

## การออกแบบการทดลองแบบ $2^3$ Factorial Design เพื่อการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อ การสึกหรอของเครื่องมือตัดเคลือบ TiAlN ในการกัดเหล็กกล้า SKD61 A $2^3$ Factorial Design for Studying Parameters Affecting the Wear of TiAlN-Coated Cutting Tools in SKD61 Steel Milling

เกริกชัย มีหนู\* สมชาย โพธิ์พยอม

สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

พิษณุโลก อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

Kerkchai Meenu\* Somchai Peopayom

Department of Industrial Education and Technology, Faculty of Engineering, Rajamangala

University of Technology Lanna Phitsanulok, Mueang Phitsanulok District, Phitsanulok 65000

\*Corresponding author Email: kerkchai2022@gmail.com

(Received: April 26, 2025; Revised: December 12, 2025 ; Accepted: January 13, 2026)

### บทคัดย่อ

กระบวนการกัดเป็นหนึ่งในกระบวนการตัดเฉือนสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิต โดยเฉพาะงานที่ต้องการความละเอียดสูง ปัญหาหลักที่พบคือ การสึกหรอของเครื่องมือตัด ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานและคุณภาพผิวชิ้นงาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์กระบวนการกัดต่อการสึกหรอด้านข้างของเครื่องมือตัดเคลือบ TiAlN ในการกัดเหล็กกล้า SKD61 โดยออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  factorial design วิเคราะห์ตัวแปรอิสระ 3 ตัว ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความเร็รรอบ และวัดค่าการสึกหรอด้านข้าง ( $VB_A$ ) ตามมาตรฐาน ISO 3685-1997 ผลการทดลองพบว่า ความเร็วตัดและอัตราป้อนมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ต่อการสึกหรอ โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ ความเร็วตัด 40 เมตร/นาที อัตราป้อน 828 มิลลิเมตร/นาที และความเร็รรอบ 2,387 รอบ/นาที ให้ค่าการสึกหรอเฉลี่ยต่ำสุดที่ 0.0428 ไมครอน ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานเครื่องมือ และลดต้นทุนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลลัพธ์นี้สามารถนำไปกำหนดพารามิเตอร์การกัดที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความคุ้มค่าในการผลิตอุตสาหกรรมได้อย่างชัดเจน

**คำสำคัญ:** การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล, การสึกหรอ, เครื่องมือตัดเคลือบ TiAlN, เหล็กกล้า SKD61

### ABSTRACT

Milling is one of the essential machining processes in the manufacturing industry, particularly for high-precision applications. A major challenge in this process is tool wear, which directly affects tool life and the surface quality of the workpiece. This research aims to investigate the effects of milling parameters on the flank wear of TiAlN-coated cutting tools during the milling of SKD61 steel. A  $2^k$  factorial design of experiments was employed to analyze three independent variables: cutting speed, feed rate, and spindle speed. Flank wear ( $VB_A$ ) was measured in accordance with ISO 3685-1997. The

results revealed that cutting speed and feed rate significantly influenced tool wear ( $p < 0.05$ ). The optimal condition—cutting speed of 40 m/min, feed rate of 828 mm/min, and spindle speed of 2,387 rpm—produced the lowest average flank wear of 0.0428 microns. These findings contribute to extending tool life and reducing production costs effectively. The outcome can be applied to define optimal milling parameters to enhance productivity and cost-effectiveness in industrial manufacturing processes.

**Keyword:** Factorial design, tool wear, TiAlN-coated cutting tool, SKD61 tool steel.

## 1. บทนำ

กระบวนการกัด เป็นกระบวนการตัดเฉือนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ อุตสาหกรรมยานยนต์ และการผลิตอื่น ๆ เนื่องจากกระบวนการนี้มีความสามารถในการสร้างรูปทรงที่ซับซ้อน และเครื่องมือตัดเคลือบ TiAlN ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการกัดเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD61 เนื่องจากสามารถทนการสึกหรอและอุณหภูมิสูงได้ดี ทำให้เหมาะกับการผลิตแม่พิมพ์และชิ้นส่วนที่ต้องการความทนทานสูง การใช้งานที่มีประสิทธิภาพต้องอาศัยการออกแบบกระบวนการตัดที่เหมาะสม เช่น การเลือกความเร็วตัด อัตราป้อน และการหล่อเย็นที่ถูกต้อง ถ้าไม่เหมาะสมส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องมือในการตัดลดลง และยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน เช่น ความเรียบของผิว และความแม่นยำในการกัด [1] ดังนั้น การควบคุมการสึกหรอด้านข้างจึงเป็นหัวใจสำคัญที่ช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดและเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมปัจจุบัน

การสึกหรอของเครื่องมือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานและอายุการใช้งานของเครื่องมือในการกัดหรือเจาะโลหะ การติดตามและควบคุมการสึกหรอจึงมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต [2] โดยเฉพาะการสึกหรอด้านข้าง (flank wear) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดหลักของการเสื่อมสภาพของคมตัด การวัดความกว้างของการสึกหรอตามช่วงเวลาช่วยให้เข้าใจพฤติกรรม

การใช้งานและการเสื่อมสภาพของเครื่องมือได้อย่างชัดเจน [3] กลไกหลักของการสึกหรอประกอบด้วย การเสียดสีระหว่างคมตัดกับชิ้นงาน การยึดเกาะและหลุดลอกของวัสดุชิ้นงาน การเกิดหลุมบนผิวเครื่องมือ และการสึกหรอแบบเกาะตัว

งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าความเร็วในการตัดมีผลโดยตรงต่อการสึกหรอของเครื่องมือ นอกจากนี้ แรงเสียดทานและความแข็งของวัสดุชิ้นงานก็มีบทบาทสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของคมตัด [4-5] การทำนายแรงตัดอย่างแม่นยำและประเมินการสึกหรอจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อออกแบบกระบวนการกัดที่มีประสิทธิภาพ แม้ว่าจะมีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาการสึกหรอของเครื่องมือ แต่ยังไม่มีการศึกษาโดยตรงที่ใช้การออกแบบการทดลองแบบ  $2^3$  factorial design กับ การกัดเหล็กกล้า SKD61 ด้วยดอกกัด (End Mill) เคลือบ TiAlN ซึ่งเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์การทำนายการสึกหรอ (flank wear) ในการกัดวัสดุอื่น ๆ [6]

งานวิจัยนี้ จึงมุ่งศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การตัดเฉือนที่ส่งผลต่อความสึกหรอของคมตัดเคลือบ TiAlN โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ  $2^3$  factorial design เพื่อระบุปัจจัยหลักและปฏิสัมพันธ์ที่มีผลต่อการสึกหรอ อีกทั้งปรับปรุงพารามิเตอร์การกัดเหล็กกล้า SKD61 เพื่อยืดอายุการใช้งานดอกกัดและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการกัดให้เหมาะสมและคุ้มค่ามากที่สุด

## 2. ทฤษฎีและวิธีดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยศึกษาทฤษฎีและวิธีดำเนินการวิจัยในการทดสอบ [7] ดังนี้

### 2.1 การออกแบบการทดลอง

ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยเลือกใช้การทดลองแบบ  $2^k$  factorial design ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งอิทธิพลหลักและอิทธิพลผลรวมของปัจจัยที่ทำการศึกษาได้ครบถ้วน แต่ถ้าใช้การทดลองแบบทาคุชิ (Taguchi) จะการลดจำนวนการทดลอง และหาอิทธิพลหลักเป็นหลัก อีกทั้งยังนำผลไปต่อยอดสู่การใช้การทดลองแบบพื้นผิวการตอบสนอง (RSM) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งการเลือกใช้การทดลองแบบ  $2^k$  factorial design สามารถเห็นอิทธิพลทั้งของปัจจัยเดี่ยวและอิทธิพลผลรวมครอบคลุมทุกลำดับ ได้ชัดเจนมากกว่าวิธีแบบทาคุชิ และแบบพื้นผิวการตอบสนอง [8]

นอกจากการเลือกใช้การทดลองแบบ  $2^k$  factorial design ผู้วิจัยทำการทดลองเบื้องต้น (Pilot Study) เพื่อระบุเงื่อนไขที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระ [9] ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วตัด (Cutting Speed), ความเร็วรอบ (Spindle Speed) และ อัตราป้อน (Feed Rate) [10] ในการทดลองเบื้องต้น ได้มีการกำหนดจำนวนชุดการทดลองทั้งหมดจำนวน 8 ชุด ตามหลักการออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  Factorial Design ซึ่งช่วยให้วิเคราะห์ผลกระทบของแต่ละปัจจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะกับการทดลองที่ระดับปัจจัยเป็นสองระดับ และง่ายต่อการตีความผลเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพขั้นต้น และทำการทดลอง 3 ครั้ง แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การทดลองแบบ  $2^k$  Factorial Design

| การทดลอง<br>แบบ           | ระดับของ<br>ปัจจัย |   |   | จำนวนซ้ำ | จำนวนครั้ง<br>การทดลอง |
|---------------------------|--------------------|---|---|----------|------------------------|
|                           | A                  | B | C |          |                        |
| $2^k$ Factorial<br>Design | 2                  | 2 | 2 | 3        | 24                     |

ทั้งนี้ ค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวถูกคำนวณจากสมการ 1 – 3 เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดระดับของตัวแปรอิสระ

### 2.2.1 สมการคำนวณความเร็วตัด

$$V = \frac{\pi D n}{1,000} \quad (1)$$

### 2.2.2 สมการคำนวณความเร็วรอบ

$$n = \frac{1,000 v}{\pi D} \quad (2)$$

### 2.2.3 สมการคำนวณอัตราป้อน

$$F = f_z \times Z \times n \quad (3)$$

เมื่อ

V คือ ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

$\pi$  คือ ค่าพาย เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 3.14

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)

n คือ ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

F คือ อัตราป้อน (มิลลิเมตร/นาที)

$f_z$  คือ อัตราป้อนต่อฟัน (มิลลิเมตร/ฟัน)

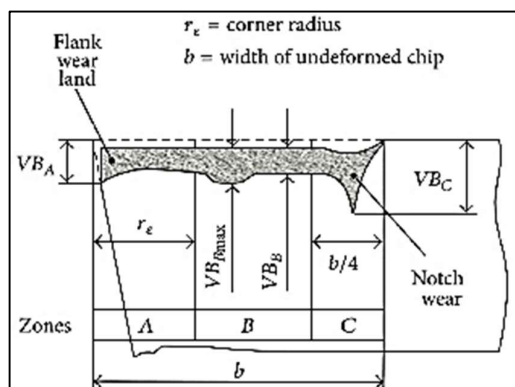
Z คือ จำนวนฟันของเครื่องมือตัด

ภายหลังการทดลองเบื้องต้น ผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าทุกระดับของพารามิเตอร์มีการแจกแจงแบบปกติ โดยพิจารณาจากค่า p-value > 0.05 ซึ่งไม่อาจปฏิเสธสมมติฐานว่าข้อมูลเป็นแบบปกติได้อย่างมีนัยสำคัญ ผลดังกล่าวช่วยให้ผู้วิจัยกำหนดระดับของตัวแปรอิสระในการทดลองหลักได้เหมาะสม โดยเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของคมตัด ตามแนวทางการออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  Factorial Design รายละเอียดแสดงในตารางที่ 2 และใช้ระยะป้อนลึกเป็นค่าคงที่ เพื่อลดความซับซ้อน ลดตัวแปรที่เปลี่ยนรูปกลไกสึกหรอ ใช้การตัดเฉือนแบบแห้ง เพื่อลดตัวแปรจากสารหล่อเย็นที่อาจเปลี่ยนสภาพผิวหรือการยึดติดของเศษชิ้นงาน

ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่กำหนดในการทดลอง

| ปัจจัย                                                                                         | ระดับของปัจจัย |           | หน่วย                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------|-------------------------------|
|                                                                                                | ค่าต่ำสุด      | ค่าสูงสุด |                               |
| ความเร็วตัด                                                                                    | 40             | 60        | เมตรต่อนาที(m/min)            |
| ความเร็วรอบ                                                                                    | 1,591          | 2,387     | รอบต่อนาที (rev/min หรือ rpm) |
| อัตราป้อน                                                                                      | 828            | 1,241     | มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)     |
| ปัจจัยควบคุม ระยะป้อนลึก (depth of cut) ระยะ 1 มิลลิเมตร ใช้การตัดเฉือนแบบแห้ง (Dry machining) |                |           |                               |

ตัวแปรตาม คือ การศึกษาการสึกหรอของดอกกัดตามมาตรฐาน ISO 3685:1997 [11] เน้นการประเมินการสึกหรอในโซนข้างของเครื่องมือกัด (Flank Wear) โดยการทดสอบจะพิจารณาอัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน ซึ่งวัดค่าการสึกหรอในพื้นที่ที่เรียกว่า Flank Wear Area ( $VB_A$ ) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือกัดและวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือ โดยการทดสอบจะใช้การวัดและเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของขนาดการสึกหรอในระหว่างการทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่มีการควบคุม แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ค่ามาตรฐานการสึกหรอตามมาตรฐาน  
ISO 3685-1997 ( $VB_A$ ) [11]

เมื่อ

$VB_A$  คือ ความกว้างของ flank wear บริเวณโซน A (ใกล้มุมตัด)

$VB_{max}$  คือ ค่าการสึกหรอ flank wear สูงสุดที่วัดได้ในโซน B

$VB_B$  คือ ความกว้างของ flank wear เฉลี่ยบริเวณโซน B

$VB_C$  คือ ความกว้างของ flank wear บริเวณโซน C

$r_e$  คือ รัศมีมุมตัด

$b$  คือ ความกว้างของชิ้นตัดที่ไม่ได้แปรรูป

การทดลอง แบบ  $2^K$  factorial design เป็นแบบจำลองเชิงเส้น (linear model) สำหรับการทดลอง ซึ่งรวมทั้งผลหลักและผลปฏิสัมพันธ์หลายระดับ  $\beta_0$  แทนค่าพื้นฐาน (baseline) ของผลลัพธ์เมื่อทุกปัจจัยอยู่ระดับอ้างอิง ส่วน  $\beta_x x_i$  แสดงผลหลักของแต่ละปัจจัย และ  $\beta_{ij} x_i x_j$  แสดงปฏิสัมพันธ์สองปัจจัย ที่ชี้ว่าผลกระทบของปัจจัยหนึ่งขึ้นกับระดับของอีกปัจจัยหนึ่ง นอกจากนี้  $\beta_{123} x_1 x_2 x_3$  แสดงปฏิสัมพันธ์สามปัจจัยพร้อมกัน ส่วน  $\epsilon$  แสดงความคลาดเคลื่อนในการทดลอง การวิเคราะห์จะเริ่มด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อตรวจสอบความสำคัญของอิทธิพลหลัก (main effects) และอิทธิพลร่วม (interactions) โมเดลนี้ช่วยให้เข้าใจอิทธิพลของปัจจัยแต่ละตัวอย่างครบถ้วนและสามารถใช้คาดการณ์ผลตอบสนองได้อย่างแม่นยำ [12] โมเดลทางสถิติแบบ Summation สำหรับการทดลอง  $2^3$  factorial design แสดงในสมการที่ 4

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_x x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 + \epsilon \quad (4)$$

เมื่อ

$y$  คือ ค่าผลตอบสนองจากการทดลอง

$\beta_0$  คือ ค่าคงที่ (intercept)

$\beta_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของผลกระทบหลักของปัจจัยที่ i

$\beta_{ij}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย i และ j

$\beta_{123}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของผลปฏิสัมพันธ์สามทาง

$x_i$  คือ ค่ารหัสระดับของปัจจัยที่ i ซึ่งกำหนดเป็น -1 และ +1

$\varepsilon$  คือ ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

การใช้  $2^3$  factorial design แบบ full model จึงตอบโจทย์ทั้งการตรวจปัจจัยหลักและการสำรวจ ปัจจัยหลักร่วม เหมาะกับกรณีที่ต้องการเน้นผลกระทบหลักของแต่ละปัจจัย และช่วยลดความซับซ้อนของโมเดลโดยกำหนดการออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab 19 ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ได้การทดลองทั้งหมด 24 การทดลอง [13] การทดลองจากการสุ่มเลือกชิ้นงาน มาทำการกัดภายใต้เงื่อนไขที่ได้ออกแบบการทดลองจนครบ 24 ชิ้น ส่วนอีก 8 ชิ้นที่ได้ทำการทดลองเบื้องต้น สามารถนำผลจากการทดลองไปใช้ได้จึงไม่จำเป็นต้องทำใหม่ทั้ง 24 ชิ้น

## 2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

การทดลองนี้ใช้เครื่องกัด CNC ยี่ห้อ Chevalier รุ่น QP 2026-L สำหรับกระบวนการตัดเฉือนโลหะ พร้อมด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง รุ่น HBRV-187.5 สำหรับวัดค่าความแข็งแบบ Rockwell scale C และเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบโลหะ HITACHI รุ่น OE750 เพื่อยืนยันองค์ประกอบธาตุของวัสดุ

ชิ้นงานที่ใช้คือ เหล็กกล้าเครื่องมือ JSI SKD61 ขนาด 39×40×26 มม. ซึ่งยังไม่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง มีความแข็งเฉลี่ย 19.5 HRC ส่วนการเลือกเครื่องมือตัดเป็น ดอกกัดคาร์ไบด์ ขนาด 8 มม. คมตัด 4 ฟัน ยี่ห้อ Akira รุ่น Carbide Endmill D8 Lc20 4F เคลือบ TiAlN มีความแข็งเฉลี่ย 55 HRC เพราะมีผลต่อพื้นที่การวัดค่าความเรียบผิว [6] โดยรูปที่ 2 เหล็กกล้าเครื่องมือ JSI SKD61 และดอกเอ็นมิลคาร์ไบด์ และตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก SKD61 (wt%)



รูปที่ 2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง เหล็กกล้าเครื่องมือ JSI SKD61 และดอกเอ็นมิลคาร์ไบด์

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็ก SKD61 (wt%)

| C    | Si   | Mn   | Cr   | Mo   | V    | Fe    |
|------|------|------|------|------|------|-------|
| 0.48 | 1.05 | 0.43 | 5.23 | 1.10 | 0.82 | 90.52 |

## 2.3 ขั้นตอนการทดลอง

1) การสร้างชิ้นงานและโปรแกรม Tool Path ด้วย MasterCAM 2022 โดยทำตามปัจจัยที่กำหนดและใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการควบคุมและจัดการกระบวนการผลิต (CAM) เพื่อเพิ่มความแม่นยำ ลดเวลาผลิต และลดความผิดพลาดตรวจสอบการจำลองการทำงาน (Simulation) ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม NC-Code ใน Notepad Edit แก้ไขโปรแกรมตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในกระบวนการออกแบบการทดลอง

2) การทดลองกัดชิ้นงานจริง (ตามตารางสุ่ม  $2^3$  factorial Design) จากโปรแกรม Minitab 19 ทำซ้ำ 3 รอบ รวม 24 การทดลอง (RunOrder) การตั้งเครื่อง (calibration) ต้องตรวจสอบ tool length, spindle runout, work coordinate, และ alignment ของชิ้นงาน ตรวจสอบสภาพชิ้นงานและตรวจสอบความถูกต้องระบบ NC ทุกครั้งก่อนการทดลอง หลังการทดลอง ถอดและจัดเก็บชิ้นงานพร้อมเครื่องมือภายใต้รหัสเดียวกันเพื่อความสอดคล้องในการวัดและวิเคราะห์

3) การวัดการสึกหรอของคมตัด ทำความสะอาดดอกกัดด้วยแปรงอ่อน วัดการสึกหรอ (flank wear) ( $VB_A$ ) ของแต่ละฟันด้วยกล้องจุลทรรศน์ Nikon ECLIPSE LV150NA/LV150N ตั้งค่ากำลังขยายและแสงที่เหมาะสม

บันทึกค่าเป็นหน่วยไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) พร้อมคำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และบันทึกผลการทดลองเพื่อการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ใช้ผู้ปฏิบัติเดียวกันเพื่อลดความแปรปรวนและระบุความละเอียดอุปกรณ์ พร้อมค่าความไม่แน่นอนของการวัด [14]

### 3. การทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาการดำเนินการทดลองที่ได้จากตารางสุ่มการทดลอง เพื่อหาค่าเฉลี่ยความสึกหรอ ซึ่งวัดด้วยค่ามาตรฐานการสึกหรอตามมาตรฐาน ISO 3685-1997 ( $VB_A$ ) เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยการสึกหรอคมตัดทั้ง 4 คมตัด ดังแสดงในตารางที่ 4

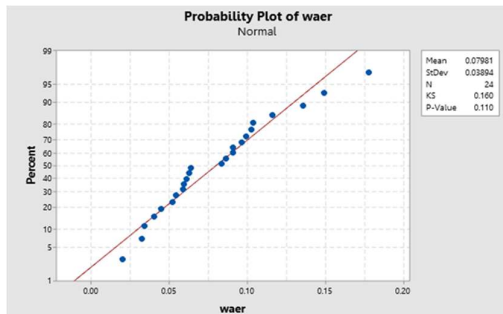
ตารางที่ 4 การเก็บผลการทดลองการสึกหรอ Flank Wear ( $VB_A$ ) ของแต่ละฟันด้วยกล้องจุลทรรศน์

| Std Order | Run Order | Cutting speed | Feed rate | Spindle Speed | Flank Wear Area 4 Flutes ( $VB_A$ ) ( $\mu\text{m}$ ) |       |       |       |           |       |
|-----------|-----------|---------------|-----------|---------------|-------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-----------|-------|
|           |           |               |           |               | 1                                                     | 2     | 3     | 4     | $\bar{x}$ | S.D.  |
| 1         | 7         | 40            | 828       | 1591          | 0.042                                                 | 0.042 | 0.063 | 0.013 | 0.040     | 0.021 |
| 2         | 13        | 40            | 828       | 2387          | 0.063                                                 | 0.013 | 0.061 | 0.042 | 0.045     | 0.023 |
| 3         | 1         | 40            | 1241      | 1591          | 0.088                                                 | 0.117 | 0.063 | 0.117 | 0.096     | 0.026 |
| 4         | 14        | 40            | 1241      | 2387          | 0.015                                                 | 0.042 | 0.246 | 0.042 | 0.086     | 0.107 |
| 5         | 3         | 60            | 828       | 1591          | 0.089                                                 | 0.043 | 0.042 | 0.043 | 0.054     | 0.023 |
| 6         | 8         | 60            | 828       | 2387          | 0.061                                                 | 0.063 | 0.042 | 0.042 | 0.052     | 0.012 |
| 7         | 20        | 60            | 1241      | 1591          | 0.239                                                 | 0.125 | 0.061 | 0.119 | 0.136     | 0.074 |
| 8         | 15        | 60            | 1241      | 2387          | 0.042                                                 | 0.237 | 0.061 | 0.125 | 0.116     | 0.088 |
| 9         | 2         | 40            | 828       | 1591          | 0.043                                                 | 0.012 | 0.063 | 0.012 | 0.033     | 0.025 |
| 10        | 10        | 40            | 828       | 2387          | 0.012                                                 | 0.013 | 0.042 | 0.013 | 0.020     | 0.015 |
| 11        | 23        | 40            | 1241      | 1591          | 0.125                                                 | 0.042 | 0.125 | 0.042 | 0.084     | 0.048 |
| 12        | 21        | 40            | 1241      | 2387          | 0.023                                                 | 0.063 | 0.042 | 0.008 | 0.034     | 0.024 |
| 13        | 19        | 60            | 828       | 1591          | 0.089                                                 | 0.103 | 0.089 | 0.082 | 0.091     | 0.009 |
| 14        | 17        | 60            | 828       | 2387          | 0.063                                                 | 0.042 | 0.082 | 0.063 | 0.063     | 0.016 |
| 15        | 6         | 60            | 1241      | 1591          | 0.082                                                 | 0.117 | 0.117 | 0.094 | 0.103     | 0.017 |
| 16        | 4         | 60            | 1241      | 2387          | 0.238                                                 | 0.117 | 0.119 | 0.238 | 0.178     | 0.069 |
| 17        | 18        | 40            | 828       | 1591          | 0.042                                                 | 0.063 | 0.089 | 0.042 | 0.059     | 0.022 |
| 16        | 4         | 60            | 1241      | 2387          | 0.238                                                 | 0.117 | 0.119 | 0.238 | 0.178     | 0.069 |
| 17        | 18        | 40            | 828       | 1591          | 0.042                                                 | 0.063 | 0.089 | 0.042 | 0.059     | 0.022 |
| 18        | 5         | 40            | 828       | 2387          | 0.117                                                 | 0.012 | 0.063 | 0.063 | 0.064     | 0.043 |
| 19        | 24        | 40            | 1241      | 1591          | 0.042                                                 | 0.089 | 0.143 | 0.089 | 0.091     | 0.041 |
| 20        | 11        | 40            | 1241      | 2387          | 0.258                                                 | 0.063 | 0.063 | 0.012 | 0.099     | 0.109 |
| 21        | 12        | 60            | 828       | 1591          | 0.099                                                 | 0.013 | 0.063 | 0.063 | 0.060     | 0.035 |
| 22        | 9         | 60            | 828       | 2387          | 0.099                                                 | 0.061 | 0.042 | 0.042 | 0.061     | 0.027 |
| 23        | 16        | 60            | 1241      | 1591          | 0.117                                                 | 0.141 | 0.082 | 0.257 | 0.149     | 0.076 |
| 24        | 22        | 60            | 1241      | 2387          | 0.117                                                 | 0.082 | 0.117 | 0.099 | 0.104     | 0.017 |

จากการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปได้ดังนี้

### 3.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลการทดลองเบื้องต้น (Pilot Study)

ผลการทดลองเบื้องต้น (Pilot Study) เพื่อหาระดับของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมกับการทดลอง จากผลการทดลอง รูปที่ 3 พบว่าค่า P-Value เท่ากับ 0.150 ซึ่งมากกว่าเกณฑ์ 0.05 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองเบื้องต้นนี้มีการแจกแจงแบบปกติ แสดงว่ายอมรับผลการทดลองเบื้องต้น และนำไปทดลองตามเงื่อนไขที่ออกแบบการทดลองไว้ได้



รูปที่ 3 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha=0.05$ )

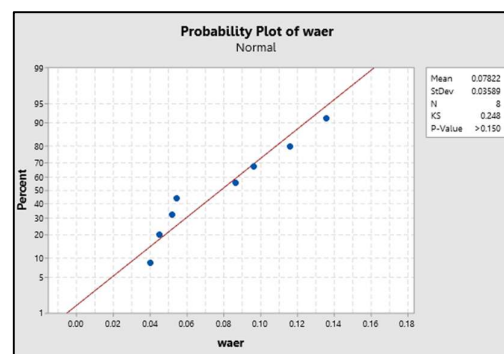
### 3.2 ผลการตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของการทดลองทั้ง 24 การทดลอง

การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ ในระดับความเชื่อมั่นที่ 95% จากผลการทดลองทดลองทั้ง 24 การทดลอง โดยพิจารณาจากค่า P-Value ดังรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างกระจายตัวตามแนวเส้นตรง โดยค่า P-Value ที่ได้คือ 0.110 ซึ่งมากกว่าเกณฑ์ 0.05 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ

### 3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่มีผลต่อความสึกหรอของคมตัดเคลือบ TiAlN

จากการศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสึกหรอของคมตัด ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า

ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความสึกหรออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คือ ความเร็วตัด โดยมีค่า (P-value = 0.002) ซึ่งมีความน้อยกว่าเกณฑ์ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าความแตกต่างของระดับความเร็วตัดส่งผลโดยตรงต่อความสึกหรอของคมตัด ในขณะที่ ความเร็วรอบ มีค่า (P-value = 0.538) ซึ่งมากกว่า 0.05 ทำให้สรุปได้ว่า ความเร็วรอบที่แตกต่างกันไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสึกหรอสำหรับผลการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมแบบสองปัจจัย และอิทธิพลร่วมแบบสามปัจจัย พบว่า ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่า โมเดลที่ใช้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของความเร็วตัดต่อการสึกหรอของคมตัด ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเชิงวิศวกรรมในการปรับปรุงคุณภาพกระบวนการตัดเฉือน ผลลัพธ์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าแบบจำลอง ANOVA ที่ใช้มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบกระบวนการผลิตที่เหมาะสมต่อไป เมื่อพิจารณาค่า R-sq = 74.33% และ R-sq (adj) = 63.09% แสดงว่าโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ในระดับที่เหมาะสม ค่า R-sq (pred) ที่ต่ำ (42.23%) ชี้ว่าโมเดลยังมีข้อจำกัดในการทำนายข้อมูลใหม่ ซึ่งอาจต้องการเพิ่มจำนวนซ้ำในการทดลองหรือขยายช่วงของปัจจัยเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทดลองครั้งต่อไป



รูปที่ 4 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha=0.05$ )

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่มีผลต่อความสึกหรอของคมตัดเคลือบ TiAlN

| Source                        | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|-------------------------------|----|--------|--------|---------|---------|
| Model                         | 7  | 0.0259 | 0.0037 | 6.62    | 0.001   |
| Linear                        | 3  | 0.0243 | 0.0081 | 14.45   | 0.000   |
| Cutting speed                 | 1  | 0.0072 | 0.0072 | 12.88   | 0.002   |
| Feed rate                     | 1  | 0.0168 | 0.0168 | 30.07   | 0.000   |
| Speed                         | 1  | 0.0002 | 0.0002 | 0.40    | 0.538   |
| 2-Way Interactions            | 3  | 0.0013 | 0.0004 | 0.80    | 0.511   |
| Cutting speed*Feed rate       | 1  | 0.0013 | 0.0013 | 2.31    | 0.148   |
| Cutting speed*Speed           | 1  | 0.0000 | 0.0000 | 0.09    | 0.763   |
| Feed rate*Speed               | 1  | 0.0000 | 0.0000 | 0.01    | 0.939   |
| 3-Way Interactions            | 1  | 0.0003 | 0.0003 | 0.57    | 0.461   |
| Cutting speed*Feed rate*Speed | 1  | 0.0003 | 0.0003 | 0.57    | 0.461   |
| Error                         | 16 | 0.0090 | 0.0006 |         |         |
| Total                         | 23 | 0.0349 |        |         |         |

S=0.0236580 R-sq=74.33% R-sq (adj) = 63.09% R-sq (pred) = 42.23%

|       |             |                                                                     |
|-------|-------------|---------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | DF          | คือ องศาอิสระ (จำนวนค่าที่เปลี่ยนแปลงได้)                           |
|       | Adj SS      | คือ ผลรวมกำลังสองที่ปรับแล้ว (ความแปรปรวนที่ตัวแปรอธิบายได้)        |
|       | Adj MS      | คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ปรับแล้ว (Adj SS ÷ DF)                      |
|       | F-Value     | คือ ค่าสถิติ F ใช้ทดสอบนัยสำคัญ                                     |
|       | P-Value     | คือ ค่าความน่าจะเป็น ถ้า < 0.05 แสดงว่ามีนัยสำคัญ                   |
|       | S           | คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อน (ความแม่นยำของโมเดล)      |
|       | R-sq        | คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (ร้อยละความแปรปรวนที่โมเดลอธิบายได้) |
|       | R-sq (adj)  | คือ ค่า R-sq ที่ปรับแก้ (คำนึงถึงจำนวนตัวแปร)                       |
|       | R-sq (pred) | คือ ค่า R-sq สำหรับทำนายข้อมูลใหม่                                  |

### 3.4 การกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้างจากข้อมูลการวัดความสึกหรอ

จากรูปที่ 5 การตรวจสอบรูปแบบการทดลอง แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงเส้นที่สร้างขึ้นจากการวิจัยเชิงทดลอง มีความเหมาะสมและสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ในระดับที่น่าเชื่อถือ

โดยพิจารณาจากกราฟ Normal Probability Plot พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) มีการกระจายตัวสอดคล้องใกล้เคียงการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำคัญของการวิเคราะห์เชิงสถิติ

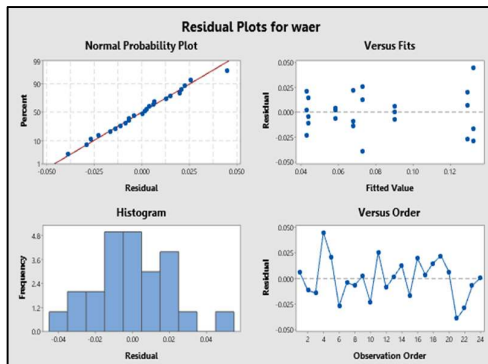
กราฟ Residuals versus Fitted Values แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนกระจายรอบศูนย์โดยไม่เกิดรูปแบบชัดเจน และไม่ปรากฏลักษณะกรวย (Funnel Shape) บ่งชี้ว่า ความแปรปรวนมีความคงที่ (Homoscedasticity)

ขณะที่กราฟ Histogram ของ Residuals มีรูปทรงใกล้เคียงระฆังคว่ำ ซึ่งยืนยันผลลัพธ์การกระจายแบบปกติอีกด้านหนึ่ง

สำหรับกราฟ Residuals versus Order พบว่าความคลาดเคลื่อนไม่มีแนวโน้มชัดเจนตามลำดับการ



ทดลอง แสดงถึงความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Errors) โดยสรุป ผลการตรวจสอบทั้งหมดบ่งชี้ว่าสมมติฐานพื้นฐานของการถดถอยเชิงเส้น (OLS Assumptions) ไม่ถูกละเมิดอย่างมีนัยสำคัญแบบจำลองจึงมีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 5 การตรวจสอบรูปแบบการทดลอง

### 3.5 การหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลองเพื่อลดความสึกหรอ

การหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลองเพื่อลดความสึกหรอของเครื่องมือตัดเคลือบ TiAlN จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Response Optimization ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมในการลดค่าความสึกหรอของเครื่องมือตัดเคลือบ TiAlN ให้น้อยที่สุด (ค่า wear ต่ำสุดที่ 0.0428) ได้แก่ ความเร็วตัด (Cutting Speed) ที่ 40 m/min อัตราป้อน (Feed Rate) ที่ 828 mm/min และความเร็วรอบ (Spindle Speed) ที่ 2,387 rpm โดยมีค่าดัชนีความพึงพอใจ เท่ากับ 0.85549 ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพสูงในการทำนายและควบคุมกระบวนการกัดเหล็ก SKD61 ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และมีความสำคัญต่อการยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดและลดต้นทุนการผลิตในกระบวนการกัดเหล็กกล้า



รูปที่ 6 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทดลองการกัดเหล็กกล้า SKD61

## 4. สรุปผล

### 4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความสึกหรอของคมตัดเคลือบ

#### TiAlN

ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความสึกหรอของคมตัดเคลือบ TiAlN ได้แก่ ความเร็วตัดและอัตราป้อน ซึ่งมีค่า  $F = 12.88$  ( $p = 0.002$ ) และ  $F = 30.07$  ( $p = 0.000$ ) ตามลำดับ แสดงว่า อัตราป้อนเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อการสึกหรอ การเพิ่มอัตราป้อนทำให้แรงตัดและแรงกดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการขัดถูรุนแรงและเร่งการสึกหรอเร็วกว่าผลของความเร็วดัดเพียงอย่างเดียว

ความเร็วดัด เมื่อมีค่าที่สูงก่อให้เกิดความร้อนและแรงเสียดทานสะสมบริเวณหน้าสัมผัส ส่งผลให้การสึกหรอเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการสึกหรอของเครื่องมือตัดที่รายงานว่า flank wear และ crater wear มักเกิดรุนแรงเมื่อความเร็วดัดสูง [15] แสดงว่าผลการสึกหรอถูกครอบงำด้วย ความเร็วดัด และอัตราป้อนเป็นหลัก ดังนั้นการควบคุมอัตราป้อนให้อยู่ในระดับต่ำ และเลือกความเร็วดัดที่เหมาะสมจึงเป็นแนวทางหลักในการยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดเคลือบ TiAlN [16]

### 4.2 การเพิ่มประสิทธิภาพพารามิเตอร์การกัดเหล็กกล้า SKD61 เพื่อลดการสึกหรอของเครื่องมือตัดเคลือบ TiAlN

จากการใช้เทคนิค Response Optimization ในการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลองเพื่อลดความสึกหรอของเครื่องมือตัดเคลือบ TiAlN ในการกัดวัสดุ SKD61 คือ ความเร็วดัด 40 เมตร/นาที อัตราป้อน 828 มิลลิเมตร/นาที และความเร็วรอบ 2,387 รอบ/นาที ซึ่ง

สามารถลดค่าการสึกหรอของเครื่องมือได้ต่ำสุดที่ 0.0428 ไมครอน ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์การหยุดทดสอบ (End-of-test criteria) เมื่อเครื่องมือตัดสึกหรอถึงระดับที่ถือว่าไม่เหมาะสมต่อการใช้งานต่อไป โดย ISO 3685:1997 กำหนดไว้ดังนี้ Flank wear ( $VB_A$  หรือ  $VB_{max}$ ) โดยทั่วไป 0.3 มม. เป็นค่าหลักที่ใช้สิ้นสุดการทดสอบ อาจยืดหยุ่นได้ ขึ้นกับงาน เช่น 0.2–0.6 มม. ค่ามาตรฐานสากล สำหรับใช้เปรียบเทียบอายุการใช้งานเครื่องมือตัด (tool life) ค่าที่มากกว่านี้ ( $VB_A = 0.6$  มม.) ใช้ในงานหยาบหรือสถานะที่ต้องการความทนทานมากกว่าเน้นผิวละเอียด ในเชิงอุตสาหกรรมอาจมีการปรับตามความต้องการ เช่น ลดลงเหลือ  $VB_A = 0.2$  มม. ถ้างานต้องการผิวละเอียดสูง ซึ่งผลการวิจัยในครั้งนี้ระบุค่าการสึกหรอของเครื่องมือได้ต่ำสุดที่ 0.0428 ไมครอน อยู่ระหว่างค่าเฉลี่ย  $VB_A = 0.3$  มม. งานทั่วไป (finishing) และค่าเฉลี่ย  $VB_A = 0.6$  มม. งานหยาบ (roughing) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถคาดการณ์ผลได้อย่างแม่นยำ [11]

#### 5. ข้อจำกัดและงานวิจัยในอนาคต

1) จำนวนตัวอย่างทดลองค่อนข้างจำกัด ส่งผลต่อความแม่นยำของแบบจำลองทางสถิติ ควรเพิ่มจำนวนซ้ำหรือช่วงระดับปัจจัยในการศึกษาครั้งต่อไปเพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงการกำหนดระดับนัยสำคัญ ใช้ค่า ( $\alpha = 0.05$ ) เป็นมาตรฐาน และกำหนดกำลังทดสอบ (power analysis) เพื่อประมาณค่าผลกระทบ (Effect Size) ขนาดของผลลัพธ์ที่คาดว่าจะพบในการทำทดลองเบื้องต้น (Pilot Study)

2) ควรขยายการศึกษาไปโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวการตอบสนอง (RSM) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในเชิง (Optimization) และสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าการสึกหรอได้อย่างละเอียด

3) พัฒนาแบบจำลอง (Machine Learning) หรือ Predictive Model เพื่อคาดการณ์การสึกหรอจากข้อมูลพารามิเตอร์การตัดจริงในโรงงาน

4) ศึกษาผลของวัสดุเคลือบชนิดอื่น เช่น AlCrN, TiSiN หรือ TiCN เพื่อเปรียบเทียบความทนทานและกลไกการสึกหรอในสถานะเดียวกัน

5) เพิ่มการทดลองเปรียบเทียบในสถานะการตัดเฉือนที่ใช้ สารหล่อเย็น (Wet Machining) หรือ MQL (Minimum Quantity Lubrication) เพื่อประเมินผลของการหล่อลื่นต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Hongsuwan and B. Panprasitvech, "Factors of machining with milling tool TiAlN coated solid carbide finishing end mill affecting life time of cutting edge and surface roughness," *J. KMUTNB*, vol. 27, no. 2, pp. 303–313, 2017.
- [2] P. Zhao, Y. Song, B. Jiang and B. Wang, "Distribution and prediction of incremental cutter flank wear in high-efficiency milling," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 8, Art. no. 4749, 2023.
- [3] M. S. Najiha, M. Rahman, and A. R. Yusoff, "Flank wear characterization in aluminum alloy (6061-T6) with nanofluid minimum quantity lubrication environment using an uncoated carbide tool," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 137, no. 6, Art. no. 061004, 2015.
- [4] S. Gao, X. Duan, K. Zhu, and Y. Zhang, "Generic cutting force modeling with comprehensively considering tool edge radius, tool flank wear and tool runout in micro-end milling," *Micromachines*, vol. 13, no. 11, Art. no. 1805, 2022.
- [5] J. Baralić, A. Mitrović, and M. Radović, "Flank wear as a function of cutting time," *Int. J.*

- Adv. Manuf. Technol.*, vol. 123, no. 4, pp. 789–798, 2022.
- [6] P. B. Odedeyi and K. Abou-El-Hossein, “A model for prediction and optimization of flank wear in end milling of AISI 316 stainless steel,” in *Proc. 8th Int. Conf. Fracture, Fatigue and Wear (FFW 2020)*, Singapore, 2020, pp. 573–586.
- [7] M. Fakthong, S. Peopayom, N. Leechai, S. Chuenchomnakjad, S. Kongta and K. Meenu, “Factors affecting surface roughness in the milling process of SKD 61 steel using design of experiment,” *J. Eng. Innov.*, vol. 17, no. 4, pp. 43–52, Oct.–Dec. 2024.
- [8] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017.
- [9] S. A. Julious, “Pilot studies in clinical research,” *Stat. Methods Med. Res.*, vol. 25, no. 3, pp. 995–996, 2016.
- [10] B. Sornil and S. Wattanasriyakul, *Metal Work Manual Table*. Bangkok, Thailand: Textbook Production Center, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2015.
- [11] International Organization for Standardization, ISO 3685: Tool-Life Testing with Single-Point Turning Tools, 1997.
- [12] P. Sudasna Na Ayudhya and P. Luangpai boon, *Design and Analysis of Experiments*. Bangkok, Thailand: Top Publishing, 2008.
- [13] P. Palaphan, *A Professional Guide to Analyzing and Managing Statistical Data with Minitab*. Nonthaburi, Thailand: IDC Premier, 2017.
- [14] R. Daicu and G. Oancea, “Methodology for measuring the cutting inserts wear,” *Symmetry*, vol. 14, no. 3, p. 469, 2022.
- [15] E. M. Trent and P. K. Wright, *Metal Cutting*, 4th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [16] B. Denkena and D. Biermann, “Cutting edge geometries,” *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 61, no. 2, pp. 631–653, 2012.