



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

ผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในกระบวนการกัดเหล็กกล้า SKD 61 โดยการออกแบบการทดลอง

Factors affecting surface roughness in the milling process of SKD 61 steel using design of experiment

แมน ฟักทอง สมชาย โพธิ์พยอม นิตกร เหลือชัย ศักดิ์สิทธิ์ ชื่นชมณาจาด สรวิชญ์ คงตะ เกริกชัย มีหนู*

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก อำเภอเมือง จังหวัด พิษณุโลก 65000

Man Fakthong Somchai Peopayom Nitikorn Leechai Saksit Chuenchomnakjad Soravich Kongta Kerkchai Meenu*

Program of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok 65000

* Corresponding author.

E-mail: kerkchai2022@gmail.com; Telephone: 0 91387 3374

วันที่รับบทความ 10 พฤศจิกายน 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 21 ธันวาคม 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 8 มีนาคม 2567

วันที่ตอบรับบทความ 17 เมษายน 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความเรียบผิวในกระบวนการกัดเหล็กกล้า SKD61 โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^k Factorial Design จำนวน 3 ซ้ำ การทดลองทั้งหมด 24 ชิ้น ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ตัวแปรต้น คือ ความเร็วตัด มี 2 ระดับคือ 40 และ 60 เมตร/นาที อัตราป้อน มี 2 ระดับ คือ 828 และ 1,241 มิลลิเมตร/นาที ความเร็วรอบ มี 2 ระดับคือ 1,591 และ 2,387 รอบ/นาที ตัวแปรตาม คือ ความเรียบผิวมาตรฐาน JIS B 0633:2001 ซึ่งค่าความเรียบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (R_a) ระหว่าง 0.1-2 ไมโครเมตร จากการทดลองพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อความเรียบผิว คือ ความเร็วตัด ความเร็วรอบ มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 และปัจจัยร่วม คือ ความเร็วตัดกับอัตราป้อน มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 ได้สภาวะการกัดงานที่เหมาะสมต่อค่าความเรียบผิว คือ ความเร็วตัด 60 เมตร/นาที อัตราป้อน 1,241 มิลลิเมตร/นาที ความเร็วรอบ 2,387 รอบ/นาที จะได้ค่าความเรียบผิว 0.4552 ไมโครเมตร

คำสำคัญ

การออกแบบการทดลอง ความเรียบผิว งานกัด เหล็กกล้าเครื่องมือ สภาวะ

Abstract

The objective of this research was to examine the factors affecting surface roughness and cutting-edge wear in the milling process of SKD 61 steel using a 2^k Factorial Design experiment with 3 replicates and a total of 24 experiments. Factors studied consisted of the independent variables: two levels of cutting speed including 40 and 60 meters/minute, feed rate with 2 levels of 828 and 1,241 millimeters/minute, and spindle speed of 2 levels with 1,591 and 2,387 revolutions/minute. The dependent variable was the surface roughness standard JIS B 0633:2001, in which the arithmetic mean surface roughness value (Roughness Average: R_a) is between 0.1 - 2 micrometer. The experiments showed that the main factors that affect surface roughness are cutting speed and rotational speed. Which have a statistically significant

influence on surface roughness at the level of 0.05. The cofactors are cutting speed and feed rate. Which have a statistically significant influence on surface roughness at the level of 0.05. The suitable milling conditions for the surface roughness value is a cutting speed of 60 meters/minute, a feed rate of 1,241 millimeters/minute, a rotational speed of 2,387 revolutions/minute. The surface roughness value will be 0.4552 micrometer.

Keywords

condition; designing of experiment; milling process; surface roughness; tool steel

1. บทนำ

ปัจจุบันกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม งานกัดอัดโน้มติ ก็เป็นส่วนหนึ่งของการแปรรูปโลหะ โดยใช้เครื่องมือตัด ตัดเฉือนวัสดุออกไป (Machining) เพื่อให้ได้รูปทรงและขนาดตามที่ต้องการ การตัดเฉือนจำเป็นจะต้องทราบ ชนิดของวัสดุ ความแข็ง และส่วนผสมทางเคมี เพื่อกำหนดเงื่อนไขในการตัด เพราะจะส่งผลต่อการผลิตที่เหมาะสมในด้านต้นทุน เวลา และคุณภาพชิ้นงาน ในกระบวนการผลิตในปัจจุบัน ยังพบปัญหาหลักคือ คุณภาพผิวงาน (Surface roughness) การสึกหรอ (Tool wear) และอายุการใช้งานของดอกกัด (Tool life) ซึ่งกระบวนการกัดชิ้นงาน มีปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพผิวงาน การสึกหรอ และอายุการใช้งาน คือ ความเร็วตัด ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัดเฉือน [1,2] ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมามีกระบวนการผลิตโดยการกัด (Milling) มีการใช้วัสดุต่างชนิดกัน เช่น อลูมิเนียมผสม เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S45C ทองเหลือง เหล็กกล้า SKD61 สแตนเลส 304 เป็นต้น ได้สภาวะการตัดเฉือนที่มีความเหมาะสมแตกต่างกัน ในการปรับพารามิเตอร์ คือ อัตราป้อน ความเร็วตัด ความลึกในการตัด และชนิดของดอกกัด ซึ่งผลลัพธ์ คือ ความเรียบผิวชิ้นงาน แรงที่ใช้ในการตัดเฉือน การสึกหรอ เป็นต้น [3,4,5] Pradeep KS, Pardeep S. และ Deepak K. [6] ได้ทำการวิจัยเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI H11 เป็นวัสดุสำคัญที่ใช้ในการผลิตเครื่องมือและแม่พิมพ์ ชูบแข็งด้วยอากาศ เพื่อหาอิทธิพลของพารามิเตอร์การตัดเฉือน ระหว่างการกัดต่อความหยาบผิว (S_R) และอัตราการขจัดวัสดุ (MRR) ของเหล็ก AISI H11 การทดสอบการตัดเฉือนดำเนินการกับเครื่องกัดแนวตั้ง การวิเคราะห์ทางทฤษฎี (TGRA) วิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ควบคุม คือความเร็วในการตัด อัตราป้อน และความลึกของการตัด ต่อตัวแปรการตอบสนอง (S_R และ MRR) การวิจัยพบว่า เปอร์เซ็นต์ของความเร็วในการตัด อัตราป้อน และความลึก ของการตัดสำหรับการตัดเฉือน

หยาบ คือ 18.48% 37.49% และ 35.61% ตามลำดับ สำหรับการตัดเฉือนละเอียด เปอร์เซ็นต์ของ ความเร็วในการตัด อัตราป้อนและความลึกของการตัด คือ 71.55 13.88% และ 1.09% ตามลำดับ การวิเคราะห์ทางทฤษฎี (TGRA) ถือว่าเหมาะสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้ได้

ซึ่งเหล็กกล้า SKD 61 เป็นเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนที่มีความเหนียวและทนความร้อนสูง ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่หลากหลาย เช่น การตีแม่พิมพ์ การอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม และการเจาะแบบร้อน ด้วยความสามารถในการขึ้นรูปและความต้านทานการสึก ด้วยเหตุผลข้างต้นนี้จึงเป็นที่มาของการศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในกระบวนการกัดเหล็กกล้า SKD61 โดยการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาความเรียบผิวของชิ้นงาน อีกทั้งได้เงื่อนไขที่เหมาะสมกับการใช้งานของดอกกัด ทำให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดในการทำงาน โอกาสและความสูญเสียจากการใช้งานดอกกัด และยังคุ้มค่าต่อการลงทุน คุณภาพ ต้นทุน และเวลาในการผลิต ผลการวิจัยจะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมในอนาคตต่อไป

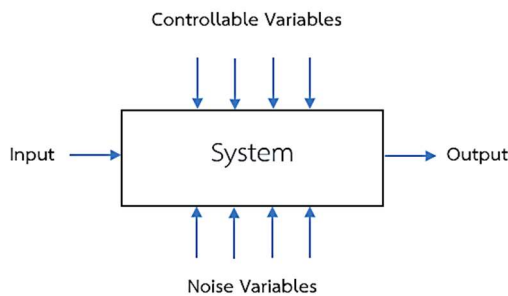
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) คือ การทดสอบครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปร

หรือปัจจัย ที่ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factors) หรือตัวแปร หรือปัจจัย ที่สามารถออกแบบได้ (Design Variables or Factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปร หรือปัจจัย ที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or Noise Variables Factors) โดยทั่วไป แล้วตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวแปรรบกวน (Noise Variables) จะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ฝุ่น ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น ที่มาของวัตถุดิบ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น [7,8] ดังแสดงในรูปที่ 1



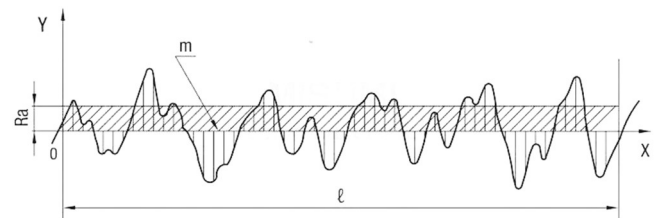
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ

การทดลองแบบ 2^k Factorial Design เป็นตัวแบบการทดลองที่ทุกปัจจัยมี เพียง 2 ระดับเท่านั้น กำหนดเป็น High กับ Low ทำให้จำนวนการ ทดลองลดลงเมื่อเทียบกับกรณี General Full Factorial Design นิยมใช้กับกรณีที่ตัวแปรเป็นค่าต่อเนื่องและมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น เนื่องจากในการคำนวณตัวแบบจะสมมติให้ความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองในทุก ๆ ปัจจัยเป็นแบบเส้นตรงทั้งหมด และยัง สามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัยพร้อมกัน สรุปผลของปัจจัยหลัก และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย [9] ในปัจจุบันมี โปรแกรมการคำนวณทางสถิติเป็นในการวิเคราะห์ช่วยในการออกแบบการทดลอง ซึ่งโปรแกรม Minitab เป็นหนึ่งโปรแกรมที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้งานสำหรับการคำนวณทางสถิติโดยเฉพาะ [10]

2.2.2 ความเรียบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness Average: Ra)

เป็นการแสดงความเรียบด้วยค่าเฉลี่ยของพื้นที่ผิวที่วัด ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุด และหลายมาตรฐานมักจะนิยมใช้ในการกำหนดมาตรฐานความเรียบผิว ช่วงความยาวมาตรฐานได้รับการสุ่มเลือกจากเส้นเฉลี่ยบนกราฟแสดงความหยาบผิว เส้นเฉลี่ยจะอยู่บนพิกัดคาร์ทีเซียน ซึ่งเส้นเฉลี่ยลากผ่านในทิศทางแกน X และขยายออกไปในทิศทางเดียวกับเส้นเฉลี่ย โดยมีแกน y แสดงค่าของขนาดเมื่อ $y=f(x)$ ค่า R_a ในหน่วย (ไมโครเมตร) [11] ดังแสดงในรูปที่ 2

$$R_a = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |f(x)| dx \quad (1)$$



รูปที่ 2 ความหยาบผิวเฉลี่ย (Average)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Song Z, YB Guo. [12] ได้ศึกษากระบวนการกัดแห้ง โดยการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ในการศึกษาที่ใช้ เหล็กเครื่องมือ AISI H13 ชุบแข็ง ค่าความแข็งวัสดุ 50 ± 1 HRC การกัดแบบแข็งด้วยดอกเอ็นมิลเคลือบ PVD ดอกเอ็นมิลเคลือบ N-TiN เพื่อศึกษาความขรุขระของพื้นผิวที่เหมาะสมที่สุด จากการศึกษาพบว่า การวัดความหยาบที่ตำแหน่งต่างๆ และเส้นทางการติดตามในทิศทางตั้งฉากจะระบุลักษณะความหยาบของพื้นผิวสำหรับพื้นผิว ตามการกำหนดลักษณะและวิเคราะห์ทิศทางอย่างละเอียด ได้ค่าความหยาบผิว R_a น้อยกว่า 0.1 ไมโครเมตร ในทิศทางป้อน และ 0.15 ไมโครเมตร ซึ่งสามารถลดการใช้การเจียรไน ซึ่งทำให้ได้คุณสมบัติพื้นผิวที่ต้องการ

Do TV, Phan TD. [13] ได้ศึกษาผลกระทบของสภาพการตัดต่อความหยาบของพื้นผิวในการกัดเหล็กกล้า SKD61 โดยใช้ อนุภาคนาโน SiO_2 ในน้ำมันตัด พารามิเตอร์ที่ศึกษาได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราป้อนความลึก และความเข้มข้นของอนุภาค

นาโน โดยวิธีทาทุชิ และทำการทดลอง 27 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ ต่อความหยาบของพื้นผิว ผลวิจัยพบว่า ผลลัพธ์ ได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความหยาบของพื้นผิวที่ดีที่สุด ได้แก่ ความเร็วในการตัด 80 เมตร/นาที่ อัตราป้อนข้อมูล 0.01 มิลลิเมตร/ฟัน ความลึกของการตัด 0.2 มิลลิเมตร และความเข้มข้นของอนุภาคนาโน 4wt% การศึกษาเปรียบเทียบความหยาบของพื้นผิวที่ได้กับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้นาโนฟลูอิดกับการหล่อลิ้นปริมาณขั้นต่ำทั่วไป (MQL) ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่านาโนฟลูอิดด้วยเทคนิค MQL ส่งผลให้พื้นผิวหยาบดีขึ้นเมื่อเทียบกับ MQL ทั่วไป

Huu TN, Quang CH. [14] วิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการต่อความหยาบของพื้นผิวชิ้นงาน (R_a) ในการกัดแข็งของเหล็ก JIS (มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น) SKD61 โดยใช้การทดลองแบบทาทุชิ และการทดลองแบบวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (RSM) การศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการต่อความหยาบของพื้นผิวในการกัดแข็งของเหล็ก JIS SKD61 ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ผลการวิจัย พบว่า เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่คาดการณ์ของ R_a คือ 3.2% และความหยาบของพื้นผิวที่กัดภายใต้สภาวะการตัดเฉือนที่ได้รับการปรับปรุงคือ 0.122 ไมโครเมตร การวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนกระบวนการกัดแข็ง (hard milling) เป็นทางเลือกแทนการเจียระไน ในการผลิตแม่พิมพ์อนาคต

M. Sedlacek, B. Podgornik, J. Vizintin. [15] การวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของการเตรียมพื้นผิวต่อพารามิเตอร์ความหยาบผิวและความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ความหยาบผิวกับแรงเสียดทานและการสึกหรอ มีการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างเทคนิคการเตรียมพื้นผิวต่างๆ และพารามิเตอร์ความหยาบผิว ซึ่งตัวอย่างแผ่นเหล็ก 100Cr6 ได้ทำการเตรียมพื้นผิวและตรวจสอบผลความหยาบผิวเฉลี่ยที่แตกต่างกัน โดยใช้การเจียระไน การขัด การกลึง และการกัด ในระดับที่แตกต่างกัน เทคนิคการเตรียมพื้นผิวที่แตกต่างกันส่งผลให้ค่า R_a ต่างกัน ตั้งแต่ 0.02 ถึง 7 ไมโครเมตร หลังจากนั้น ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ความหยาบของพื้นผิวกับแรงเสียดทานและการสึกหรอ เพื่อทำการทดสอบพินออนดิสก์แบบแห้ง และหล่อลิ้น โดยใช้เงื่อนไขการสัมผัสที่แตกต่างกัน โดยที่

ใช้ลูกบอล Al_2O_3 เป็นตัวนับ พบว่า พารามิเตอร์ R_{ku} R_{sk} R_{pk} และ R_{vk} มีแนวโน้มที่จะมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

- 1) เครื่องกัด CNC เครื่องหมายการค้า Chevalier รุ่น QP 2026-L
- 2) เครื่องทดสอบความแข็ง รุ่น HBRV-187.5 BRINELL ROCKWELL VICKERS HARDNESS TESTER
- 3) เครื่องวิเคราะห์โลหะ เครื่องหมายการค้า HITACHI รุ่น OE750 ใช้ระบุธาตุที่มีอยู่ในวัสดุชิ้นงานทดลอง
- 4) เครื่องวัดความเรียบผิวงาน (Surface Roughness Testing Machine) เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องหมายการค้า MITUTOYO รุ่น SJ-210 ใช้ในการหาค่าความเรียบของผิวงาน
- 5) ชิ้นงานที่ใช้ทดลองเป็น เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD61 ขนาด 39X40X26 มิลลิเมตร
- 6) ดอกเอ็นมิลคาร์ไบด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร คมตัด 4 ฟัน Akira Carbide Enmill D8 Lc20 4F เคลือบสาร TiAlN ค่าความแข็งอยู่ที่ 55 HRC

3.2 การออกแบบการทดลอง

การทดลองกระบวนการกัดเหล็กกล้าเหล็ก SKD61 ใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^k Factorial Design เป็นตัวแบบการทดลองที่ทุกปัจจัยมี เพียง 2 ระดับเท่านั้น ปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองประกอบด้วย ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และความเร็วรอบ (Spindle Speed) ทำการทดลองจำนวน 3 ชั่วโมง ได้การทดลองทั้งหมด 24 การทดลอง โดยโปรแกรม Minitab 19 ดังแสดงตารางที่ 1 ผลตอบสนองของการทดลอง คือ ความเรียบผิวมาตรฐาน JIS B 0633:2001 ซึ่งค่าความเรียบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (R_a) ระหว่าง 0.1-2 ไมโครเมตร การกำหนดช่วงปัจจัยสำหรับการทดลองนั้น ได้พิจารณาจากคู่มือตารางโลหะ [16] งานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป (Minitab 19) ตารางปัจจัยหลักที่กำหนดในการทดลอง ดังแสดงตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ 2^k Factorial Design

ปัจจัยและตัวแปรในการทดลอง	ระดับของปัจจัย			จำนวนซ้ำ	จำนวนครั้งการทดลอง
	A	B	C		
2^k Factorial Design	2	2	2	3	24

ตารางที่ 2 ปัจจัยหลักที่กำหนดในการทดลอง

Factor	Level Factor	
	Low Speed	High Speed
Cutting speed (m/min)	40	60
Feed rate (mm/min)	828	1,241
Spindle Speed (rpm)	1,591	2,387

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) จัดเตรียมชิ้นงาน เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD61 ขนาด 39X40x26 มิลลิเมตร

2) การกัดชิ้นงานจริง โดยการทำซ้ำในขั้นตอนการทดลอง โดยเปลี่ยนค่าความเร็วรอบ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความเร็วรอบ ตามตารางสุมการทดลองแบบ 2^k Factorial Design จำนวน 3 ซ้ำ จนครบ 24 การทดลอง

3) วัดค่าความเรียบผิวชิ้นงาน (Surface Roughness Testing Machine) เครื่องหมายการค้า MITUTOYO รุ่น SJ-210 หาค่าความเรียบของผิวงานจำนวน 3 จุด แล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าความเรียบผิว ตามมาตรฐานความเรียบผิว JIS B 0633: 2001 ค่าความเรียบผิวอยู่ระดับมาตรฐาน (R_a) 0.1- 2 ไมโครเมตร ซึ่งวัดด้วยความยาวคลื่นมาตรฐาน Cut-off Length 0.8 มิลลิเมตร กำหนด 3 ตำแหน่ง

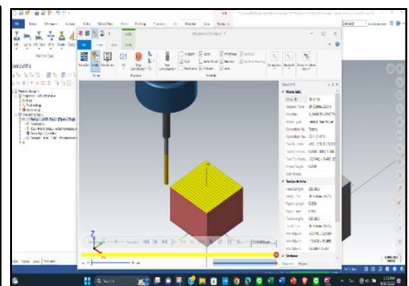
4) บันทึกผลการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติต่อไป โดยแสดงขั้นตอนต่างๆ ดังในรูปที่ 3



1) ชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ JSI SKD61 ขนาด 39X40x26 มิลลิเมตร



2) ดอกเอ็นมิลคาร์ไบด์ ๘ มิลลิเมตร 4 คมตัด เคลือบสาร TiAlN



3) ตรวจสอบการจำลองการกัดชิ้นงาน (Simulation)



4) ปรับ Condition ตามตารางสุมการทดลองแบบ 2^k Factorial Design



5) การกัดชิ้นงานจริง ตามตารางสุมการทดลอง จนครบ 24 การทดลอง



6) วัดค่าความเรียบผิวชิ้นงาน 24 ชิ้น แล้วนำบันทึกผลการทดลอง

รูปที่ 3 ขั้นตอนในการทดลอง การกัดเหล็กกล้าเครื่องมือ JSI SKD61

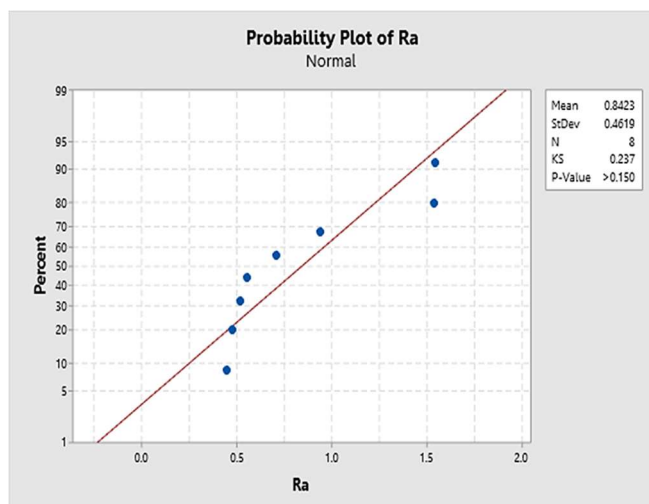
3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

- 1) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลการทดลองเบื้องต้น (Pilot Study)
- 2) การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลของผลการทดลอง
- 3) การวิเคราะห์การทดลองทางสถิติ ความแปรปรวน (ANOVA) ของการทดลอง
- 4) การวิเคราะห์ระดับความเชื่อมั่นของค่าความเรียบผิว
- 5) การกำหนดค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง
- 6) การทดลองเพื่อยืนยันผล ผลการทดลองซ้ำการกดชิ้นงาน JSI SKD61

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลการทดลองเบื้องต้น (Pilot Study)

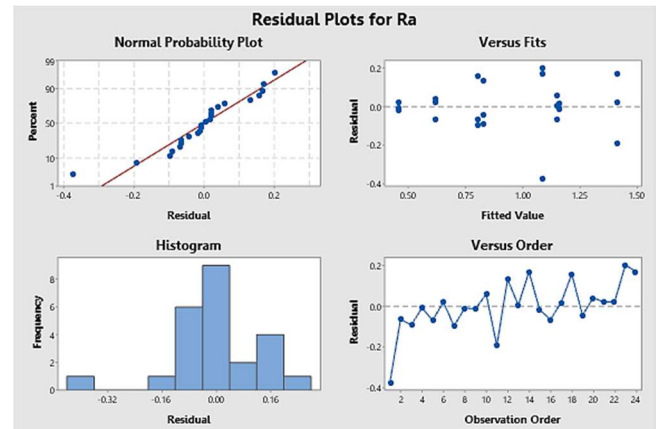
ผลการทดลองเบื้องต้น (Pilot Study) เพื่อหาระดับของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมกับการทดลอง กำหนดให้ ความเร็วตัด 2 ระดับ คือ 40 และ 60 เมตร/นาที อัตราป้อน 2 ระดับ คือ 828 และ 1,241 มิลลิเมตร/รอบ และความเร็วรอบ 2 ระดับ คือ 1,591 และ 2,387 รอบ/นาที จากผลที่ได้จากการทดลองเบื้องต้นนำมาทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) โดยพิจารณาจากค่า P-Value ในกรณีนี้ค่า P-Value เท่ากับ 0.150 ซึ่งมากกว่า (0.05) แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลทดสอบการแจกแจงของข้อมูล (Normality Test) การทดลองเบื้องต้น (Pilot Study)

4.2 ผลการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลของผลการทดลอง

การนำส่วนตกค้างของข้อมูลของการวัดความเรียบผิวของชิ้นงานที่ได้จากการเก็บข้อมูลนำมาวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือหรือว่าพอเพียงต่อการวิเคราะห์โดยวิธีวิธีการปกติ หรือว่าจะต้องทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีขั้นสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การตรวจสอบเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความแปรปรวน ของรูปแบบการทดลองของผลการทดลองความเรียบผิว

การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด (Residual) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล ของรูปแบบการทดลองการทดสอบความเรียบผิว จากการตรวจสอบพบว่า การแจกแจงแบบปกติของค่าความผิดพลาดของข้อมูลมีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีการกระจายตัวที่หนาแน่นบริเวณใกล้ศูนย์ แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ซึ่งสอดคล้องกับแผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram) ของค่า Residual มีการกระจายตัวเป็นใกล้เคียงกับเส้นโค้งปกติ ทำให้ประมาณค่าได้ว่า Residual มีการแจกแจงแบบปกติ และเมื่อพิจารณาแผนภูมิการกระจาย (Versus Fits) ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่า Residual เทียบกับ Fitted Value ตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ของค่าความผิดพลาด (Residual) พบว่า มีลักษณะเรียงตัวไม่แน่นอนแสดงว่า ข้อมูลเป็นแบบสุ่ม และมีความแปรปรวนเท่าๆ กัน แสดงให้เห็นว่าค่า Residual มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent) ส่วนกราฟ (Observation Order) มีการกระจายตัวทั้งด้านบนและด้านล่างแสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า รูปแบบการทดลองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับค่าความเรียบผิว มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้

4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่มีผลต่อความเรียบผิวงานกัด เหล็กกล้าเครื่องมือ JSI SKD61

เมื่อตรวจสอบเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของรูปแบบการทดลองของผลการทดลองความเรียบผิว พบว่ามีความปกติของข้อมูล จึงนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่มีผลต่อความเรียบผิวงานกัด เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD61 กำหนดระดับค่าความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha=0.05$) วิเคราะห์โดยโปรแกรม Minitab 19 แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	2.13390	0.30484	13.46	0.000
Linear	3	1.05695	0.35232	15.56	0.000
Cutting speed	1	0.73500	0.73500	32.46	0.000
Feed rate	1	0.05383	0.05383	2.38	0.143
Spindle Speed	1	0.26811	0.26811	11.84	0.003
2-Way Interactions	3	0.99389	0.33130	14.63	0.000
Cutting speed*Feed rate	1	0.80008	0.80008	35.33	0.000
Cutting speed*Spindle Speed	1	0.09601	0.09601	4.24	0.056
Feed rate*Spindle Speed	1	0.09779	0.09779	4.32	0.054
3-Way Interactions	1	0.08307	0.08307	3.67	0.073
Cutting speed*Feed rate*Spindle Speed	1	0.08307	0.08307	3.67	0.073
Error	16	0.36231	0.02264		
Total	23	2.49622			

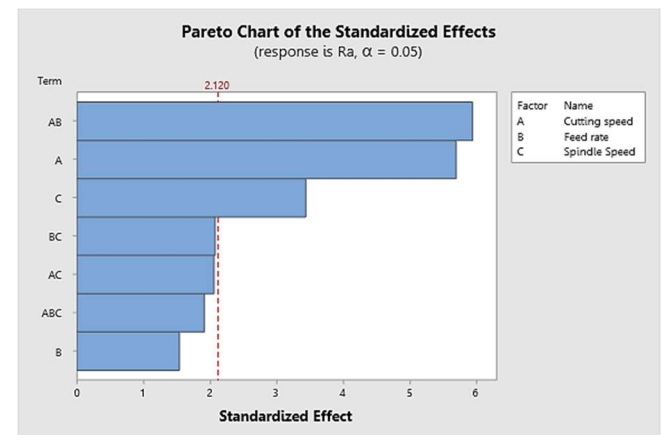
จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก ส่งผลกระทบต่อความเรียบของผิวงาน คือ ความเร็วตัด เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ความเร็วตัดที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ความเร็วรอบ มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ความเร็วรอบแตกต่างกันมีอิทธิพลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย คือ ความเร็วตัดและอัตราป้อน (Cutting speed*Feed rate) มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 คือ ความเร็วตัดและอัตราป้อนแตกต่างกัน มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อิทธิพลร่วม 3 ปัจจัย คือ ความเร็วตัด*อัตราป้อน*ความเร็วรอบ (Cutting

speed*Feed rate*Spindle Speed) มีค่าสำคัญที่ระดับทางสถิติ 0.073 ซึ่งมีความมากกว่า 0.05 ไม่ส่งผลกระทบต่อความเรียบของผิวงาน

และการวิเคราะห์ผล ผลลัพธ์ที่ออกมาจากตาราง Model Summary จะบอกให้ทราบสมการ พยากรณ์ที่ได้มีประสิทธิภาพในการ พยากรณ์มากน้อยแค่ไหน โดยดูจากค่า R-sq มีค่าเท่ากับ 85.49% และ ค่า R-sq(adj) เท่ากับ 79.14% ซึ่งมากกว่า 70% [7] แสดงว่า การออกแบบการทดลองนี้มีความถูกต้องและเหมาะสม

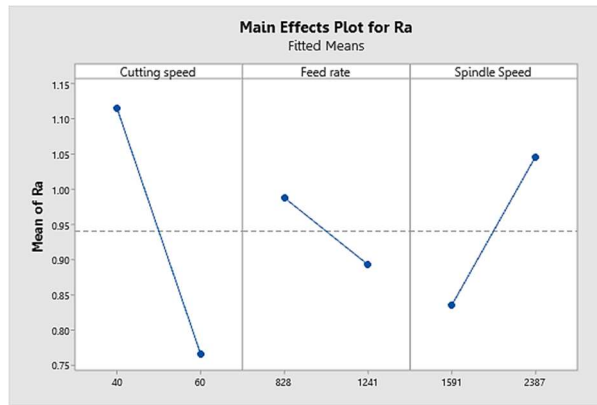
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.150481	85.49%	79.14%	67.34%



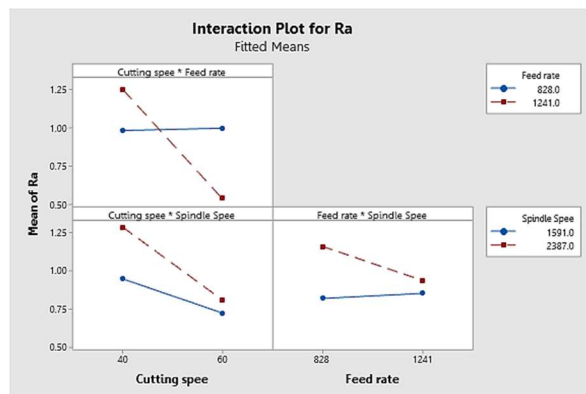
รูปที่ 6 กราฟพาเรโตแสดงเทอมของปัจจัย

จากรูปที่ 6 กราฟพาเรโตแสดงเทอมของปัจจัยแสดงให้เห็นว่าผลของปัจจัย คือ ความเร็วตัดและอัตราป้อน (Cutting speed*Feed rate) มีค่ามากกว่าเส้นวิกฤตมาก และแสดงว่า ปัจจัยที่ศึกษาส่งผลกับการตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ และพิจารณาจาก อิทธิพลหลัก รองลงมาเป็นอันดับสอง คือ ความเร็วตัด (Cutting speed) และอันดับสาม คือ ความเร็วรอบ (Spindle Speed) ส่งผลกับการตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 7 ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลักส่งผลกระทบต่อความเรียบของผิวงาน

จากรูปที่ 7 แสดงตำแหน่งค่ากลาง ของปัจจัยหลักที่อยู่บนเส้นตรง คือ ความเร็วตัด (Cutting speed) แสดงให้เห็นผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติมากกว่าปัจจัยอื่น และรองลงมา คือความเร็วรอบ (Spindle Speed) แสดงให้เห็นผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งตรงกับค่า P-Value

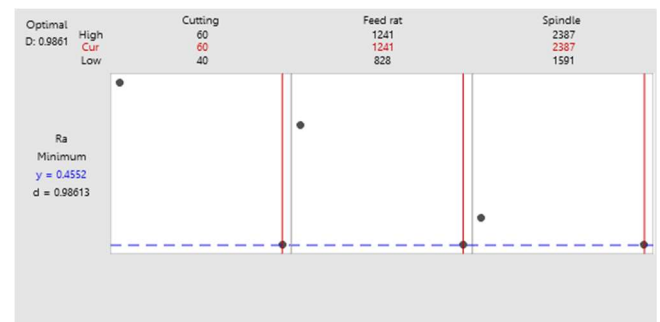


รูปที่ 8 ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลร่วมส่งผลกระทบต่อความเรียบผิว

จากรูปที่ 8 การวิเคราะห์ความเร็วตัดและอัตราป้อน (Cutting speed*Feed rate) ค่าความเรียบผิวจะสูงขึ้นตามความเร็วตัด (Cutting speed) พบว่า เมื่อใช้อัตราป้อน (Feed rate) 828 มิลลิเมตร/รอบ เริ่มจากความเร็วรอบ 1,591รอบ/นาที่ และเมื่อใช้ 1,241 มิลลิเมตร/รอบ จะมีทิศทางเดียวกับเมื่อใช้อัตราป้อน (Feed rate) 828 มิลลิเมตร/รอบ เช่นกัน แสดงให้เห็นผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติมากกว่าปัจจัยอื่น ซึ่งตรงกับค่า P-Value

4.4 การหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้กรองปัจจัยมาเบื้องต้นแล้ว (Screening) ทำให้ได้ทราบว่าปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อความเรียบผิว จากนั้นผู้วิจัยมีความสนใจที่จะกำหนดค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการกระบวนการกัดชิ้นงาน โดยจะทำการทดลองเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้ค่าสิ่ง Response Optimizer ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ Response โดยกำหนดเป็นแบบค่าที่เหมาะสม คือ ความเร็วตัด 60 เมตร/นาที่ อัตราป้อน 1,241 มิลลิเมตร/นาที่ และความเร็วรอบ 2,387 รอบ/นาที่ จะได้ค่าความเรียบผิว (R_a Minimum) คือ 0.4552 ไมโครเมตร ที่ความน่าเชื่อถือ 98% จะมีค่าความคลาดเคลื่อนได้ 2% แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการกัดเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD61

4.5 การทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองซ้ำการกัดชิ้นงาน JSI SKD61 ที่ได้จากการหาค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

จากตารางที่ 5 ทำการทดลองเพื่อยืนยันผล เป็นการทดลองที่ได้จากการหาค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ของปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิว คือ ความเร็วตัด 60 เมตร/นาที่, อัตราป้อน 1,241 มิลลิเมตร/นาที่ และความเร็วรอบ 2,387 รอบ/นาที่ จำนวน 8 ครั้ง ผลจากการทดลองพบว่า ได้ค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 0.466 ดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่การทำนายค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด Y เท่ากับ 0.4552 ไมโครเมตร คิดค่าความคลาดเคลื่อน (% Error) เท่ากับ 2.36%

ตารางที่ 5 ตารางผลการทดลองซ้ำการกัดชิ้นงาน JSI SKD61

การทดลอง	ค่าปัจจัยที่เหมาะสม		
	ความเร็วตัด 60 เมตร/นาที	อัตราป้อน 1,241 มิลลิเมตร/นาที	ความเร็วรอบ 2,387 รอบ/นาที
1	0.423		
2	0.577		
3	0.461		
4	0.439		
5	0.445		
6	0.454		
7	0.469		
8	0.461		
ค่าเฉลี่ย (ไม่โครเมตร)	0.466		

5 อภิปรายผลการวิจัย

การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) ของการทดลองเบื้องต้น โดยพิจารณาจากค่า P-Value เท่ากับ 0.150 ซึ่งมากกว่า 0.05 ซึ่งแสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ จึงนำมาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวงานกัด (ANOVA) ซึ่งได้ค่าความเร็วตัด (Cutting speed), ค่าความเร็วรอบ (Spindle Speed) มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-Value < 0.05) พิจารณาอิทธิพลร่วม (interaction effect) ที่ส่งผลกระทบต่อความเรียบของผิวงาน คือ ความเร็วตัดกับอัตราป้อน (Cutting speed*Feed rate) มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-Value < 0.05) สอดคล้องกับงานวิจัยของ ปรเมศวร์ เบาวรรณ และชาญณรงค์ สายแก้ว [17] ศึกษาการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพในอุตสาหกรรมการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ด้วยการออกแบบการทดลอง ผลวิจัยพบว่า Feed rate Depth of Cut และ Step over มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ (p-value < 0.05) และแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Feed กับ Depth of Cut มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ (p-value < 0.05) และงานวิจัยของ Ngoc CV, Xuan PD, Shyh CH. [18] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของความหยาบผิวและแรงตัดในการกัดแข็งโดยใช้วิธีทางสถิติและการตอบสนองของพื้นผิว ผลลัพธ์การวิเคราะห์แสดงให้เห็น

เห็นว่าความเร็วในการตัด (V) อัตราป้อน (f) และระยะกินลึก (f) และความลึกของการตัด (a) เป็นเงื่อนไขที่สำคัญทางสถิติสำหรับ ค่าความเร็วในการตัด (V) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุด ใน R_a กับ 35% ผลงานของรูปแบบทั้งหมด ปัจจัยผลต่อไปของ R_a คืออัตราการป้อน (f) และความลึกของการตัด (a) ที่มีผลต่อ 33.6% และ 22.2% ตามลำดับอัตราป้อน (Feed rate) จากการทดลองครั้งนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

เมื่อพิจารณาค่า R-sq มีค่าเท่ากับ 85.49% และ ค่า R-sq (adj) เท่ากับ 79.14% ซึ่งมากกว่า 70% แสดงว่า การออกแบบการทดลองนี้มีความถูกต้องและเหมาะสม ในงานวิจัยนี้ได้ค่าสถานะที่เหมาะสมกับงานกัดชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD61 คือ ความเร็วตัด 60 เมตร/นาที อัตราป้อน 1,241 มิลลิเมตร/นาที และความเร็วรอบ 2,387 รอบ/นาที จะได้ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยอยู่ที่ 0.4552 ไมโครเมตร อีกทั้งสถานะที่เหมาะสมสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกัดขึ้นรูป และเป็นการพัฒนาคุณภาพผิวและลดการสิ้นเปลืองเครื่องมือตัดในอุตสาหกรรมการกัดขึ้นรูปต่อไป และทำการทดลองเพื่อยืนยันผล เป็นการทดลองที่ได้จากจากการหาค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ของปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิว คือ ความเร็วตัด 60 เมตร/นาที, อัตราป้อน 1,241 มิลลิเมตร/นาที และความเร็วรอบ 2,387 รอบ/นาที จำนวน 8 ครั้ง ผลจากการทดลองพบว่า ได้ค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 0.466 ไมโครเมตร ดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่การทำนายค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด Y เท่ากับ 0.4552 ไมโครเมตร คิดค่าความคลาดเคลื่อน (static error) เท่ากับ 2.36% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Muhammad S, Yamin L, Alfred B, Rosehan R. [19] ได้วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์การตัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความหยาบผิวขั้นต่ำ จะใช้วิธีทางสถิติ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าค่าความหยาบผิวที่เหมาะสมที่สุดได้มาจากการรวมกันของพารามิเตอร์การตัดที่มีความเร็วรอบ 1800 รอบ/นาที อัตราป้อน 256 มิลลิเมตร/นาที และความลึกของการตัด 0.25 มิลลิเมตร และงานวิจัยของ Huu, T. N., and Quang, C. H [20] ได้วิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการต่อความขรุขระของผิวชิ้นงานในการกัดแข็งของเหล็กกล้า JIS SKD61 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าความขรุขระของพื้นผิวที่ผ่านการกัดภายใต้สภาวะการตัดเฉือนที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.122 ไมโครเมตร

6. สรุปผลการวิจัย

จากจุดประสงค์ของการวิจัยนี้สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1) การวิเคราะห์ผลการทดสอบปัจจัยที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อความเรียบผิวงานกัด ซึ่งผลที่ได้ คือ ค่าความเร็วตัด และค่าความเร็วรอบ มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วตัด และค่าความเร็วรอบ ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเรียบผิวงานกัด ในการวิจัยครั้งนี้ เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วม พบว่า ความเร็วตัดกับอัตราป้อน มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญ และได้ค่าสภาวะที่เหมาะสมกับงานกัดชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD61 คือ ความเร็วตัด 60 เมตร/นาที, อัตราป้อน 1,241 มิลลิเมตร/นาที และความเร็วรอบ 2,387 รอบ/นาที จะได้ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยอยู่ที่ 0.4552 ไมโครเมตร

2) การทดสอบยืนยันผลการทดลองที่ได้จากจากการหาค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ของปัจจัยที่ศึกษามีผลต่อความเรียบผิว คือ ความเร็วตัด 60 เมตร/นาที, อัตราป้อน 1,241 มิลลิเมตร/นาที และความเร็วรอบ 2,387 รอบ/นาที จำนวน 8 ครั้ง ผลจากการทดลองพบว่า ได้ค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 0.466 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่การทำนายค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด Y เท่ากับ 0.4552 ไมโครเมตร คิดค่าความคลาดเคลื่อน (static error) เท่ากับ 2.36%

ข้อเสนอแนะ

ศึกษาตัวแปรอิสระอื่น ๆ เช่น การควบคุมอุณหภูมิที่เกิดจากการตัดเฉือนโดยน้ำหล่อเย็นหรือลม ชนิดเหล็กหรือเหล็กผ่านการชุบแข็ง ชนิดของดอกกัดและสารเคลือบ ผิวของดอกกัด เป็นต้น ซึ่งอาจจะส่งผลต่อความเรียบผิวและการสึกหรอของดอกกัด และศึกษาจากปัญหาจากอุตสาหกรรมการผลิตโดยตรง เพื่อตอบสนองรูปแบบการผลิตในอุตสาหกรรมปัจจุบัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย การศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในกระบวนการกัดเหล็กกล้า SKD61 โดยการออกแบบการ

ทดลอง และขอบคุณทุกๆ ท่าน ที่ไม่ได้กล่าวนาม ที่ได้ให้ความร่วมมือในการตรวจสอบ และเก็บข้อมูล ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] The VD, Quoc MN, Minh TP. Optimization of cutting parameters for improving surface roughness during hard milling of AISI H13 steel. *Key Engineering Materials*. 2020;831: 35-39.
- [2] Hoang TD, Nguyen NT, Tran DQ, Nguyen VT. Cutting forces and surface roughness in face-milling of SKD6 1 hard steel. *Journal of Mechanical Engineering / Strojniški Vestnik*. 2019;65(6): 375-385.
- [3] สมเสียง จันทาสี, ศิริชัย ปั่นสมสกุล. การทำนายความหยาบผิวในงานกัดอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 โดยใช้วิธีทางสถิติ. *วิศวกรรมลาดกระบัง*. 2559;33(2): 78-83.
- [4] พงศ์ธร รักซ้อน, ศิรประภา ดีประดิษฐ์. การพยากรณ์ค่าความเรียบผิวในกระบวนการกลึง S45C ด้วยแผนแบบผิวตอบสนอง. *วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน*. 2562;7(2): 13-19.
- [5] คมพันธ์ ชมสมุทร, สุกัญญา เชิดชูงาม. การศึกษาประสิทธิภาพทิศทางการทำงานที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว โดยวิธีทากูชิ. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*. 2561;8(3): 246-262.
- [6] Pradeep KS, Pardeep S, Deepak K. Multi response optimization of CNC end milling of AISI H11 alloy steel for rough and finish machining using. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1240(1): 2564-2573.
- [7] ปรัชญา พละพันธ์. คู่มือวิเคราะห์และจัดการข้อมูลสถิติด้วย Minitab ฉบับมีอาชีพ. นนทบุรี: โอดีซี พรีเมอร์; 2560.
- [8] ปฐมพงษ์ หอมศรี, จักรพรรณ คงชนะ. การลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนฉีดพลาสติกสำหรับ ชิ้นส่วนยานยนต์โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*. 2556;3(2): 73-95.
- [9] วิบูลย์ พงศ์พรทรัพย์. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) : Generation Full Factorial

- Experiment. for Quality Tools.* 2560;24(221): 10-11.
- [10] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป; 2551.
- [11] Misumi Technical Center. Roughness. Available from: <https://misumitechnical.com/technical/tools/what-is-roughness/> [เข้าถึง 22 สิงหาคม 2023].
- [12] Zhang S, Guo YB. Taguchi method-based process space for optimal surface topography by finish hard milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering.* 2009;131(3): 1-9.
- [13] Do TV, Phan TD. An empirical investigation of SiO₂ nano concentration under mql on surface roughness in hard milling of jis SKD61 steel. *Journal of Applied Engineering Science.* 2020;18(3): 432–437.
- [14] Huu TN, Quang CH. Surface Roughness Analysis in the Hard Milling of JIS SKD61 Alloy Steel. *applied sciences.* 2016;6(172): 1-15.
- [15] Sedláček M, Podgornik B, Vižintin J. Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear. *Wear.* 2009;266(3-4): 482–487.
- [16] บรรเลง ศรีนิล. ตารางคู่มืองานโลหะ. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ; 2555.
- [17] ประเมศวร์ เบ้าวรรณ, ชาญณรงค์ สายแก้ว. การพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพในอุตสาหกรรมการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ด้วยการออกแบบการทดลอง. *วารสารวิจัย มข. (บศ.).* 2556;13(2): 42-53.
- [18] Vu NC, Dang XP, Huang SC. Multi- objective optimization of hard milling process of AISI H13 in terms of productivity, quality, and cutting energy under nanofluid minimum quantity lubrication condition. *Measurement and control.* 2021;54(5-6): 820–834
- [19] Mahesh G, Muthu S, Devadasan SR. Prediction of surface roughness of end milling operation using genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2015;77(1-4): 369–381.
- [20] Nguyen HT, Hsu QC. Surface Roughness Analysis in the Hard Milling of JIS SKD61 Alloy Steel. *applied sciences.* 2016;6(172): 1-15.