บทความวิจัย

การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มอัตราการกำจัดเศษและควบคุมความหยาบผิวในการกัดสเตนเลส AISI 304L ด้วยดอกกัดคาร์ไบด์มุมเลื้อยสูงเคลือบไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตร

กัลยา กิตติเลิศไพศาล
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ปรเมศวร์ เบ้าวรรณ*
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 7918 8685 อีเมล: paramet.ba@rmuti.ac.th
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.11.006
รับเมื่อ 17 มีนาคม 2569 แก้ไขเมื่อ 29 มิถุนายน 2569 ตอบรับเมื่อ 15 กรกฎาคม 2569 เผยแพร่ออนไลน์ 27 พฤศจิกายน 2569
© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันกระบวนการกัดด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Milling) มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิต โดยมุ่งเน้นการเพิ่มผลผลิตควบคู่กับการรักษาคุณภาพผิวของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการกำจัดเศษมักส่งผลให้คุณภาพผิวลดลง รวมถึงก่อให้เกิดแรงตัด อุณหภูมิ และการสั่นสะเทือนที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานของเครื่องมือตัด งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของดอกกัดคาร์ไบด์มุมเลื้อยสูงที่เคลือบผิวด้วย TiAlN สำหรับการเพิ่มอัตราการกำจัดเศษในกระบวนการกัดวัสดุสเตนเลส AISI 304L เป็นวัสดุที่ตัดเฉือนได้ยาก เนื่องจากมีความเหนียวสูงเกิดการแข็งตัวเนื่องจากการแปรรูปได้ง่าย และก่อให้เกิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดอย่างรวดเร็ว โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design; CCD) และการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฟังก์ชันความพึงพอใจแบบหลายตัวแปรตอบสนอง ผลการวิจัยพบว่าค่าตัวแปรที่เหมาะสมคือ ระยะป้อนลึกแนวรัศมี 0.30 มิลลิเมตร และอัตราป้อน 0.15 มิลลิเมตรต่อฟัน ซึ่งให้ค่าความหยาบผิวด้านข้าง 1.54 ไมโครโมลาร์ และอัตราการกำจัดเศษ 13.68 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที โดยมีค่าความพึงพอใจเท่ากับ 96.84% และผลการทดลองยืนยันผลแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความเชื่อมั่นทางสถิติที่ระดับ 95%

คำสำคัญ: การตัดเฉือนด้านข้าง การหาค่าที่เหมาะสมแบบหลายตัวแปรตอบสนอง ค่าความหยาบผิวด้านข้าง ระยะป้อนลึกแนวรัศมี

การอ้างอิงบทความ: กัลยา กิตติเลิศไพศาล และ ปรเมศวร์ เบ้าวรรณ, "การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มอัตราการกำจัดเศษและควบคุมความหยาบผิวในการกัดสเตนเลส AISI 304L ด้วยดอกกัดคาร์ไบด์มุมเลื้อยสูงเคลือบไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตร," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 37, ฉบับที่ 1, หน้า 1–20, ม.ค.–มี.ค. 2570. เลขที่บทความ 271-068398, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.11.006.

Research Article

Optimization of Machining Parameters for Maximizing Material Removal Rate and Controlling Surface Roughness in Milling of AISI 304L Stainless Steel Using a TiAlN-Coated High-Helix Carbide End Mill

Kallaya Kittilertpaisan

Department of Mechanical and Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Sakon Nakhon Rajabhat University, Sakon Nakhon, Thailand

Paramet Baowan*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamungala University of Technology Isan KhonKaen Campus, Khon Kaen, Thailand

*Corresponding Author, Tel. 09 7918 8685, E-mail: paramet.ba@rmuti.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.11.006
Received 17 March 2026; Revised 29 June 2026; Accepted 15 July 2026; Published online: 27 November 2026
© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Currently, CNC milling processes play an important role in modern manufacturing industries, where both productivity and surface quality are critical requirements. However, increasing the material removal rate often leads to a deterioration in surface quality and generates higher cutting forces, temperatures, and vibrations, which accelerate tool wear. This study investigates the performance of a TiAlN-coated high-helix carbide end mill for increasing the material removal rate in the milling of AISI 304L stainless steel, which is considered a difficult-to-machine material due to its high ductility, strong tendency for work hardening, and rapid tool wear during machining. A Central Composite Design (CCD) was employed to design the experiments, and a multi-response desirability function approach was applied to determine the optimal machining parameters. The results indicated that the optimal machining parameters were a radial depth of cut of 0.30 mm and a feed rate of 0.15 mm/tooth. Under these conditions, the side surface roughness was 1.54 μm, while the material removal rate was 13.68 cm^3/min, with a desirability value of 96.84%. The confirmation experiments demonstrated that the optimal machining parameters were statistically reliable at the 95% confidence level.

Keywords: Side Milling, Multi-Response Optimization, Radial Surface Plane, Radial Depth of Cut

Please cite this article as: K. Kittilertpaisan and P. Baowan, "Optimization of machining parameters for maximizing material removal rate and controlling surface roughness in milling of AISI 304L stainless steel using a TiAlN-coated high-helix carbide end mill," *The Journal of KMUTNB*, vol. 37, no. 1, pp. 1–20, Jan.–Mar. 2027 (in Thai), Art. no. 271-068398, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.11.006.

1. บทนำ

กระบวนการกัดด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Milling) เป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตหลักที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตสมัยใหม่ โดยเฉพาะในกลุ่มอุตสาหกรรมที่ต้องการความแม่นยำสูง และคุณภาพผิวที่ดี เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อากาศยาน และอุปกรณ์ทางการแพทย์ ทั้งนี้ เป้าหมายสำคัญของกระบวนการกัดคือ การเพิ่มอัตราการกำจัดเศษ (Material Removal Rate; MRR) ควบคู่กับการควบคุมคุณภาพผิว (Surface Roughness) และการยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัด (Tool Wear) อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่าอัตราการกำจัดเศษมักก่อให้เกิดผลกระทบเชิงลบต่อคุณภาพผิว แรงตัดเฉือน อุณหภูมิ และการสั่นสะเทือน ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่เร่งการสึกหรอของเครื่องมือตัดและลดเสถียรภาพของกระบวนการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ [1]–[2]

อัตราการกำจัดเศษเป็นตัวชี้วัดสำคัญของประสิทธิภาพการผลิตในกระบวนการกัด ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ ระยะป้อนลึกแนวแกน (Axial Depth of Cut) ระยะป้อนลึกแนวรัศมี (Radial Depth of Cut) และอัตราป้อน (Feed Rate) โดยพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณวัสดุที่ถูกกำจัดต่อหน่วยเวลา อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวแม้จะช่วยเพิ่มอัตราการกำจัดเศษแต่กลับส่งผลให้ค่าความหยาบผิวสูงขึ้นสะท้อนถึงลักษณะความสัมพันธ์แบบแลกเปลี่ยน (Trade-off) เนื่องจากเมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้นความสูงของ Feed Mark จะเพิ่มขึ้นตามหลักการสร้างผิวทางเรขาคณิตในงานตัดเฉือน ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มโหลดในการตัดยังส่งผลให้เกิดแรงตัดและการสั่นสะเทือนที่สูงขึ้น ซึ่งมีผลต่อคุณภาพผิวของชิ้นงานที่ยังคงเป็นประเด็นท้าทายสำคัญในงานวิจัยด้านการตัดเฉือน [3], [4]

วัสดุสเตนเลสเกรด AISI 304L ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเคมี และอุปกรณ์ทางการแพทย์ เนื่องจากมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง อย่างไรก็ตามความเหนียวสูงและแนวโน้มการเกิดการเพิ่มความแข็งจากการทำงาน (Work Hardening) ส่งผลให้เกิดแรงตัดสูง อุณหภูมิสะสม และการสึกหรอของเครื่องมือตัดอย่างรวดเร็ว [5], [6] ดังนั้นการเพิ่มอัตราการกำจัดเศษในวัสดุชนิดนี้จึงจำเป็นต้องอาศัยแนวทางเชิงวิศวกรรมที่เหมาะสมเพื่อรักษาสมดุลระหว่างผลผลิตและคุณภาพ

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแนวทางในการปรับปรุงการเพิ่มอัตราการกำจัดเศษ และควบคุมคุณภาพผิวของกระบวนการกัดสามารถแบ่งออกเป็นสามแนวทางหลัก ได้แก่ 1) การออกแบบรูปทรงของเครื่องมือตัด (Tool Geometry) 2) การพัฒนาเทคโนโลยีเคลือบผิว (Tool Coating) และ 3) การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Process Optimization) ในด้านการออกแบบเครื่องมือตัด งานวิจัยรายงานว่าดอกกัดมุมเลี้ยสูง (High-Helix End Mill) สามารถช่วยลดแรงตัด และการสั่นสะเทือน พร้อมทั้งปรับปรุงคุณภาพผิวของชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามมุมเลี้ยที่สูงอาจส่งผลให้เกิดอุณหภูมิสะสมในบริเวณคมตัดเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือ [7]–[9] ในด้านเทคโนโลยีการเคลือบผิวการเคลือบด้วยไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตร (TiAlN) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นด้านความแข็งสูง ความต้านทานการสึกหรอ และความสามารถในการทนความร้อน โดยเฉพาะการเกิดชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) บนผิว

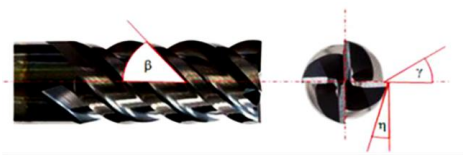
เคลือบซึ่งช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เครื่องมือ ส่งผลให้สามารถเพิ่มความเสถียรของกระบวนการตัดเฉือนได้ภายใต้สภาวะการตัดที่รุนแรง [10]–[13] ในขณะเดียวกันการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคทางสถิติและการเพิ่มประสิทธิภาพแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) ได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงหลัง เนื่องจากสามารถวิเคราะห์และหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์การตัดเฉือนได้อย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE) ร่วมกับวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) และฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราการกำจัดเศษควบคู่กับการควบคุมค่าความหยาบผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพ [14]–[17] อย่างไรก็ตามแม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแต่ละแนวทางดังกล่าว แต่ส่วนใหญ่ยังคงมุ่งเน้นการศึกษาปัจจัยแต่ละด้านแยกจากกัน เช่น การศึกษาผลของรูปทรงเครื่องมือตัดหรือการเคลือบผิว หรือการปรับพารามิเตอร์เพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง ส่งผลให้ยังขาดความเข้าใจเชิงบูรณาการเกี่ยวกับผลกระทบร่วมของปัจจัยเหล่านี้ โดยเฉพาะในกรณีของการกัดด้านข้าง (Side Milling) ที่ต้องการเพิ่มอัตราการกำจัดเศษในวัสดุสเตนเลส AISI 304L ภายใต้กรอบการเพิ่มประสิทธิภาพแบบหลายวัตถุประสงค์

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์การตัดเฉือนและหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มอัตราการกำจัดเศษควบคู่กับการควบคุมความหยาบผิวด้านข้างในกระบวนการกัดสเตนเลส AISI 304L โดยใช้ดอกกัดคาร์ไบด์มุมเลี้ยสูงเคลือบไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) และวิธีฟังก์ชันความพึงพอใจแบบหลายตัวแปรตอบสนอง เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์การตัดเฉือนที่เหมาะสมที่มีความสำคัญเชิงประยุกต์ต่ออุตสาหกรรมการผลิต โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการความแม่นยำสูงและผิวงานคุณภาพ ซึ่งการเพิ่มอัตรากำจัดเศษโดยไม่ลดทอนคุณภาพผิวสามารถช่วยลดระยะเวลาการผลิต เพิ่มประสิทธิภาพการใช้เครื่องจักร และลดต้นทุนการผลิตโดยรวม อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดและลดของเสียจากกระบวนการผลิต ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการผลิตอย่างยั่งยืนและระบบการผลิตอัจฉริยะในยุคอุตสาหกรรม 4.0

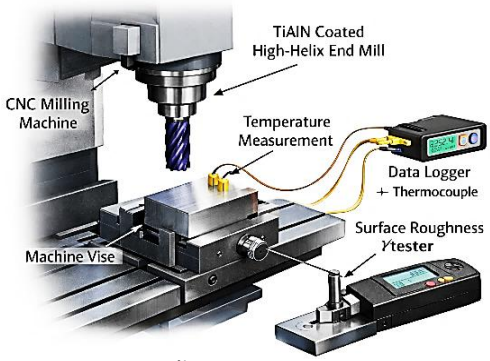
2. วิธีการทดลอง

2.1 เครื่องมือ/วัสดุการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ใช้เครื่องมือตัดเป็นดอกกัดเอ็นมิลล์คาร์ไบด์มีรูปร่าง และรายละเอียดดังรูปที่ 1 และตารางที่ 1 ดอกกัดเอ็นมิลล์คาร์ไบด์จะถูกเคลือบด้วยวัสดุ TiAlN ด้วยวิธีพีวีดีแมกนีตรอนสปัตเตอริ่ง (Magnetron Sputtering PVD) จากบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือตัดภายในประเทศไทย ทั้งนี้ รายละเอียดสมบัติของชั้นเคลือบเป็นไปตามข้อมูลผู้ผลิตดังตารางที่ 2 วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นสเตนเลส 304L มีสมบัติดังตารางที่ 3 ทั้งดอกกัดเอ็นมิลล์คาร์ไบด์และวัสดุ สเตนเลสถูกติดตั้งบนเครื่องกัดอัตโนมัติยี่ห้อ HAAS รุ่น VM2 ดังรูปที่ 2 และมีค่าปัจจัยในการทดลองดังตารางที่ 4 เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์การตัดเฉือนต่ออัตราการกำจัดเศษและคุณภาพผิวของชิ้นงาน



รูปที่ 1 รูปร่างดอกกัดประกอบด้วยมุมเลี้ยย (β) มุมคายเศษ (γ) มุมหลบแนวรัศมี (η)



รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องมือ/วัสดุในการทดลอง

ตารางที่ 1 รายละเอียดต่างๆ ของรูปร่างดอกกัด

รายการ	รายละเอียด
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	10
มุมเลี้ยว; β (°)	30, 45, 60
มุมคายเศษ; γ (°)	4
มุมหลบแนวรัศมี; η (°)	6
จำนวนฟัน; Z (ฟัน)	4

ตารางที่ 2 สมบัติของวัสดุเคลือบ TiAlN

รายการ	รายละเอียด
ความหนาชั้นเคลือบ (μm)	2.87
ความแข็ง (Hardness; Hv)	2300
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction)	0.45

ตารางที่ 3 สมบัติของวัสดุสเตนเลส เกรด 304L

สมบัติ	ค่า
ความแข็งร็อกเวลล์	80 HRB
ความเค้นคราก	210 MPa
มอดูลัสความยืดหยุ่น	193–200 GPa
ความหนาแน่น	8.03 g/cm^3
ค่าการนำความร้อน	16.2 W/m • K

ตารางที่ 4 ปัจจัยการทดลอง

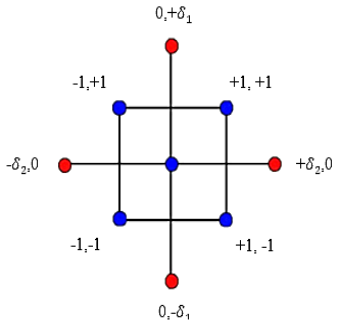
ปัจจัย	ค่าปัจจัย
ความเร็วตัด: Vc (m/min)	120
อัตราป้อน: F (mm/tooth)	0.10, 0.15
ระยะป้อนลึกแนวแกน: a_p (mm)	20.0
ระยะป้อนลึกแนวรัศมี: a_e (mm)	0.25, 0.30

ค่าตัวแปรตอบสนองที่ศึกษา ได้แก่ ความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานในแนวแกนและแนวรัศมี (Ra) อุณหภูมิชิ้นงานขณะตัดเฉือน และอัตราการกำจัดเศษ โดยค่าความหยาบผิววัดด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว และบันทึกค่าเฉลี่ยจากการวัดซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อประเมินความมีนัยสำคัญของพารามิเตอร์ และสร้างแบบจำลองสมการถดถอยเชิงกำลังสองเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนอง จากนั้นใช้วิธีฟังก์ชันความพึงพอใจแบบหลายตัวแปรตอบสนองในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาการเพิ่มอัตราการกำจัดเศษควบคู่กับการควบคุมค่าความหยาบผิวให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

2.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางเป็นการออกแบบการทดลองหนึ่งที่ได้รับความนิยมที่สามารถแก้ปัญหาในรูปแบบสมการถดถอยที่พบว่ามีส่วนโค้งในพื้นผิวผลตอบสนอง การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางถูกริเริ่มโดย [18] โดยทั่วไปแล้วการออกแบบส่วนประสมกลางจะประกอบด้วย 2^k แฟคตอเรียล พร้อมด้วยจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย รวมกับจุดในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว (Star) ดังรูปที่ 3 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบ 2^2 แฟคตอเรียล มีจำนวนจุดที่ต้องทำการทดลองคือ 4 จุด รวมกับจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัยอีก 4–6 ซ้ำ และจุดในแนวแกนหรือในแนวรูปดาวอีก 4 จุด รวมเป็น 12–14 จุด

การออกแบบการทดลองส่วนประสมกลางในการศึกษานี้ประกอบด้วยการทดลองแบบแฟคตอเรียล 2^2



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของตัวแปรในการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

จุดการทดลองแบบแกนหรือแบบดาว (Axial or Star Runs) จำนวน 2×2 จุด และจุดกลาง (Center Runs) จำนวน 5 จุด นอกจากนี้ระดับต่ำและระดับสูงของอัตราการป้อนคือ 0.10 และ 0.15 มิลลิเมตรต่อฟัน ตามลำดับ ในขณะที่ระดับต่ำและระดับสูงของระยะป้อนลึกตามแนวรัศมีคือ 0.25 และ 0.30 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ อัตราการป้อนและระยะป้อนลึกตามแนวรัศมีกับตัวแปรเข้ารหัส δ_1 และ δ_2 ที่แสดงในสมการที่ (1) และ (2)

$$\delta_1 = \frac{Feed - \left(Feed_{high} + Feed_{low}\right)/2}{\left(Feed_{high} - Feed_{low}\right)/2} \qquad (1)$$

และ

$$\delta_2 = \frac{Radial - \left(Radial_{high} + Radial_{low}\right)/2}{\left(Radial_{high} - Radial_{low}\right)/2} \qquad (2)$$

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ผลการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมส่วนกลาง สำหรับดอกกัดคาร์ไบด์มุมเลื้อยสูงเคลือบด้วย TiAlN ในการทดลองเพื่อเพิ่มอัตราการกำจัดเศษ ดังแสดงในตารางที่ 5 เป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดลองจากการทำซ้ำ 3 ครั้ง มีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการกำจัดเศษคือ อัตราการป้อน และระยะป้อนลึกแนวรัศมี และมีตัวแปรผลตอบสนอง 4 ตัวแปร ได้แก่ ค่าความหยาบผิวแนวรัศมี (Surface Roughness Radial Plane) ค่าความหยาบผิวแนวแกน (Surface Roughness Axial Plane) อุณหภูมิขณะตัดเฉือน (Temperature) และ อัตราการกำจัดเศษ ทั้งนี้ เนื่องจากอัตราการกำจัดเศษในงานวิจัยนี้ได้มาจากการคำนวณตามสูตรจากตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราการป้อน และระยะป้อนลึกตามแนวรัศมี ซึ่งแปรผันโดยตรงกับอัตราการกำจัดเศษ จึงไม่มีผลในการนำมาวิเคราะห์ทางสถิติ แต่จะใช้ในการกำหนดเพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในตอนท้าย

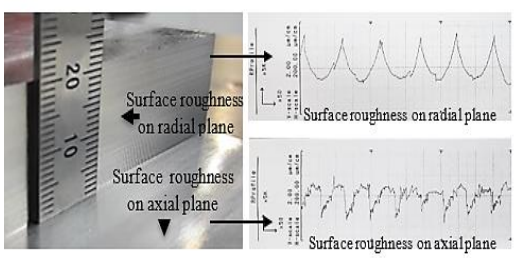
จากตารางผลทดลองเพื่อประเมินความสามารถในการทำซ้ำของการทดลองได้ดำเนินการทดลองซ้ำที่จุดศูนย์กลาง (Center Point) จำนวน 5 ครั้ง ภายใต้เงื่อนไขอัตราป้อน 0.125 มิลลิเมตรต่อฟัน และระยะป้อนลึกแนวรัศมี 0.275 มิลลิเมตร ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความหยาบผิวแนวรัศมี ความหยาบผิวแนวแกน และอุณหภูมิขณะตัดเฉือนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.983 ±0.082 ไมโครเมตร 0.349 ±0.028 ไมโครเมตร และ 126.35 ±7.20 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการทดลองมีความสามารถในการทำซ้ำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

3.1 ความหยาบผิว (Surface Roughness)

ในงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบการตัดเฉือนแบบด้านข้าง เพื่อให้ได้เกิดการใช้งานดอกกัดได้เต็มคมตัดจะทำให้ได้พื้นผิว 2 ผิว คือ ความหยาบผิวแนวรัศมี และความหยาบผิวแนวแกน ดังรูปที่ 4 ทั้งสองผิวนั้นจะมีความหยาบผิวที่แตกต่างการสังเกตได้จากกราฟความหยาบผิวที่แสดงมีลักษณะที่แตกต่างกันและจะอธิบายด้วยการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองสำหรับการออกแบบส่วนประสมส่วนกลางพร้อมตัวแปรตอบสนอง 4 ตัวแปร

ลำดับที่	อัตราป้อน (mm/tooth)	ระยะป้อนลึกแนวรัศมี (mm)	ความหยาบผิวแนวรัศมี (μm)	ความหยาบผิวแนวแกน (μm)	อุณหภูมิขณะตัดเฉือน (°C)	อัตราการกำจัดเศษ (cm^3/min)
1	0.100	0.250	0.743	0.446	121.22	7.60
2	0.150	0.250	1.328	0.336	132.21	11.40
3	0.100	0.300	1.018	0.686	149.24	9.12
4	0.150	0.300	1.587	0.286	164.25	13.68
5	0.090	0.275	0.626	0.202	136.09	7.50
6	0.160	0.275	1.654	0.481	140.10	13.40
7	0.125	0.240	1.064	0.313	112.33	9.10
8	0.125	0.310	1.101	0.418	159.48	11.80
9	0.125	0.275	0.997	0.336	128.56	10.45
10	0.125	0.275	1.069	0.374	136.27	10.45
11	0.125	0.275	0.899	0.331	119.35	10.45
12	0.125	0.275	0.987	0.321	128.36	10.45
13	0.125	0.275	0.863	0.384	119.21	10.45

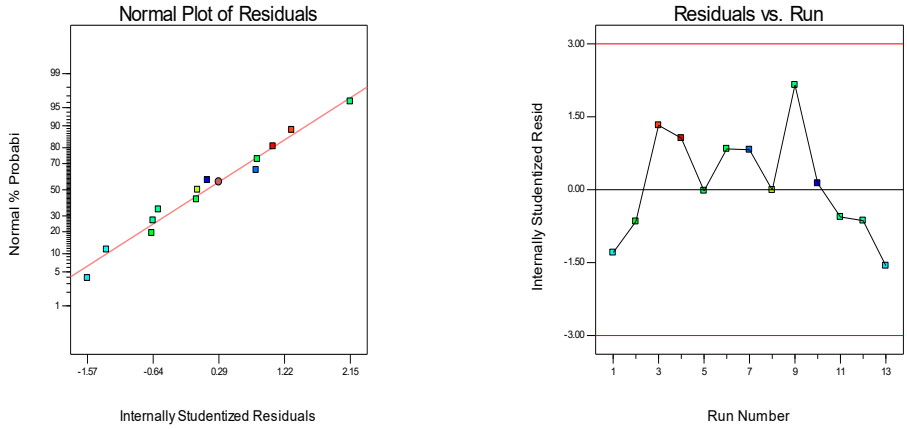


รูปที่ 4 ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานและกราฟการกระจายตัวของความเรียบผิว

3.1.1 ความหยาบผิวแนวรัศมี (Surface Roughness on Radial Surface Plane)

เพื่อให้การทดลองเป็นไปตามข้อกำหนดตามรูปแบบทางสถิติของแผนการออกแบบการทดลองแบบ 2^2 แฟคทอเรียล การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางสถิติพิจารณาจากกราฟ Normal Probability Plot และ Residual Plot ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติและมีความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน ดังรูปที่ 5 (ก) ข้อมูลมีการเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรง นั่นหมายความว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ดังรูปที่ 5 (ข) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบไร้รูปแบบ นั่นหมายความว่าข้อมูลถูกสุ่มเก็บตามรูปแบบการทดลอง แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเหมาะสมกับรูปแบบทางสถิติของแผนการออกแบบการทดลองแบบ 2^2 แฟคทอเรียล หรือสามารถวิเคราะห์ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลจากการทดลองจะเห็นว่ารูปแบบทางสถิติของแผนการออกแบบการทดลองมีความเหมาะสม (p-value < 0.05) ในทำนองเดียวกันตัวแปรอัตราป้อนมีอิทธิพลหลักต่อค่าความหยาบผิวแนวรัศมี (p-value < 0.05) ซึ่งเป็นไปตามที่



(ก) (ข)

รูปที่ 5 ตรวจสอบความเพียงพอของรูปแบบของแผนการทดลองค่าความหยาบผิวแนวรัศมี (ก) การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล (ข) การทดสอบการเป็นอิสระของข้อมูล

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความหยาบผิวแนวรัศมี

แหล่งที่มาของความแปรปรวน	ผลรวมกำลังสอง (SS)	องศาอิสระ (df)	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (MS)	ค่าสถิติ F	ระดับนัยสำคัญ (*p*-value)	
แบบจำลอง	0.9929	4	0.2482	26.8223	0.0001	*มีนัยสำคัญ*
A-อัตราป้อน	0.8501	1	0.8501	91.8574	< 0.0001	
B-ระยะป้อนลึกแนวรัศมี	0.0430	1	0.0430	4.6434	0.0633	
ความคลาดเคลื่อนคงเหลือ	0.0740	8	0.0093			
ความไม่สอดคล้องของแบบจำลอง	0.0470	4	0.0117	1.7356	0.3032	*ไม่มีนัยสำคัญ*
ความคลาดเคลื่อนสุทธิ	0.0271	4	0.0068			
ผลรวมความแปรปรวนทั้งหมดที่ปรับแก้	1.0669	12				

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน%	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงพยากรณ์	ความแม่นยำเพียงพอของแบบจำลอง
0.0962	1.072	8.9739	0.9306	0.8959	0.74762	15.4541

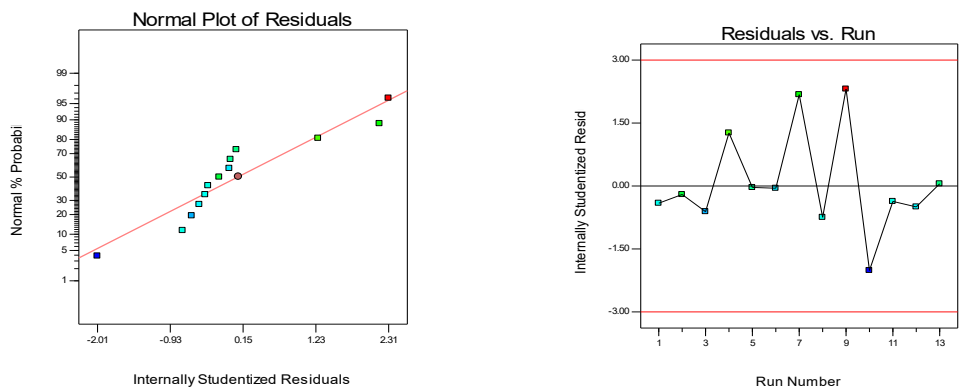
งานวิจัยหลายงานได้สรุปว่าตัวแปรอัตราป้อน ถือเป็นหนึ่งในตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวในกระบวนการกัด โดยมีรายงานว่าเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุดเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์อื่น เช่น ความเร็วตัดและระยะกินลึก [19], [20] ทำนองเดียวกันการวิเคราะห์เชิงสถิติยังแสดงให้เห็นว่าอัตราป้อนเป็นหนึ่งในตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงมีแนวโน้มทำให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อค่าอัตราป้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้อง

กับงานวิจัยล่าสุดที่ยืนยันว่า เป็นตัวแปรเด่นที่ควบคุมคุณภาพผิวในกระบวนการตัดเฉือน [21] การเพิ่มขึ้นของอัตราป้อน ส่งผลให้แรงในการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการสั่นสะเทือนในระบบการตัดเฉือน โดยมีรายงานว่าแรงตัดที่สูงขึ้นสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่และความเร่งของเครื่องมือที่ส่งผลให้เมื่อเพิ่มค่าอัตราป้อนขึ้นทำให้โหลดในการตัดเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเพิ่มขึ้น [22] ในทางตรงกันข้ามตัวแปรระยะป้อนลึกแนวรัศมี ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวแนวรัศมี (p-value > 0.05) อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ ภายหลังจากการวิเคราะห์การถดถอย พบความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ระหว่างอัตราการป้อนและระยะป้อนลึกตามแนวรัศมี ดังนี้ความหยาบผิวแนวรัศมี = 10.077 - 28.135F - 62.353R + 164.700F^2 + 118.700R^2

3.1.2 ความหยาบผิวแนวแกน (Surface Roughness on Axial Surface Plane)

การทดสอบความเพียงพอของรูปแบบทางสถิติของแผนการทดลองความหยาบผิวแนวแกนพิจารณาจากกราฟ Normal Probability Plot และ Residual Plot ดังรูปที่ 6 (ก) ข้อมูลมีการเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรง นั่นหมายความว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ดังรูปที่ 6 (ข) ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบไร้รูปแบบ นั่นหมายความว่าข้อมูลถูกสุ่มเก็บตามรูปแบบการทดลอง แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเหมาะสมกับรูปแบบทางสถิติของแผนการออกแบบการทดลองแบบ 2^2 แฟคทอเรียล หรือสามารถวิเคราะห์ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังต่อไปนี้

การเปลี่ยนค่าของตัวแปรทุกตัวจากการทดลองไม่ได้ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวแนวแกนแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 7 จะเห็นว่ารูปแบบทางสถิติของแผนการออกแบบการทดลองตัวแปรอัตราการป้อนและระยะป้อนลึกตามแนวรัศมีไม่มีอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมต่อค่าความหยาบผิวแนวแกน (p-value > 0.05) เนื่องมาจากการตัดเฉือนแบบด้านข้างรายละเอียดในรูปที่ 7 จากลักษณะการกัดด้านข้างที่ใช้ระยะป้อนลึกในแนวรัศมีค่อนข้างต่ำทำให้บริเวณส่วนปลายของคมตัดในแนวแกน (Axial Cutting Edge) เคลื่อนผ่านพื้นผิวชิ้นงานในตำแหน่งที่มีการซ้อนทับของแนวทางเดินเครื่องมือ (Overlapping Tool Paths) หลายครั้งภายใต้สภาวะ

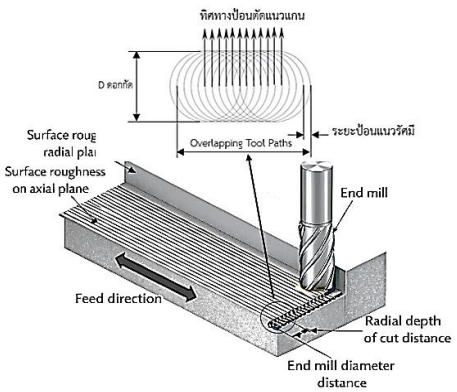


(ก) (ข)

รูปที่ 6 ตรวจสอบความเพียงพอของรูปแบบของแผนการทดลองค่าความหยาบผิวแนวแกน (ก) การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล (ข) การทดสอบการเป็นอิสระของข้อมูล

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของความหยาบผิวแนวแกน

แหล่งที่มาของความแปรปรวน	ผลรวมกำลังสอง (SS)	องศาอิสระ (df)	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (MS)	ค่าสถิติ F	ระดับนัยสำคัญ (*p*-value)	
แบบจำลอง	0.0370	3	0.0123	0.8717	0.4909	*ไม่มีนัยสำคัญ*
A-อัตราป้อน	0.0017	1	0.0017	0.1177	0.7394	
B-ระยะป้อนลึกแนวรัศมี	0.0143	1	0.0143	1.0119	0.3407	
AB	0.0210	1	0.0210	1.4854	0.2539	
ความคลาดเคลื่อนคงเหลือ	0.1274	9	0.0142			
ความไม่สอดคล้องของแบบจำลอง	0.1243	5	0.0249	31.7924	0.0026	*มีนัยสำคัญ*
ความคลาดเคลื่อนสุทธิ	0.0031	4	0.0008			
ผลรวมความแปรปรวนทั้งหมดที่ปรับแก้	0.1644	12				



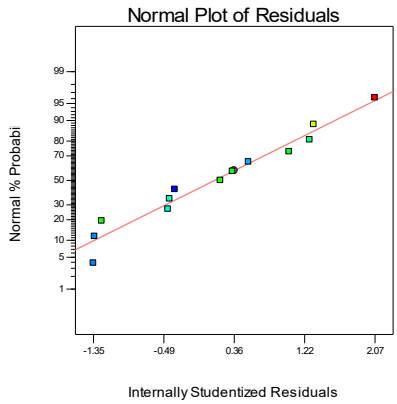
รูปที่ 7 ทิศทางระยะป้อนลึกตามแนวรัศมีและทิศทางป้อนแนวแกนสำหรับการกัดข้าง

ดังกล่าวรอยผิวที่เกิดขึ้นจากการตัดในรอบก่อนหน้าจะถูกคมตัดในรอบถัดไปเกลี่ยและตัดแต่งซ้ำ (Secondary Surface Generation) ส่งผลให้ยอดรอยผิว (Surface Peaks) ลดระดับลงและความสูงของร่องผิว (Surface Valleys) มีความสม่ำเสมอมากขึ้น

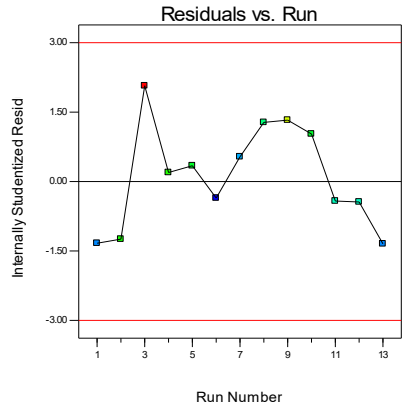
นอกจากนี้การสัมผัสซ้ำของคมตัดยังช่วยลดผลกระทบของรอยป้อน (Feed Marks) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราป้อนต่อฟันตัด และลดอิทธิพลของความคลาดเคลื่อนเชิงเรขาคณิตที่เกิดขึ้นระหว่างแนวทางเดินเครื่องมือแต่ละแนว ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวแนวแกนมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แม้อัตราป้อนและระยะป้อนลึกในแนวรัศมีจะเปลี่ยนแปลงภายในช่วงที่ศึกษา ดังนั้นความหยาบผิวแนวแกนจึงมีความไว (Sensitivity) ต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์การตัดเฉือนต่ำกว่าความหยาบผิวแนวรัศมี ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการเกิดผิวจากการซ้อนทับของแนวทางเดินเครื่องมือในการกัดด้านข้าง [23]–[25]

3.2 อุณหภูมิขณะตัดเฉือน (Workpiece Temperature)

การทดสอบความเพียงพอของรูปแบบทางสถิติพิจารณาจากกราฟ Normal Probability Plot และ Residual Plot จากรูปที่ 8 (ก) ข้อมูลมีการเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรง นั่นหมายความว่า ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติจากรูปที่ 8 (ข) ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบไร้รูปแบบ นั่นหมายความว่า ข้อมูลถูกสุ่มเก็บตามรูปแบบการทดลอง แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเหมาะสมกับรูปแบบทางสถิติของแผนการออกแบบการทดลองแบบ 2^2 แฟคทอเรียล หรือสามารถวิเคราะห์ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากรูปที่ 9 จะเห็น

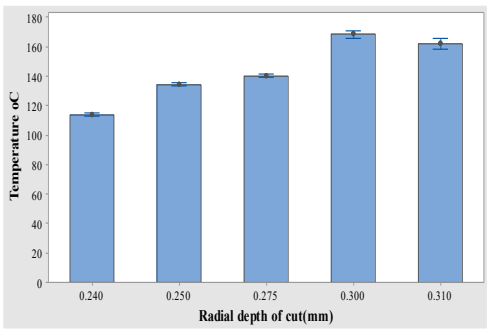


(ก)

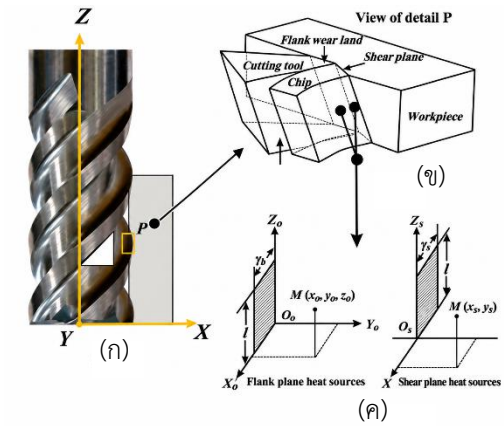


(ข)

รูปที่ 8 ตรวจสอบความเพียงพอของรูปแบบของแผนการทดลองค่าอุณหภูมิขณะตัดเฉือน (ก) การทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล (ข) การทดสอบการเป็นอิสระของข้อมูล



รูปที่ 9 อิทธิพลของระยะป้อนลึกในแนวรัศมี (Radial Depth of Cut) ที่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิขณะตัดเฉือน



รูปที่ 10 การวิเคราะห์กระบวนการเกิดความร้อน (ก) รูปร่างดอกกัด (ข) พื้นที่การเกิดความร้อนบนชิ้นงาน (ค) ปริมาณพื้นที่การเกิดความร้อน

ว่าตัวแปรระยะป้อนลึกในแนวรัศมีมีอิทธิพลต่อค่าอุณหภูมิขณะตัดเฉือน โดยเมื่อค่าระยะป้อนลึกในแนวรัศมีสูงขึ้น ค่าอุณหภูมิขณะตัดเฉือนจะสูงขึ้นตามไปด้วย สาเหตุที่ทำให้ตัวแปรระยะป้อนลึกในแนวรัศมีมีอิทธิพลต่อค่าอุณหภูมิขณะตัดเฉือนสามารถอธิบายได้ด้วยงานวิจัย [26] ดังรูปที่ 10 (ก) แสดงดอกกัดกับแหล่งความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะตัดเฉือนวัสดุ ซึ่งอธิบายด้วยรูปที่ 10 (ข) เป็นรายละเอียดการอธิบายแหล่งพื้นที่ของความร้อนมีด้วยกัน 2 แหล่ง คือ พื้นที่หลักบริเวณหน้าคมตัด (Shear Plane Heat Source) และพื้นที่รองบริเวณหลังคมตัด (Flank Plane Heat Source) ซึ่งแหล่งความร้อนที่เกิดสูงที่สุดคือบริเวณพื้นที่หลักบริเวณหน้าคมตัด เมื่อวิเคราะห์ตามขนาดพื้นที่ในรูปที่ 10 (ค) จะเห็นว่า l จะมีค่าแปรผันไปตามขนาดของค่ามุมเลื้อยดอกกัด (ในงานวิจัยนี้มีค่าคงที่) และค่า w จะแปรผันไปตามค่าของระยะป้อนลึกในแนวรัศมี เมื่อค่าเพิ่มขึ้นพื้นที่ของแหล่งความร้อนก็จะมากขึ้นตามจึงทำให้ค่าตัวแปรนี้มีอิทธิพลต่อ

อุณหภูมิขณะตัดเฉือน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [27] โดยมีรายงานว่าเมื่อค่าระยะป้อนลึกในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงในการตัดเฉือนและปริมาณการกำจัดเนื้อวัสดุเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการสะสมความร้อนในบริเวณตัดเฉือนมากขึ้น นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการสัมผัสของเครื่องมือกับชิ้นงานยังมีผลโดยตรงต่อค่าอุณหภูมิในการตัดเฉือนส่งผลให้ค่าอุณหภูมิขณะตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะป้อนลึกในแนวรัศมี

3.3 การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม (Optimization)

การแก้ปัญหาเกี่ยวกับหลายตัวแปรตอบสนองในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง [28] วิธีนี้เริ่มจากการแปลงฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยว (Individual Desirability Function, d_i) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $0 \le d_i \le 1$ ถ้าผลตอบสนอง y_i อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ของผู้ทำการทดลองแล้ว ค่า d_i จะมีค่าเท่ากับ 1 ในขณะเดียวกันถ้าผลตอบสนอง y_i ไม่อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ของผู้ทำการทดลองแล้วค่า d_i จะมีค่าเท่ากับ 0 ในการแปลงค่าจากผลตอบสนองแต่ละตัวให้เป็นค่าฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวนั้นมีวัตถุประสงค์ 3 ประการด้วยกันคือ ต้องการให้ได้ค่าที่มากที่สุด (Maximization) ต้องการค่าที่น้อยที่สุด (Minimization) และต้องการให้ได้ค่าตามที่กำหนด (Meeting the Target) ดังรูปที่ 11 ค่าฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวที่ต้องการให้ได้ค่ามากที่สุดสามารถกำหนดได้ดังสมการที่ (3)

$$d_i = \begin{cases} 0, & y_i < low \\ \left(\dfrac{y_i - low}{high - low}\right)^r, & low \le y_i \le high \\ 1, & y_i > high \end{cases} \quad (3)$$

ค่าฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวที่ต้องการให้ได้ค่าน้อยที่สุดสามารถกำหนดได้ดังสมการที่ (4) และค่าฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวที่ต้องการให้ได้ค่าตามที่กำหนดสามารถกำหนดได้ดังสมการที่ (5)

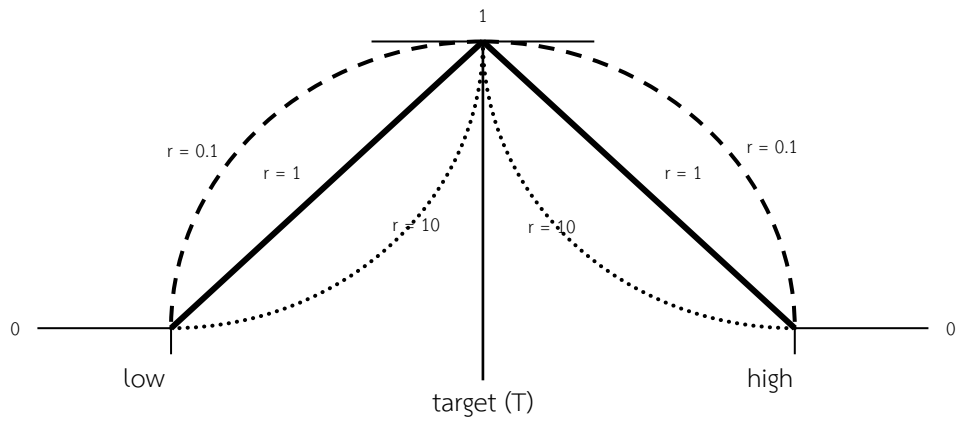
$$d_i = \begin{cases} 1, & y_i < low \\ \left(\dfrac{high - y_i}{high - low}\right)^r, & low \le y_i \le high \\ 0, & y_i > high \end{cases} \quad (4)$$

$$d_i = \begin{cases} \left(\dfrac{y_i - low}{T - low}\right)^{r1}, & low \le y_i \le T, \\ \left(\dfrac{y_i - high}{T - high}\right)^{r2}, & T \le y_i \le high, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

หลังจากแปลงค่าผลตอบสนองเป็นฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวแล้ว ฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวแต่ละผลตอบสนองจะถูกแปลงเป็นฟังก์ชันความพึงพอใจรวม (Overall Desirability Function, D) ดังสมการ (6) แล้วจึงทำการหาค่าที่ดีที่สุดของ D

$$D = \left(\prod_{i=1}^{n} d_i\right)^{1/n} \quad (6)$$

การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราการกำจัดเศษให้กับกระบวนการกัดแบบด้านข้างด้วยวิธีการใช้ฟังก์ชั่นความพึงพอใจโดยมีผลตอบสนอง 2 ตัว คือ ความหยาบผิวแนวรัศมี (Surface Roughness on Radial Plane) และอัตราการกำจัดเศษ ผลตอบสนองอุณหภูมิขณะตัดเฉือนไม่ถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกิน 160 องศาเซลเซียส ซึ่งยังอยู่ในระดับต่ำกว่า



รูปที่ 11 ทางลาดของฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวที่ให้ได้ค่ามากที่สุด ค่าน้อยที่สุด และต้องการให้ได้ค่าตามที่กำหนด โดยมีน้ำหนักของฟังก์ชั่นความพึงพอใจแตกต่างกัน

ช่วงอุณหภูมิที่มักก่อให้เกิดการหลอมติดของเศษวัสดุ (Built-Up Edge) หรือความเสียหายทางความร้อนต่อคมตัดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นอุณหภูมิจึงถูกใช้เป็นตัวแปรประกอบในการประเมินสภาวะการตัดเฉือนเท่านั้น ในการหาค่าที่เหมาะสมในครั้งนี้และในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมมีการกำหนดแนวทาง 3 กรณี ดังนี้

การกำหนดระดับความสำคัญ (Importance Level) อ้างอิงตามแนวทางของ Derringer และ Suich [28] ซึ่งใช้กำหนดน้ำหนักสัมพัทธ์ของตัวแปรตอบสนองในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีฟังก์ชันความพึงพอใจโดยกรณีที่ 1 มุ่งเน้นการควบคุมความหยาบผิวแนวรัศมี จึงกำหนดค่า Importance เท่ากับ 5

ตารางที่ 8 ได้ผลการหาค่าที่เหมาะสมอัตราป้อน = 0.1 มิลลิเมตรต่อฟัน และระยะป้อนลึกแนวรัศมี = 0.270 มิลลิเมตร ทำให้ได้ค่าหยาบผิวแนวรัศมี = 0.7275 ไมโครเมตร และอัตราการกำจัดเศษ = 8.1959 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีค่าความพึงพอใจ = 92.34% ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 10 เป็นกรณีที่ให้ความสำคัญไปที่อัตราการกำจัดเศษโดยกำหนดระดับความสำคัญระดับ 5 และเป้าหมายเป็นค่ามากที่สุดตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ส่วนความหยาบผิวแนวรัศมี กำหนดให้เพียงแค่ระดับ 1 เป้าหมายเป็นค่าต่ำที่สุดซึ่งเป็นเป้าหมายที่งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้และได้ผลการหาค่าที่เหมาะสม อัตราป้อน = 0.150 มิลลิเมตรต่อฟัน และระยะป้อนลึกแนวรัศมี = 0.300 มิลลิเมตร ทำให้ได้ค่าหยาบผิวแนวรัศมี = 1.5393 ไมโครเมตร และ อัตราการกำจัดเศษ = 13.680 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีค่าความพึงพอใจ = 96.41% ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 12 เป็นกรณีที่ให้ความสำคัญทั้งสองผลตอบสนองแต่ละตัวจะถูกกำหนดที่ระดับความสำคัญที่ระดับ 5 อัตราการกำจัดเศษจะกำหนดเป้าหมายเป็นค่ามากที่สุดตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเช่นเดียวกันกับกรณีที่ 1 และ 2 แต่ค่าความหยาบผิวแนวรัศมีเป้าหมายจะถูกกำหนดในทางการนำไปใช้งานจริงด้วยการกำหนดจากลูกค้าให้ค่าเป็นเป้าหมาย = 1.6 ไมโครเมตร (อ้างอิงตามมาตรฐาน DIN 4766-1) ได้ผลการหาค่าที่เหมาะสม อัตราป้อน = 0.150 มิลลิเมตรต่อฟัน และระยะป้อนลึก

แนวรัศมี = 0.300 มิลลิเมตร ทำให้ได้ค่าหยาบผิวแนวรัศมี = 1.5394 ไมโครเมตร และ อัตราการกำจัดเศษ = 13.6803 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีค่าความพึงพอใจ = 96.84% ดังแสดงในตารางที่ 13 ซึ่งให้ผลไม่แตกต่างจากกรณีที่ 2

ตารางที่ 8 การกำหนดค่าเป้าหมายของการหาค่าที่เหมาะสมกรณีที่ 1 ความหยาบผิวแนวรัศมีสำคัญที่สุด

ตัวแปร	เป้าหมาย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	น้ำหนักต่ำ	น้ำหนักสูง	ระดับความสำคัญ
อัตราป้อน	อยู่ในช่วง	0.100	0.150	1.0	1.0	3
ระยะป้อนลึกแนวรัศมี	อยู่ในช่วง	0.250	0.300	1.0	1.0	3
หยาบผิวแนวรัศมี	ต่ำสุด	0.626	1.654	1.0	0.5	5
อัตราการกำจัดเศษ	สูงสุด	7.500	13.680	0.1	1.0	1

ตารางที่ 9 ค่าตัวแปรที่เหมาะสมกรณีที่ 1 ความหยาบผิวแนวรัศมีสำคัญที่สุด

ลำดับที่	อัตราป้อน	ระยะป้อนลึกแนวรัศมี	หยาบผิวแนวรัศมี	อัตราการกำจัดเศษ	ความพึงพอใจ
1	0.100	0.270	0.7275	8.1959	0.9234
2	0.100	0.269	0.7270	8.1852	0.9234
3	0.100	0.270	0.7285	8.2134	0.9234

ตารางที่ 10 การกำหนดค่าเป้าหมายของการหาค่าที่เหมาะสมกรณีที่ 2 อัตราการกำจัดเศษสำคัญที่สุด

ตัวแปร	เป้าหมาย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	น้ำหนักต่ำ	น้ำหนักสูง	ระดับความสำคัญ
อัตราป้อน	อยู่ในช่วง	0.100	0.150	1.0	1.0	3
ระยะป้อนลึกแนวรัศมี	อยู่ในช่วง	0.250	0.300	1.0	1.0	3
หยาบผิวแนวรัศมี	ต่ำสุด	0.626	1.654	1.0	0.1	1
อัตราการกำจัดเศษ	สูงสุด	7.500	13.680	0.5	1.0	5

ตารางที่ 11 ค่าตัวแปรที่เหมาะสมกรณีที่ 2 อัตราการกำจัดเศษสำคัญที่สุด

ลำดับที่	อัตราป้อน	ระยะป้อนลึกแนวรัศมี	หยาบผิวแนวรัศมี	อัตราการกำจัดเศษ	ความพึงพอใจ
1	0.150	0.300	1.5393	13.6800	0.9641
2	0.149	0.300	1.5182	13.5886	0.9608
3	0.150	0.292	1.4779	13.3266	0.9475

ตารางที่ 12 การกำหนดค่าเป้าหมายของการหาค่าที่เหมาะสมกรณีที่ 3 ให้ความสำคัญที่สุดกับผลทั้งสอง

ตัวแปร	เป้าหมาย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	น้ำหนักต่ำ	น้ำหนักสูง	ระดับความสำคัญ
อัตราป้อน	อยู่ในช่วง	0.100	0.150	1.0	1.0	3
ระยะป้อนลึกแนวรัศมี	อยู่ในช่วง	0.250	0.300	1.0	1.0	3
หยาบผิวแนวรัศมี	เป้าหมาย = 1.6	0.626	1.654	1.0	0.5	5
อัตราการกำจัดเศษ	สูงสุด	7.500	13.680	0.5	1.0	5

ตารางที่ 13 ค่าตัวแปรที่เหมาะสมกรณีที่ 3 ให้ความสำคัญที่สุดกับผลทั้งสอง

ลำดับที่	อัตราป้อน	ระยะป้อนลึกแนวรัศมี	หยาบผิวแนวรัศมี	อัตราการกำจัดเศษ	ความพึงพอใจ
1	0.150	0.300	1.5394	13.6803	0.9684
2	0.150	0.299	1.5264	13.6120	0.9588
3	0.149	0.300	1.5192	13.5930	0.9542

ตารางที่ 14 ผลลัพธ์ค่าการทดลองเพื่อยืนยันผลของตัวแปรที่เหมาะสม

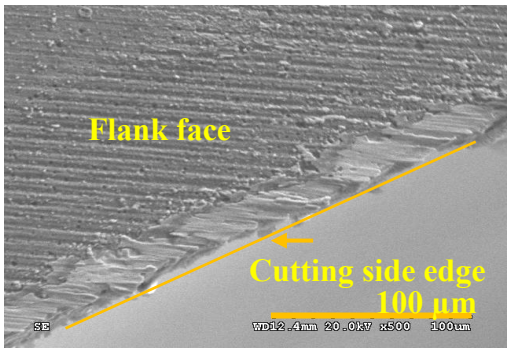
ผลตอบสนอง	ค่าจริง	ค่าพยากรณ์	ร้อยละความคลาดเคลื่อน	95% CI ระดับต่ำ	95% CI ระดับสูง
ความหยาบผิวแนวรัศมี (μm)	1.519	1.539	1.30%	1.4765	1.5607
อัตราการกำจัดเศษ (cm^3/min)	13.680	13.680	0.0%	13.670	13.690

3.4 การทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirm Test)

การทดลองเพื่อยืนยันผลดำเนินการภายใต้เงื่อนไขการตัดเฉือนที่เหมาะสมจากแบบจำลอง ได้แก่ อัตราป้อน 0.15 มิลลิเมตรต่อฟัน และระยะป้อนลึกแนวรัศมี 0.30 มิลลิเมตร โดยกำหนดความเร็วตัด 120 เมตรต่อนาที และระยะป้อนลึกแนวแกน 20 มิลลิเมตร คงที่ จากนั้นทำการกัดชิ้นงานทดลองภายใต้สภาวะดังกล่าว 5 ซ้ำ และวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานจำนวน 3 ซ้ำต่อชิ้นงาน จากตารางที่ 14 ได้ประเมินความแม่นยำของแบบจำลองโดยคำนวณร้อยละความคลาดเคลื่อน (Percentage Error) ระหว่างค่าทดลองจริงและค่าที่พยากรณ์จากแบบจำลอง พบว่าความหยาบผิวแนวรัศมีมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.30% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถพยากรณ์ผลการทดลองได้อย่างแม่นยำ และกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมมีความน่าเชื่อถือสำหรับการประยุกต์ใช้งานภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ นอกจากนี้จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองทุกตัวอยู่ในช่วงของค่าความเชื่อมั่นในระดับ 95% แสดงว่าค่าที่เหมาะสมที่ได้มีความน่าเชื่อถือที่ระดับ 95%

3.5 การสึกหรอของเครื่องมือตัด (Tool Wear)

โดยปกติเครื่องมือตัดจะเกิดการสึกหรอเร็วหรือช้าจะเป็นไปตามค่าตัวแปรที่ใช้ในการตัดเฉือน เมื่อต้องการให้เครื่องมือตัดมีอายุการใช้งานที่ยาวนานค่าตัวแปรจะถูกปรับไปใช้ในระดับที่ต่ำแต่ก็จะส่งผลให้อัตราการกำจัดเศษต่ำเช่นกัน ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มค่าตัวแปรให้สูงเกินปกติเพื่อเพิ่มอัตราการกำจัดเศษผลที่ตามมาคือเครื่องมือตัดจะเกิดการสึกหรอเร็วดังรายละเอียดในรูปที่ 12 เป็นการวิเคราะห์การสึกหรอของดอกกัดบริเวณคมตัดด้านข้างที่ตัดเฉือนด้วยค่าตัวแปรที่เหมาะสมเมื่อกำหนดค่าความหยาบผิว 1.6 ไมโครเมตร (ระยะป้อนลึกแนวรัศมี = 0.30 มิลลิเมตร และ อัตราป้อน = 0.15 มิลลิเมตรต่อฟัน) ในการตัดเฉือนแบบด้านข้างจะให้ความสำคัญกับบริเวณคมตัดด้านข้างซึ่งมีผลต่อค่าความหยาบผิวมากที่สุดเนื่องจากเป็นส่วนที่ตัดเฉือนวัสดุจะเห็นได้ว่าที่คมตัดด้านข้างของดอกกัดที่ตัดด้วยตัวแปรที่เหมาะสมสามารถรักษารูปร่างคมตัดได้ดี พบการสึกหรอบริเวณด้านหลังคมตัด (Flank Wear) ในระดับเล็กน้อย ซึ่งคาดว่าเกิดจากการเสียดสีระหว่างคมตัดกับผิวชิ้นงานในระหว่างกระบวนการกัด อย่างไรก็ตามไม่พบการสึกหรอแบบหลุมบนหน้าลายตัด (Crater Wear) หรือการบิ่นแตกของคมตัดอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าสภาวะการตัดเฉือนที่ใช้ในการศึกษายังไม่ก่อให้เกิดความเสียหายรุนแรงต่อ



รูปที่ 12 การสึกหรอบริเวณคมตัดด้านข้าง (Cutting Side Edge) ของดอกกัดมุมเลี้ยสูงเคลือบด้วย TiAlNiที่ตัดเฉือนด้วยค่าตัวแปรที่เหมาะสม

เครื่องมือตัด เนื่องจากดอกกัดมุมเลี้ยสูงสามารถลดแรงในการตัดเฉือนได้ดี ทำให้เมื่อเพิ่มค่าอัตราป้อนและระยะป้อนลึกแนวรัศมี เพื่อให้อัตราการกำจัดเศษสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัย [29] การรักษารูปร่างของคมตัดที่ดีสามารถลดการสึกหรอจากการเสียดสีและช่วยให้ค่าความหยาบผิวลดลง โดยเฉพาะเมื่อใช้เครื่องมือตัดมุมเลี้ยสูง ซึ่งสามารถลดแรงตัดเฉือนได้ส่งผลให้เกิดการสึกหรอของเครื่องมือต่ำแม้ภายใต้สภาวะการตัดที่มีอัตราป้อนและระยะป้อนลึกในแนวรัศมีสูง

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์การตัดเฉือนและหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มอัตราการกำจัดเศษควบคู่กับการควบคุมความหยาบผิวในการกัดสเตนเลส AISI 304L โดยใช้ดอกกัดคาร์ไบด์มุมเลี้ยสูงเคลือบไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง การหาค่าที่เหมาะสมแบบหลายตัวแปรตอบสนองด้วยวิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหยาบผิวแนวรัศมีแสดงให้เห็นว่าอัตราป้อนเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความหยาบผิว (p-value < 0.05) โดยเมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้นค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงตัดและการสั่นสะเทือนในกระบวนการตัดเฉือน ขณะที่ระยะป้อนลึกแนวรัศมีไม่ส่งผลต่อความหยาบผิวแนวรัศมีอย่างมีนัยสำคัญภายใต้ช่วงการทดลองที่ศึกษา ในด้านอุณหภูมิขณะตัดเฉือนพบว่าอัตราป้อนและระยะป้อนลึกแนวรัศมีส่งผลให้อุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามภาระการตัดที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้นยังอยู่ในช่วงที่ไม่ส่งผลให้เกิดความเสียหายรุนแรงต่อคมตัดหรือส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของกระบวนการตัดเฉือน

ผลการหาค่าที่เหมาะสมแบบหลายตัวแปรตอบสนองพบว่าเงื่อนไขการตัดเฉือนที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ อัตราป้อน 0.15 มิลลิเมตรต่อฟัน และระยะป้อนลึกแนวรัศมี 0.30 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถให้ค่าความหยาบผิวด้านข้างเท่ากับ 1.54 ไมโครเมตร และอัตราการกำจัดเศษเท่ากับ 13.68 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที โดยมีค่าฟังก์ชันความพึงพอใจ 96.84% ผลการทดลองยืนยันผลแสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองจริงภายใต้ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางร่วมกับวิธีฟังก์ชันความพึงพอใจสามารถใช้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการกำหนดสภาวะการตัดเฉือนที่เหมาะสมสำหรับการกัดวัสดุสเตนเลส AISI 304L ช่วยเพิ่มอัตราการกำจัดเศษควบคู่กับการรักษาคุณภาพผิวของชิ้นงาน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มผลิตภาพของกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม

5. กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มอัตราการกำจัดเศษและควบคุมความหยาบผิวในการกัดสเตนเลส AISI 304L ด้วยดอกกัดคาร์ไบด์มุมเลี้อยสูงเคลือบไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตร ในครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนวิจัยจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

[1] M. Wagih, M. A. Shokrani, H. El-Hofy, J. Yan, and I. Maher, “ Effects of process parameters on cutting forces, material removal rate, and specific energy in trochoidal milling,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2024, vol. 238, no. 7, pp. 2745–2757, doi: 10.1177/09544062231196991.

[2] C. Li, G. Zhao, F. Meng, S. Yu, B. Yao, and H. Liu, “ Multi-objective optimization of machining parameters in complete peripheral milling process with variable curvature workpieces,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 117, pp. 95–110, May 2024, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.03.004.

[3] S. K. Khare, P. Gulati, J. P. Singh, and G. S. Phull, “ Enhancing MRR in face milling by varying cutting speed,” *Materials Today: Proceedings*, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.714.

[4] V. Dhiman and D. Gupta, “ A review on optimization of process parameters for material removal rate and surface roughness for SS 202 material during face milling operation,” *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, vol. 1, no. 11, pp. 377–381, Apr. 2015, doi: 10.13140/RG.2.2.10732.58244.

[5] K. Tatar and I. Svenningsson, “Investigation of sustainable face milling of austenitic stainless steel: Material removal performance and tool modification,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 142, no. 1, pp. 349–359, Jan. 2026, doi: 10.1007/s00170-025-17010-8.

[6] S. Tansukatanon, V. Tangwarodomnukun, C. Dumkum, P. Kruytong, N. Plaichum, and W. Charee, “ Micromachining of stainless steel using TiAlN-coated tungsten carbide end mill,”*Procedia Manufacturing*, vol. 30, pp. 419–426, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.058.

[7] S. Yuksel, T. B. Sirin, M. Ay, M. Uçar, and M. Kurt, “ A study on end mill tool geometry parameters for end milling of 316L: Finite element analysis and response surface methodology optimization based on resultant cutting force,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*

and Engineering, vol. 46, no. 8, Aug. 2024, Art. no. 452, doi: 10.1007/s40430-024-05027-1.

[8] E. Doluk and A. Rudawska, " Effect of machining settings and tool geometry on surface quality after machining of Al/CFRP sandwich structures," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 22–33, May 2022, doi: 10.12913/22998624/147787.

[9] W. Wenqi, L. Wei, Z. Yang, L. Yang, Z. Peidong, and J. Zhenyuan, " Precise measurement of geometric and physical quantities in cutting tools inspection and condition monitoring: A review," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 37, no. 4, pp. 23–53, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.cja.2023.08.011.

[10] K. Sonowal and P. P. Borthakur, " Recent advances in tool coatings and materials for superior performance in machining nickel-based alloys," *Engineering Proceedings*, vol. 105, no. 1, Oct. 2025, Art. no. 8, doi: 10.3390/en gproc2025105008.

[11] R. S. Revuru, V. K. Pasam, and N. R. Posinasetti, "Performance of coated cutting tools in machining: A review," presented at the International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (IConETech-2020), St. Augustine, Trinidad and Tobago, Jun. 1–5, 2020, doi: 10.47412/JSID9445.

[12] J. Zhang, L. Ling, D. Luo, C. Deng, X. Huang, G. Tao, and H. Cao, " Cutting performance and surface quality of Ti-6Al-4V by longitudinal ultrasonic vibration-assisted high-speed dry milling with coated carbide tools," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 126, no. 11–12, pp. 5583–5596, May 2023, doi: 10.1007/s00170-023-11510-1.

[13] A. Das, M. Kamal, S. R. Das, S. K. Patel, A. Panda, M. Rafighi, and B. B. Biswal, " Comparative assessment between AlTiN and AlTiSiN coated carbide tools towards machinability improvement of AISI D6 steel in dry hard turning," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 236, no. 6, pp. 3174–3197, Mar. 2022, doi: 10.1177/09544062211037373.

[14] B. S. Rao, C. K. Babu, and H. S. Nayaka, "Multi-response optimisation of end milling process parameters," *Journal of Mines, Metals and Fuels*, vol. 71, no. 1, pp. 29–39, Jan. 2023, doi: 10.18311/jmmf/2023/33352.

[15] T. Dumitru, M. G. Petrescu, M. Tănase, and C. N. Ilincă, " Multi-response optimization analysis of the milling process of asphalt layer based on the numerical evaluation of cutting regime parameters," *Processes*, vol. 11, no. 8, Aug. 2023, Art. no. 2401, doi: 10.3390

/pr11082401.

[16] R. Kumar, P. Katyal, K. Kumar, and V. Singh, "Multiresponse optimization of end milling process parameters on ZE41A Mg alloy using Taguchi and TOPSIS approach," *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, pp. 2497–2504, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.08.271.

[17] R. Bouhali, H. Bendjeffal, K. B. Chetioui, and I. Bousba, " Multivariable optimization based on the Taguchi method to study the cutting conditions in aluminum turning," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 19, no. 5, pp. 3541–3551, May 2025, doi: 10.1007/s12008-024-01995-9.

[18] G. E. P. Box and K. B. Wilson, " On the experimental attainment of optimum conditions,"*Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, vol. 13, no. 1, pp. 1–38, Jan. 1951, doi: 10.1111/j.2517-6161.1951.tb00067.x.

[19] N. H. Son, " A survey on the effects of cutting parameters on surface roughness when milling 40Cr steel using end mill cutter," *European Journal of Engineering and Technology Research*, vol. 5, no. 1, pp. 33–36, Jan. 2020, doi: 10.24018/ejeng.2020.5.1.1704.

[20] Y. Akiyama, M. Iwaki, Y. Komagamine, S. Minakuchi, and M. Kanazawa, " Effect of spindle speed and feed rate on surface roughness and milling duration in the fabrication of milled complete dentures: An in vitro study," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 24, Dec. 2023, Art. no. 13338, doi: 10.3390/app132413338.

[21] S. R. Bommisetty, K. B. Chettu, and S. N. Hanumanthappa, " Study and experimental investigation of the effect of progressive feed rate on surface roughness in CNC end milling process using RSM," *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 55, no. 5, pp. 581–591, Oct. 2022, doi: 10.18280/jesa.550503.

[22] F. Lai, A. Hu, K. Mao, Z. Wu, and Y. Lin, "Effect of milling processing parameters on the surface roughness and tool cutting forces of T2 pure copper," *Micromachines*, vol. 14, no. 1, Jan. 2023, Art. no. 224, doi: 10.3390/mi14010224.

[23] X. Wei, C. Yue, D. Hu, X.-L. Liu, Y.-P. Ding, and S. Y. Liang, " Research on surface roughness of supersonic vibration auxiliary side milling for titanium alloy," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 35, no. 1, Dec. 2022, Art. no. 101, doi: 10.1186/s10033-022-00770-9.

[24] M. Casuso, A. Rubio-Mateos, F. Veiga, and A. Lamikiz, "Influence of axial depth of cut

and tool position on surface quality and chatter appearance in locally supported thin floor milling," *Materials*, vol. 15, no. 3, Jan. 2022, Art. no. 731, doi: 10.3390/ma15030731.

[25] R. Wang, B. Zhao, D. Tan, and W. Wan, " Modelling and optimization of machined surface topography in ball-end milling process," *Materials*, vol. 17, no. 7, Mar. 2024, Art. no. 1533, doi: 10.3390/ma17071533.

[26] S. Lin, F. Peng, J. Wen, Y. Liu, and R. Yan, "An investigation of workpiece temperature variation in end milling considering flank rubbing effect," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 73, pp. 71–86, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.05.010.

[27] K. Waszczuk, " Influence of technological parameters on the cutting temperature during trochoidal milling," *Manufacturing Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 148–153, Feb. 2024, doi: 10.21062/mft.2024.001.

[28] G. Derringer and R. Suich, " Simultaneous optimization of several response variables," *Journal of Quality Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 214–219, Oct. 1980, doi: 10.1080/00224065.1980.11980968.

[29] R. Liu and W. Tian, " A novel simultaneous monitoring method for surface roughness and tool wear in milling process," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, Mar. 2025, Art. no. 8079, doi: 10.1038/s41598-025-92178-3.