chanpahol, A. and Jantana, Y. 2022. Optimization for compress rubber screen machine setup using design of experiment. **Journal of Engineering and Innovation.** 10(2): 156-164. (*in Thai*)

[16] Jantana, Y. and Rattanawai, N. 2022. Optimizing factors for lemongrass slicer using design of experiment. **Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal.** 14(1): 83-95. (*in Thai*)

[17] Homjabok, W. and et al. 2023. Effect of time and number of cycles in spheroidizing process on the formation of SUJ2 high carbon steel carbide spheroids In: **Proceedings of the 14th Engineering, Science, Technology and Architecture Conference,** 25-26 August 2023. Kalasin. Thailand. (*in Thai*)