

การเพิ่มความสามารถในการตัดเฉือนชิ้นพอกแข็งบนเหล็กหล่อเทา JIS-FC25: การใช้สารหล่อเย็นและข้อจำกัดในการใช้งาน

Enhancing Machinability of Hardfaced JIS-FC25 Gray Cast Iron: Coolant Application and Its Trade-offs

นิวัฒน์ มูเก็ม¹ อุไรวรรณ พงสา¹ อรจิตร แจ่มแสง¹ และ ทวี หมดสี^{1*}
Niwat Mookam¹, Uraiwan Pongsa¹, Orakit Jaemsang¹,
and Tavee Madsa^{1*}

Received: 6 January 2025

Revised: 21 April 2025

Accepted: 25 July 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จุดประสงค์ในการศึกษาความสามารถในการกัดผิวพอกแข็งของเหล็กหล่อสีเทา JIS-FC25 ที่ผ่านการเชื่อมพอก 3 ชั้นด้วยกระบวนการเชื่อมลวดหุ้มฟลักซ์ การทดลองดำเนินการในสองสภาวะ คือ การกัดแบบแห้งและแบบเปียกที่ใช้สารหล่อเย็นชนิดน้ำมันผสมน้ำในอัตราส่วน 1:20 ภายใต้ตัวแปรการกัดที่ควบคุมได้แก่ ความลึกการกัด 1 มม. ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที และอัตราป้อน 100 มม./นาที ผลการทดลองที่นำมาทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ลักษณะเศษตัด การสึกหรอของเครื่องมือตัด (Flank wear) และความหยาบผิวของคมตัดและพื้นผิวงาน ผลการทดลองชี้ว่าการใช้สารหล่อเย็นช่วยเพิ่มความยาวและความสม่ำเสมอของเศษลดแรงเสียดทานและทำให้การหล่อลื่นดีขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าในระยะการกัดยาว การกัดแบบเปียกก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของเครื่องมือเร็วขึ้นอันเนื่องมาจากวัฏจักรความร้อน ขณะที่การกัดแบบแห้งแสดงผลการสึกหรอที่สม่ำเสมอและผิวงานที่มีความหยาบน้อยกว่าในระยะยาว ผลการศึกษาชี้ว่าการกัดแบบแห้งเหมาะสมกับระยะกัดยาวเนื่องจากลดการสึกหรอของเครื่องมือ จึงควรเลือกสภาวะให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง

คำสำคัญ: สารหล่อเย็น การกัดผิว ผิวพอกแข็ง การสึกหรอ ความหยาบผิว

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล
ประจวบคีรีขันธ์ ประเทศไทย 77110

¹Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin,
Wang Klai Kangwon Campus, Prachuap Khiri Khan, Thailand 77110

*ผู้รับผิดชอบประสานงาน (Corresponding author) e-mail: tavee.mad@rmutr.ac.th

ABSTRACT

This study aimed to investigate the machinability of hard-faced layers on JIS-FC25 gray cast iron, which were deposited in three layers using the shielded metal arc welding (SMAW) process. The experiments were conducted under two conditions: dry milling and wet milling using a coolant composed of oil and water in a 1:20 ratio. The milling parameters were kept constant with a cutting depth of 1 mm, spindle speed of 800 rpm, and feed rate of 100 mm/min. The experimental analysis focused on chip morphology, tool wear (flank wear), and the surface roughness of both the cutting edge and the machined workpiece. The results indicated that coolant application improved chip length and consistency, reduced friction, and enhanced lubrication during the milling process. However, in long-distance milling operations, wet milling led to accelerated tool degradation due to thermal cycling effects. In contrast, dry milling exhibited more stable tool wear and lower surface roughness over extended cutting distances. The findings suggest that dry milling is more suitable for long cutting operations as it minimizes tool wear and maintains better surface quality. Therefore, the selection of milling conditions should be tailored to match the specific requirements of real-world applications.

Keywords: Coolant; Face Milling; Hardfacing; Wear; Surface Roughness

บทนำ

เหล็กหล่อเทาเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง แต่มีข้อจำกัดด้านความต้านทานการสึกหรอในสภาวะที่มีความเค้นสูง [1] ด้วยเหตุนี้จึงมีการประยุกต์การพอกผิวแข็งด้วยโลหะผสมต่างๆ เช่น Fe-Mo-B-C เพื่อช่วยเพิ่มความทนทาน และทำให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมที่ต้องการความทนต่อการสึกหรอสูง [2-5] หรือการพอกผิวแข็งด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์บนเหล็กหล่อเทา JIS-FC25 ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอ [3] โดยการเกิดเฟสคาร์ไบด์ เช่น Cr_7C_3 และ Mo_2C ส่งผลให้ความแข็งแรงและเสถียรภาพของผิวในสภาวะเสียดทานสูงเพิ่มขึ้น [6] อย่างไรก็ตามกระบวนการพอกผิวแข็งโดยเฉพาะจากกระบวนการเชื่อมมักทำให้เกิดพื้นผิวหยาบ และจำเป็นต้องผ่านการกัดผิวหน้าเพื่อให้ได้คุณภาพพื้นผิวที่ต้องการ [7] ในการกัดผิวหน้าผิวพอกแข็งบนเหล็กหล่อเทามีความท้าทายเนื่องจากความแข็งแรงและความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการกัดผิวหน้ามักเพิ่มการสึกหรอของเครื่องมือและทำให้เกิดความบกพร่องของพื้นผิว [8] ที่ผ่านมามีการใช้สารหล่อเย็นอาจสามารถช่วยลดปัญหาเหล่านี้ได้โดยลดความร้อน ปรับปรุงการกำจัดเศษ และยืดอายุเครื่องมือตัดในวัสดุทั่วไป [8-10] อย่างไรก็ตามในการกัดผิวหน้าผิวพอกแข็งบนเหล็กหล่อเทายังมีข้อจำกัดที่ต้องการศึกษาเพิ่มเติมเนื่องจากการใช้สารหล่อเย็นอาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการกัดผิวพอกแข็งทั้งในแง่การลดอุณหภูมิ ลดแรงเสียดทาน และช่วยในการกำจัดเศษ แต่ในวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง สารหล่อเย็นอาจก่อให้เกิดวัฏจักรความร้อน ทำให้เครื่องมือสึกหรอเร็วขึ้นและกระทบต่อคุณภาพผิวชิ้นงาน การเลือกใช้สารหล่อเย็นจึงควรคำนึงถึงสมบัติของวัสดุและลักษณะกระบวนการเฉือน [11-13] ด้วยเหตุนี้การผสมผสานการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการพอกผิวแข็ง การกัดผิวหน้า และ

การใช้สารหล่อเย็นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่สามารถเพิ่มความทนทานและประสิทธิภาพของเหล็กหล่อเทาเพื่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีความต้องการสูงได้ต่อไป [8-10]

ความก้าวหน้าล่าสุดในการแปรรูปวัสดุที่ผ่านการพอกผิวแข็งมีการศึกษาบทบาทของสารหล่อเย็นในการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องมือตัดและคุณภาพผิวการตัดเฉือนอินโคเนล 718 (Inconel 718) ที่พบว่าการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นที่เหมาะสมช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดและรักษาความสมบูรณ์ของพื้นผิวได้ ขณะที่การหล่อเย็นด้วยอุณหภูมิต่ำช่วยลดแรงตึงและปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวได้ดี [14, 15] อย่างไรก็ตาม การศึกษาการใช้สารหล่อเย็นในการกัดผิวพอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กหล่อเทายังคงมีข้อจำกัด [16, 17] และเนื่องจากวัสดุนี้มีสมบัติที่โดดเด่นด้านความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอ จึงเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องมีการศึกษาเพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับการนำความร้อนที่มักเกิดการเปลี่ยนแปลง ลักษณะการก่อตัวของเศษตัดที่ซับซ้อนและจำเป็นต้องมีการวิจัยเฉพาะเพื่อพัฒนาแนวทางการแปรรูปที่มีประสิทธิภาพต่อไป [18, 19] โดยเฉพาะกระบวนการตัดเฉือนวัสดุที่ใช้สารหล่อเย็นที่เหมาะสมที่สามารถแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการลดการสึกหรอของเครื่องมือ ปรับปรุงการกระจายความร้อน และรักษาคุณภาพพื้นผิวในวัสดุที่ตัดเฉือนยากต่อไป [20, 21] การศึกษาเพิ่มเติมเหล่านี้ อาจก่อให้เกิดความเข้าใจในข้อจำกัด และสามารถช่วยพัฒนาแนวทางสำหรับการแปรรูปผิวพอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กหล่อเทาได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

บทความนี้มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความเข้าใจในข้อจำกัดเหล่านี้ โดยการวิเคราะห์ผลกระทบของการใช้สารหล่อเย็นต่อความคงทนของเครื่องมือตัดและความสมบูรณ์ของพื้นผิวระหว่างการกัดผิวพอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กหล่อเทา JIS-FC25 ในสภาวะเปียกและแห้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการใช้สารหล่อเย็นอย่างเหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพการตัดเฉือน ผลการทดลองคาดว่าจะมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงแนวปฏิบัติในอุตสาหกรรม โดยช่วยพัฒนาแนวทางการใช้สารหล่อเย็นที่เหมาะสมกับวัสดุเฉพาะ เพื่อสร้างสมดุลระหว่างอายุการใช้งานของเครื่องมือและคุณภาพพื้นผิวในกระบวนการกัดผิวหน้าเหล็กหล่อสีเทาที่พอกผิวแข็งต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

เหล็กหล่อเทา JIS-FC25 ซึ่งมีสมบัติเด่นด้านความแข็งแรงและความสามารถในการตัดเฉือน ถูกเลือกใช้เป็นวัสดุฐานสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ วัสดุฐานที่มีส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อดัง Table 1 ถูกเตรียมด้วยวิธีทางกลให้มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดหนา 20 มิลลิเมตร กว้าง 110 มิลลิเมตร และยาว 150 มิลลิเมตร ดัง Figure 1 a เหล็กหล่อเทาความหนา 20 มิลลิเมตรที่มีส่วนผสมทางเคมีดัง Table 1 แนวเชื่อมพอกแข็งจำนวน 3 ชั้น ซึ่งประกอบด้วยแนวเชื่อม 12 แนวเชื่อมดัง Figure 1 b ถูกเชื่อมขึ้นด้วยการเชื่อมอาร์กกดหัวพลาสมาโดยมีอุณหภูมิอุณหภูมิมากกว่า 400 °C และอุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อมมากกว่า 400 °C [22]

แผ่นเหล็กหล่อที่ถูกสร้างขึ้นพอกแข็งถูกนำมาทำการตัดด้วยใบตัดความเร็วสูงให้มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีขนาดดัง Figure 1 c เพื่อนำมาทำการกัดผิวหน้าด้วยตัวแปรการกัดประกอบด้วยความลึกในการตัด 1 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที และอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยการกัดแบบเปียกที่ใช้สารหล่อเย็นที่เป็นส่วนผสมระหว่างน้ำมันและน้ำในส่วนผสม 1:20 และการกัดแบบแห้งที่ไม่ใช้สารหล่อเย็น

หลังการกัดผิวหน้าการศึกษานี้ได้ทำการประเมินรูปร่างและขนาดของเศษการกัด การสึกหรอของคมตัด และความเรียบของคมตัดและพื้นผิวพอกแข็ง เศษการกัดและการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) ของคมตัดถูกวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์ ขณะที่ความเรียบของพื้นผิวถูกวัดด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว (Profilometer)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงถูกใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบของในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกแข็งและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่มีการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (EDS) ถูกใช้ในการศึกษาส่วนผสมทางเคมีของเฟสในชั้นพอกแข็งและการศึกษารูปแบบการสีกหรือของคมตัดของมีดเล็บที่ใช้ในการกัดผิวหน้า ขณะที่รูปร่างและขนาดของเศษตัดถูกทำการศึกษาด้วยกล้องกำลังขยายต่ำ ความแข็งของเฟสในโครงสร้างจุลภาคทำการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบไมโครวิกเกอร์ส ด้วยแรงกด 50 กรัมแรง และเวลากดแช่ 10 วินาที

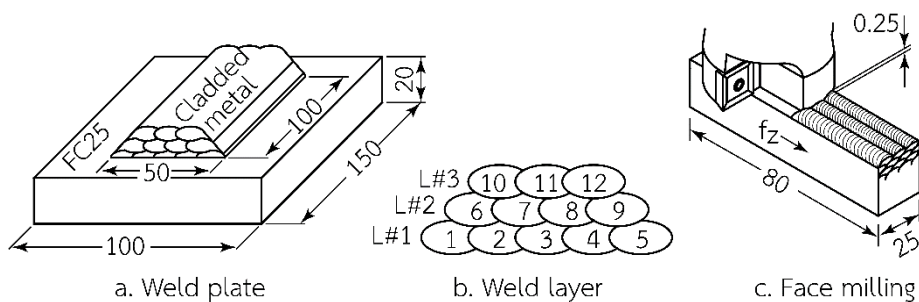


Figure 1 Experimental preparation

Table 1 Chemical composition of experimental steel and electrode (wt%)

Materials	Element				
	C	Si	Mn	Cr	Mo
Cast iron	3.20	2.30	0.55	0.40	-
Electrode	1.50	3.00	3.00	6.00	2.50

ผลการวิจัย

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชั้นพอกผิวแข็งชั้นที่สามบนพื้นผิวเหล็กหล่อเตาตั้ง Figure 2 แสดงเฟสคล้ายกลุ่มคาร์ไบด์ซีซีเอ็ม (I) มีรูปร่างแหลม และยาวเป็นนูนจากมุมล่างขวาขึ้นสู่มุมบนซ้าย การกระจายตัวที่พบค่อนข้างสมดุลบนพื้นหลักพอกแข็งสีขาว (II) เมื่อทำการตรวจสอบความแข็งของจุด I และ II พบว่าค่าความแข็งที่ได้มีค่า 666 และ 609 HV ตามลำดับ ความแข็งที่สูงของเฟสซีซีเอ็มเกิดขึ้นเนื่องจากส่วนผสมทางเคมีมีประกอบด้วยธาตุที่มีความสามารถในการรวมตัวเป็นเฟสโลหะที่มีความแข็งสูงประกอบด้วย คาร์บอน โครเมียม และแมงกานีส ในปริมาณสูง ดัง Table 2 ปริมาณธาตุเหล่านี้ที่ค่าสูงกว่าในเฟสซีซีเอ็ม จึงมักก่อให้เกิดเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_7C_3) หรือโลหะคาร์ไบด์อื่นๆสูงตามไปด้วย ปริมาณของเฟสคาร์ไบด์ที่มีค่าสูงส่งผลทำให้เฟสแสดงความต้านทานการสึกหรอ ความแข็ง และแข็งแรงของโครงสร้างสูง [1-3] ส่วนจุด II ที่มีความแข็งและปริมาณสารก่อตัวของโลหะคาร์ไบด์ต่ำกว่า สามารถลดความแข็ง ความเปราะ และเพิ่มความเหนียว เหมาะสำหรับงานรับแรงกระแทกสูง [4] การเรียงตัวอย่างสมดุลของเฟสทั้งสองจึงมั่นใจได้ว่าค่าความแข็งและความเหนียวของผิวพอกแข็งอยู่ในระดับที่น่าพอใจในการนำไปใช้งาน [2, 23] ความสมดุลระหว่างความแข็งและความเหนียวในชั้นพอกผิวแข็งมีบทบาทสำคัญในการกำหนดความต้านทานการสึกหรอและ

ความทนทานของวัสดุในงานอุตสาหกรรม เช่นเดียวกับในกระบวนการกัดผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็ง ที่สมบัติของวัสดุร่วมกับสภาวะการหล่อเย็นมีผลโดยตรงต่อรูปแบบของเศษของการกัดผิวหน้า การสึกหรอของเครื่องมือตัด และเสถียรภาพของกระบวนการผลิต เพื่อให้เข้าใจผลกระทบเหล่านี้มากขึ้น การวิเคราะห์ลักษณะของเศษการกัดภายใต้สภาวะการใช้สารหล่อเย็นและการกัดแบบแห้ง รวมถึงความแตกต่างในรูปทรง ความยาว และความหนาของเศษ ตามที่แสดงใน Figure 3 และ Figure 4 จึงถูกทำการศึกษาและนำเสนอ

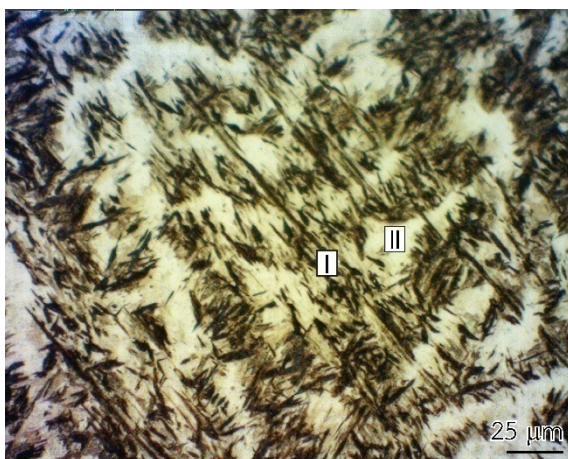


Table 2 Chemical composition of Point I and II

Element	I (wt%)	II (wt%)
Fe	bal.	bal.
C	3.11	2.51
Si	1.48	1.29
Mn	1.32	1.04
Cr	5.78	4.36
Mo	1.72	1.63

Figure 2 Microstructure of third layers of Hard-daced metal

อย่างไรก็ตามหากมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของลวดเชื่อม เช่น การเพิ่มธาตุโบรอนหรือโมลิบดีนัม อาจส่งผลให้เกิดเฟสคาร์ไบด์ที่มีความแข็งและละเอียดมากขึ้น ซึ่งอาจช่วยเพิ่มความต้านทานการสึกหรอได้ดียิ่งขึ้น [24] ในขณะเดียวกันการควบคุมพารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อม เช่น ความเร็วเชื่อมหรืออุณหภูมิอุ้งงาน อาจช่วยควบคุมอัตราการเย็นตัว และมีผลโดยตรงต่อการจัดเรียงและขนาดของเฟสคาร์ไบด์ [4] ซึ่งล้วนส่งผลต่อความสามารถในการตัดเฉือนของชั้นพอกแข็งโดยตรง ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตควรพิจารณา ร่วมกับผลกระทบของการใช้สารหล่อเย็น เพื่อพัฒนาแนวทางที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการกัดผิวพอกแข็งในระดับอุตสาหกรรม [4, 25]

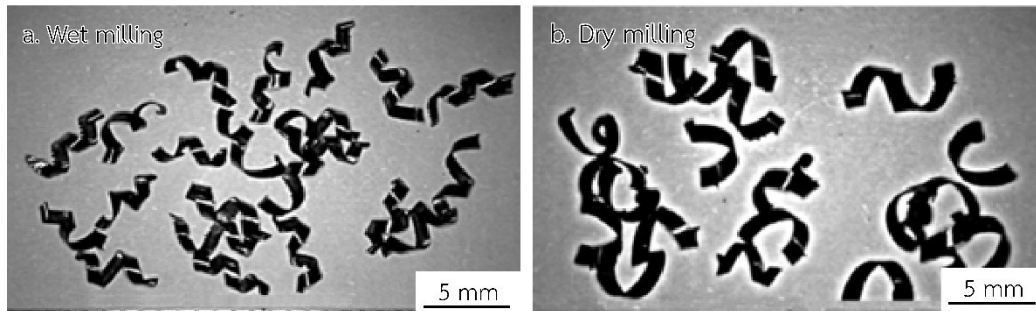


Figure 3 Face milling chip characterization.

การวิเคราะห์ผลกระทบของสารหล่อเย็นแบบเปียกและแบบแห้งต่อลักษณะของเศษการกัดแสดง ความแตกต่างของลักษณะเศษ ความยาว และความหนาของเศษการกัดดัง Figure 3 และ Figure 4 เศษการกัด ในสภาวะการใช้สารหล่อเย็นมีลักษณะยาว สม่่าเสมอ และโค้งเป็นรูปทรง ซึ่งเกิดจากการลดแรงเสียดทานและ อุณหภูมิในกระบวนการกัด ทำให้การกำจัดเศษราบรื่นและลดการแตกหักของเศษ [8, 26] ขณะที่เศษการกัด ในสภาวะแห้งมีลักษณะสั้น แตกหัก และไม่สม่ำเสมอ อันเนื่องจากความเครียดจากความร้อนและแรงตัดที่ไม่ เสถียร [19, 27] ความหนาของเศษการกัดในสภาวะเปียกลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปจาก 0.81 มิลลิเมตร ที่ระยะ การกัด 80 มิลลิเมตร เหลือ 0.45 มิลลิเมตร ที่ระยะ 320 มิลลิเมตร ขณะที่ในสภาวะแห้งความหนาลดลง อย่างรวดเร็วจาก 0.74 มิลลิเมตร เป็น 0.26 มิลลิเมตรดัง Figure 4 a ซึ่งสะท้อนผลกระทบของอุณหภูมิที่ สูงขึ้นในกระบวนการกัด [27, 28] นอกจากนี้ Figure 4 b แสดงความยาวเศษการกัดในสภาวะเปียกลดลงจาก 5.21 มิลลิเมตร เหลือ 4.55 มิลลิเมตร ในขณะที่เศษในสภาวะแห้งลดลงจาก 5.06 มิลลิเมตรเหลือ 4.34 มิลลิเมตร แสดงถึงความแตกต่างชัดเจนในการกำจัดเศษและเสถียรภาพกระบวนการกัด [24] การใช้สารหล่อเย็นช่วย ปรับปรุงการหล่อลื่นและการกำจัดเศษ ทำให้เศษมีความสม่ำเสมอและลดความเครียดจากความร้อน ขณะที่ การกัดแบบแห้งเพิ่มความเปราะของเศษและอาจลดความแม่นยำของการกัด [10] ด้วยเหตุนี้การพัฒนาเทคโนโลยี หล่อเย็นขั้นสูงให้มีความเหมาะสมกับวัสดุเฉพาะอย่างอาจสามารถเพิ่มเสถียรภาพและลดผลกระทบจาก อุณหภูมิได้ [17, 29]

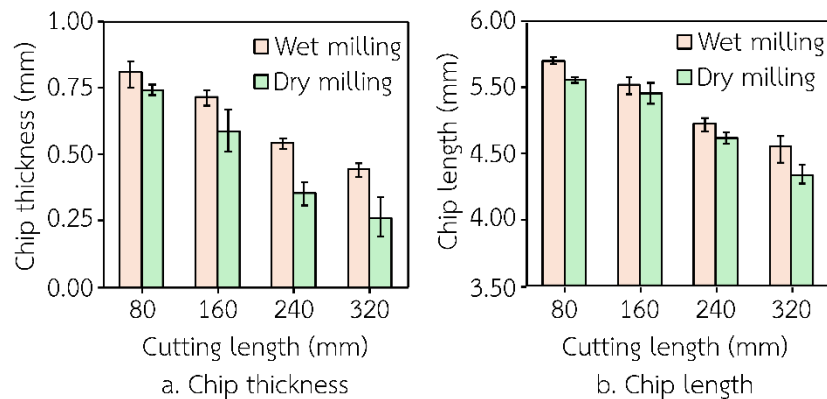


Figure 4 Chip dimension

ลักษณะของเศษตัดระหว่างการกัดแบบแห้งและเปียกมีความแตกต่างอย่างชัดเจน โดยในสภาวะแห้งเศษจะสั้น แตกหักไม่สม่ำเสมอ และมีขอบคม ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิสูงและแรงตัดไม่เสถียร ส่งผลให้คมตัดเกิดการสึกหรอเชิงกลอย่างรวดเร็วจากแรงกระแทกซ้ำ โดยเฉพาะในระยะกัดต้นๆ [30, 31] ในทางตรงกันข้ามเศษในสภาวะเปียกมีลักษณะยาว โค้ง และสม่ำเสมอ สะท้อนถึงการลดแรงเสียดทานและอุณหภูมิจากการหล่อเย็น ทำให้การไหลของเศษเป็นไปอย่างราบรื่นและลดการสึกหรอของคมตัดในช่วงต้น อย่างไรก็ตามในระยะการกัดที่ยาว การกัดแบบเปียกอาจส่งผลให้เกิดการสะสมความร้อนแบบวัฏจักรและเร่งการสึกหรอมากกว่าการกัดแบบแห้ง [32] จึงสามารถสรุปได้ว่าลักษณะของเศษตัดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกลไกการสึกหรอของเครื่องมือตัด และเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกสภาวะการตัดเฉือนที่เหมาะสม

นอกจากผลกระทบต่อรูปแบบและการกำจัดเศษแล้ว สภาวะการใช้สารหล่อเย็นยังมีบทบาทสำคัญต่ออัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัด โดยเฉพาะการสึกหรอด้านข้าง (Flank wear) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของคมตัด ในการศึกษาต่อไปได้ทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของการสึกหรอของคมตัดระหว่างสภาวะการกัดแบบเปียกและแห้งดังแสดงใน Figure 5 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของสารหล่อเย็นต่อการลดแรงเสียดทานและอุณหภูมิ ตลอดจนผลกระทบจากวัฏจักรความร้อนที่มีต่อเสถียรภาพของเครื่องมือตัดในระยะการกัดที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าสารหล่อเย็นสามารถช่วยลดแรงเสียดทานและอุณหภูมิในระยะการกัดที่สั้น ทำให้พื้นผิวการสึกหรอของคมตัดเรียบขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อระยะการกัดเพิ่มขึ้นผลกระทบของวัฏจักรความร้อน (Thermal cycling) [17, 29] ทำให้คมตัดเสื่อมเร็วขึ้น โดยการสึกหรอในสภาวะเปียกเพิ่มจาก 61.70 ไมโครเมตร ที่ 80 มิลลิเมตร เป็น 104.97 ไมโครเมตร ที่ 320 มิลลิเมตร ส่วนในสภาวะแห้งแม้ความสึกหรอเริ่มต้นใกล้เคียงกับสภาวะเปียก (59.50 ไมโครเมตร ที่ 80 มิลลิเมตร) เพราะขาดการหล่อเย็น แต่การกัดแบบแห้งมีความเสถียรในระยะยาว โดยเพิ่มเป็น 95.13 ไมโครเมตร ที่ 320 มิลลิเมตร ดังผลการวัดค่าการสึกหรอของคมตัดใน Figure 6 [33, 34] ผลการศึกษายังชี้ถึงความสำคัญของการเลือกสภาวะการกัดที่เหมาะสม โดยสารหล่อเย็นเหมาะสมสำหรับระยะกัดสั้น แต่การกัดแบบแห้งให้ผลดีกว่าในระยะกัดยาว เพราะเสถียรภาพของคมตัดสม่ำเสมอและลดผลกระทบจากวัฏจักรความร้อน [7, 18] การปรับแนว

ทางการตัดเฉือนให้เหมาะสมจึงจำเป็นต้องการเพิ่มประสิทธิภาพและความทนทานของเครื่องมือในงานอุตสาหกรรม [35]

วัฏจักรความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการกัดผิวพอกแข็งส่งผลให้เครื่องมือตัดประสบกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันและต่อเนื่อง ซึ่งเป็นปัจจัยเร่งการเกิดความล้า ความแตกร้าว และการสึกหรอของคมตัด โดยเฉพาะในระยะเวลาการกัดที่ยาวนาน [36] สำหรับการลดผลกระทบดังกล่าวเทคนิคการหล่อเย็นขั้นสูง เช่น การหล่อเย็นแบบไครโอเจนิค (Cryogenic Cooling) และการใช้เทคโนโลยีสารหล่อเย็นแบบปริมาณน้อย (Minimum Quantity Lubrication; MQL) ได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถลดอุณหภูมิสะสมควบคุมแรงตัด และช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ [18]

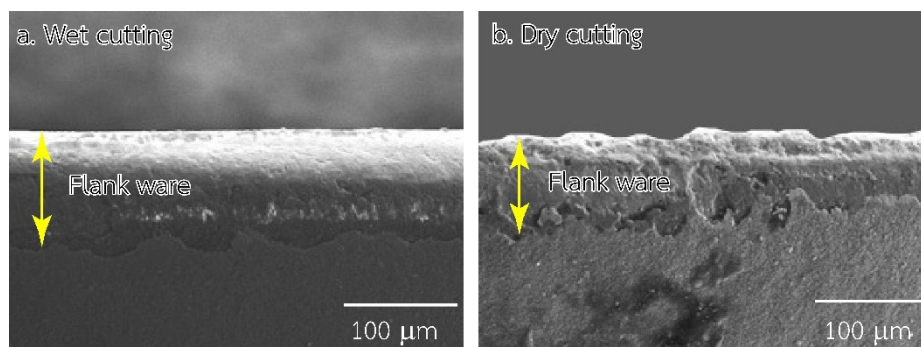


Figure 5 Flank ware of cutting tool

คุณภาพของพื้นผิวที่ได้จากกระบวนการกัดเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของชิ้นงาน โดยเฉพาะในกรณีของพื้นผิวพอกแข็งที่ต้องการความเรียบเนียนและความทนทานต่อการสึกหรอ การเปรียบเทียบความหยาบผิวภายใต้สภาวะการกัดแบบเปียกและแบบแห้งจึงมีความจำเป็นเพื่อให้เข้าใจถึงผลกระทบของระยะเวลาการกัดต่อคุณภาพพื้นผิว ดังที่แสดงใน Figure 7 พบว่าที่ระยะการกัดสั้น (80 มิลลิเมตร) ความหยาบผิวทั้งสองสภาวะใกล้เคียงกัน (ประมาณ 60.69 ไมโครเมตรในสภาวะเปียก และประมาณ 59.71 ไมโครเมตรในสภาวะแห้ง) ซึ่งสะท้อนถึงการสึกหรอเครื่องมือที่ต่ำและแรงตัดเสถียรในช่วงเริ่มต้น [8] เมื่อระยะเวลาการกัดเพิ่มขึ้น ความหยาบผิวในสภาวะเปียกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเท่ากับ 103.73 ไมโครเมตร ที่ระยะการกัด 320 มิลลิเมตร การเพิ่มขึ้นนี้เกิดจากผลกระทบของวัฏจักรความร้อน ซึ่งส่งผลให้คมตัดเกิดรอยร้าวและเสื่อมสภาพลง [18] ในทางตรงกันข้ามความหยาบผิวในสภาวะแห้งเพิ่มขึ้นช้ากว่าโดยมีค่าประมาณ 89.70 ไมโครเมตร ที่ระยะการกัดเดียวกัน ซึ่งแสดงถึงการสึกหรอของเครื่องมือที่ต่ำและสม่ำเสมอกว่า [34] ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงข้อดีและข้อจำกัดของทั้งสองสภาวะ ในระยะเวลาการกัดสั้นสารหล่อเย็นช่วยลดแรงเสียดทานและความเครียดจากความร้อนทำให้พื้นผิวเรียบเนียน แต่ในระยะเวลาการกัดที่ยาวผลกระทบจากวัฏจักรความร้อนกลับเร่งการสึกหรอของเครื่องมือและลดคุณภาพพื้นผิว ในทางกลับกันการกัดแบบแห้งแสดงความสม่ำเสมอในคุณภาพพื้นผิวและการสึกหรอแม้จะเริ่มต้นด้วยความหยาบที่มีค่าสูงกว่าการกัดแบบเปียก [37] การเลือกใช้สภาวะการตัดเฉือนที่เหมาะสมจึงควรพิจารณาตามระยะเวลาการกัดและเป้าหมายของคุณภาพพื้นผิว โดยต้องปรับสมดุลระหว่างประสิทธิภาพและความทนทานของเครื่องมือในงานอุตสาหกรรม

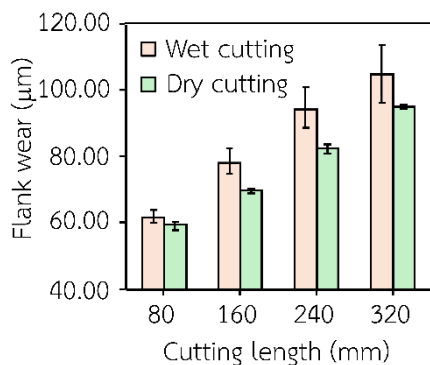


Figure 6 Flank wear measurement.

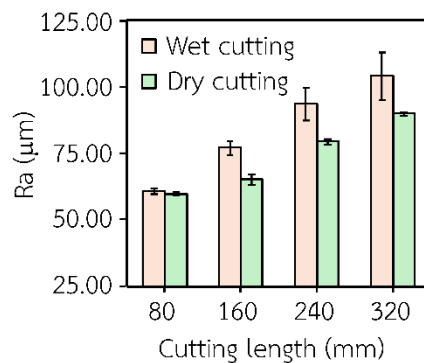


Figure 7 Milling surface roughness.

ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกัดมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างสภาวะแห้งและเปียก โดยในระยะการกัดสั้นความหยาบผิวต่ำและใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระยะการกัดเพิ่มขึ้นสภาวะแห้งแสดงค่าความหยาบที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ขณะที่สภาวะแบบเปียกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการสะสมความร้อนและวัฏจักรความร้อนจากสารหล่อเย็น [38] ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อคุณภาพผิว ได้แก่ ระดับการสึกหรอของเครื่องมือตัด อุณหภูมิสะสม ลักษณะเศษตัด และประสิทธิภาพของสารหล่อเย็นในการลดแรงเสียดทานและควบคุมความร้อน ซึ่งมีผลต่อความต่อเนื่องของกระบวนการกัดและคุณภาพผิวโดยรวม [39]

ผลการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการกัดแบบแห้งให้เสถียรภาพของกระบวนการและคุณภาพผิวที่คงที่กว่าในการกัดระยะยาว แม้ว่าจะเริ่มต้นด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่า แต่ความต่อเนื่องของกระบวนการไม่ถูกรบกวนจากการสะสมความร้อนหรือวัฏจักรความร้อนเหมือนกับในสภาวะเปียก ตรงกันข้ามการกัดแบบเปียกแม้จะช่วยลดแรงเสียดทานและอุณหภูมิในช่วงเริ่มต้น และส่งผลให้เศษตัดมีความสม่ำเสมอและผิวงานเรียบขึ้น แต่เมื่อต้องกัดในระยะยาว ความร้อนที่สะสมกลับเป็นปัจจัยเร่งการสึกหรอของเครื่องมือตัด [40-42]

ข้อจำกัดของสารหล่อเย็นแบบทั่วไปจึงอยู่ที่ประสิทธิภาพในระยะยาว โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องกัดวัสดุพอกแข็งซึ่งมีความแข็งแรงสูงและเกิดแรงตึงมาก การใช้สารหล่อเย็นในลักษณะเดิมอาจไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของกระบวนการได้ตลอดช่วงการตัดเฉือน ดังนั้นการเลือกใช้หรือออกแบบระบบหล่อเย็นควรคำนึงถึงหลายปัจจัย เช่น ชนิดของวัสดุพอกแข็ง ระยะและความลึกของการกัด ประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิ รวมถึงผลกระทบต่อลักษณะของเศษตัดและอายุการใช้งานของเครื่องมือตัด [42]

แม้ว่าผลการทดลองในปัจจุบันจะสนับสนุนว่าการกัดแบบแห้งเหมาะสมกว่าในระยะยาว แต่การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกัดแบบเปียกยังคงเป็นแนวทางที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาในอนาคต โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารหล่อเย็นรุ่นใหม่ เช่น สารหล่อเย็นชนิดนาโน การหล่อเย็นแรงดันสูง หรือการควบคุมทิศทางและอัตราการไหลของสารหล่อเย็นให้สอดคล้องกับคุณสมบัติของวัสดุพอกแข็ง ซึ่งอาจช่วยลดผลกระทบจากความร้อนสะสม และยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ [40, 41, 43]

นอกจากนี้เทคโนโลยีการหล่อเย็นขั้นสูง เช่น การหล่อเย็นด้วยปริมาณน้อยที่สุด (Minimum quantity lubrication: MQL) หรือการหล่อเย็นด้วยอุณหภูมิต่ำยิ่งยวด (Cryogenic cooling) ก็เป็นทางเลือกที่ควรพิจารณาอย่างจริงจัง MQL ช่วยลดปริมาณของเหลวหล่อเย็นที่ใช้ พร้อมเพิ่มความสามารถในการหล่อเย็น

เฉพาะจุด ขณะที่การหล่อเย็นด้วยอุณหภูมิต่ำยิ่งช่วยลดอุณหภูมิที่บริเวณจุดตัดได้อย่างรวดเร็ว ลดการสึกหรอ และช่วยรักษาคุณภาพของผิวชิ้นงาน ทั้งสองแนวทางนี้มีศักยภาพในการยกระดับประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการกัดโดยเฉพาะในการผลิตที่ต้องการความแม่นยำสูงและความต่อเนื่องของกระบวนการ [44]

สรุปผลการวิจัย

การกัดผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กหล่อเทาเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากความแข็งที่เพิ่มขึ้นทำให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องมือ ความหยาบผิว และการแตกของเศษตัดที่มากขึ้น การใช้สารหล่อเย็นช่วยลดอุณหภูมิและเพิ่มการกำจัดเศษตัดแต่สามารถสร้างข้อเสีย เช่น การเร่งการสึกหรอจากวัฏจักรความร้อน งานวิจัยนี้เปรียบเทียบการกัดแบบเปียกและแบบแห้งและสามารถสรุปผลสำคัญได้ดังนี้ การใช้สารหล่อเย็นลดการสึกหรอในระยะสั้นแต่เพิ่มอัตราการเสื่อมสภาพในระยะยาวจากผลกระทบวัฏจักรความร้อน การกัดแบบแห้งมีการสึกหรอที่สม่ำเสมอแต่มีค่าการสึกหรอสูงในเริ่มต้นจากแรงเสียดทานและความร้อน การกัดแบบเปียกให้ผิวที่เรียบในช่วงแรกแต่เสื่อมสภาพเร็วในระยะยาว ในขณะที่การกัดแบบแห้งเริ่มต้นด้วยความหยาบสูงกว่าแต่แสดงแนวโน้มความสม่ำเสมอที่ดีกว่า สารหล่อเย็นเพิ่มเสถียรภาพระยะสั้นแต่เร่งการเสื่อมสภาพของเครื่องมือในระยะยาว การกัดแบบแห้งหลีกเลี่ยงวัฏจักรความร้อนแต่เผชิญกับปัญหาการแตกของเศษและอุณหภูมิที่สูงขึ้น ผลการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการตัดเฉือนผิวพอกแข็ง เช่น ชิ้นส่วนแม่พิมพ์หรือเครื่องจักรกล โดยแนะนำให้เลือกสภาวะการกัดแบบแห้งในงานที่มีระยะกัดยาว เพื่อเพิ่มเสถียรภาพและลดการสึกหรอของเครื่องมือ ขณะที่การกัดแบบเปียกยังเหมาะกับการผิวเรียบในระยะสั้น แนวทางการพัฒนาต่อไปควรศึกษาการใช้เทคโนโลยีหล่อเย็นสมัยใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดการสึกหรอ และสนับสนุนการผลิตที่ยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีสนับสนุนงานวิจัยนี้

References

- [1] Yan, Z., et al. (2024). Enhanced Interfacial Joining Strength of Joined High Chromium Gray Cast Iron/Low Carbon Steel Joint via Graphite Coating. *Journal of Materials Research And Technology*, 33, 7206-7215.
- [2] Tandon, D., et al. (2023). A review on Hardfacing, Process Variables, Challenges, and Future Works. *Metals*, 13(9), 1512.
- [3] Bembenek, M., et al. (2022). Microstructure and Wear Characterization of the Fe-Mo-BC—Based Hardfacing Alloys Deposited by Flux-Cored Arc Welding. *Materials*, 15(14), 5074.
- [4] Kishore, K., et al. (2023). Effect of alloying Elements on Microstructure, Wear, and Corrosion Behavior of Fe-based Hardfacing. *Welding in the World*, 67(11), 2463-2475.
- [5] Zhao, L., et al. (2023). Investigation on Surface Integrity of Nodular Cast Iron QT700-2

- in Shape Adaptive Grinding. *Micromachines*, 14(2), 276.
- [6] Hoshiyama, Y., et al. (2010). Production of Stainless Cast Iron Base Deposits with Dispersed Titanium Carbide Particles by Plasma Spraying. *Materials Science Forum*, 654, 1891-1888
- [7] Abbas, A. T., et al. (2023). Precision Face Milling of Maraging Steel 350: An Experimental Investigation and optimization Using Different Machine Learning Techniques. *Machines*, 11(11), 1001.
- [8] Le, T. H., et al. (2022). Surface Finish Comparison of Dry and Coolant Fluid High-Speed Milling of JIS SDK61 Mould Steel. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12(1), 8023-8028.
- [9] Masafi, M., et al. (2023). Microstructural Properties of Particle-Reinforced Multilayer Systems of 316L and 430L Alloys on Gray Cast Iron. *Coatings*, 13(8), 1450.
- [10] Zhang, J., et al. (2023). Effect of interlayer Temperature and extremely Low Terminal Cooling Temperature on the Microstructure and Wear Resistance of Fe-based Hardfacing Alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 4105-4116.
- [11] Chauhan, D., et al. (2023). Comparison of machining Performance of Ti-6Al-4V under Dry and Cryogenic Techniques based on Tool Wear, Surface Roughness, and Power Consumption. *Lubricants*, 11(11), 493.
- [12] Ali Khan, M., et al. (2019). Statistical Analysis of Energy Consumption, Tool Wear and Surface Roughness in Machining of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) under Dry, Wet and Cryogenic Conditions. *Mechanical sciences*, 10(2), 561-573.
- [13] Schopf, C., & Rascher, R. (2016). Reducing Forces During Drilling Brittle Hard Materials by Using Ultrasonic and Variation of Coolant. In *Optics and Measurement International Conference 2016* (p. 34-38). 11 November, 2016, Liberec, Czech Republic.
- [14] Lin, Y., et al. (2022). Multi-Response Optimization of Process Parameters in Nitrogen-Containing Gray Cast Iron Milling Process based on Application of Non-Dominated Ranking Genetic Algorithm. *Heliyon*, 8(11), e11629.
- [15] dos Reis, A., et al. (2023). Effect of Increased Mechanical Strength on the Machinability of Graphite Cast Irons in Face Milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(7), 3777-3790.
- [16] Odum, K., et al. (2017). Surface Feature Formation Mechanism During Finish Milling of Gray Cast Iron. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1), 459-469.
- [17] Soori, M., & Arezoo, B. (2024). The Effects of Coolant on the Cutting Temperature, Surface Roughness and Tool Wear in Turning Operations of Ti6Al4V Alloy. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 52(6), 3277-3299.
- [18] Gupta, M. K., et al. (2023). Comparison of Tool Wear, Surface Morphology, Specific

-
- Cutting Energy and Cutting Temperature in Machining of Titanium Alloys under Hybrid and Green Cooling Strategies. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 10(6), 1393-1406.
- [19] Martyushev, N. V., et al. (2023). Production of Workpieces from Martensitic Stainless Steel Using Electron-Beam Surfacing and Investigation of Cutting Forces When Milling Workpieces. *Materials*, 16(13), 4529.
- [20] Ercetin, A., et al. (2023). Optimization of Machining Parameters to Minimize Cutting Forces and Surface Roughness in Micro-Milling of Mg13Sn Alloy. *Micromachines*, 14(8), 1590.
- [21] Gutzeit, K., et al. (2023). Sub-Zero Milling of Ti-6Al-4V-Impact of the Cutting Parameters on the Resulting Forces, Tool Wear, and Surface Quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(7), 3367-3381.
- [22] Poonayom, P., & Kimapong, K. (2018). SMAW Electrodes Selection for Producing Hard-Faced Layer on FC25 Cast Iron Surface. *Key Engineering Materials*, 777, 339-343.
- [23] Chen, X., et al. (2022). Tool Wear and Surface Quality During Milling CFRP Laminates under Dry and LN₂-Based Cryogenic Conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(5), 1785-1797.
- [24] Prysyazhnyuk, P., et al. (2020). In Situ Formation of Molybdenum Borides at Hardfacing by Arc Welding with Flux-Cored Wires Containing a Reaction Mixture of B₄C/Mo. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(12-106), 46-51.
- [25] Turichin, G., et al. (2018). Influence of Heat Input and Preheating on the Cooling Rate, Microstructure and Mechanical Properties at the Hybrid Laser-Arc Welding of API 5L X80 Steel. *Procedia Cirp*, 74, 748-751.
- [26] Liang, X., et al. (2023). Tool Wear Mechanisms and Surface Quality Assessment During Micro-Milling of High Entropy Alloy FeCoNiCrAl_x. *Tribology International*, 178, 108053.
- [27] Mandru, S. K., et al. (2020). Experimental Investigations of Canola Oil Lubrication with Nano-Crystalline MoS₂ Additives in CNC End Milling of Aluminium Alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 998(1), 012021.
- [28] Korkmaz, M. E., & Gupta, M. K. (2024). A State of the Art on Cryogenic Cooling and its Applications in the Machining of Difficult-to-Machine Alloys. *Materials*, 17(9), 2057.
- [29] Rahman, M. H., et al. (2021). Water-Based Lubricants: Development, Properties, and Performances. *Lubricants*, 9(8), 73.
- [30] Katuku, K. (2022). Tool-Chip Contact and Chip Formation in Dry Finish-Machining of Austempered Ductile Iron. *Journal of Manufacturing Processes*, 78, 288-307.
- [31] Patwari, M. A. U., et al. (2010). Identification of Instabilities of the Chip Formation and its Prediction Model During End Milling of Medium Carbon Steel (S45C). *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3, 193-200.
- [32] Siswanto, W. A., et al. (2020). Experimental Study on the Cutting Temperature, Vibration

- and Chip Formation in Machining of 316L under Dry and Flood Process. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(6), 2701-2706.
- [33] Wang, X., et al. (2023). Tool Wear and Surface Integrity of γ -TiAl Cryogenic Coolant Machining at Various Cutting Speed Levels. *Lubricants*, 11(6), 238.
- [34] Dalke, P. A., et al. (2024). A Review: Nanofluids in Machining for Performance and Sustainability. *Journal of Physics: Conference Series*, 2763, 012012.
- [35] Khan, A. M., et al. (2021). Holistic Sustainability Assessment of Hybrid Al-GnP-Enriched Nanofluids and Textured Tool in Machining of Ti-6Al-4V Alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(3), 731-743.
- [36] Rouhani, M., et al. (2023). An In-Operando Evaluation Identified the Oxidative Failure Mechanism of TiN Hard Coatings During Extreme Thermal Cycling. *Applied Surface Science*, 640, 158375.
- [37] Trivedi, D. B., et al. (2023). Microstructural Analysis and Integrity of Drilling Surfaces on Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) Using Heat-Sink-Based Cryogenic Cooling. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 12(5), 814-833.
- [38] Owais Qadri, M., & Namazi, H. (2020). Fractal-Based Analysis of the Relationship Between the Surface Finish of Workpiece and Chip Formation in Milling Operation. *Fractals*, 28(06), 2050099.
- [39] Yağmur, S. (2021). The Effects of Cooling Applications on Tool Life, Surface Quality, Cutting Forces, and Cutting Zone Temperature in Turning of Ni-based Inconel 625. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116(3), 821-833.
- [40] Wada, T., & Enoki, S., (2021). Tool Wear of WC-Co-Based Cemented Carbide in External Thread Turning of Super Heat-resistant Alloy Inconel 718 with High-Pressure Coolant Supply. In *12th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering* (p. 145-149). 16-19 July, 2021, Athens, Greece.
- [41] Wang, P., et al. (2024). Machinability Analysis of Micro-Milling Thin-Walled Ti-6Al-4V Micro Parts under Dry, Lubrication, and Chatter Mitigation Conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 238(1-2), 335-346.
- [42] Airao, J., et al. (2021). Tool Wear Analysis During Ultrasonic Assisted Turning of Nimonic - 90 under Dry and Wet Conditions. *Metals*, 11(8), 1253.
- [43] Binali, R., & Kuntoğlu, M. (2023). Evaluation of Machining Parameters Affecting Cutting Forces in Dry Turning of GGG50 Ductile Cast Iron. *Turkish Journal of Nature and Science*, 12(2), 55-60.
- [44] Sivaiah, P., & Bodicherla, U. (2020). Effect of surface texture tools and minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in CNC turning of AISI 52100 steel. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 101(1), 85-95.

