

การศึกษาปัจจัยการเชื่อมแบบเสียดทานที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ของอะลูมิเนียม 6061 ที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

Study of Friction Stir Welding Parameters Affecting the Microstructure and Mechanical Properties of Silicon Carbide Reinforced Aluminum 6061

ศุภฤกษ์ บุญเที่ยง¹ ก้องเกียรติ ปุภรัตน์พงษ์² กฤษ เหลืองโสภานันท์³ และ วัฒนชัย พฤกษ์กานนท์^{4*}
Supparerk Boontein¹ Kongkiat Puparattanapong² Ghit Laungsopapun³ and Wattanachai Prukkanon^{4*}

Received: March 11, 2025

Revised: April 21, 2025

Accepted: April 24, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลในอะลูมิเนียมเกรด 6061 คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ขนาด 5 ไมครอน การศึกษาผลการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในรอยเชื่อมด้วยเครื่องมือแบบไม่มีหัวกวนในรอบที่ 1 ผลการเติมพบว่า ซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวในรอยเชื่อมได้ดีกว่าการใช้หัวกวนสี่เหลี่ยม การศึกษาผลของปัจจัยความเร็วเดินเชื่อมที่ 26 34 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วหมุนเชื่อมที่ 920 1,040 และ 1,350

¹อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
Lecturer, Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi
E-mail: Supparerk.boon@kmutt.ac.th

²อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
Instructor, Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi
E-mail: Kongkiat.pup@kmutt.ac.th

³นักวิจัย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
Researcher, Thailand Institute of Scientific and Technological Research
E-mail: Ghit@tistr.or.th

^{4*}ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมนวัตกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
Assistant Professor, Automotive Innovation Engineering, School of Engineering, University of the Thai Chamber of Commerce
E-mail: wattanachai_pru@utcc.ac.th

*Corresponding Author

รอบต่อนาที ต่อลักษณะรอยเชื่อมด้านบนมีความสมบูรณ์ทุกความเร็วเดินเชื่อม ยกเว้นรอยเชื่อมที่ความเร็วเดินเชื่อม 50 มิลลิเมตรต่อนาที และ ความเร็วหมุนหัวเชื่อม 920 รอบต่อนาที เกิดรอยร้าวด้านบนตามแนวการเชื่อมและมีผลความแข็งต่ำที่สุดที่ 54.21 HV ส่วนผลโครงสร้างจุลภาคการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์การปั่นกวานที่ความเร็วเดินเชื่อม 26 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วหมุนหัวเชื่อมที่ 1350 รอบต่อนาที ส่งผลให้อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวในชิ้นงานทดสอบอย่างสม่ำเสมอทั่วชิ้นงาน และให้ค่าความแข็งสูงที่สุดที่ 77.16 HV

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทาน, อะลูมิเนียม, อะลูมิเนียมคอมโพสิต, อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

Abstract

The objective of this study is to investigate the effects of parameters on the metallurgical and mechanical properties of friction stir welding of aluminum AA6061 reinforced with Silicon Carbide micro-particles of 5 microns. A study on the effect of silicon particle addition in friction stir welding using a pinless tool in the first pass showed better silicon carbide dispersion in the welding zone compared to using a square pin tool. A study on the effect of transverse speed 26, 34, and 50 mm/min and rotational speed 920, 1,040, and 1,350 rpm on the top welds appearance showed complete welds at all transverse speed which exhibited cracks along the weld line and the lowest hardness value of 54.21 HV. As for the microstructure, uniform silicon carbide particle distribution was observed at a travel speed of 26 mm/min and a welding rotation speed of 1350 round per minute (rpm). This resulted silicon carbide particle dispersed in a homogeneous with aluminum matrix and obtain the highest hardness of 77.16 HV.

Keywords: Friction Stir Welding, Aluminium, Aluminium Composite, Silicon Carbide Particle

1. บทนำ

อะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีน้ำหนักเบา (Light Alloy) มีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ อาทิเช่น สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีความแข็งแรงทั้งที่มีน้ำหนักเบาและยังสามารถนำไปรีไซเคิลได้ง่าย ทำให้ถูกนำไปใช้ในการผลิตชิ้นส่วนเรือและเครื่องบิน เพื่อช่วยลดน้ำหนัก ทำให้ใช้พลังงานในการขับเคลื่อนน้อยลง [1] อะลูมิเนียมจึงถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม และนอกจากนี้ยังมีแนวโน้มในการใช้อะลูมิเนียมสูงขึ้นในทุก ๆ ปี ดังนั้นในปัจจุบันอะลูมิเนียมถือว่าเป็นหนึ่งในวัสดุทางวิศวกรรมที่มีความสำคัญในงานอุตสาหกรรมเป็นอย่างยิ่ง

ในหลายปีที่ผ่านมาได้มีการวิจัยและพัฒนาสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอะลูมิเนียมในการใช้งานในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมไปถึงอุตสาหกรรมอากาศยาน และหนึ่งในงานวิจัยและพัฒนา คือ การศึกษาสมบัติทางกล โดยการใส่อนุภาคเข้าไปในเนื้อโลหะโดยอนุภาคที่ใส่เข้าไปจะกระจายตัวอยู่ตามเนื้อพื้นเพื่อช่วยเสริมแรงเฉพาะจุด โดยนิยมใช้ส่วนเสริมแรงที่เป็นเซรามิก เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide) โบรอนคาร์ไบด์ (Boron Carbide) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide) โดยในอุตสาหกรรมนิยมใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นสารเสริมแรงอย่างแพร่หลาย [2, 3] เนื่องจากราคาถูก และสามารถหาซื้อได้ทั่วไป

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอะลูมิเนียมที่มีการเติมอนุภาคเสริมแรง โดยใช้อะลูมิเนียมเกรด 6061 เนื่องจากเป็นอะลูมิเนียมที่โดดเด่นในเรื่องความแข็งแรง และน้ำหนักเบาจึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการความแข็งแรง เช่น โครงสร้างและอุปกรณ์เรือเดินสมุทร ยานพาหนะต่าง ๆ อุตสาหกรรมการบิน ตัวอย่างเช่น

การทำเฟรมเครื่องบิน ที่จำเป็นต้องมีความแข็งแรง แต่น้ำหนักต้องเบา [4] และได้ทำการศึกษาผลของการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาด 5 ไมครอน เป็นอนุภาคเสริมแรง เนื่องจากการเพิ่มสมบัติของวัสดุจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของอนุภาคเสริมแรง ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเลือกใช้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) ที่เป็นวิธีการในการผลิตอะลูมิเนียมคอมโพสิต เนื่องจากเป็นเทคนิคการเชื่อมโลหะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมละลายหรือเรียกว่า การเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid State) โดยมีข้อได้เปรียบกว่าวิธีการเชื่อมอื่นโดยสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกี่ยวกับการเกิด รูพรุน (Porosity) รอยร้าวขณะแข็งตัว (Solidification Cracking) และรอยร้าวขณะเหลว (Liquation Cracking) ส่งผลให้รอยเชื่อมของชิ้นงานมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น [5]

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาผลการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์กับการปรับเปลี่ยนชนิดหัวกดเชื่อม

2.2 ศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อกระบวนการเชื่อม ตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม ได้แก่ ความเร็วเดินเชื่อม (Transverse Speed) ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation Speed) ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลในอะลูมิเนียมเกรด 6061 คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในอะลูมิเนียมผสม 6061 ด้วยเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค เพิ่มสมบัติความแข็งแรงและความแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยข้อดีของกระบวนการนี้ คือ โครงสร้างจุลภาคละเอียด และสมบัติทางโลหะวิทยาบริเวณรอยเชื่อมจะดี และไม่สูญเสียธาตุผสม [6, 7] ผลของการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ขนาด 45-64 นาโนเมตร ในอะลูมิเนียม 5052 อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของขอบเกรนและป้องกันการเติบโตของเกรนส่งผลให้โครงสร้างเกิดเกรนที่เล็กละเอียดในบริเวณรอยเชื่อม ทำให้สามารถเชื่อมต่อได้ดี ความแข็งแรงและอัตราการยืดตัวเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการที่ไม่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ผลของพารามิเตอร์ความเร็วหมุนหัวเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมในอะลูมิเนียมเกรด 6061 ที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีผลต่อสมบัติทางกล [8] การเชื่อมเสียดทานรอบแรกด้วยหัวกดเชื่อมแบบไม่มีหัวกวน เพื่อปิดบริเวณปากหลุมไม่ให้อนุภาคกระจายตัว ก่อนการเชื่อมครั้งที่สองด้วยหัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวน ทำให้อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายได้ดีและมีค่าความแข็งแรงสูงที่สุด [9] หัวกดเชื่อมลักษณะที่ต่างกัน หัวกวนเชื่อมแบบสี่เหลี่ยมทำให้การกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์แบบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) บริเวณพื้นที่กวน (Nugget Zone) มากที่สุดในอะลูมิเนียมเกรด 1050 H24 [10] อัตราส่วนระหว่างความกว้างของร่องรอยเชื่อมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวนที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของวัสดุอะลูมิเนียมเกรด 6063 T6 ที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ [11] และการอบอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 900-1,100 °C ที่เวลาต่าง ๆ เพิ่มสมบัติความเปื่อยกผิว กำจัดสารปนเปื้อนและแก๊สที่อยู่ในอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ดี รวมทั้งการเกิดชั้นฟิล์มออกไซด์เพิ่มขึ้นผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน [12, 13]

4. วิธีการดำเนินการศึกษา

4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

4.1.1 โลหะอะลูมิเนียมผสม 6061 (AA6061) โดยมีค่าส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 โดยเตรียมชิ้นงานการทดลองขนาด $100 \times 100 \times 6 \text{ mm}^3$ มีการเจาะรูตรงกลางชิ้นงานตามแนวการเชื่อม ในรูปที่ 3 รูเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm ความลึกของรูเจาะเท่ากับ 2 mm และระยะห่างระหว่างแต่ละรูเจาะเท่ากับ 1 mm

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของแผ่นอะลูมิเนียมเกรด 6061 [4]

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ti	Zn	Other
%	0.4-0.8	0.7 Max	0.15- 0.4	0.15 Max	0.8- 1.20	0.04- 0.35	0.15 Max	0.25 Max	0.15 Max

4.1.2 อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการทดลองขนาดอนุภาค 5 ไมครอน ทำการอบไล่ความชื้นอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 890°C เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์รวมตัวกับอะซิโตน เพื่อง่ายต่อการบรรจุลงในรูเจาะ การเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้คำนวณหาค่าสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เติมเพิ่มเข้าไปในรอยเชื่อม คือ %Fraction Volume = 7.63 %

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของซิลิคอนคาร์ไบด์ [14]

มวลโมเลกุล	40.10
ค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Expansion)	$4.4 \times 10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1}$
ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	410 GPa
จุดหลอมเหลว (Melting Point)	$2,700^\circ\text{C}$
ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)	0.285 cal/g k
ความแข็ง (Hardness)	9.0-9.5 Moh's scale
ความหนาแน่น (Bulk Density)	2.0 g/cm^3
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	3.2

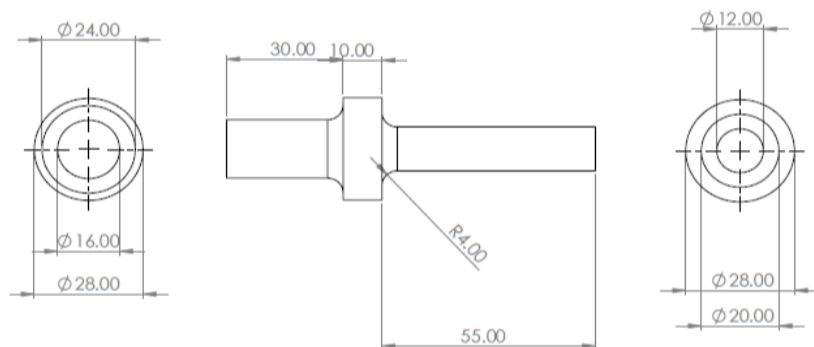
4.1.3 ชนิดของหัวกดเชื่อม (Tool Rotation) เป็นเครื่องมือที่ต้องทนความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทาน ยังต้องรับภาระทั้งแรงกด แรงบิด และการเสียดสี ทำมาจากวัสดุเหล็กกล้า JIS SKD 11 (AISI D2) เป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของ C และ Cr สูง โดยมีค่าส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้า JIS SKD11 (หน่วยเป็น %) [15]

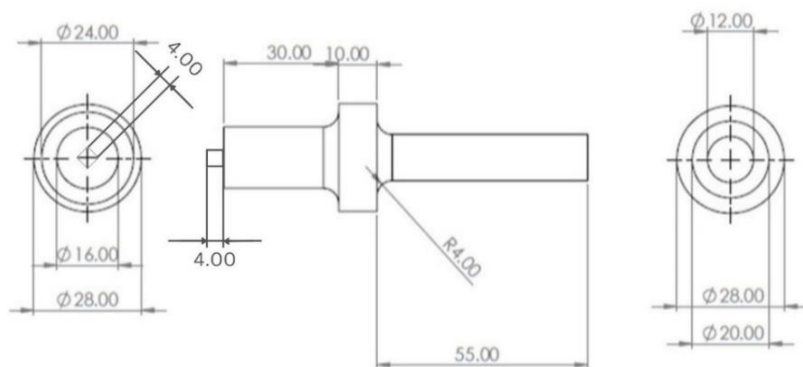
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
1.40– 1.60	≤0.40	≤0.60	≤0.03	≤0.03	≤0.25	≤0.50	11.0– 13.0	0.80– 1.20	0.20– 0.50

หัวกดเชื่อมแบบไม่มีหัวกวนและหัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวน นำมาผ่านกระบวนการปรับสมบัติด้วยความร้อน (Heat Treatment) โดยอบที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมาชุบลงในน้ำมันและปล่อยให้เย็นตัวในน้ำมัน หลังจากนั้นนำมาผ่านกระบวนการอบคืนตัว (Tempering) ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำมาชุบน้ำมันอีกครั้งและปล่อยให้เย็นตัวในน้ำมัน [16] ได้ค่าความแข็งเฉลี่ย 60.8 HRC

หัวกดเชื่อมในการทดลองประกอบด้วยรูปทรง 2 แบบ คือ 1.หัวกดเชื่อมแบบไม่มีหัวกวน (Pinless Tool) ลักษณะดังรูปที่ 1 และ 2 หัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวนทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Pin Tool) ขนาดกว้างด้านละ 4 mm และ ยาว 4 mm ลักษณะดังรูปที่ 2 ทุกหัวกดเชื่อมจะมีบ่าให้ความร้อน (Tool Shoulder) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm



รูปที่ 1 ลักษณะหัวกดเชื่อมแบบไม่มีหัวกวน



รูปที่ 2 ลักษณะหัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวนทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

4.2 ขั้นตอนการทดลอง

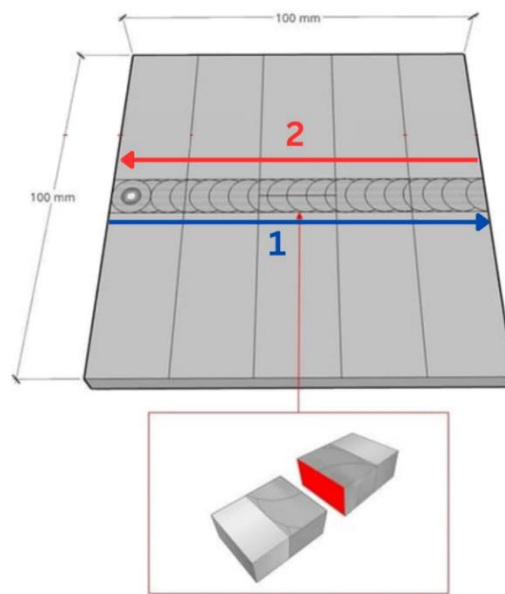
การทดลองเริ่มต้นจากการนำแผ่นอะลูมิเนียมเกรด 6061 ที่เตรียมไว้มาทำการจับยึดกับฐานยึดกระบวนกรเชื่อมจากเครื่อง Milling Machine Tong-IL TNV-50 และทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ด้วยเครื่อง INNOYATEST Verzus 750U การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามวัตถุประสงค์การวิจัย

4.2.1 เพื่อศึกษาผลการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในชิ้นงานและไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจาย ทำการกำหนดความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min และความเร็วหมุนเชื่อม 1,800 rpm เพื่อให้เกิดความร้อนสูงบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม ส่งผลให้ปิดผิวด้านบนไม่ให้อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เกิดการฟุ้งกระจายตัวในบริเวณพื้นที่กวนรอยเชื่อม เวลาในการแช่หัวกดเชื่อมก่อนเดินเชื่อม 2 นาที ในทั้ง 2 รอบ โดยทำการศึกษาเป็น 2 แบบ แบบที่ 1 ทำเชื่อมด้วยหัวกดเชื่อมไม่มีหัวกวนในรอบที่ 1 และหัวกดเชื่อมเชื่อมแบบหัวกวนสี่เหลี่ยมในรอบที่ 2 เปรียบเทียบกับแบบที่ 2 หัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวนสี่เหลี่ยมทั้งรอบที่ 1 และรอบที่ 2 โดยมีทิศทางการเชื่อมรอบที่ 1 และรอบที่ 2 ดังในรูปที่ 3 [10, 17] ผลของลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

4.2.2 เพื่อศึกษาผลการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในชิ้นงานทดสอบ เพื่อให้ผลการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นจึงเพิ่มความลึกของรูเจาะเป็น 4 mm โดยทำการเชื่อมทั้งหมด 2 รอบ รอบที่ 1 เชื่อมโดยใช้หัวกดเชื่อมแบบไม่มีหัวกวน ความเร็วในการเชื่อม 40 mm/min ความเร็วหมุนเชื่อม 1,800 rpm เวลาในการแช่หัวเชื่อมก่อนเดินเชื่อมคือ 2 นาที เพื่อปิดผิวรอยเชื่อมด้านบนให้อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในพื้นที่กวนรอยเชื่อม และรอบที่ 2 ทิศทางการเชื่อมสวนทางกับรอบที่ 1 เชื่อมโดยใช้หัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวนทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส เวลาในการแช่หัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวน คือ 3 นาทีก่อนการเดิน เพื่อให้เหมาะสมกับการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในรอยเชื่อมตามงานวิจัยที่ได้ศึกษา [7] โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการเชื่อมในรอบที่ 2 มีทั้งหมด 9 การทดลองในตารางที่ 4 ทิศทางการเชื่อมและตัดชิ้นงานตามตำแหน่งกลางชิ้นงานเชื่อม ดังรูปที่ 3 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของผิวด้านบนรอยเชื่อมดังในรูปที่ 6 ผลทางโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 200 เท่า ในรูปที่ 7 และกำลังขยาย 1,500 เท่า ในรูปที่ 8 และผลความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อมแสดงในรูปที่ 9

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ต่าง ๆ การทดลองเชื่อมรอบที่ 2

การทดลองที่	ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)	ความเร็วหมุนเชื่อม (rpm)
1	26	920
2	26	1,040
3	26	1,330
4	34	920
5	34	1,040
6	34	1,330
7	50	920
8	50	1,040
9	50	1,330



รูปที่ 3 ทิศทางการเดินเชื่อมรอบที่ 1 และรอบที่ 2 และตำแหน่งการตัดชิ้นงานทดสอบเตรียมชุดดูโครงสร้างจุลภาค และทดสอบความแข็ง

5. ผลการศึกษา

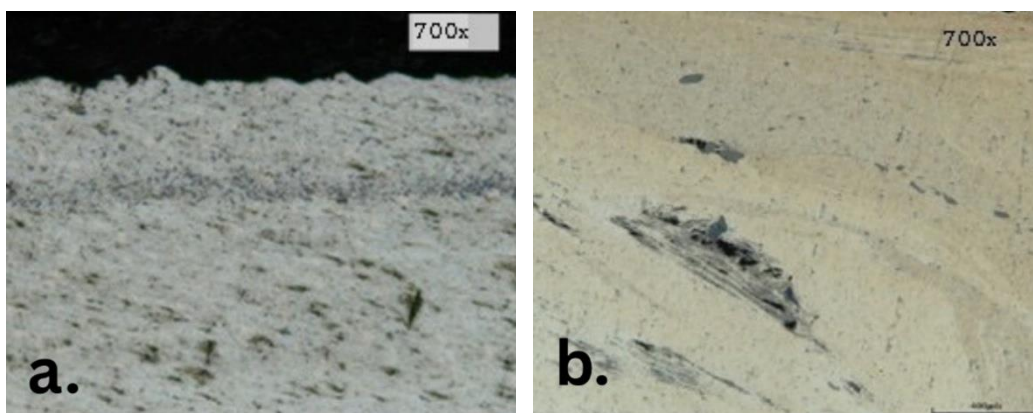
5.1 ผลของการศึกษาการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมของการทดลองที่ผ่านการเชื่อม 2 รอบ บริเวณผิวหน้าด้านบนมีลักษณะเชื่อมปิดสนิท แต่เกิดครีปที่เกิดจากการไม่หลอมละลายของอะลูมิเนียมทั้งหัวกดเชื่อมที่มีหัวทวนสี่เหลี่ยมและไม่มีหัวทวน แต่หัวกดเชื่อมที่มีหัวทวนสี่เหลี่ยมรอบที่ 1 จะมีการกระจายอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ออกบริเวณข้างแนวเชื่อมปริมาณมากอย่างชัดเจนที่วงกลมสีแดง ดังในรูปที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบกับมีหัวกดเชื่อมไม่มีหัวทวนในรอบที่ 1 จะมีปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ด้านข้างน้อยกว่า



รูปที่ 4 ลักษณะแนวเชื่อมด้านบนและด้านข้างที่ผ่านการเชื่อมหัวทวนสี่เหลี่ยม 2 รอบ

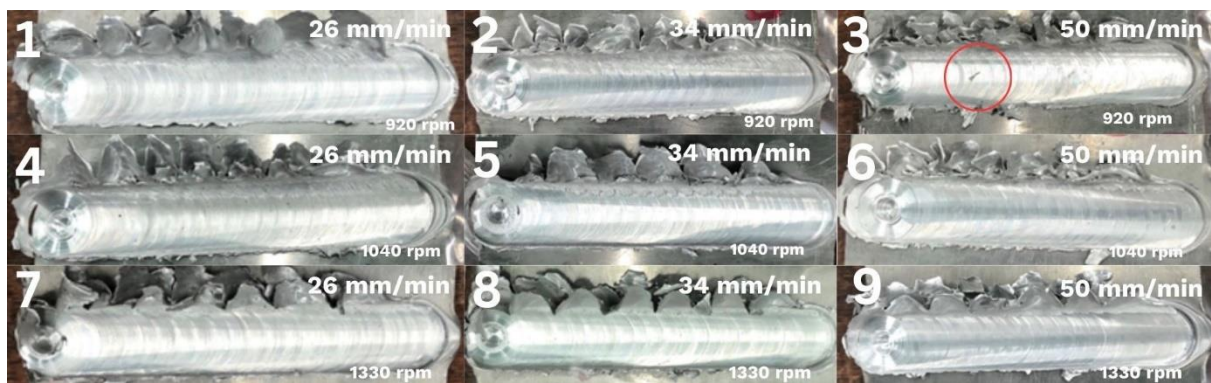
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อม 2 รอบ เมื่อเปรียบผลแบบที่ 1 ไม่มีหัวกวนรอบที่ 1 และหัวกวนทรงสี่เหลี่ยมรอบที่ 2 พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ทั่วทั้งบริเวณที่มีการกวน และพบปริมาณมากบริเวณใกล้ของรูเจาะกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในรูป 5 (a) ส่วนแบบที่ 2 โครงสร้างจุลภาค หัวกดเชื่อมแบบมีหัวกวนสี่เหลี่ยมทั้ง 2 รอบ จะพบบริเวณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์บริเวณขอบของรูที่เจาะ เกิดรูหนอนและเกิดโพรงภายในบริเวณส่วนล่างของโซนการกวนใกล้รูเจาะ ดังในรูปที่ 5 (b) เนื่องจากอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์อยู่บริเวณรูเจาะปริมาณมาก จึงได้ทำการปรับความลึกของรูเจาะให้เหมาะสม เพื่อไม่ให้ชิ้นทดสอบเกิดโพรงภายในและให้อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ในการทดลองส่วนที่ 2 จึงเพิ่มความลึกรูเจาะจาก 2 mm เป็น 4 mm



รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่กำลังขยาย 700 เท่า (a) ไม่มีหัวกวน และ (b) หัวกวนทรงสี่เหลี่ยม

5.2 ผลการศึกษาการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์

ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อม จากการทดลองพบว่า ผิวหน้ารอยเชื่อมส่วนใหญ่เชื่อมปิดสนิท ในทุกพารามิเตอร์การเชื่อม ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่ความเร็วเดินเชื่อมที่ 26 mm/min ความเร็วเดินเชื่อมที่ 34 mm/min และความเร็วเดินเชื่อมที่ 50 mm/min กับความเร็วหมุนเชื่อม ที่ 920, 1,040 และ 1,330 rpm ลักษณะผิวด้านบนชิ้นงานทดสอบมีลักษณะเชื่อมปิดสนิท ไม่เกิดความบกพร่องบนผิวหน้ารอยเชื่อม แต่ที่ความเร็วเดินเชื่อมที่ 50 mm/min ด้วยความเร็วหมุนเชื่อม 920 rpm ผิวชิ้นงานทดสอบเกิดรอยที่ไม่ต่อเนื่อง บริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม (วงกลมสีแดงในรูปที่ 6) ซึ่งเกิดเป็นรอยร้าวตามแนวการเชื่อม เป็นผลจากความร้อนแล้วเกิดการเย็นตัวเร็ว ซึ่งเกิดจากการหดตัวในแนวยาวของรอยเชื่อมชิ้นงานและทุกชิ้นงานที่ทดสอบเกิดครีบจากการที่อะลูมิเนียมหลอมละลายไม่เพียงพอทั้งสองรอบการเดิน ความเร็วรอบการเชื่อมที่ต่ำลักษณะผิวแนวเชื่อมด้านบนหยาบกว่าผิวแนวเชื่อมที่ความเร็วรอบการเชื่อมสูง เนื่องมาจากการเดินความเร็วรอบการเชื่อมสูงทำให้มีแรงเสียดทานสูงตามส่งผลให้ขณะเดินแนวเชื่อมทำให้มีความร้อนสะสมมากกว่าความเร็วรอบต่ำ ทำให้เนื้ออะลูมิเนียมเกิดการอ่อนตัวมากกว่า เกิดการหลอมของอะลูมิเนียม ส่งผลให้เกิดรอยเชื่อมที่ต่อเนื่อง เชื่อมปิดผิวที่ดีกว่า ดังในรูปที่ 6

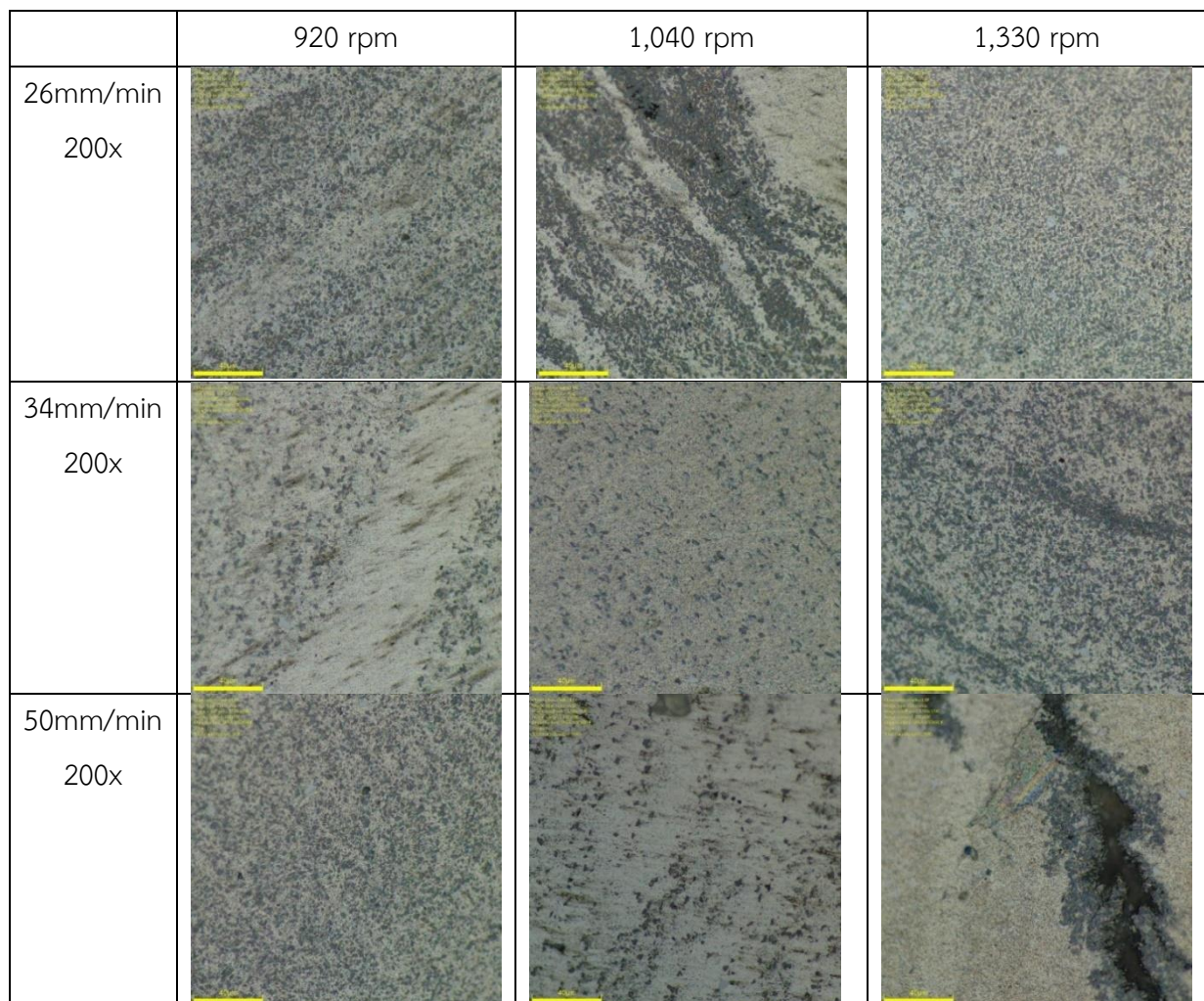


รูปที่ 6 ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมค่าความเร็วเดินเชื่อมและความเร็วหมุนเชื่อมต่าง ๆ

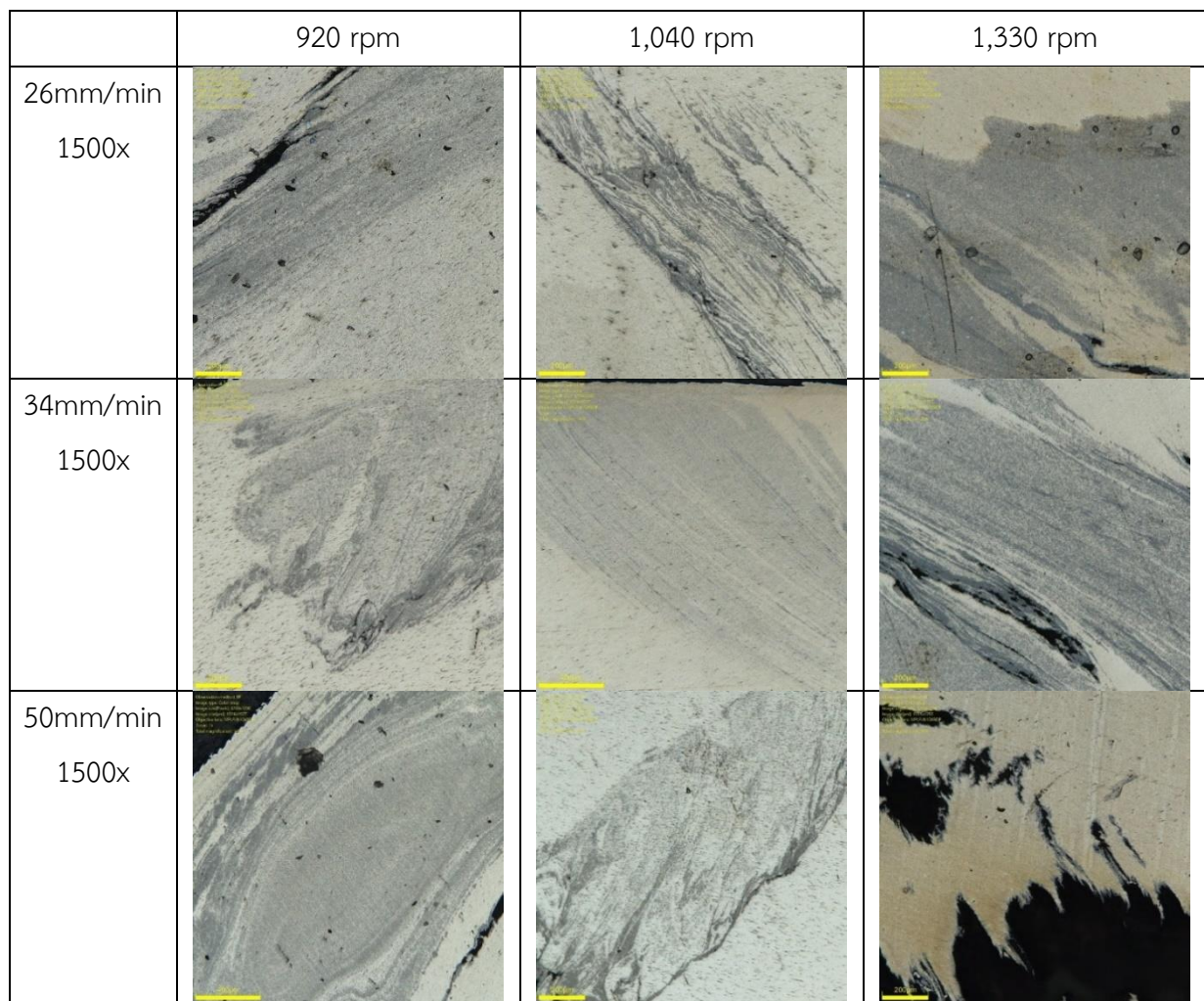
โครงสร้างจุลภาคพิจารณาที่ความเร็วเดินเชื่อม 26 mm/min เป็นหลักที่ความเร็วหมุนเชื่อม 920 rpm การกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ค่อนข้างดี แต่พบรูหนอน โครงขนาดใหญ่ และมีซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวอยู่ตามขอบของโพรงภายในที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,040 rpm การกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นลักษณะเส้นยาวตามแนวการกวและเกาะกลุ่มกันตามบริเวณรูเจาะ และที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,330 rpm กำลังขยาย 200 เท่า จะมีการกระจายตัวที่ดีมากเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอยหัวเชื่อมที่โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายเพิ่มขึ้น 1,500 เท่า พบว่าที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,330 rpm มีการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ดีและอย่างสม่ำเสมอที่สุด

โครงสร้างจุลภาคพิจารณาที่ความเร็วเดินเชื่อม 34 mm/min เป็นหลักที่ความเร็วหมุนเชื่อม 920 rpm มีการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ค่อนข้างทั่วผิว แต่มีปริมาณที่เบาบางที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าการเรียงตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ไม่ดี เกิดโพรงภายในจากการเติมเนื้อไม่สมบูรณ์ และไม่กระจายตัวทั่วบริเวณโซนการกวอย่างสม่ำเสมอ ความเร็วหมุนเชื่อม 1,040 rpm การกระจายตัวค่อนข้างดีที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าซิลิคอนคาร์ไบด์เรียงตัวกันไม่ดี พบรูหนอนเล็กน้อย ยังคงเกิดโพรงภายในจากการเติมเนื้อไม่สมบูรณ์ และไม่กระจายตัวทั่วบริเวณโซนการกวอย่างสม่ำเสมอ ที่ความเร็วเดินเชื่อม 34 mm/min และความเร็วหมุนเชื่อม 1,330 rpm นั้นค่อนข้างดีที่กำลังขยาย 200 เท่า แต่ยังพบโพรงขนาดใหญ่ และที่กำลังขยาย 1,500 เท่า มีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ดี แต่ยังคงเกาะกลุ่มไม่ทั่วบริเวณโซนการกวอย่างสม่ำเสมอ

โครงสร้างจุลภาคพิจารณาที่ความเร็วเดินเชื่อม 50 mm/min เป็นหลักที่ความเร็วหมุนเชื่อม 920 rpm กำลังขยาย 200 เท่า มีการกระจายตัวที่ดีที่กำลังขยาย 1,500 เท่า มีการเรียงตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ดี แต่ยังพบโพรงขนาดใหญ่จากการเติมเนื้อโลหะในรอยเชื่อมไม่สมบูรณ์ ความเร็วหมุนเชื่อม 1,040 rpm กำลังขยาย 200 เท่า มีการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ตัวที่ดี แต่มีรูหนอนที่ค่อนข้างมาก ความเร็วหมุนเชื่อม 1,330 rpm กำลังขยาย 200 เท่า การกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ไม่ดี และพบซิลิคอนคาร์ไบด์เกาะอยู่ตามโพรงภายใน และมีรูหนอนบริเวณที่ซิลิคอนเกาะงอกกันอยู่อย่างหนาแน่น รวมทั้งเกิดโพรงขนาดใหญ่ เกิดจากความเร็วเดินเชื่อมที่สูงเกินไป ทำให้การไหลตัวของเนื้อวัสดุไม่เพียงพอ เนื่องจากความร้อนที่ต่ำเกินไป

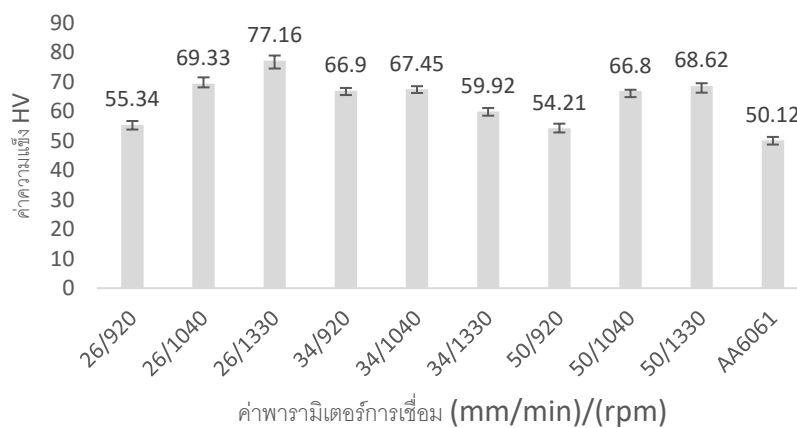


รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ความเร็วเดินเชื่อม 26 mm/min 34 mm/min และ 50 mm/min ที่ความเร็วรอบหัวกลึง 920 rpm 1,040 rpm และ 1,330 rpm กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ความเร็วเดินเชื่อม 26 mm/min 34 mm/min และ 50 mm/min ที่ความเร็วรอบหัวทวน 920 rpm 1,040 rpm และ 1,330 rpm กำลังขยาย 1,500 เท่า

โครงสร้างจุลภาคของการกระจายตัวซิลิคอนคาร์ไบด์เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วเดินเชื่อมต่างกันพบว่า ที่ความเร็วเดินเชื่อม 26 mm/min และ 34 mm/min จะมีการกระจายตัวที่ดีกว่าที่ความเร็วเดินเชื่อม 50 mm/min เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 1,500 เท่าพบว่า ความเร็วเดินเชื่อม 26 mm/min และความเร็วหมุนเชื่อม 1,330 rpm มีการกระจายตัวของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ดีที่สุด มีการเกิดโพรงภายในชิ้นงาน มีขนาดเล็กที่สุดและไม่พบรูหนอนขนาดใหญ่ และทำการทดสอบความแข็งในแต่ละชิ้นงานต่อไป ผลการวัดความแข็งของชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วการเดินเชื่อม และความเร็วหมุนเชื่อมที่ปัจจัยต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับความเร็วในการเชื่อม

จากรูปที่ 9 ผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานตามแนวเดินเชื่อม (Hardness Value : HV) ที่ความเร็วเดินเชื่อมและ ความเร็วหมุนเชื่อมของชิ้นงาน ที่ปัจจัยต่าง ๆ พบว่าค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่ 77.16 HV ที่ความเร็วเดินเชื่อม 26 mm/min และ ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,330 rpm ซึ่งมีความสอดคล้องกับ โครงสร้างจุลภาคที่มีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ดีที่สุด ส่วนค่าความแข็งต่ำสุดอยู่ที่ 54.21 HV เกิดที่ความเร็วเดินเชื่อม 50 mm/min และความเร็วหมุนเชื่อม 920 rpm จากผลลักษณะรอยเชื่อมด้านบน มีรอยร้าวตามแนวเชื่อม และจากผลโครงสร้างจุลภาคพบโพรงขนาดใหญ่จากการเติมเนื้อโลหะในรอยเชื่อม ไม่สมบูรณ์ สำหรับค่าความเร็วเดินเชื่อม และความเร็วหมุนเชื่อม อื่น ๆ จะมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 54.21 ถึง 69.33 HV มีค่าสูงกว่าอะลูมิเนียม 6061 ที่ไม่ได้เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่มีความแข็ง 50.12 HV

6. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลในอะลูมิเนียมเกรด 6061 คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ว่า

6.1 การใช้หัวกดเชื่อมแบบไม่มีหัวกวนในรอบที่ 1 มีผลการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในรอยเชื่อมกระจายตัวได้ดี เกิดรอยบกพร่องน้อย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ออกนอกแนวเชื่อมน้อย

6.2 ความเร็วเดินเชื่อมมีผลต่อความร้อนสะสมในชิ้นงาน ความเร็วเดินเชื่อมสูงเกินไปทำให้เกิดความร้อนสูง และมีการระบายความร้อนในชิ้นงานไม่เพียงพอ ส่งผลต่อโครงสร้างในแนวเชื่อม ทำให้เกิดรอยเชื่อมไม่ต่อเนื่อง เกิดรอยร้าว รุหนอน และโพรงภายใน

6.3 ความเร็วหมุนเชื่อมมีผลต่อลักษณะรอยเชื่อมด้านบน พบว่าที่ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำลักษณะรอยเชื่อมหยาบกว่าที่ความเร็วรอบการเชื่อมสูง เนื่องมาจากการเดินความเร็วหมุนเชื่อมสูงทำให้มีแรงเสียดทานสูง ทำให้มีความร้อนสะสมสูงเป็นผลให้เนื้ออะลูมิเนียมเกิดการอ่อนตัวมากกว่า ส่งผลให้เกิดรอยเชื่อมที่ต่อเนื่อง เชื่อมปิดผิวที่ดีกว่า

6.4 ความแข็งสูงสุดที่ 77.16 HV เกิดที่ความเร็วเดินเชื่อม 26 mm/min และความเร็วหมุนเชื่อม 1,350 rpm สอดคล้องกับการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ดีในรอยเชื่อม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Materia TT. Marine applications of aluminum alloys [Internet]. 2025 [cited 2025 Mar 3]. Available from: <https://www.totalmateria.com/en-us/articles/marine-applications-of-aluminum-alloys-1/>.
- [2] Morris PL, Baker C. Properties and applications of particulate reinforced aluminum MMC. In: Bouchard M, Tremblay P, editors. Production, refining, fabrication and recycling of light metals. Oxford: Pergamon; 1990. p. 199-209.
- [3] Pk J, et al. The effect of SiC content in aluminum-based metal matrix composites on the microstructure and mechanical properties of welded joints. J Mater Res Technol. 2021;12:2325-2339.
- [4] Aluminum Association Standards (A.A.S). Aluminum 6061-T6; 6061-T651 [Internet]. 2025 [cited 2025 Mar 1]. Available from: <https://asm.matweb.com/search/specificmaterial.asp?bassnum=ma6061t6>.
- [5] Skilled Investments in Aluminum (S.I.i). Advantages of friction stir welding (FSW) | SBB [Internet]. 2023 [cited 2023 Feb 22]. Available from: <https://sbb.ca/home/servicessbb/fsw/>.
- [6] Elsayed M, Shash A, Abd-Rabou M, El-Sherbiny M. Welding and processing of metallic materials by using friction stir technique: A review. J Adv Joining Process. 2021;3:1-20. doi: 10.1016/j.jajp.2021.100059.
- [7] Bodaghi M, Dehghani K. Friction stir welding of AA5052: the effects of SiC nano-particles addition. Int J Adv Manuf Technol. 2017;88:2651-2660. doi: 10.1007/s00170-016-8959-8.
- [8] Kumar D, Ottarackal D, Acharya U, Medhi T, Saha Roy B. A parametric study of friction stir welded AA6061/SiC AMC and its effect on microstructure and mechanical properties. Mater Today Proc. 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.
- [9] Takhakh AM, Abdulla HH. Surface modification of AA 7075-T651 plate using friction stir processing with SiC particles. Emirates J Eng Res. 2017;22(3):1-11.
- [10] Mahmoud ERI, Takahashi M, Shibayanagi T, Ikeuchi K. Effect of friction stir processing tool probe on fabrication of SiC particle reinforced composite on aluminium surface. Sci Technol Weld Join. 2009;14(5):413-425. doi: 10.1179/136217109X406974.
- [11] Rathee S, Maheshwari S, Siddiquee A, Srivastava M. Investigating effects of groove dimensions on microstructure and mechanical properties of AA6063 / SiC surface composites produced by friction stir processing. Trans Indian Inst Met. 2017. doi: 10.1007/s12666-017-1060-7.

-
- [12] Zhou W, Xu ZM. Casting of SiC reinforced metal matrix composites. J Mater Process Technol. 1997;63(1–3):358-363. doi: 10.1016/S0924-0136(96)02647-7. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013696026477>.
- [13] Hashim J, Looney L, Hashmi MSJ. Metal matrix composites: Production by the stir casting method. J Mater Process Technol. 1999;92-93:1-7. Available from: <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=642817>.
- [14] AZoM.com. Silicon carbide (SiC) properties and applications [Internet]. 2001 Feb 5 [cited 2025 Mar 2]. Available from: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=42>.
- [15] Otai Special Steel. D2 tool steel | 1.2379 | X153CrMo12 | SKD11 [Internet]. 1999-2024 [cited 2025 Mar 2]. Available from: <https://www.astmsteel.com/product/d2-tool-steel-1-2379-x153crmo12-skd11/>.
- [16] Fine Cause Co., Ltd. SKD11 steel characters and heat treatment [Internet]. 2025 [cited 2025 Mar 3]. Available from: <https://www.finecause.com/knowledge/knowledge-7-1>.
- [17] Alhelli A, Al Hamaoy A, Takhakh A. Effect of friction stir processing parameters on the properties of AA7075-T73/Al₂O₃ surface metal matrix composite. Mater Sci Forum. 2020;1002:140-150. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1002.140.