

การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูในเหล็กหล่อเหนียวโดยใช้วิธีการพื้นผิว ผลตอบสนองและการสึกหรอของเม็ดมีด

Surface Roughness Prediction in Boring Turning of Ductile Cast Iron Using Response Surface Methodology and Tool Wear

จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล^{1*} สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2} และชาตรี หอมเขียว^{1,2}

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

2/4 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

2/4 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

Julaluk Rodjananugoon^{1*} Surasit Rawangwong^{1,2}, and Chatree Homkhiew^{1,2}

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivajaya

2/4 Ratchadamnoennok Road, Boyang Sub-District, Muang District, Songkhla, Thailand, 90000

² Materials Processing Technology Research Unit Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology

Srivajaya

2/4 Ratchadamnoennok Road, Boyang Sub-District, Muang District, Songkhla, Thailand, 90000

* ผู้รับผิดชอบบทความ: julaluk.r@rmutsv.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-9657-0721

Received: 5 March 2021, Revised: 18 May 2021, Accepted: 24 June 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูในเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) โดยมีปัจจัยในการทดลองประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และรัศมีงูมกมิต จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว คือ ความเร็วรอบ รัศมีงูมกมิต อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยค่าความขรุขระผิวมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อใช้อัตราป้อนความลึกในการตัดลดลง และเพิ่มความเร็วรอบ และรัศมีงูมกมิต ให้สูงขึ้น สภาวะที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิว คือ ความเร็วรอบ 1,700 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.04 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.1 มิลลิเมตร และรัศมีงูมกมิต 1.2 มิลลิเมตร จะได้ค่าความขรุขระผิวเท่ากับ 0.2589 ไมโครเมตร และจากการกลึงคว้านรูเพื่อดูลักษณะการสึกหรอของเม็ดมีด พบว่าจะมีการสึกหรอแบบแตกหักที่ปลายคมตัด เนื่องจากการเสียดสีและการกระแทกกับชิ้นงาน

คำสำคัญ เหล็กหล่อเหนียว ความขรุขระผิว วิธีการพื้นผิวตอบสนอง การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

Abstract

The research aims to study the surface roughness prediction in turning of ductile cast iron using response surface methodology with experiment design of Box-Behnken design. Factors used in the experiment include speed, feed rate, depth of cut, and corner radius using ductile cast iron FCD 400. From the experiment, factors affecting the surface roughness are speed, corner radius, feed rate, and depth of cut. The surface roughness tended to decrease when the feed rate and depth of cut were decreased and increasing the speed corner radius up. The optimal conditions on the surface roughness

were the speed of 1,700 rpm, feed rate of 0.04 mm/rev, depth of cut 0.1 mm, and corner radius of 1.2 mm. These conditions resulted in the surface roughness of 0.2589 μm . From boring turning to study the wear characteristics of the insert, it was found that the fracture wears at the cutting edge due to the friction and impact on the workpiece.

Keywords: Ductile Cast Iron, Surface Roughness, Response Surface Methodology, Box-Behnken Design

1. บทนำ

เหล็กหล่อเหนียว (Ductile Iron) มีชื่อเรียกกันหลายแบบ เช่น เหล็กหล่อกราไฟต์กลม (Spheroidal Graphite Iron Nodular Cast Iron) คุณสมบัติและลักษณะของกราไฟต์ที่ตกผลึกอยู่ในเนื้อของเหล็ก จะอยู่ในลักษณะกลม (Nodule or Spheroid) มีความแตกต่างไปจากลักษณะกราไฟต์ของเหล็กหล่อสีเทา ซึ่งอยู่ในรูปของแถบยาวๆ (Lamellar Flakes) ด้วยคุณลักษณะของกราไฟต์ที่เป็นรูปกลมทำให้เหล็กชนิดนี้มีคุณสมบัติเหนียวรับแรงกระแทกได้ดีกว่าเหล็กหล่อสีเทา ข้อดีของเหล็กหล่อเหนียว เมื่อเทียบกับเหล็กหล่อขาวก็คือจะไม่มีการบิดงอในเชิงความหนาของชิ้นงานหล่อ และข้อดีอีกประการหนึ่งของเหล็กหล่อเหนียว คือจุดหลอมเหลวต่ำ สามารถหลอมได้ด้วยเตาแบบธรรมดาที่ใช้ถลุงเหล็กหล่อทั่ว ๆ ไปได้ [1] ด้วยข้อดีต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้มีการนำเหล็กหล่อเหนียว ไปใช้งานในอุตสาหกรรมยานยนต์เพื่อผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ที่รับแรงกระแทก เป็นต้น เนื่องจากทนต่อแรงดึงทนต่อการสึกหรอรับแรงกระแทกได้ดี และสามารถนำไปกลึง กัด ไส เจาะได้ง่าย

การนำเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 ไปใช้ในงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการต่าง ๆ เพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างที่ต้องการ ซึ่งกระบวนการกลึงคว้านรูในก็เป็นกระบวนการแปรรูปที่สำคัญ และนิยมใช้ แต่หากใช้สภาวะการตัดเฉือนไม่เหมาะสม จะส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงาน คือ ผิวชิ้นงานขรุขระ ขนาดของชิ้นงานไม่ถูกต้องและทำให้ต้นทุนการผลิตสูงเนื่องจากเสียเวลาในการแก้ไข จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา Badadhe และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์และหาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอน AISI1041 โดยใช้การออกแบบการทดลองทากูจิแบบ L9 ผลการวิจัยพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด อยู่ในช่วงความเร็วตัด 224 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.045 มิลลิเมตรต่อรอบ

ความลึกในการตัด 0.75 มิลลิเมตร ต่อมา Kumar และคณะ [3] ได้ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความขรุขระพื้นผิวในการกลึงคว้านรูในเหล็กหล่อเทา โดยใช้การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ พบว่า ปัจจัยที่ให้ค่าความเรียบผิวดีที่สุดคือ ความเร็วตัด 160 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ และค่าตัดเฉือน 0.3 มิลลิเมตร ได้ความเรียบของพื้นผิว 3.02 ไมโครเมตร ส่วน Viashnav และ Sonawane [4] โดยทำการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์กระบวนการกลึงคว้านรูเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง SAE 1541 ในโดยใช้วิธีการทากูจิ พบว่า อัตราป้อนมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวมากที่สุด ส่วนอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นมีอิทธิพลน้อยที่สุดสำหรับความขรุขระของพื้นผิว หลังจากนั้น Patil และ Jadhav [5] ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูในโดยใช้เครื่องกลึง CNC โดยใช้การออกแบบการทดลองทากูจิ พบว่า อัตราป้อนเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวมากที่สุด และสภาวะที่ทำให้ความขรุขระผิวมีค่าต่ำสุดคือ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร อัตราการป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วยรอบ 1,200 รอบต่อนาที

จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูในเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) และศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของเม็ดมีด สำหรับเป็นแนวทางในการกำหนดปัจจัย และการพยากรณ์ความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูในเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 ให้มีความเหมาะสมเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกลึงคว้านรูในเหล็กหล่อเหนียวที่มีคุณภาพและนำไปสู่การลดต้นทุนในการแปรรูปในการผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมได้

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาวิธีทางคณิตศาสตร์และสถิติที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้การออกแบบวิธีบล็อกซ์-เบห์นเคน [6-9] มีลักษณะเกือบจะเป็น Orthogonal จำนวนการทดลองแต่ละ Combination ทำในจำนวนครั้งที่เท่ากัน โดยเฉพาะจุด Centerpoints ข้อดีคือมีค่า Resolution เท่ากับ IV ซึ่งทำให้สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effects) ผลกระทบในเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic Effects) และอันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (2-Factor Interactions) ทั้งนี้การออกแบบการทดลองแบบวิธีบล็อกซ์-เบห์นเคน จะมีจำนวนครั้งในการทดลองที่ลดลงรวมถึงมีต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) [9-10]

2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

2.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

1) เครื่องกลึง Harrison รุ่น M 300 มีความเร็วรอบสูงสุดเท่ากับ 2,500 รอบต่อนาที อัตราป้อนสูงสุด 1 มิลลิเมตรต่อรอบ ผลิตในประเทศอังกฤษ

2) วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กหล่อเหนียว FCD 400 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร คุณสมบัติโดยทั่วไปทนแรงดึงได้สูงสุด 400 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร มีอัตราการยืดตัว 12% สามารถนำไปชุบแข็ง อบลดความเครียดหรือชุบผิวแข็งได้ ทนต่อการสึกหรอได้ดีสามารถนำไปตีขึ้นรูปได้สามารถรับแรงกระแทกได้ดี ส่วนผสมมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน ประมาณ 3.581% และยังมีธาตุที่ผสมอยู่ เช่น แมกนีเซียม และซิลิคอน เป็นต้น

3) เม็ดมิลดกิ้งคว้านชนิดคาร์ไบด์ ยี่ห้อ Tungaloy ชนิด CCMT09T304- PM, CCMT09T308- PM และ CCMT09T312-PM เกรด T9115 ส่วนผสม คาร์ไบด์เคลือบผิวด้วย คือ TiCN + Al₂O₃ ผลิตในประเทศญี่ปุ่น

4) ด้ามมิลดกิ้ง ยี่ห้อ Tungaloy ชนิด CC**09T3** เกรด A16Q-SCLCR/L09-D180 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความยาว 180 มิลลิเมตร ผลิตในประเทศญี่ปุ่น

5) เครื่องวัดความขรุขระ ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210 ผลิตในประเทศญี่ปุ่น

2.2.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองโดยใช้แผนการทดลองบล็อกซ์-เบห์นเคน (Box – Behnken Design) [6-10] ปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง ประกอบด้วย ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) ความลึกในการตัด (Depth of Cut) และรัศมีมุมกมิด (Corner Radius) [2-5, 9-14] ผลตอบสนอง คือ ค่าความขรุขระผิว (Surface Roughness; Ra) การกำหนดช่วงปัจจัยสำหรับการทดลองนั้น ได้พิจารณาจากประสิทธิภาพของเม็ดมิล การทดลองกลึงคว้านในชิ้นงานเบื้องต้น และข้อจำกัดของเครื่องจักรที่สามารถปรับตั้งได้จริง โดยกำหนดตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิว 4 ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมี 3 ระดับ แสดงดังตารางที่ 1 มีสภาวะในการทดลอง 27 สภาวะ และมีการวัดซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูลทำให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น จากนั้นนำผลค่าความขรุขระผิว วิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) โดยใช้โปรแกรม Minitab รุ่น 17 ระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง แสดงดังตารางที่ 1

Factor	Low (-1)	Medium (0)	High (1)
Speed (rpm)	800	1,200	1,700
Feed Rate (mm/rev)	0.04	0.06	0.08
Depth of Cut (mm)	0.1	0.2	0.3
Corner Radius (mm)	0.4	0.8	1.2

2.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

1) จัดเตรียมชิ้นงานเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน 35 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูคว้าน 22 มิลลิเมตร ความยาวชิ้นงาน 30 มิลลิเมตร

2) นำชิ้นงานที่จัดเตรียมไว้มาทำการกลึงคว้านรูในตามสถานะการกลึงคว้านรูที่กำหนด จำนวน 27 สถานะ ซึ่งจะทำการกลึงคว้านรูในตลอดชิ้นงาน ตามแนวยาวของชิ้นงาน

3) วัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน จำนวน 3 จุด โดยแต่ละจุด จะทำการหมุนชิ้นงานประมาณ 120 องศา ตำแหน่งวัดจะห่างจากปลายชิ้นงานประมาณ 10 มิลลิเมตร แล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าความขรุขระผิว

2.2.4 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

เมื่อดำเนินการทดลองตามที่ออกแบบไว้ จะนำข้อมูลค่าความขรุขระผิวตรวจสอบก่อนว่าข้อมูลที่เก็บมานั้นเป็นข้อมูลที่มีคุณภาพหรือไม่ โดยมีความจำเป็นต้องพิสูจน์คุณสมบัติของข้อมูล 3 ประการคือความเป็นปกติของข้อมูล ความเสถียรภาพของข้อมูล และความเป็นอิสระของข้อมูล

2.2.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

ใช้โปรแกรม Minitab รุ่น 17 ในการวิเคราะห์การทดลองเพื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองโดยที่พิจารณาค่า P-Value เปรียบเทียบกับค่า α หากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า α แสดงว่าปัจจัยที่พิจารณานั้นมีผลต่อค่าความขรุขระผิว โดยจะกำหนด α เท่ากับ 0.05 โดยพิจารณาที่อิทธิพลหลัก (Main Effect) ปัจจัยกำลังสอง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Interaction Effect) ว่ามีผลต่อค่าความขรุขระผิวหรือไม่

2.2.6 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระผิวกับตัวแปรอิสระ คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และรัศมีมุมมีด โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิวนำมาวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้โปรแกรม Minitab รุ่น 17

2.2.7 การหาสถานะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูใน

การวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูในเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 จะใช้ Response Optimizer ในการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์ โดยจะเลือกค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว (Ra) มีค่าน้อยที่สุด

2.2.8 การทดลองเพื่อยืนยันผล

การทดลองนี้เป็นการทดสอบความแม่นยำของสมการถดถอย โดยการสุ่มสถานะการกลึงคว้านรูใน จำนวน 10 สถานะการทดลอง แล้วนำผลที่ได้จากการพยากรณ์มา

เปรียบเทียบกับค่าจริง (dt) ที่ได้จากการทดลอง และคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error; MAPE) โดยมีเกณฑ์ที่ตัดสินใจคือ คลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

2.2.9 การศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของเม็ดมีด

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาการสึกหรอของเม็ดมีด โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง จากนั้นเอาเม็ดมีดไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

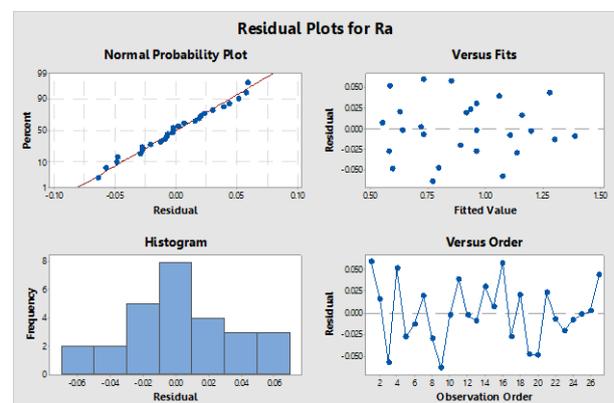
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์การทดลอง

การวิจัยนี้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน มีตัวแปรอิสระที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง ประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และรัศมีมุมมีด โดยค่าผลตอบสนอง คือ ค่าความขรุขระผิว

3.1.1 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล

จากผลการทดลองสามารถนำมาวิเคราะห์ เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลมีคุณภาพหรือไม่ โดยทั่วไปจะตรวจสอบคุณสมบัติของข้อมูล 3 ประการด้วยกัน คือการทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test) การทดสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล (Variance Stability Test) และการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent Test) แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การตรวจสอบคุณภาพข้อมูลความขรุขระผิว

จากรูปที่ 1 เป็นการทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลจะพิจารณาจากแผนภาพ 2 ประเภท ได้แก่ 1) ความน่าจะเป็น

แบบปกติ หรือ Normal Probability Plot จะเห็นว่าค่าเศษเหลือมีลักษณะการเรียงตัวเป็นแนวเส้นตรง และไม่มีค่าผิดปกติเกิดขึ้นในแผนภาพ และ 2) ฮิสโตแกรม (Histogram) โดยสังเกตรูปร่างของฮิสโตแกรมที่สมมาตร ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลในการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ

จากนั้นตรวจสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวนโดยใช้แผนภาพการกระจายค่าเศษเหลือบนแผนภาพมีลักษณะการกระจายที่เป็นอิสระ ไม่มีแนวโน้ม และไม่สามารถคาดการณ์รูปแบบได้ มีการกระจายค่าเศษเหลืออยู่รอบ ๆ ค่าศูนย์ที่เท่า ๆ กัน แสดงให้เห็นถึงข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนและตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล โดยใช้แผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง ซึ่งพบว่าค่าเศษเหลือมีการกระจายที่ไร้รูปแบบ ไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการทดลองที่เป็นแนวโน้มหรือความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้แสดงให้เห็นถึงข้อมูลมีความเป็นอิสระของข้อมูล

ผลจากการประเมินคุณสมบัติทั้ง 3 ประการของข้อมูลสรุปได้ว่าข้อมูลมีความพอเพียงและน่าเชื่อถือ

3.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความขรุขระผิว

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่าข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ จึงนำข้อมูลผลการวัดความขรุขระผิวมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยเพื่อศึกษาว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีผลกระทบต่อความขรุขระผิวของเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab รุ่น 17 แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความขรุขระผิวของเหล็กหล่อเหนียว FCD 400

Analysis of Variance for Ra					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-value
Regression	14	1.54190	0.110136	43.25	0.000
Linear	4	1.27335	0.318338	125.00	0.000
Speed	1	0.67687	0.676875	265.78	0.000
Feed Rate	1	0.22495	0.224954	88.33	0.000
Depth of Cut	1	0.12813	0.128133	50.31	0.000
CornerRadius	1	0.24339	0.243390	95.57	0.000
Square	4	0.20822	0.052056	20.44	0.000
Speed*Speed	1	0.05885	0.058847	23.11	0.000
Feed*Feed	1	0.03771	0.037707	14.81	0.002
Depth*Depth	1	0.03850	0.038496	15.12	0.002
Corner*Corner	1	0.01648	0.016477	6.47	0.026
2-Way	6	0.06032	0.010054	3.95	0.021
Speed*Feed	1	0.01210	0.012100	4.75	0.050
Speed*Depth	1	0.00748	0.007482	2.94	0.112
Speed*Corner	1	0.00001	0.000012	0.00	0.946
Feed*Depth	1	0.00319	0.003192	1.25	0.285
Feed*Corner	1	0.03725	0.37249	14.63	0.002
Depth*Corner	1	0.00029	0.000289	0.11	0.742
Error	12	0.03056	0.002547		
Lack-of-Fit	10	0.02887	0.002887	3.41	0.248
Pure Error	2	0.00169	0.000846		
Total	26	1.57246			

S = 0.0504653 R-Sq = 98.06% R-Sq(adj) = 95.79% R-Sq(pred) = 89.18%

จากตารางที่ 2 พบว่า ค่า R-Square มีค่าเท่ากับ 98.06 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความหมายว่าค่าความขรุขระผิวมีอิทธิพลจากปัจจัยการทดลองสูงถึง 98.06 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอีก 1.94 เปอร์เซ็นต์เป็นผลมาจากปัจจัยที่ไม่ได้มีการควบคุม แสดงว่าการออกแบบการทดลองนี้ถูกต้อง และมีความเหมาะสม นอกจากนี้ค่า Lack of Fit มีค่า P-Value เท่ากับ 0.248 ซึ่งหมายความว่าสมการถดถอยสำหรับค่าความขรุขระผิวมีความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญ และจึงสามารถวิเคราะห์ต่อไปด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน

สมมติฐานการทดลอง

H_0 : ปัจจัยในการกลึงคว้านรูไม่มีผลต่อความขรุขระผิว เหล็กหล่อเหนียว FCD 400

H_1 : ปัจจัยในการกลึงคว้านรูมีผลต่อความขรุขระผิว เหล็กหล่อเหนียว FCD 400

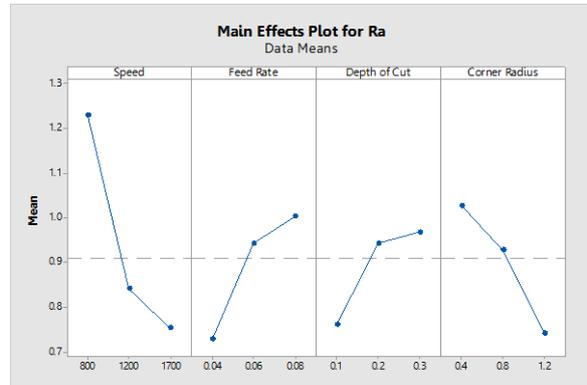
การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ หรือที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มีเกณฑ์การตัดสินใจ คือถ้า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะปฏิเสธ H_0 ซึ่งหมายถึงปัจจัยนั้น ๆ มีผลต่อความขรุขระผิวของเหล็กหล่อเหนียว FCD 400

1) การวิเคราะห์ปัจจัยหลัก ที่มีผลต่อความขรุขระผิว เหล็กหล่อเหนียว FCD 400 จากตารางที่ 2 พบว่าปัจจัยความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และรัศมีจุกมิต ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ดังนั้น สรุปได้ว่าปัจจัยความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และรัศมีจุกมิต มีผลต่อความขรุขระผิวของเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 อย่างมีนัยสำคัญซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วิลล และธเนศ [11] และ Beauchamp, Y. et.al [12]

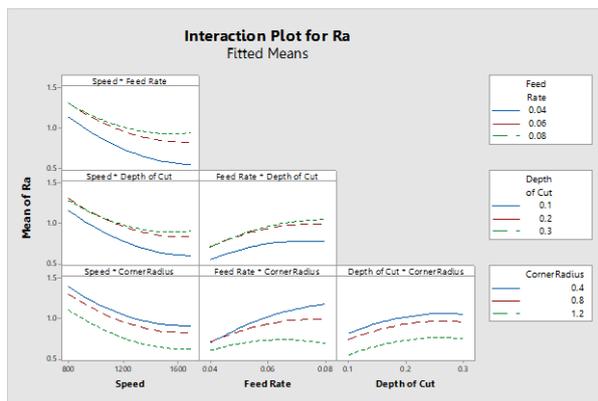
2) การวิเคราะห์ปัจจัยกำลังสอง ที่มีผลต่อความขรุขระผิว เหล็กหล่อเหนียว FCD 400 จากตารางที่ 2 พบว่าปัจจัยกำลังสองของปัจจัยความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และรัศมีจุกมิต ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ดังนั้น สรุปได้ว่าปัจจัยกำลังสองของปัจจัยความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และรัศมีจุกมิต มีผลต่อความขรุขระผิว เหล็กหล่อเหนียว FCD 400 อย่างมีนัยสำคัญ

3) การวิเคราะห์อันตรกิริยา ที่มีผลต่อความขรุขระผิว เหล็กหล่อเหนียว FCD 400 จากตารางที่ 2 พบว่าอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบกับอัตราป้อนและอัตราป้อนกับรัศมีจุกมิต ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ดังนั้นสรุปได้ว่าอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบกับอัตราป้อน และอัตราป้อนกับรัศมีจุกมิต มีผลต่อความขรุขระผิว เหล็กหล่อเหนียว FCD 400 อย่างมีนัยสำคัญ จากตารางที่ 2 และรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาอันตรกิริยาของปัจจัยความเร็วรอบกับความลึกในการตัด ความเร็วรอบกับรัศมีจุกมิต อัตราป้อนกับความลึกในการตัด และความลึกในการตัดกับรัศมีจุกมิต มีค่า P-Value มากกว่า 0.05 และพบว่าเส้นของกราฟขนานกัน และมีแนวโน้มไม่ตัดกัน ดังนั้น สรุปได้ว่าปัจจัยอันตรกิริยา

ของปัจจัยความเร็วรอบกับความลึกในการตัด ความเร็วรอบกับรัศมีจุกมิต อัตราป้อนกับความลึกในการตัดและความลึกในการตัดกับรัศมีจุกมิตไม่มีผลต่อความขรุขระผิว เหล็กหล่อเหนียว FCD 400



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความขรุขระผิวจากการเปลี่ยนระดับของปัจจัยหลัก



รูปที่ 3 ปฏิสัมพันธ์ของความขรุขระผิว

เมื่อพิจารณาผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวจากรูปที่ 2 และตารางที่ 2 พบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความขรุขระผิว เหล็กหล่อเหนียว FCD 400 คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และรัศมีจุกมิต โดยความเร็วรอบมีแนวโน้มว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ จาก 800 เป็น 1,700 รอบต่อนาที ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวจะมีแนวโน้มลดลง ส่วนอัตราป้อนมีแนวโน้มว่าเมื่อเพิ่มอัตราป้อน จาก 0.04 เป็น 0.08 มิลลิเมตรต่อรอบ ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวจะเพิ่มขึ้น ส่วนความลึกในการตัดนั้นมีแนวโน้มว่าเมื่อเพิ่มความลึกในการตัดจาก 0.1 เป็น 0.3 มิลลิเมตร ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวจะเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ พงศ์ธร และ

ศิรประภา [13] ส่วนรัศมีจุมูกมีดเพิ่มขึ้นจาก 0.4 เป็น 1.2 มิลลิเมตร ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ ทฤษฎีความขรุขระผิว [14] และเมื่อปรับความเร็วรอบเพิ่มขึ้น อัตราป้อนลดลง และความลึกในการตัดลดลง และรัศมีจุมูกมีด เพิ่มขึ้น ทำให้ความขรุขระผิวของเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 ลดลงด้วย

3.1.3 การวิเคราะห์การถดถอยของความขรุขระผิว

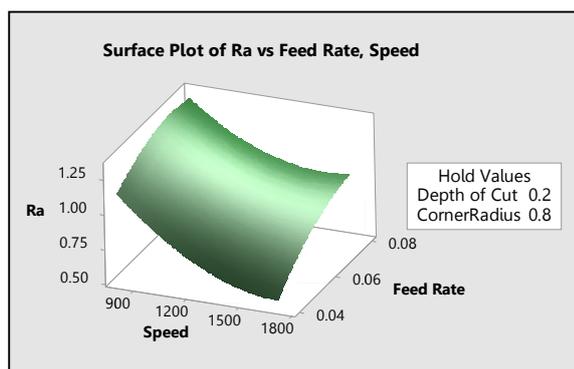
เป็นการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ของความขรุขระผิวของเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 กับปัจจัย ในการทดลอง ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และรัศมีจุมูกมีด โดยใช้โปรแกรม Minitab รุ่น 17 ซึ่ง สามารถวิเคราะห์การถดถอยได้สมการจำลองแบบเต็มรูป (Full Model) ในรูปแบบสมการกำลังสอง (Quadratic) แต่ เนื่องจากสมการถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ ยังมีปัจจัย อันตรกิริยา (2-Way Interaction) ที่ประกอบไปด้วยปัจจัย ความเร็วรอบกับความลึกในการตัด ความเร็วรอบกับรัศมีจุมูก มีด อัตราป้อนกับความลึกในการตัด และความลึกในการตัด

กับรัศมีจุมูกมีด ไม่ส่งผลต่อความขรุขระผิวของเหล็กหล่อ เหนียว FCD 400 จึงทำการเปรียบเทียบสมการถดถอยแบบ เต็มรูปและสมการถดถอยแบบลดรูปที่ตัดอันตรกิริยาระหว่าง ปัจจัยที่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญออก ที่สภาวะการทดลอง คือความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.04 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.3 มิลลิเมตร และรัศมี จุมูกมีด 0.8 มิลลิเมตร จากตารางที่ 3 พบว่า สมการถดถอย แบบลดรูปนั้น มีค่าความผิดพลาดที่ต่ำกว่า และมีค่า Predicted R Square มีค่าสูงกว่าการพยากรณ์ที่ได้จาก สมการเต็มรูปแบบ ดังนั้น จึงเลือกใช้สมการถดถอยแบบลด รูป ในการพยากรณ์ความขรุขระผิวของเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 ดังสมการที่ 1

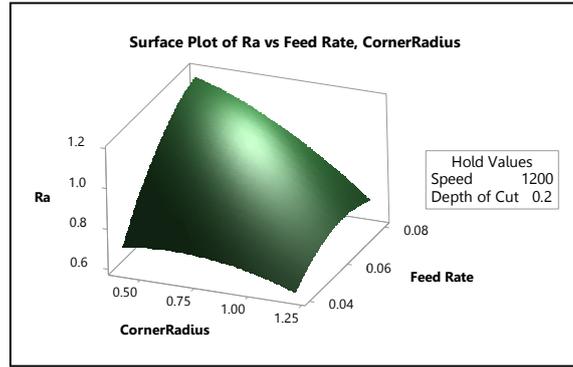
$$R_a = 0.9617 - 0.2375 (\text{Speed}) + 0.1369 (\text{Feed Rate}) + 0.1033 (\text{Depth of Cut}) - 0.1424 (\text{Corner Radius}) + 0.1050 (\text{Speed}^2) - 0.0841 (\text{Feed Rate}^2) - 0.0850 (\text{Depth of Cut}^2) - 0.0556 (\text{Corner Radius}^2) + 0.0550 (\text{Speed*Feed Rate}) - 0.0965 (\text{Feed Rate*Corner Radius}) \quad (1)$$

ตารางที่ 3 ผลพยากรณ์ของสมการเต็มรูปเปรียบเทียบกับสมการลดรูปของกระบวนการกลึงคว้านรูในเหล็กหล่อเหนียว FCD 400

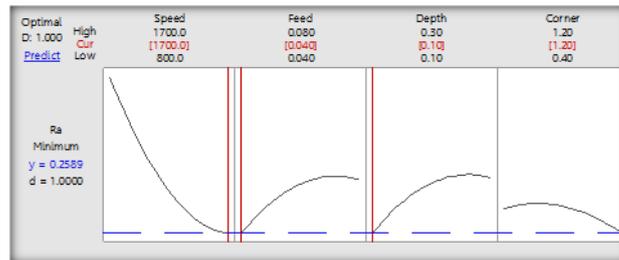
Model		Predicted (μm)	Actual (μm)	% Error	R-Sq%	R-Sq(pred)%
Ra	Full Model	0.731	0.790	7.47	98.06	89.18
	Reduced Model	0.759	0.790	3.92	97.36	93.69



รูปที่ 4 แผนภาพพื้นผิวผลตอบสนองระหว่างความเร็วรอบกับอัตราป้อน



รูปที่ 5 แผนภาพพื้นผิวผลตอบสนองระหว่างอัตราป้อนกับรัศมีจุมุมมิด



รูปที่ 6 สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกลึงคว้านรูในเหล็กหล่อเหนียว FCD 400

3.1.4 การสร้างพื้นผิวตอบสนอง

จากสมการถดถอยของค่าความขรุขระผิวในกระบวนการกลึงคว้านรูในเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 สามารถนำมาสร้างแผนภาพพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Plot) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวของเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 โดยใช้โปรแกรม Minitab รุ่น 17 ในการสร้างพื้นผิวผลตอบสนอง การวิเคราะห์ผลกระทบของอันตริยาระหว่างความเร็วรอบกับอัตราป้อน ในรูปที่ 4 พบว่าถ้าใช้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น อัตราป้อนลดลง จะทำให้ความขรุขระผิวต่ำลง ในทางกลับกันถ้าใช้ความเร็วรอบลดลง อัตราป้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ความขรุขระผิวสูงขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ และการวิเคราะห์ผลกระทบของอันตริยาระหว่างอัตราป้อนกับรัศมีจุมุมมิด ในรูปที่ 5 พบว่าถ้าใช้อัตราป้อนลดลง รัศมีจุมุมมิดเพิ่มขึ้น จะทำให้ความขรุขระผิวต่ำลง ในทางกลับกันถ้าใช้อัตราป้อนเพิ่มขึ้น รัศมีจุมุมมิดลดลง จะทำให้ความขรุขระผิวสูงขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ

3.1.5 การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว

การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูในเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 ด้วย Response Optimizer โปรแกรม Minitab รุ่น 17 การวิเคราะห์เพื่อหาระดับของปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิว (Ra) มีค่าน้อยที่สุด จากรูปที่ 6 พบว่าค่าความพึงพอใจโดยรวมของสภาวะที่เหมาะสม มีค่าเท่ากับ 1.00 ซึ่งอยู่ในระดับความพึงพอใจสูงสุด และสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกลึงเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 ที่ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวต่ำที่สุด คือ ความเร็วรอบ 1,700 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.04 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.1 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมิด 1.2 มิลลิเมตร โดยมีค่าความขรุขระผิวเท่ากับ 0.2589 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าความขรุขระผิวสำเร็จ แบบการตัดละเอียดที่มีค่าความขรุขระผิวในช่วง 0.1 - 1.0 ไมโครเมตร

3.2 การทดลองเพื่อยืนยันผล

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อยืนยันผลที่ความแม่นยำสมการถดถอยในพยากรณ์ความขรุขระผิว โดยทำการสุ่มสภาวะการกลึงคว้านไปตามขอบเขตที่กำหนดจำนวน 10 สภาวะการทดลอง แล้วนำผลที่ได้จากการ

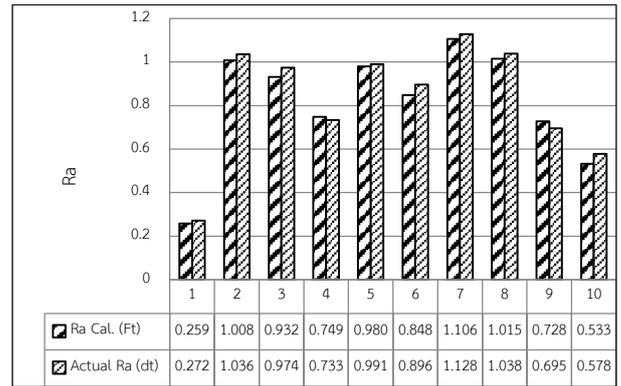
พยากรณ์มาเปรียบเทียบค่าจริง (dt) ที่ได้จากการทดลอง และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ที่ยอมรับได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าความขรุขระผิวของค่าจริงกับค่าพยากรณ์ที่คำนวณได้แสดงดังรูปที่ 7 ผลจากการทดลองพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยของสมการความขรุขระผิวเท่ากับ 3.72 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ และค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ

3.3 ลักษณะการสึกหรอของมีดมีด (Tool Wear)

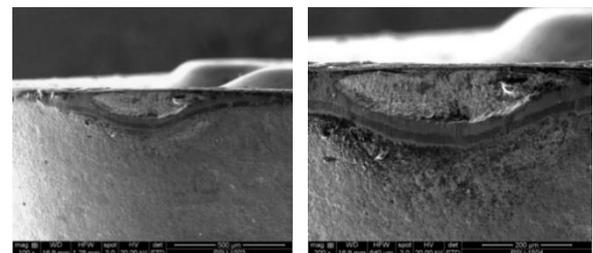
การวิเคราะห์พฤติกรรมการสึกหรอของมีดมีดโดยการกล้องคว้านรูในเหล็กหล่อเหนียว FCD400 ที่สภาวะการกลึงประกอบด้วย ความเร็วรอบ 1,700 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.04 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.1 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 1.2 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการคว้านรูใน 205 นาที จากนั้นนำมีดมีดไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) พบว่ามีลักษณะการสึกหรอที่ปลายมีด (Nose Wear) แสดงดังรูปที่ 8 (ก) และ (ข) เกิดจากการขัดสีระหว่างปลายคมตัดกับชิ้นงานที่กำลังตัดเฉือนเมื่อตัดเฉือนไปนาน ๆ ขึ้น จะทำให้คมตัดหรือปลายมีดตัดเกิดการแตกหัก ลักษณะคมตัดด้านหน้าเกิดการสึกหรอกว้างขึ้น และเนื่องจากเกิดจากการเสียดสีระหว่างปลายกับชิ้นงานที่กำลังทำการตัดเฉือน ซึ่งการสึกหรอของปลายคมตัดจะส่งผลกับคุณภาพความขรุขระผิวของชิ้นงานและขนาดของชิ้นงานโตขึ้น หรือขนาดไม่สม่ำเสมอ

4. บทสรุป

การศึกษาการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูในเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 โดยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง และพฤติกรรมการสึกหรอของเครื่องมือตัดสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิว



ก) กำลังขยายที่ 100 x ข) กำลังขยายที่ 200 x

รูปที่ 8 ลักษณะการสึกหรอของมีดมีด

- 1) ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 มากที่สุด คือ ความเร็วรอบ โดยมีค่า F-Value มากที่สุด รองลงมา คือ รัศมีจุมุมมีด อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยมีแนวโน้มว่าการใช้ความเร็วรอบสูง อัตราป้อนต่ำ และความลึกในการตัดต่ำ รัศมีจุมุมมีดสูง มีผลทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง
- 2) จากการทดลองได้สมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และรัศมีจุมุมมีด ตัวแปรตามคือ ค่าความขรุขระผิว พบว่า มีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการกำลังสอง (Quadratic Model) และเป็นสมการถดถอยแบบลดรูป ซึ่งให้ค่า ค่า Predicted R Square 93.69 เปอร์เซ็นต์ และจากการทดลองเพื่อยืนยันผลเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการถดถอยกับค่าที่วัดจริงจากการทดลอง พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยของสมการความขรุขระผิว เท่ากับ 3.72 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าสามารถพยากรณ์ค่าที่ยังไม่มีการทดลองได้อย่างแม่นยำ
- 3) ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวในการกลึงเหล็กหล่อเหนียว FCD 400 พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ความเร็วรอบ 1,700



รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.04 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.1 มิลลิเมตร และรัศมีงูมกมีด 1.2 มิลลิเมตร ซึ่งที่สภาวะดังกล่าว ส่งผลให้เม็ดมีดจะมีลักษณะการสึกหรอที่ปลายมีด (Nose Wear) เกิดจากการขัดสีระหว่างปลายคมตัดกับชิ้นงานที่กำลังตัดเฉือน ซึ่งการสึกหรอของปลายคมตัดจะส่งผลกับคุณภาพความขรุขระผิวของชิ้นงานและขนาดของชิ้นงานผิดพลาด หรือขนาดไม่สม่ำเสมอ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายได้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปี 2562

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Saterachinda M. Cast Iron. 4th edition. Bangkok: Engineering Institute of Thailand; 1996. Thai.
- [2] Badadhe AM, Bhave SY, Navale LG. Optimization of cutting parameters in boring operation. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. ISSN (e): 2278-1684, ISSN, 2013; p. 10-5.
- [3] Kumar P, Oberoi JS, Singh C, Dhiman H. (2014). Analysis and optimization of parameters affecting Surface roughness in boring process. International Journal of Advanced Mechanical Engineering. 2014; 4(6): p. 647-55.
- [4] Vaishnav MP, Sonawane, SA. Analysis and optimization of boring process parameters by using taguchi Method on SAE 1541. International Journal of Engineering Science Invention. 2014; 3(8): p. 59-63.
- [5] Patil RS, Jadhav SM. Boring parameters optimization for minimum surface roughness using CNC boring machine with passive damping material. In2017 2nd International Conference for Convergence in Technology; (I2CT) 2017 Apr 7 (pp. 300-303). IEEE.
- [6] Chutima P. Engineering experiment design. Bangkok: Chulalongkorn University Press; 2002. Thai.
- [7] Montgomery DC. Design and Analysis of Experiments. 7th edition. New York: John Wiley & Sons Inc; 2012.
- [8] Sudasna- na- ayudhya P, Luangpaiboon P. Design and Analysis of Experiments. Bangkok: Top Publishing; 2008. Thai.
- [9] Rawangwong S, Burapa R, Rodjananugoon J. Prediction of Surface Roughness in Turning of Aluminum Casting Semi- Solid 7075 Using Response Surface Methodology. Proceedings of the 13th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, 2016 December 1-4, Udonthani, Thailand; 2016, p. 450-9. Thai.
- [10] Yuvarajua BA, Nandaa BK. Prediction of vibration amplitude and surface roughness in boring operation by response surface methodology. Materials today: Proceedings. 2018 Jan 1; 5(2):6906-15.
- [11] Boonrawd W, Ratanawilai T. Effect of turning parameters on surface roughness of aluminum casting semi-Solid. Research and Development Journal. 2012; 23(4): p. 71-7. Thai.
- [12] Beauchamp Y, Thomas M, Youssef YA, Masounave J. Investigation of cutting parameter effects on surface roughness in lathe boring operation by use of a full factorial design. Computer _Industrial Engineering. 1996 Dec 1;31(3-4):645-51.
- [13] Ruksorn P, Deepradit S. (2017). The prediction of surface roughness in the S45C turning process by using response surface design. Thai Journal of Operations Research. 2017; 7(2): p. 13-9. Thai.
- [14] Chanphong S. Prediction of surface roughness for steel in CNC turing by response surface method. M.Eng. thesis. Chulalongkorn University Bangkok; 2011