



การหาสภาวะที่เหมาะสมโดยการใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองสำหรับการกลึงคว้านในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S20C

จุฬาลักษณ์ โรจนานุกุล¹ อภิชาล ทองมั่ง กำเนิดว่า¹ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2*}

ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร¹ วิมเนศ เพชรสุวรรณ¹ ณัฐวัตร นระโต¹ และ ธนัท แสงงาม¹

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: surasit.r@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 25 เมษายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 18 กรกฎาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 29 กันยายน 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน และวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองสำหรับการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S20C โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย ความเร็วรอบ 800-1,700 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.04-0.08 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.10-0.50 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 45-55 มิลลิเมตร ซึ่งจากการทดลองพบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด โดยค่าความขรุขระผิวจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบลดลง นอกจากนี้ ค่าความขรุขระผิวจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด ลดลง ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมต่อความขรุขระผิว คือ ความเร็วรอบ 1,685 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.04 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.39 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 45 มิลลิเมตร โดยมีค่าความขรุขระผิวเท่ากับ 2.267 ไมโครเมตร การยืนยันผลการทดลองโดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการพยากรณ์กับค่าที่วัดจริงจากการทดลอง โดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลการทดลอง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยเท่ากับ 3.16 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้และค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

คำสำคัญ: บ็อกซ์-เบห์นเคน; การคว้าน; ความเร็วรอบ; ความยาวด้ามมีด; เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S20C

Optimization of Condition Using Response Surface Methodology for Boring Process in S20C Carbon Steel

Julaluk Rodjananugoon¹, Apichon Thongmung Kamnerdwam¹, Surasit Rawangwong^{1,2*}
Chainarong Srivabut¹, Wikanet Phetsuwan¹, Nattawat Narato¹ and Tanat Sangngam¹

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

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

* Corresponding author, E-mail: E-mail: surasit.r@rmutsv.ac.th

Received: 15 April 2025; Revised 18 July 2025; Accepted: 29 September 2025

Online Published: 9 December 2025

Abstract: This research designed a Box-Behnken experiment and analyzed it using surface response methodology to predict the boring process of carbon steel grade S20C. The experimental variables encompass speed from 800 to 1,700 rpm, feed rate from 0.04 to 0.08 mm/rev, depth of cut from 0.10 to 0.50 mm, and overhang length from 45 to 55 mm. The experiment found that all the main factors affecting the surface roughness values were speed, feed rate, depth of cut, and overhang length. The surface roughness values increase significantly as speed decreases. Moreover, the surface roughness tends to decrease when decreasing the feed rate, depth of cut, and overhang length. The optimal conditions for surface roughness (R_a) of 2.267 micrometers were speed of 1,685 rpm, feed rate of 0.04 mm/rev, depth of cut of 0.39 mm, and overhang length of 45 mm. The experimental results were confirmed by comparing the predicted values with the actual measured values from the experiment, with a maximum surface roughness prediction error of 5%. The comparison of the experimental results revealed that the mean absolute percentage error value of the surface roughness was 3.16 percent, which is less than the specified error value and remains within the acceptable range.

Keywords: Box-Behnken; Boring; Speed; Overhang length; S20C carbon steel



1. บทนำ

เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย โดยเฉพาะในงานขึ้นรูปโครงสร้างเครื่องจักร ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ อุตสาหกรรมยานยนต์ และชิ้นส่วนทางวิศวกรรมอื่น ๆ ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นด้านความแข็งแรง ทนทานต่อแรงกระทำและมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอในระดับหนึ่ง อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงได้ด้วยการผ่านกระบวนการทางความร้อน ทำให้เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในภาคการผลิตเหล็กกล้าคาร์บอน แบ่งเป็น 3 ประเภทคือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผสม โดยจะส่งผลทางตรงต่อความแข็งแรง และความทนทานของวัสดุ ในภาค อุตสาหกรรมเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ ได้หลายวิธี เช่น การกลึง การกัด การไส การเจาะ เป็นต้น การขึ้นรูปด้วยกระบวนการกลึง (Turning) ถือเป็นหนึ่งในวิธีการผลิตที่มีความสำคัญอย่างยิ่งและมักถูกเลือกใช้เป็นลำดับแรกในกระบวนการผลิต เนื่องจากกระบวนการกลึงมีความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานได้หลากหลายรูปแบบ อีกทั้งยังให้ความแม่นยำสูงและมีประสิทธิภาพในการทำงาน จึงทำให้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน การขึ้นรูปด้วยการกลึงปอกจะส่งผลให้ขนาดของชิ้นงานลดลง ส่วนการขึ้นรูปด้วยการกลึงคว้านรูใน (Boring) จะเป็นการขยายรูในของชิ้นงานโตขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงกระบวนการกลึงคว้านรูใน โดยการที่จะกลึงคว้านรูใน

นั้นชิ้นงานจะต้องผ่านกระบวนการเจาะมาก่อน จากนั้นนำไปกลึงคว้านด้วยมีดกลึงคว้านรูใน ซึ่งในการกลึงคว้านให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพนั้น จะต้องใช้ค่าปัจจัยหรือพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสม ประกอบด้วย ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) ความลึกในการตัด (Depth of Cut) และวัสดุมีดกลึง (Cutting Tool) เป็นต้น หากกำหนดปัจจัยไม่เหมาะสมจะทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่มีคุณภาพ เกิดความสูญเสียในกระบวนการผลิต และเกิดต้นทุนที่สูง สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เกรด S20C ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในด้านการทำโครงสร้างเครื่องจักร ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ชิ้นส่วนเครื่องจักร อุตสาหกรรมยานยนต์ และชิ้นส่วนอุตสาหกรรมทั่วไป เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ทนทานต่อการเสียดสี มีความแข็งแรงและสามารถต้านทานต่อความล้าได้ดี [1-2]

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อการกลึง ดังเช่น การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) [3-4] และประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทาคุชิ (Taguchi Method) [5-7] อีกทั้งยังมีการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) สำหรับวิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ และสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูใน [8-11] โดยวิธีการพื้นผิวตอบสนองมีงานวิจัยที่ได้นำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) [10, 12-14] ซึ่งการออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน มีจุดเด่นในการลดจำนวนการทดลองในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรหลายตัว เมื่อเทียบกับการ



ออกแบบแปดทอเรียลเต็มรูปแบบ และเหมาะสำหรับการประเมินผลกระทบแบบไม่เป็นเชิงเส้นของตัวแปรต่อตัวแปรตอบสนอง รวมไปถึงการประยุกต์วิธีการพื้นผิวตอบสนองใช้ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Designs: CCD) [15] ซึ่งการออกแบบการทดลองแต่ละวิธีแตกต่างกันในวิธีการและจุดประสงค์ในการใช้เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการกลึง การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองวิธีการต่าง ๆ ข้างต้นนั้น นอกจากสามารถวิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ และสถานะที่เหมาะสมได้แล้ว ยังนำไปสู่การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว (Surface Roughness) ของกระบวนการกลึงชิ้นงาน [4, 8-14] ได้อีกด้วย ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้เพื่อประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบนเคน สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมและการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S20C เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดปัจจัยและสถานะการกลึงที่เหมาะสม ช่วยให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูง พร้อมทั้งลดต้นทุนและเวลาในการผลิตอันจะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตและการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่ายิ่งขึ้น

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 เครื่องมือ เครื่องจักร และวัสดุที่ใช้ทดลอง

เครื่องจักรที่และเครื่องมือ ใช้ในการทดลองประกอบด้วย เครื่องกลึง ยี่ห้อ Harrison รุ่น M 300 มีค่าทางเทคนิคสำคัญ ๆ ประกอบด้วย ความเร็วรอบสูงสุด 2,500 รอบต่อนาที อัตราป้อนสูงสุด 1 มิลลิเมตร

ดอรรอบ เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์ ยี่ห้อ Kyocera ชนิด Turning Insert เกรด CA5525 ตามมีดคว้าน ยี่ห้อ Kyocera ชนิด Internal Turning เกรด S16Q-SDUCR11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความยาว 250 มิลลิเมตร ดอกสว่าน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 18 และ 22 มิลลิเมตร เครื่องวัดความขรุขระ ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210 ลักษณะการวัดแบบหัวกดเคลื่อนที่ความละเอียดในการวัดอยู่ที่ 350 ไมโครเมตร ระยะในการวัด 12.5 มิลลิเมตร ความเร็วในการวัด 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที และทิศทางการวัดจะถอยกลับหลัง และวัสดุในการทดลองเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C ปริมาณคาร์บอนระหว่าง 0.18-0.23%

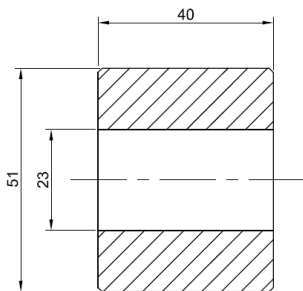
2.2 การออกแบบวิธีการวัด

การออกแบบวิธีการวัด จะวัดค่าความขรุขระผิวบนผิวชิ้นงานที่ทำารกลึงคว้านรูในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 23 มิลลิเมตร ความยาวลึก 40 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 1 (ก) และกำหนดจุดวัดห่างจากหน้าตัดของชิ้นงานประมาณ 13 มิลลิเมตร โดยแบ่งชิ้นงานออกเป็น 3 ส่วน ส่วนละ 120 องศา แสดงดังภาพที่ 1 (ข) ในแต่ละสถานะการกลึงจะวัด 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย และวัดทันทีเมื่อกลึงเสร็จเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล โดยวัดในทิศทางขนานกับทิศทางการกลึง

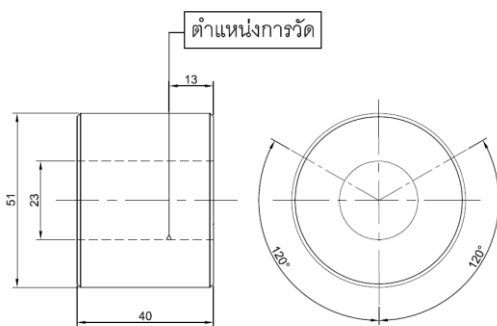
2.3 การดำเนินการทดลอง

2.3.1 ศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิวและสถานะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูใน

การกำหนดช่วงปัจจัยการทดลองนั้น พิจารณาจากคุณลักษณะของเม็ดมีดคว้าน และคุณลักษณะของ



(ก) กำหนดขนาดของชิ้นงานทดสอบ



(ข) การกำหนดช่วงการวัดชิ้นงาน

รูปที่ 1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบและการกำหนดช่วงการวัดชิ้นงาน

ตารางที่ 1 การกำหนดค่าปัจจัยสำหรับการทดลอง

ปัจจัย	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)
ความเร็วรอบ (S) รอบ/นาที	800	1,200	1,700
อัตราป้อน (F) มิลลิเมตร/รอบ	0.04	0.06	0.08
ความลึกในการตัด (D) มิลลิเมตร	0.10	0.30	0.50
ความยาวด้ามมีด (L) มิลลิเมตร	45	50	55

เครื่องกลึงที่ใช้ในการทดลอง โดยปัจจัยหรือค่าพารามิเตอร์ที่แนะนำจากบริษัทผู้ผลิตเกี่ยวกับคุณลักษณะของเมตมิต คือ ความเร็วตัด 120-240 เมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.5-2.0 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.10-0.25 มิลลิเมตรตอร์อบ และจากข้อจำกัดของเครื่องกลึง มีความเร็วรอบปรับได้จริงระหว่าง 800-1,700 รอบต่อนาที หรือความเร็วตัด 122 เมตรต่อนาที และอัตราป้อนระหว่าง 0.04-0.08 มิลลิเมตรตอร์อบ โดยกำหนดปัจจัยที่ต้องควบคุม 4 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด แสดงดังตารางที่ 1 จากนั้นนำปัจจัยทั้งหมดมาออกแบบการทดลอง และขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ โดยกำหนดให้ค่าผลตอบแทนเป็นค่าความขรุขระผิว (R_a)

2.3.2 ทดลองกลึงเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวและสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูใน

1) การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ได้กำหนดตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิวจำนวน 4 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แสดงดังตารางที่ 2 โดยมีทั้งหมด 29 สภาวะการทดลอง และมีการวัดซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูล ซึ่งจะใช้รหัส (Code) แทนระดับของปัจจัย คือ 0, 1 และ -1

2) จัดเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน 51 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูคว้าน 23 มิลลิเมตร ความยาวชิ้นงาน 40 มิลลิเมตร จำนวน 29 ชิ้นงาน

จากนั้นทำการกลึงคว้านรูในตามค่าระดับและปัจจัยที่กำหนด ตามแนวยาวของชิ้นงาน แล้วนำไปวัดค่าความขรุขระผิว ชิ้นละ 3 จุด แต่ละข้อมูลทำการหมุนชิ้นงาน 120 องศา และวัดห่างจากปลายชิ้นงานประมาณ 13 มิลลิเมตร บันทึกผลข้อมูล หาค่าเฉลี่ย

และวิเคราะห์ค่าความขรุขระผิวโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) ด้วยโปรแกรม Design-Expert 8.0.6

3) การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง เมื่อทำการทดลองตามที่ออกแบบไว้ ก่อนจะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ ต้องตรวจสอบก่อนว่าข้อมูลที่เก็บมานั้นมีคุณภาพหรือไม่ โดยพิสูจน์จากการทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการทดสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

4) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว จะใช้โปรแกรม

Design-Expert 8.0.6 ในการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

5) การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวของการทดลองเพื่อทำนายสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลอง โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ซึ่งเป้าหมายของการทดลองจะกำหนดเป้าหมายให้มีค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุด

6) การยืนยันผลการทดลองโดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการพยากรณ์กับค่าที่วัดจริงจากการทดลอง โดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2 การกำหนดค่าปัจจัยสำหรับการทดลองและการออกแบบการทดลอง

ลำดับ	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	อัตราป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกในการตัด (มิลลิเมตร)	ความยาวด้ามมีด (มิลลิเมตร)	ค่าความขรุขระผิว (ไมโครเมตร)
1	1,200 (0)	0.06 (0)	0.5 (1)	45 (-1)	3.052
2	1,200 (0)	0.06 (0)	0.3 (0)	50 (0)	2.931
3	1,200 (0)	0.06 (0)	0.3 (0)	50 (0)	2.892
4	1,200 (0)	0.08 (1)	0.3 (0)	45 (-1)	3.103
5	1,700 (1)	0.04 (-1)	0.3 (0)	50 (0)	2.433
6	1,200 (0)	0.06 (0)	0.5 (1)	55 (1)	3.283
7	1700 (1)	0.08 (1)	0.3 (0)	50 (0)	2.485
8	800 (-1)	0.04 (-1)	0.3 (0)	50 (0)	4.162
9	1200 (0)	0.06 (0)	0.3 (0)	50 (0)	2.912
10	1,200 (0)	0.08 (1)	0.1 (-1)	50 (0)	2.988
11	800 (-1)	0.06 (0)	0.3 (0)	45 (-1)	4.124
12	1,200 (0)	0.04 (-1)	0.3 (0)	45 (-1)	2.763
13	800 (-1)	0.08 (1)	0.3 (0)	50 (0)	4.281



ตารางที่ 2 (ต่อ) การกำหนดค่าปัจจัยสำหรับการทดลองและการออกแบบการทดลอง

ลำดับ	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	อัตราป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกในการตัด (มิลลิเมตร)	ความยาวด้ามมีด (มิลลิเมตร)	ค่าความขรุขระผิว (ไมโครเมตร)
14	800 (-1)	0.06 (0)	0.5 (1)	50 (0)	4.355
15	800 (-1)	0.06 (0)	0.1 (-1)	50 (0)	4.102
16	1,200 (0)	0.06 (0)	0.1 (-1)	55 (1)	3.011
17	1,200 (0)	0.06 (0)	0.3 (0)	50 (0)	3.105
18	800 (-1)	0.06 (0)	0.3 (0)	55 (1)	4.091
19	1,200 (0)	0.04 (-1)	0.1 (-1)	50 (0)	2.768
20	1,200 (0)	0.06 (0)	0.1 (-1)	45 (-1)	2.817
21	1,700 (1)	0.06 (0)	0.3 (0)	45 (-1)	2.356
22	1,200 (0)	0.06 (0)	0.3 (0)	50 (0)	2.920
23	1,700 (1)	0.06 (0)	0.3 (0)	55 (1)	2.878
24	1,200 (0)	0.04 (-1)	0.3 (0)	55 (1)	3.177
25	1,700 (1)	0.06 (0)	0.5 (1)	50 (0)	2.829
26	1,200 (0)	0.08 (1)	0.3 (0)	55 (1)	3.136
27	1,200 (0)	0.08 (1)	0.5 (1)	50 (0)	3.198
28	1,200(0)	0.04 (-1)	0.5 (1)	50 (0)	2.874
29	1,700(1)	0.06 (0)	0.1 (-1)	50 (0)	2.287

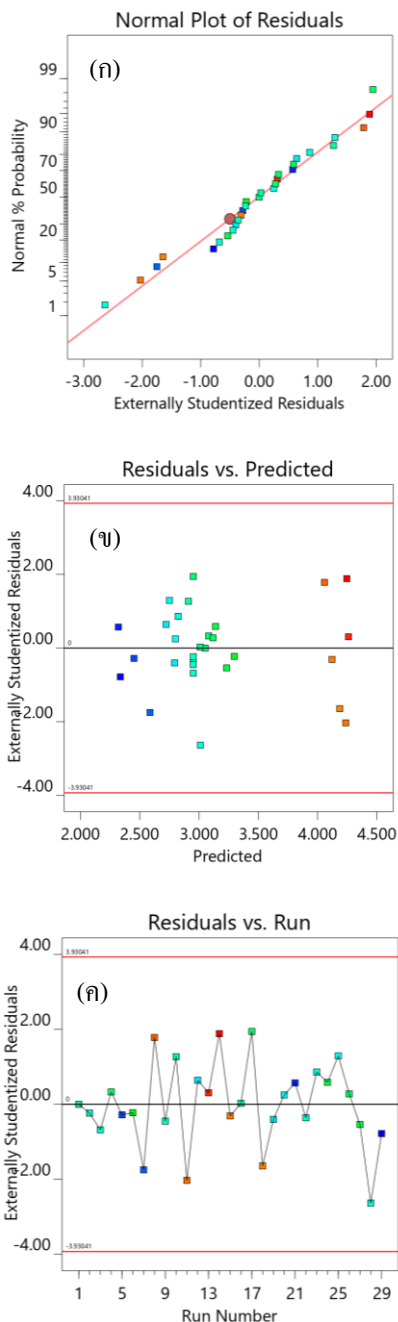
7) การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ของค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูป เป็นการวิเคราะห์ค่าความขรุขระผิวกับตัวแปรต่าง ๆ คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิวโดยใช้โปรแกรม Design-Expert 8.0.6

8) การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในการกลึง ในส่วนนี้จะใช้ Response Optimization ในการคำนวณเพื่อหาระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว (R_a) มีค่าต่ำที่สุด

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการทดลอง

เมื่อทดลองตามแผนการทดลองแล้ว ทำการตรวจสอบคุณสมบัติ 3 ประการ ประกอบด้วย กราฟแสดงการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ (Normality Plot) กราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับค่าที่พยากรณ์ (Residuals vs. Predicted) และกราฟแสดงค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (Residuals vs. Run) แสดงดังรูปที่ 2 พบว่า ข้อมูลมีคุณภาพและมีความถูกต้องในทางสถิติ



รูปที่ 2 แผนภาพการตรวจสอบความถูกต้องของ
ข้อมูลความขรุขระผิว

จากรูปที่ 2 (ก) เป็นการแสดงกราฟ Normal Probability พบว่าไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลการตอบสนองมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ [7] นอกจากนี้ รูปที่ 2 (ข) พบว่า ค่าเศษเหลือมีการกระจายตัวเป็นแบบอิสระและมีการกระจายล้อมรอบเส้นตรงกึ่งกลาง (Center Line) สรุปได้ว่า ค่าเศษเหลือไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบที่แน่นอน และรูปที่ 2 (ค) จะเห็นได้ว่า ข้อมูลยังมีการกระจายตัวที่ไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการทดลองที่เป็นแนวโน้มหรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ

3.2 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว

จากผลการทดลองสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว โดยพิจารณาจากค่า Sequential Model Sum of Squares มีนัยสำคัญ (Adjusted Coefficient of Determination: Adj- R^2) และ Predicted (Coefficient of Determination: Pred- R^2) มีค่าสูง และค่า Lack-of-Fit ไม่มีนัยสำคัญ แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ค่า R_a มีความเหมาะสมกับรูปแบบการจำลองเชิงเส้นโค้งหรือรูปแบบกำลังสอง (Quadratic Model) ซึ่งมีค่า Adj- R^2 เท่ากับ 97.34 เปอร์เซ็นต์ และ Pred- R^2 และ 93.64 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าใกล้เคียงกันและมากกว่ารูปแบบอื่น ๆ และมีค่า P-Value ของ Lack-of-Fit เท่ากับ 0.4212 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ($P > 0.05$) ซึ่งหมายความว่ารูปแบบจำลองสมการถดถอยมีความสมรูปกับข้อมูล ดังนั้น จึงสรุปได้ว่ารูปแบบจำลองเชิงเส้นโค้งหรือรูปแบบกำลังสองมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย [3, 4]

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมในการกลิ้งคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	
Linear	< 0.0001	0.0274	0.8507	0.8108	
2FI	0.8870	0.0183	0.8229	0.6734	
Quadratic	< 0.0001	0.4212	0.9734	0.9364	Suggested
Cubic	0.3324	0.4633	0.9789	0.7877	Aliased

3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความขรุขระผิว

นำข้อมูลค่าความขรุขระผิวมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย เพื่อศึกษาว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีผลกระทบต่อความขรุขระผิว ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยโปรแกรม Design-Expert 8.0.6 พบว่าจากการทดลอง R Square มีค่าเท่ากับ 98.67% และค่า Adjust R Square มีค่าเท่ากับ 97.34% มีค่ามากกว่า 75.00% ซึ่งมีความหมายว่าถ้าหากความแปรปรวนในข้อมูลความขรุขระผิว สามารถอธิบายได้ด้วยปัจจัยจากการทดลอง 93.64% แสดงว่าข้อมูลจากการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองการถดถอย [6] นอกจากนี้ค่า Lack of Fit มีค่า P -Value เท่ากับ 0.4212 แสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยสำหรับค่าความขรุขระผิวมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ และสามารถวิเคราะห์ต่อไปได้ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าว ดังตารางที่ 4

โดยมีสมมติฐานการทดลอง คือ

H_0 : ปัจจัยไม่มีผลต่อความขรุขระผิวเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C

H_1 : ปัจจัยมีผลต่อความขรุขระผิวเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C

จากตารางที่ 4 ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มีเกณฑ์การตัดสินใจคือถ้า P -Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะปฏิเสธ H_0 ซึ่งหมายถึงปัจจัยนั้น ๆ มีผลต่อความขรุขระผิว สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์ปัจจัยหลัก ที่มีผลต่อความขรุขระผิว พบว่าปัจจัยความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด ซึ่งมีค่า P -Value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าปัจจัยทั้งหมดดังกล่าวมีผลต่อความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ [7] แสดงดังรูปที่ 3

2) การวิเคราะห์ปัจจัยกำลังสอง ที่มีผลต่อความขรุขระผิว พบว่าปัจจัยกำลังสองของปัจจัยความเร็วรอบ ซึ่งมีค่า P -Value น้อยกว่า 0.05 จึงทำการปฏิเสธสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าปัจจัยกำลังสองของความเร็วรอบมีผลต่อความขรุขระผิว อย่างมีนัยสำคัญ

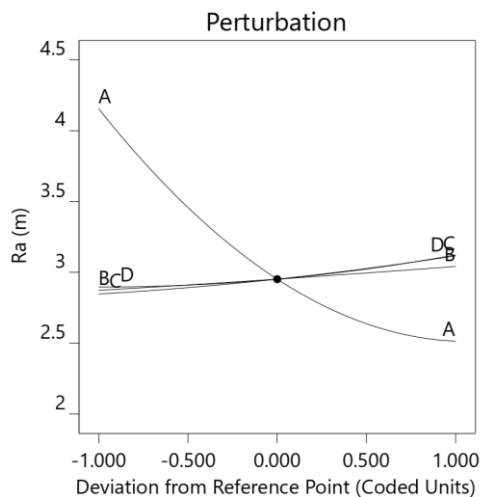
3) การวิเคราะห์ปัจจัยอันตรกิริยา ที่มีผลต่อความขรุขระผิว พบว่าปัจจัยอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบกับความยาวด้ามมีด ซึ่งมีค่า P -Value น้อยกว่า 0.05 จึงทำการปฏิเสธสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าปัจจัยอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยความเร็วรอบกับความยาวด้ามมีด มีผลต่อความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ



ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความขรุขระผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C

Source	Sum of Squares	DF	Mean Squares	F-Value	P-Value	
Model	9.66	14	0.69	74.30	< 0.0001	Significant
A-Speed	8.08	1	8.08	870.00	< 0.0001*	
B-Feed	0.086	1	0.086	9.23	0.0089*	
C-Depth of cut	0.22	1	0.22	23.49	0.0003*	
D-Over Hang	0.15	1	0.15	16.62	0.0011*	
AB	1.122E-003	1	1.122E-003	0.12	0.7333	
AC	0.021	1	0.021	2.25	0.1560	
AD	0.077	1	0.077	8.29	0.0121*	
BC	2.704E-003	1	2.704E-003	0.29	0.5980	
BD	0.036	1	0.036	3.91	0.0681	
CD	3.423E-004	1	3.423E-004	0.037	0.8505	
A ²	0.95	1	0.95	102.00	< 0.0001*	
B ²	1.816E-004	1	1.816E-004	0.020	0.8908	
C ²	5.757E-003	1	5.757E-003	0.62	0.4442	
D ²	0.022	1	0.022	2.36	0.1465	
Residual	0.13	14	9.288E-003			
Lack of Fit	0.100	10	9.995E-003	1.33	0.4212	Not Significant
Pure Error	0.030	4	7.519E-003			
Cor Total	9.79	28				

หมายเหตุ * หมายถึงค่าที่มีผลต่อความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05)



รูปที่ 3 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C

3.4 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของความขรุขระผิว

การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของความขรุขระผิว กับปัจจัยในการทดลอง ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด โดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง เพื่อศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าความขรุขระผิว โดยกำหนดความเร็วรอบ 3 ระดับ อัตราป้อน 3 ระดับ ความลึกในการตัด 3 ระดับ และความยาวด้ามมีด 3 ระดับ แสดงดังตารางที่ 1 มาวิเคราะห์รูปแบบการถดถอยทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม Design-Expert 8.0.6 แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอย

Sources	Boring Turning
Std. Dev.	0.099
Mean	3.15
C.V. %	3.15
PRESS	0.40
R-Squared	0.9779
Adj R-Squared	0.9719
Pred R-Squared	0.9591

การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติของการกลึงคว้านรูใน พบว่า Adjust-R Square จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่า R Square ซึ่งเป็นการยืนยันผลการทดสอบให้เห็นว่ารูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม พบว่า R Square ของการกลึงคว้านรูนี้มีค่าเท่ากับ 97.79% ซึ่งมีค่าสูงสามารถสรุปได้ว่าค่าความขรุขระผิวมีผลกระทบจากปัจจัยที่กำหนดคือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด ซึ่งมีค่า 97.79% ส่วนอีก 2.21% เป็นผลจากปัจจัย อื่นๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่นเดียวกันค่า Adjust-R Square มีค่าเท่ากับ 97.19% ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า Predicted R Square เล็กน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 95.91% แสดงให้เห็นว่าจำนวนข้อมูลในการทดลองมีความเพียงพอต่อการทดลอง นอกจากนี้พบว่าค่า C.V. ของความขรุขระผิว มีค่าเท่ากับ 3.15% ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำและน้อยกว่า 10.00% แสดงให้เห็นถึงรูปแบบจำลองสมการถดถอยมีความสามารถในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว [8]

จากตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์การถดถอยจะได้สมการจำลองแบบเต็ม

รูปแบบ (Full Model) ซึ่งสมการจะอยู่ในรูปแบบของ Regression Equation in Coded Units ซึ่งจะต้องเข้ารหัสของระดับแต่ละปัจจัย โดยค่าสูงสุดจะแทนด้วย 1 ค่าต่ำสุดจะแทนด้วย -1 และค่าตรงกลางจะแทนด้วย 0 แสดงดังสมการที่ (1)

$$R_a = 13.93550 - 9.75413E - 003(A) + 5.06389(B) - 1.62868(C) - 0.23269(D) - 1.86111E - 004(AB) + 8.02778E - 004(AC) + 6.16667E-005(AD) + 0.65000(BC) - 0.095250(BD) + 9.25000E - 003(CD) + 1.88724E - 006(A^2) + 0.13229(B^2) + 0.74479(C^2) + 2.32667E - 003(D^2) \quad (1)$$

นอกจากนี้ จากสมการถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ ยังมี 2-Way Interaction ที่ประกอบไปด้วย ปัจจัยอันตรกิริยาระหว่าง ความเร็วรอบกับอัตราป้อน ความเร็วรอบกับความลึกในการตัด อัตราป้อนกับความลึกในการตัด อัตราป้อนกับความยาวด้ามมีด และความลึกในการตัดกับความยาวด้ามมีด ไม่ส่งผลต่อความขรุขระผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C จึงทำการลดรูปสมการโดยการตัดปัจจัยอันตรกิริยาไม่ส่งผลต่อความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญออก เพื่อนำผลการพยากรณ์ที่ได้จากสมการลดรูป เปรียบเทียบกับผลการพยากรณ์ที่ได้จากสมการเต็มรูปที่สภาวะการทดลอง คือ ความเร็วรอบ 1,700 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.04 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.3 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 45 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 4 โดยการพิจารณาสมการถดถอยที่มีความสมมูลกับข้อมูลนั้น จะพิจารณาค่าความผิดพลาดที่ต่ำ



ก่อน แต่หากว่าค่านั้นไม่มีความแตกต่างกัน จะพิจารณาจากค่า Adjust-R Square ที่มีค่าสูงกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์การถดถอยจะได้สมการจำลองแบบลดรูป (Reduced Model) ซึ่งสมการจะอยู่ในรูปแบบของ Regression Equation in Coded Units ซึ่งจะต้องเข้ารหัสของระดับแต่ละปัจจัย โดยค่าสูงสุดจะแทนด้วย 1 ค่าต่ำสุดจะแทนด้วย -1 และค่าตรงกลางจะแทนด้วย 0 แสดงดังสมการที่ (2)

$$R_a = 10.38959 - 9.46695E - 003(A) + 0.42250(B) + 0.67417(C) - 0.054400(D) + 6.16667E - 005(AD) + 1.82404E - 006(A^2) \quad (2)$$

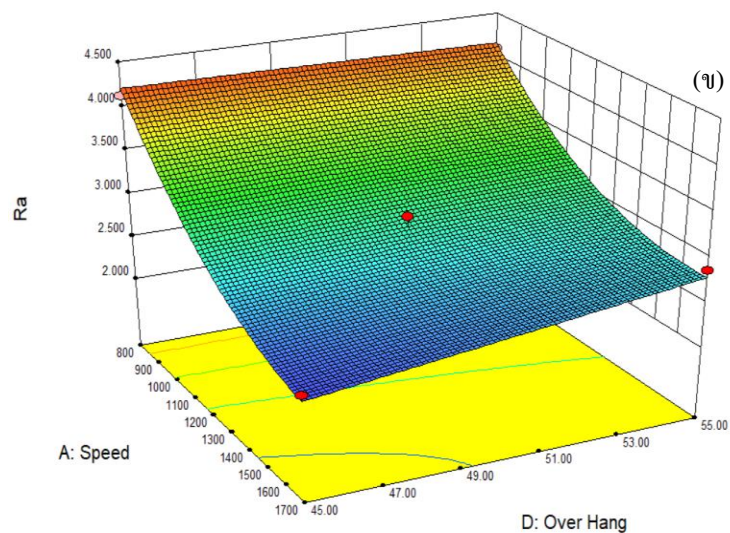
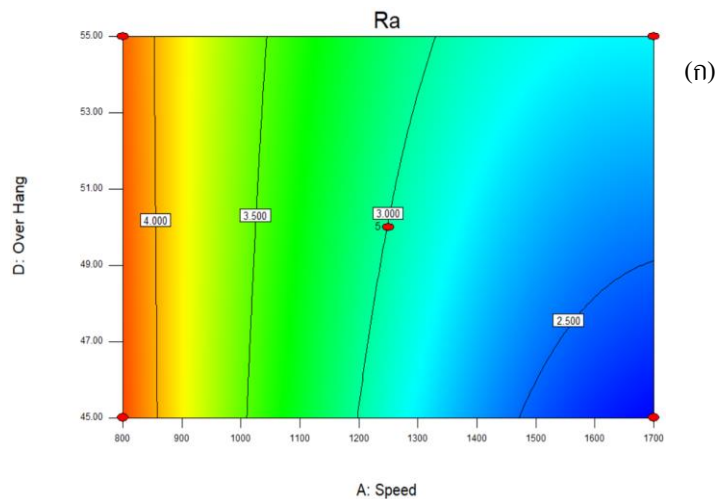
นอกจากนี้ การเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ของสมการเต็มรูป (Full Model) เปรียบเทียบกับสมการลดรูป (Reduced Model) [9-10] แสดงดังตารางที่ 6 จากการเปรียบเทียบผลการทดลอง พบว่า สมการลดรูปมีค่า Predicted R-Square สูงกว่า ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการทำนายข้อมูลใหม่ได้ดีกว่า ดังนั้นเพื่อลดความซับซ้อนของโมเดลและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนาย จึงเลือกใช้สมการถดถอยลดรูปในการนำเสนอการพยากรณ์ความขรุขระผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C สมการที่ (2)

3.5 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการทดลองและพื้นผิวตอบสนองของค่าความขรุขระผิว

จากสมการถดถอยของค่าความขรุขระผิวในกระบวนการกลึงคว้านในเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C สามารถนำมาสร้างแผนภาพพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Plot) เพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยอันตรกิริยาที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C ผลการทดลองทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Design-Expert 8.0.6 และหาค่าผลการตอบสนองด้วย (RSM) [11-12] จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบกับความยาวด้ามมีดที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว R_a ดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข) จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะตัดต่อรอบสั้นลง ส่งผลให้คมตัดสัมผัสกับชิ้นงานด้วยระยะการตัดที่ละเอียดขึ้นในแต่ละรอบ ซึ่งช่วยให้พื้นผิวที่เกิดขึ้นมีความขรุขระผิวสม่ำเสมอ และลดรอยคลื่นที่เกิดจากการตัดในรอบก่อนหน้าได้ดีขึ้น นอกจากนี้ เมื่อความยาวด้ามมีดลดลง จะทำให้ความขรุขระผิวลดลงด้วย ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับ สุรสิทธิ์ และคณะ [13] ซึ่งสรุปได้ว่า ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัดในการกลึงคว้านมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความขรุขระผิว นอกจากนี้ความยาวด้ามมีดที่เหมาะสมในการคว้าน คือ 45 มิลลิเมตร

ตารางที่ 6 ผลพยากรณ์ของสมการเต็มรูปเปรียบเทียบกับสมการลดรูป

Model	Predicted (μm)	Actual (μm)	Error %	R-Sq %	R-Sq (pred) %	Predicted (μm)
R_a	Full Model	2.280	2.433	0.306	99.72	93.44
	Reduced Model	2.267	2.433	0.875	97.79	95.91



รูปที่ 4 แผนภาพโครงร่างและแผนภาพพื้นผิวผลตอบสนองระหว่างความเร็วรอบกับความยาวด้ามมีด

(ก) กราฟโครงข่ายแสดงผลกระทบของสภาวะการทดลอง และ

(ข) กราฟพื้นผิวการตอบสนองของการทดลอง

3.6 การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว

การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูใน โดยใช้โปรแกรม Design-Expert 8.0.6 ช่วยในการวิเคราะห์เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์ โดยจะเลือกค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวมีค่าน้อยที่สุด และพิจารณาค่าความพึงพอใจโดยรวมของสภาวะที่เหมาะสม (Composite Desirability) โดยมีค่าความพึงพอใจโดยรวมของสภาวะที่เหมาะสมนั้น จะมีค่าเท่า 1 ซึ่งค่าความพึงพอใจโดยรวมของสภาวะที่เหมาะสมให้ค่าเป็น 0 แสดงว่าปัจจัยตัวใดตัวหนึ่ง หรือมากกว่าอยู่นอกขีดจำกัดที่ยอมรับได้ และถ้าค่าความพึงพอใจโดยรวมของสภาวะที่เหมาะสมให้ค่าเป็น 1 แสดงว่าสภาวะที่เหมาะสมนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์

ในการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความขรุขระผิว ดังรูปที่ 5 และตารางที่ 7 พบว่า ค่าความพึงพอใจโดยรวมของสภาวะที่เหมาะสม มีค่าเท่ากับ 1.00 ซึ่งอยู่ในระดับความพึงพอใจสูงสุด และที่ระดับความพึงพอใจดังกล่าว ทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกลึงคว้านรูใน เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C ที่ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวต่ำที่สุด คือ ความเร็วรอบ 1,685 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.04 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.39 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 45 มิลลิเมตร โดยมีค่าความขรุขระผิวเท่ากับ 2.267 ไมโครเมตร ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ จุฬาลักษณ์ และคณะ [8] กล่าวคือ สภาวะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูในคือ เมื่อเพิ่ม

ความเร็วรอบ และลดอัตราป้อนกับความลึกในการตัด จะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง นอกจากนี้หากพิจารณาประเด็นของอัตราป้อนและความลึกในการตัดที่ลดลงซึ่งมีผลต่อค่าความขรุขระผิวที่ลดลงนั้น พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัย อภิขล และสุรสิทธิ์ [14] พบว่าปัจจัยที่เพิ่มจากงานวิจัยนี้คือ ความยาวด้ามมีดที่ลดลงมีแนวโน้มให้ค่าความขรุขระผิวจะลดลงนั่นเอง

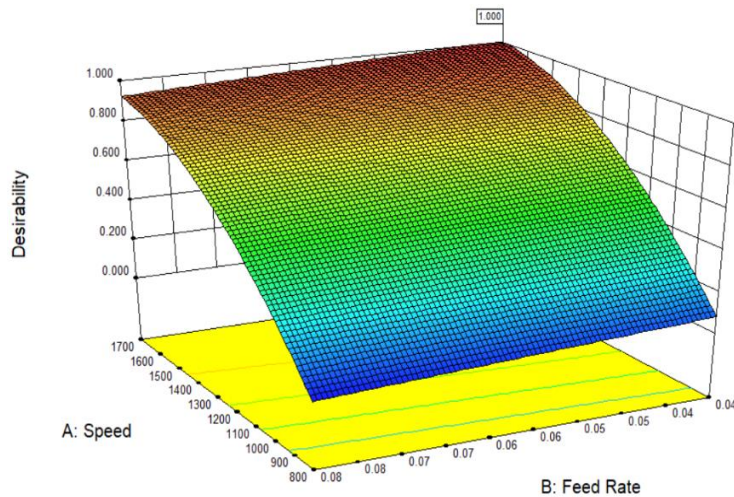
3.7 การยืนยันผลการทดลอง

ในส่วนของการยืนยันผลจะเป็นการนำสมการถดถอยมาพยากรณ์ความขรุขระผิว โดยสุ่มสภาวะการกลึงคว้านในตามขอบเขตที่กำหนด แล้วนำผลที่ได้จากการค่าความขรุขระผิวที่คำนวณจากสมการ (et) หรือ (Actual R_a) เปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวจากการทดลอง (dt) หรือ (R_a Cal.) ที่ได้จากการทดลอง โดยกำหนดสภาวะในการทดลอง 10 สภาวะ วัดซ้ำ 3 ครั้ง และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความขรุขระผิวของค่าจริงกับค่าพยากรณ์ แสดงดังตารางที่ 8

ทั้งนี้การหาค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) แสดงดังสมการที่ (3)

$$\begin{aligned} \text{MAPE} &= \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{|e_i|}{d_i}}{n} \right) \\ &= \left(\frac{31.576}{10} \right) \\ &= 3.16 \% \end{aligned} \quad (3)$$

โดยที่ dt คือค่าความขรุขระผิวจากการทดลอง (Actual R_a), et คือค่าความขรุขระผิวที่คำนวณจากสมการ (R_a Cal.) และ n คือจำนวนสภาวะการทดลอง



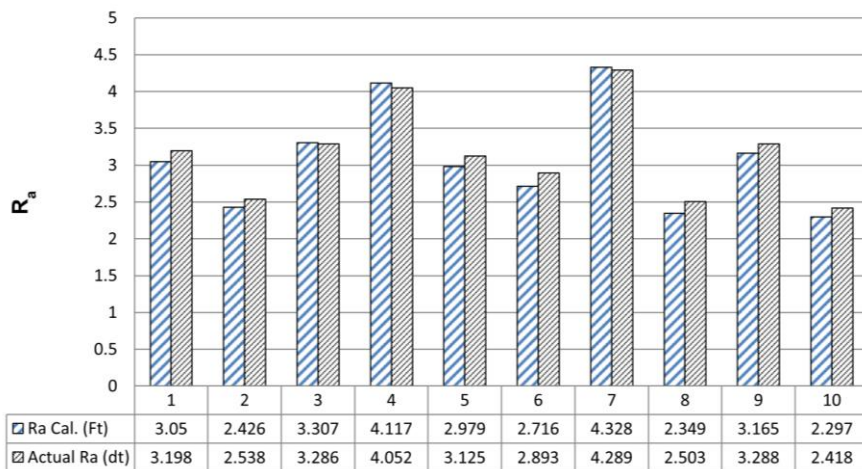
รูปที่ 5 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C

ตารางที่ 7 ค่าสภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย

Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Overhang (mm)	Prediction (R_a)	Desirability (%)
1,685	0.04	0.39	45	2.267	100

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่คำนวณจากสมการถดถอยและค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่วัดได้จริง

No	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/rev)	Depth of Cut (mm)	Overhang (mm)	R_a Cal (F_t)	Actual R_a (d_t)	Error $e_t = d_t - F_t$	$\frac{ e_t }{d_t} \times 100$
1	1,200	0.06	0.5	45	3.05	3.198	0.148	4.628
2	1,700	0.04	0.3	50	2.426	2.538	0.112	4.413
3	1,200	0.06	0.5	55	3.307	3.286	-0.021	-0.639
4	800	0.04	0.3	50	4.117	4.052	-0.065	-1.604
5	1,200	0.08	0.1	50	2.979	3.125	0.146	4.672
6	1,200	0.04	0.3	45	2.716	2.893	0.177	6.118
7	800	0.06	0.5	50	4.328	4.289	-0.039	-0.909
8	1,700	0.06	0.3	45	2.349	2.503	0.154	6.153
9	1,200	0.08	0.3	55	3.165	3.288	0.123	3.741
10	1,700	0.06	0.1	50	2.297	2.418	0.121	5.004
Total								31.576



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่คำนวณจากสมการถดถอยและค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่วัดได้จริง

จากการทดลองเพื่อยืนยันผลเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการถดถอยกับค่าที่วัดจริงจากการทดลองโดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สำหรับวัดค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการทดลองหาค่า MAPE ของสมการความขรุขระผิวเท่ากับ 3.16 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ และค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง เพื่อสามารถกำหนดแนวทางในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S20C ภายใต้ระดับของปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง ผลการศึกษานี้ยังนำไปสู่การสร้างสมการการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว ซึ่งสามารถสรุปผลที่สำคัญ ดังนี้

1) ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวมากที่สุดคือ ความเร็วรอบ รองลงมาคือ ความลึกในการตัด ความยาวด้ามมีด และอัตราป้อน ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบสูงส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะตัดต่อรอบสั้นลง ส่งผลให้คมตัดสัมผัสกับชิ้นงานด้วยระยะการตัดที่ละเอียดช่วยให้พื้นผิวที่เกิดขึ้นมีความขรุขระผิวสม่ำเสมอ และลดรอยคลื่นที่เกิดจากการตัดในรอบก่อนหน้าได้ดีขึ้น ในทางกลับกันเมื่อใช้ความลึกในการตัดต่ำ อัตราป้อนต่ำ และความยาวด้ามมีดต่ำ จะส่งผลทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง เนื่องจากอัตราป้อนที่ต่ำช่วยให้คมตัดสร้างรอยทางกลที่มีระยะห่างถี่และความลึกที่ตื้น ซึ่งส่งผลให้พื้นผิวที่ได้มีความขรุขระผิวต่ำและต่อเนื่องมากขึ้น นอกจากนี้ ความลึกในการตัดต่ำและความยาวด้ามมีดที่สั้นยังช่วยลดแรงตัดและแรงสั่นสะเทือนในกระบวนการตัดเฉือน ทำให้ควบคุมคุณภาพผิวได้ดีขึ้น และลดโอกาสเกิดข้อบกพร่องบนผิวชิ้นงาน



2) จากการทดลองทำให้ได้ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระคือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด ตัวแปรตามคือ ค่าความขรุขระผิว ซึ่งการนำสมการไปใช้ตรวจสอบอยู่ในขอบเขตของการทดลอง

3) ผลการวิเคราะห์พบว่า สภาวะที่เหมาะสมของการกลึงคว้านรูในที่สุดเพื่อให้มีความขรุขระผิวต่ำที่สุดคือ ความเร็วรอบ 1,685 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.04 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.39 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 45 มิลลิเมตร โดยมีค่าความขรุขระผิวเท่ากับ 2.267 ไมโครเมตร

4) จากการทดลองเพื่อยืนยันผลเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการทดลองกับค่าที่วัดจริงจากการทดลอง โดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สำหรับวัดค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 5% ผลจากการทดลองหาค่า MAPE เท่ากับ 3.16% ซึ่งน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้และค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้สามารถนำไปปรับใช้ในการทดลองกับชิ้นงานวัสดุ มีดตัด หรือกระบวนการผลิตอื่น ๆ ได้ และควรศึกษาร่วมกับภาคอุตสาหกรรมการผลิต เพื่อให้ได้แนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริง และควรพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ เพิ่มเติมเพื่อให้สมการมีความสามารถในการทำนายมากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องจักร และสถานที่สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Ruksorn and S. Deepradit, The prediction of surface roughness in the S45C turning process by using response surface design, Thai Journal of Operations Research, 2019, 7, 13-19
- [2] S. Singh and R. Kumar, Optimization of process parameters in boring operation: A review, Pramana Research Journal, 2018, 8, 498-502.
- [3] P. Kumar, J.S. Oberoi, C. Singh and H. Dhiman, Analysis and optimization of parameters affecting surface roughness in boring process, International Journal of Advanced Mechanical Engineering, 2014, 4, 647-655.
- [4] I.A. Choudhury and M.A. El-Baradie, Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments, Journal of Materials Processing Technology, 2013, 67, 55-61.
- [5] A.M. Badadhe, S.Y. Bhavne and L.G. Navale, Optimization of cutting parameters in boring operation, Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2013, 10-15.
- [6] P.V. Mayuresh and S.A. Sonawane, Analysis and optimization of boring process parameters by using Taguchi method on SAE 1541, International Journal of Engineering Science Invention, 2014, 3, 59-63.

- [7] A. Sankar and D. Soumyalata, Comparative assessment of carbide insert and cermet insert on surface roughness in boring of ASTM A48 grey cast iron, *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 2015, 6, 440-445.
- [8] J. Rodjananugoon, S. Rawangwong and C. Homkhiew, Surface Roughness Prediction in boring turning of ductile cast iron using response surface methodology and tool wear, *RMUTL Engineering Journal*, 2021, 6, 1-10.
- [9] S.J. Raykar and N.M. Qureshi, Analysis and optimization of precision boring process for HE 30 aluminum automotive component, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 2015, 2, 863-868.
- [10] J. Suteja, Y. Haryono, A. Harianto and E. Rinawiyanti, Optimization of boring process parameters in manufacturing of polyacetal bushing using high speed steel, *E3S Web of Conferences*, IC-AMME 2018, 2019, 1-7.
- [11] D. Vivek and K. Ramesh, Optimization of the cutting responses in boring operation using response surface methodology, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2014, 3, 1739-1744.
- [12] S. Chockalingam, U. Natarajan and S.K. Sundaram, Modeling and optimization of tool wear in a passively damped boring process using response surface methodology, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2016, 69, 1443-1448.
- [13] S. Rawangwong, C. Homkhiew, J. Rodjananugoon and A.T. Kamnerdwam, Application of response surface methodology to determine an optimized condition value and the prediction of surface roughness in turning boring in aluminum 6061 with carbide cutting Tools, *IE Network Conference 2019, Proceeding*, 2019, 184-190.
- [14] A.T. Kamnerdwam and S. Rawangwong, Application of Box-behnken experimental design with response surface methodology for prediction of surface roughness in boring turning of carbon steel grade S45C, *Journal of Advanced Development in Engineering and Science*, 2022, 12, 14-17.
- [15] G.E.P. Box and D.W. Behnken, Some new three level designs for the study of quantitative variables, *Technometrics*, 1960, 2(4), 455-475.