

การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองบล็อกซ์-เบห์นเคนด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองสำหรับการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C
Application of Box–Behnken Experimental Design with Response Surface Methodology for Prediction of Surface Roughness in Boring Turning of Carbon Steel Grade S45C

อภิชล ทองมั่ง กำเนิดว่า^{1,*} และ สุรสิทธิ ระวังวงศ์¹

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

E-mail: apichon.tk@rmutsv.ac.th

Apichon Thongmung Kamnerdwam^{1,*} and Surasit Rawangwong¹

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

Srivijaya, Muang, Songkhla, 90000

E-mail: apichon.tk@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยการนำมาผ่านกระบวนการกลึงขึ้นงาน และจำเป็นต้องทราบแนวทางกำหนดปัจจัยในการกลึงที่มีความเหมาะสม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองบล็อกซ์-เบห์นเคนด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองสำหรับการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ความเร็วรอบ 800-1,700 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.06-0.10 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.25-0.35 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 25-45 มิลลิเมตร จากการทดลองพบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด โดยค่าความขรุขระผิวมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีดต่ำลง และเพิ่มความเร็วรอบให้สูงขึ้น ซึ่งสภาวะที่เหมาะสม คือ ความเร็วรอบ 1,700 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.25 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 25 มิลลิเมตร ได้ค่าความขรุขระผิวเท่ากับ 1.6387 ไมโครเมตร และในการทดลองยืนยันผลพบว่า ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ มีค่าเท่ากับ 1.92 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ จึงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และจากการวิเคราะห์พฤติกรรมการสึกหรอของเม็ดมีด โดยการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ที่สภาวะการกลึงที่เหมาะสม โดยใช้เวลาในการกลึง 487 นาที พบว่าเม็ดมีดจะมีลักษณะการสึกหรอบนผิวหลบ เกิดจากการเสียดสีกันอย่างรุนแรงระหว่างชิ้นงานกับเม็ดมีดกลึง

คำสำคัญ: การกลึงคว้านรูใน; วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง; ความขรุขระผิว; เหล็กกล้าคาร์บอน

Abstract

Nowadays, carbon steel grade S45C is now widely used in industry which is brought through the workpiece turning process. And it is necessary to know how to determine the appropriate turning factor. The aim of this research was to apply the Box–Behnken experimental design with response surface methodology for predicting the surface roughness in the boring of carbon steel grade S45C. The factors used in the experiment consisted of the speed of 800 – 1,700 rpm, feed rate of 0.06 – 0.10 mm/rev, depth of cut of 0.25 – 0.35 mm, and the overhang of 25 – 45 mm. The experiment showed that the main factors affecting the surface roughness were speed, feed rate, depth of cut, and overhang. The surface roughness value decrease with the depth of cut, feed rate, and overhang was lower and increase the speed. The optimum condition was the speed of 1,700 rpm, feed rate of 0.06 mm/rev, depth of cut of 0.25 mm, and the overhang 25 mm. The surface roughness was 1.6387 μm . In the experiment, the results were confirmed. The Mean Absolute Percent Error was 1.92 percent, which is less than 5 percent, so it is within the acceptable range. From the analysis of insert wear behavior by making holes in carbon steel grade S45C at optimum turning conditions with a turning time of 487 minutes, the insert was found to have wear on the surface or flank wear caused by strong friction between the workpiece and the turning insert.

Keywords: Boring turning; Response surface methodology; Surface roughness; Carbon steel

1. บทนำ

เหล็กกล้า (Steel) เป็นโลหะที่นำไปใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติรับแรงได้ดี รวมทั้งมีคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอ โดยเฉพาะเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งมีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลัก มีราคาถูกกว่าเหล็กกล้าทั่วไป และใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ปูนซีเมนต์ และการผลิตกระดาษ โดยเฉพาะเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ที่มีปริมาณคาร์บอนอยู่ระหว่างร้อยละ 0.3–0.6 โดยน้ำหนัก และเมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนจะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [1] ปัจจุบันทั่วโลกใช้งานเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์และยานยนต์ เช่น อะไหล่ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เฟือง ก้านสูบ สปริง และกระบอกสูบ เป็นต้น ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญเนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นเรื่องความแข็งแรง และเมื่อผ่านการปรับสภาพทางความร้อน จะทำให้มีความแข็งแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [2]

การนำเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางไปใช้งานนั้น จำเป็นต้องผ่านการแปรรูป เช่น การกลึง การกัด และการเจาะ เป็นต้น โดยกระบวนการแปรรูปที่มีความสำคัญในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ คือ การกลึง ในที่นี้จะกล่าวถึง กระบวนการกลึงคว้านรูใน (Boring) ซึ่งผ่านการเจาะมาก่อน โดยวิธีการกลึงให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพนั้น

ต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสม ประกอบด้วย อัตราป้อน (Feed rate) ความเร็วรอบ (Speed) ความลึกในการตัด (Depth of cut) และวัสดุมีดกลึง (Cutting tool) เป็นต้น ซึ่งหากกำหนดปัจจัยที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่มีคุณภาพ เกิดความสูญเสียในกระบวนการผลิต และเกิดต้นทุนที่สูง สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C สามารถอบชุบเพื่อเพิ่มความแข็งได้น้อย 55 HRC มีความสามารถในการชุบขึ้นรูปได้ดีมาก ทนทานต่อการเสียดสีและความล้าได้ดี มีความแข็งแรงสูง มีโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลเหมาะสำหรับทำชิ้นส่วนพื้นฐานได้หลายชนิด จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ และชิ้นส่วนเครื่องจักร เป็นต้น [3-4] และแม้ว่าเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C จะมีคุณสมบัติเด่นหลายประเด็นข้างต้นแต่ก็มีความสามารถในการกลึงในระดับพอใช้ จึงต้องพิจารณาปรับตั้งสภาวะการกลึงให้เหมาะสมเพื่อคุณภาพผิวที่ดีของชิ้นงานและลดข้อบกพร่อง (Defect) ของชิ้นงานที่จะผลิต ทั้งนี้ ในประเด็นของค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานนั้น ตามมาตรฐาน ISO 1302 ได้มีการกำหนดช่วงประมาณของความขรุขระผิวงานที่ผ่านกระบวนการกลึงไว้ โดยมีช่วงอยู่ที่ประมาณ 0.2-50 ไมโครเมตร ซึ่งขึ้นกับลักษณะของชิ้นงานและการนำไปใช้ โดยที่ความขรุขระผิวของชิ้นงานนี้มีความจำเป็นสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลบางชนิดหรือชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ทั้งนี้ ความขรุขระผิวของชิ้นงานยิ่งต่ำก็ยิ่งมีคุณภาพผิวที่ดี และอาจต้องมีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น จึงต้องพิจารณาตามความเหมาะสมและเป้าหมายในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

ทั้งนี้ จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อการกลึง ดังเช่น การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial design) [5-7] และการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทาгуชิ (Taguchi method) [8-13] นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) สำหรับวิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ และสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูใน [14-16] โดยวิธีการวิธีการพื้นผิวตอบสนองมีงานวิจัยที่ได้นำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) [14], [17-18] รวมไปถึงการประยุกต์ใช้ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Designs, CCD) [19] ซึ่งการออกแบบการทดลองแต่ละวิธี ชนิดของเกรดเหล็ก และชนิดของมีดกลึง เป็นต้น ส่งผลให้ได้คำตอบที่เหมือนหรือต่างกันออกไปในบางประเด็น ทั้งนี้ การประยุกต์ใช้เทคนิคต่าง ๆ ข้างต้นในการวิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ และสภาวะที่เหมาะสมแล้ว ยังนำไปสู่การพยากรณ์ (Prediction) ความขรุขระ (Roughness) ของพื้นผิวจากกระบวนการกลึงชิ้นงาน [6], [17-19] ได้อีกด้วย ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัย คือ การหาอิทธิพลของปัจจัยและการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดปัจจัยและสภาวะในการกลึงที่เหมาะสม ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ สามารถลดต้นทุนและเวลาในการผลิตให้แก่ภาคอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีการทดลอง

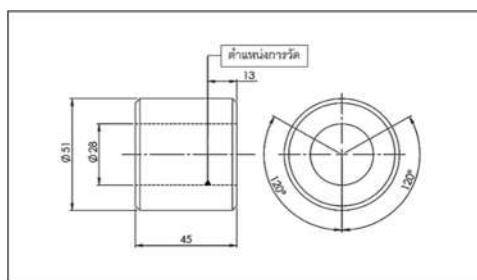
2.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือและเครื่องจักรที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับวัสดุและอุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วย 1) เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C 2) ดอกสว่าน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10, 16, 22 และ 25 มิลลิเมตร 3) เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์ ยี่ห้อ Tungaloy ชนิด CCMT09T308-PM เกรด T9115 และ 4) ด้ามมีดขวาน ยี่ห้อ Tungaloy ชนิด CC**09T3** เกรด A16Q-SCLCR/L09-D180 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความยาว 180 มิลลิเมตร

ในส่วนของเครื่องมือและเครื่องจักรที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย 1) เวอร์เนียคาลิเปอร์ ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น 530-312T ความยาว 200 มิลลิเมตร ความละเอียดของสเกล 0.02 มิลลิเมตร 2) เครื่องวัดความขรุขระ ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210 ลักษณะการวัดแบบหัวกดเคลื่อนที่ความละเอียดในการวัดอยู่ที่ 350 ไมโครเมตร ระยะในการวัด 12.5 มิลลิเมตร ความเร็วในการวัด 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที และทิศทางการวัดจะถอยกลับหลัง และ 3) เครื่องกลึง ยี่ห้อ Harrison รุ่น M 300 ความเร็วรอบสูงสุด 2,500 รอบต่อนาที อัตราป้อนสูงสุด 1 มิลลิเมตรต่อรอบ

2.2 การออกแบบวิธีการวัด

การออกแบบวิธีการวัด (Design of measurement method) จะวัดค่าความขรุขระผิวบนผิวเหล็กที่ทำการกลึงขวานรูในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 28 มิลลิเมตร ความยาวลึก 45 มิลลิเมตร และกำหนดจุดวัดห่างจากหน้าตัดของชิ้นงานประมาณ 13 มิลลิเมตร โดยแบ่งชิ้นงานออกเป็น 3 ส่วน ส่วนละ 120 องศา ดังรูปที่ 1 (ก) ในแต่ละสภาวะการกลึงจะวัด 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย และวัดทันทีเมื่อกลึงเสร็จเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล โดยวัดในทิศทางขนานกับทิศทางการกลึง ดังรูปที่ 1 (ข)



(ก) การกำหนดช่วงการวัดชิ้นงาน



(ข) วิธีการวัดค่าความขรุขระผิว

รูปที่ 1 การออกแบบวิธีการวัด

2.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

2.3.1 ศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิว และสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงขวานรูใน

การกำหนดช่วงปัจจัยการทดลองนั้น พิจารณาจากประสิทธิภาพของเม็ดมีด และข้อจำกัดของเครื่องที่ปรับตั้งได้จริง โดยค่าที่แนะนำจากเม็ดมีด คือ ความเร็วตัด 100-200 เมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 1.0-3.0 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.15-0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ จากข้อจำกัดของเครื่องกลึงที่ความเร็วรอบปรับได้จริงสูงสุด

1,700 มิลลิเมตรต่อรอบ หรือ ความเร็วตัด 149 เมตรต่อนาที จากการคำนวณคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การใช้งานเม็ดมีด สูงสุดอยู่ที่ 49.67 เปอร์เซ็นต์ของเม็ดมีด เนื่องจากขีดจำกัดของเครื่องกลึงจึงต้องใช้ระดับความเร็วรอบที่สูงสุดในการทดลอง และเลือกการใช้อัตราป้อน ที่ 0.06, 0.08 และ 0.10 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด ที่ 0.25, 0.35 และ 0.45 มิลลิเมตร โดยกำหนดปัจจัยที่ต้องควบคุม 4 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed rate) ความลึกในการตัด (Depth of cut) และความยาวค้ำมีด (Overhang) ดังตารางที่ 1 โดยปัจจัยต่าง ๆ พิจารณาและประยุกต์มาจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง [7-8, 13] จากนั้นนำปัจจัยทั้งหมดมาออกแบบการทดลอง และขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ โดยกำหนดให้ค่าผลตอบแทนเป็นค่าความขรุขระผิว (R_a)

ตารางที่ 1 วัสดุทดสอบ ปัจจัยควบคุม และระดับของปัจจัยควบคุมในการทดลอง

วัสดุทดสอบ	ปัจจัยควบคุม	ระดับของปัจจัย		
		ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)
เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C	ความเร็วรอบ (S) รอบต่อนาที	800	1,200	1,700
	อัตราป้อน (F) มิลลิเมตรต่อรอบ	0.06	0.08	0.10
	ความลึกในการตัด (D) มิลลิเมตร	0.25	0.35	0.45
	ความยาวค้ำมีด (O) มิลลิเมตร	25	35	45

2.3.2 ทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิว และสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูใน

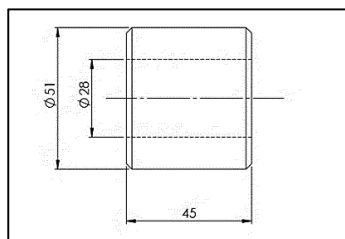
1) การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ได้กำหนดตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิว จำนวน 4 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ดังตารางที่ 2 โดยมีทั้งหมด 27 สภาวะการทดลอง และมีการวัดซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูล ซึ่งจะใช้รหัส (Code) แทนระดับของปัจจัย คือ 0, 1 และ -1

ตารางที่ 2 การกำหนดค่าปัจจัยสำหรับการทดลอง

ที่	ปัจจัยสำหรับการทดลอง				ที่	ปัจจัยสำหรับการทดลอง			
	ความเร็วรอบ (Speed)	อัตราป้อน (Feed rate)	ความลึกในการตัด (Depth of cut)	ความยาวค้ำมีด (Overhang)		ความเร็วรอบ (Speed)	อัตราป้อน (Feed rate)	ความลึกในการตัด (Depth of cut)	ความยาวค้ำมีด (Overhang)
1	1,200 (0)	0.10 (1)	0.25 (-1)	35 (0)	15	800 (-1)	0.06 (-1)	0.35 (0)	35 (0)
2	1,700 (1)	0.08 (0)	0.45 (1)	35 (0)	16	1,200 (0)	0.06 (-1)	0.35 (0)	45 (1)
3	1,200 (0)	0.08 (0)	0.35 (0)	35 (0)	17	1,700 (1)	0.08 (0)	0.35 (0)	25 (-1)
4	1,700 (1)	0.06 (-1)	0.35 (0)	35 (0)	18	800 (-1)	0.08 (0)	0.25 (-1)	35 (0)
5	1,200 (0)	0.08 (0)	0.25 (-1)	25 (-1)	19	1,200 (0)	0.10 (1)	0.45 (1)	35 (0)
6	1,200 (0)	0.06 (-1)	0.45 (1)	35 (0)	20	1,700 (1)	0.08 (0)	0.25 (-1)	35 (0)
7	1,200 (0)	0.08 (0)	0.45 (1)	25 (-1)	21	1,200 (0)	0.06 (-1)	0.25 (-1)	35 (0)
8	1,700 (1)	0.08 (0)	0.35 (0)	45 (1)	22	800 (-1)	0.08 (0)	0.35 (0)	45 (1)
9	800 (-1)	0.10 (1)	0.35 (0)	35 (0)	23	1,200 (0)	0.10 (1)	0.35 (0)	45 (1)
10	1,200 (0)	0.08 (0)	0.25 (-1)	45 (1)	24	1,200 (0)	0.10 (1)	0.35 (0)	25 (-1)
11	800 (-1)	0.08 (0)	0.35 (0)	25 (-1)	25	800 (-1)	0.08 (0)	0.45 (1)	35 (0)
12	1,200 (0)	0.08 (0)	0.45 (1)	45 (1)	26	1,700 (1)	0.10 (1)	0.35 (0)	35 (0)
13	1,200 (0)	0.08 (0)	0.35 (0)	35 (0)	27	1,200 (0)	0.06 (-1)	0.35 (0)	25 (-1)
14	1,200 (0)	0.08 (0)	0.35 (0)	35 (0)					

2) จัดเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน 51 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูคว้าน 28 มิลลิเมตร ความยาวชิ้นงาน 45 มิลลิเมตร จำนวน 27 ชิ้นงาน ดังรูปที่ 2 (ก) และ (ข)

จากนั้น กลึงคว้านรูในตามค่าระดับและปัจจัยที่กำหนด ตามแนวยาวของชิ้นงาน ดังรูปที่ 2 (ค) แล้วนำไปวัดค่าความขรุขระผิว (R_a) ขึ้นละ 3 จุด แต่ละข้อมูลทำการหมุนชิ้นงาน 120° และวัดห่างจากปลายชิ้นงานประมาณ 13 มิลลิเมตร หาค่าเฉลี่ย บันทึกผลข้อมูล และวิเคราะห์ค่าความขรุขระผิวด้วยโปรแกรม Minitab 17



(ก) กำหนดขนาดของชิ้นงานทดสอบ (ข) ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเตรียมเพื่อทดสอบ (ค) การกลึงชิ้นงาน

รูปที่ 2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบและการกลึงชิ้นงานในแต่ละระดับปัจจัย

3) การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง เมื่อทำการทดลองตามที่ออกแบบไว้ ก่อนจะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ ต้องตรวจสอบก่อนว่าข้อมูลที่เก็บมามีคุณภาพหรือไม่ โดยพิสูจน์จากการทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการทดสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

4) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว จะใช้โปรแกรม Minitab 17 ในการวิเคราะห์ เพื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองโดยกำหนดค่า α ขึ้นมาเปรียบเทียบกับค่า P-Value หากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า α แสดงว่าปัจจัยที่พิจารณานั้นมีผลต่อค่าความขรุขระผิว โดยกำหนด α เท่ากับ 0.05 แล้วพิจารณาที่อิทธิพลหลัก (Main effect) ปัจจัยกำลังสอง (Quadratic effect) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Interaction effect) ว่ามีผลต่อค่าความขรุขระผิวหรือไม่ โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

สมมติฐานการทดลอง คือ H_0 : ปัจจัยไม่มีผลต่อความขรุขระผิวเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C

H_1 : ปัจจัยมีผลต่อความขรุขระผิวเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C

5) การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูใน เป็นการวิเคราะห์ค่าความขรุขระผิวกับตัวแปรต่าง ๆ คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิวโดยใช้โปรแกรม Minitab 17

6) การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในการกลึง ในส่วนนี้จะใช้ Response Optimizer ในการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์ โดยจะเลือกค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว (R_a) มีค่าน้อยที่สุด

2.3.3 ทดลองยืนยันผล

เป็นการทดลองเพื่อยืนยันว่า ผลการทดลองให้ผลที่สอดคล้องกันหรือไม่ โดยนำสมการถดถอยมาวิเคราะห์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิวที่มีผลต่อการทดลอง และของสภาวะที่เหมาะสมในการกลึง นำมาพยากรณ์สภาวะการกลึงที่เกิดจากการสุ่มเลือก เพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าจากสมการ โดยการออกแบบการทดลอง ได้ทำการสุ่มสภาวะการกลึงอยู่ในขอบเขตของสมการถดถอย สามารถพยากรณ์ได้โดยการสุ่มเลือกสภาวะการกลึงจำนวน 10 สภาวะ ทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) โดยมีเกณฑ์ตัดสินใจ คือ คลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

2.3.4 ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของเม็ดมีด

ทำการกลึงคว้านรูชิ้นงานด้วยสภาวะการกลึงที่เหมาะสม และจับเวลาในการกลึงเพื่อสังเกตการสึกหรอ (Wear) ของเม็ดมีด จากนั้นนำเม็ดมีดที่สึกหรอไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

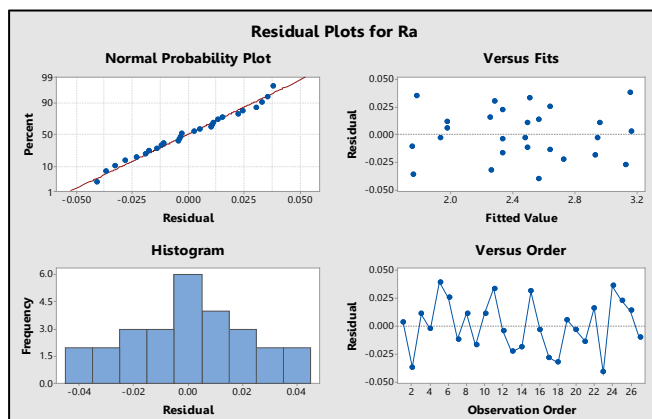
3.1 การวิเคราะห์การทดลอง

3.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

เมื่อทดลองตามแผนการทดลองแล้ว ทำการตรวจสอบคุณสมบัติ 3 ประการ คือการทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality test) การทดสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล (Variance stability test) และการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent test) ดังรูปที่ 3 พบว่า ข้อมูลคุณภาพและมีความถูกต้องในทางสถิติ

3.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความขรุขระผิว

นำข้อมูลค่าความขรุขระผิวมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย เพื่อศึกษาว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีผลกระทบต่อความขรุขระผิว ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยโปรแกรม Minitab 17 พบว่า จากการทดลอง R Square มีค่าเท่ากับ 99.72 เปอร์เซ็นต์ และค่า Adjust R Square มีค่าเท่ากับ 99.39 เปอร์เซ็นต์ มีความแตกต่างกันน้อยมาก ซึ่งมีความหมายว่า ถ้าหากความแปรปรวนในข้อมูลมี $100 \mu\text{m}^2$ แล้ว ความแปรปรวน $99.72 \mu\text{m}^2$ สามารถอธิบายได้ด้วยปัจจัยจากการทดลอง แสดงว่าการออกแบบการทดลองนี้ถูกต้องและมีความเหมาะสม ส่วนอีก $0.28 \mu\text{m}^2$ ไม่สามารถอธิบายได้เนื่องจากปัจจัยที่ไม่ได้มีการควบคุม นอกจากนี้ค่า Lack of Fit มีค่า P-Value เท่ากับ 0.277 ซึ่งหมายความว่าสมการถดถอยสำหรับค่าความขรุขระผิวมีความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถวิเคราะห์ต่อไปได้ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าวดังตารางที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลความขรุขระผิว

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความขรุขระผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C

Response surface regression: Ra versus Speed, Feed rate, Depth of cut, Overhang					
Analysis of variance for Ra					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	14	4.68666	0.33476	302.75	0.000
Linear	4	4.60951	1.15238	1042.17	0.000
Speed	1	4.22809	4.22809	3823.76	0.000
Feed rate	1	0.16450	0.16450	148.77	0.000
Depth of cut	1	0.07521	0.07521	68.02	0.000
Overhang	1	0.14170	0.14170	128.15	0.000
Square	4	0.06223	0.01556	14.07	0.000
Speed × Speed	1	0.00973	0.00973	8.80	0.012
Feed rate × Feed rate	1	0.03431	0.03431	31.03	0.000
Depth of cut × Depth of cut	1	0.03087	0.03087	27.92	0.000
Overhang × Overhang	1	0.03793	0.03793	34.30	0.000
2-Way Interaction	6	0.01493	0.00249	2.25	0.109
Speed × Feed rate	1	0.00002	0.00002	0.01	0.906
Speed × Depth of cut	1	0.00002	0.00002	0.01	0.906
Speed × Overhang	1	0.00000	0.00000	0.00	0.988
Feed rate × Depth of cut	1	0.00740	0.00740	6.69	0.024
Feed rate × Overhang	1	0.00027	0.00027	0.25	0.629
Depth of cut × Overhang	1	0.00723	0.00723	6.53	0.025
Error	12	0.01327	0.00111		
Lack-of-Fit	10	0.01244	0.00124	2.99	0.277
Pure Error	2	0.00083	0.00042		
Total	26	4.69993			
S = 0.0332527 R-Sq = 99.72% R-Sq(adj) = 99.39% R-Sq(pred) = 98.44%					

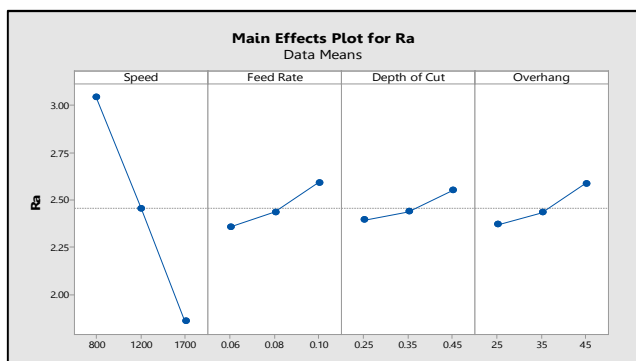
จากตารางที่ 3 ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ หรือที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มีเกณฑ์การตัดสินใจ คือถ้า P-Value มีค่าน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จะปฏิเสธ H_0 ซึ่งหมายถึงปัจจัยนั้น ๆ มีผลต่อความขรุขระผิวสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ และแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข)

1) การวิเคราะห์ปัจจัยหลัก ที่มีผลต่อความขรุขระผิว พบว่าปัจจัยความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าปัจจัยทั้งหมดดังกล่าวมีผลต่อความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ

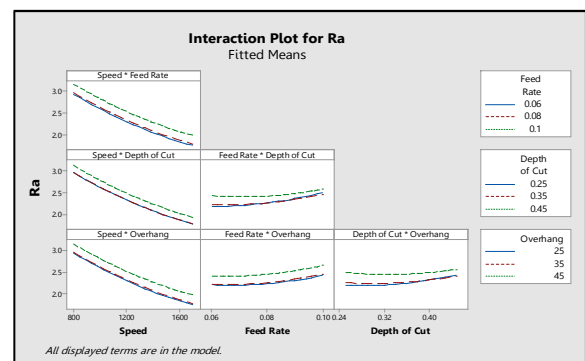
2) การวิเคราะห์ปัจจัยกำลังสอง ที่มีผลต่อความขรุขระผิว พบว่าปัจจัยกำลังสองของปัจจัยความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงทำการปฏิเสธสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าปัจจัยกำลังสองดังกล่าว มีผลต่อความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ

3) การวิเคราะห์อันตรกิริยา ที่มีผลต่อความขรุขระผิว พบว่าอันตรกิริยาระหว่างอัตราป้อนความลึกในการตัดและความลึกในการตัดกับความยาวด้ามมีด ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงทำการปฏิเสธสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยดังกล่าว มีผลต่อความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการทดลองเบื้องต้นจากรูปที่ 4 (ก) และตารางที่ 3 พบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความขรุขระผิว คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด โดยความเร็วรอบมีแนวโน้มว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบจะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวจะมีแนวโน้มลดลง ส่วนอัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีดนั้น มีแนวโน้มว่าเมื่อเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวจะเพิ่มขึ้นด้วย ในส่วนของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยอัตราป้อนกับความลึกในการตัด และความลึกในการตัดกับความยาวด้ามมีดมีผลต่อความขรุขระผิว พบว่ามีลักษณะเส้นของกราฟที่ไม่ขนานกัน และมีแนวโน้มว่าเส้นของกราฟจะตัดกัน แสดงว่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยมีผลต่อความขรุขระผิว ในขณะที่อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยความเร็วรอบกับอัตราป้อน ความเร็วรอบกับความลึกในการตัด ความเร็วรอบกับความยาวด้ามมีด และอัตราป้อนกับความยาวด้ามมีด พบว่า เส้นของกราฟขนานกัน และไม่มีแนวโน้มว่าเส้นของกราฟจะตัดกัน แสดงว่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยไม่มีผลต่อความขรุขระผิว ดังรูปที่ 4 (ข)



(ก) ปัจจัยหลัก



(ข) อันตรกิริยา

รูปที่ 4 ปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C

3.1.3 การวิเคราะห์การถดถอยของความขรุขระผิว

เป็นการวิเคราะห์การถดถอยของความขรุขระผิว กับปัจจัยในการทดลอง ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าความขรุขระผิว โดยกำหนดความเร็วรอบ 3 ระดับ คือ 800, 1,200 และ 1,700 รอบต่อนาที อัตราป้อน 3 ระดับ คือ 0.06, 0.08 และ 0.10 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 3 ระดับ คือ 0.25, 0.35 และ 0.45 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 3 ระดับ คือ 25, 35 และ 45 มิลลิเมตร มาวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้โปรแกรม Minitab 17 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 การวิเคราะห์การถดถอย สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ในรูปแบบสมการกำลังสอง (Quadratic) ของค่าความขรุขระผิว โดยพบว่าค่า R Square มีค่าเท่ากับ 99.72 เปอร์เซ็นต์ แสดงถึงสมการถดถอยมีความสมรูปกับข้อมูล ส่วนอีก 0.28 เปอร์เซ็นต์ ไม่สามารถอธิบายได้ เนื่องจากปัจจัยที่ไม่ได้ควบคุม ค่า Adjust-R Square มีค่าเท่ากับ 99.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ R Square พบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก แสดงถึงสมการถดถอยมีความสมรูปกับข้อมูล และค่า Predicted R Square มีค่าเท่ากับ 98.44 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นถึงสมการถดถอยมีความสามารถในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความขรุขระผิวกับปัจจัยต่าง ๆ

General regression analysis : Ra versus Speed, Feed rate, Depth of cut, Overhang				
Coefficients				
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	2.3287	0.0192	121.29	0.000
Speed	-0.59358	0.00960	-61.84	0.000
Feed rate	0.11708	0.00960	12.20	0.000
Depth of cut	0.07917	0.00960	8.25	0.000
Overhang	0.10867	0.00960	11.32	0.000
Speed × Speed	0.0427	0.0144	2.97	0.012
Feed rate × Feed rate	0.0802	0.0144	5.57	0.000
Depth of cut × Depth of cut	0.0761	0.0144	5.28	0.000
Overhang × Overhang	0.0843	0.0144	5.86	0.000
Speed × Feed rate	-0.0020	0.0166	-0.12	0.906
Speed × Depth of cut	-0.0020	0.0166	-0.12	0.906
Speed × Overhang	0.0002	0.0166	0.02	0.988
Feed rate × Depth of cut	-0.0430	0.0166	-2.59	0.024
Feed rate × Overhang	0.0083	0.0166	0.50	0.629
Depth of cut × Overhang	-0.0425	0.0166	-2.56	0.025
S = 0.0332527 R-Sq = 99.72% R-Sq(adj) = 99.39% R-Sq(pred) = 98.44%				

จากตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์การถดถอยจะได้สมการจำลองแบบ Full Model ดังสมการที่ (1)

$$\begin{aligned}
 Ra = & 2.3287 - 0.59358(\text{Speed}) + 0.11708(\text{Feed rate}) + 0.07917(\text{Depth of cut}) + 0.10867(\text{Overhang}) + 0.0427(\text{Speed} \times \\
 & \text{Speed}) + 0.0802(\text{Feed rate} \times \text{Feed rate}) + 0.0761(\text{Depth of cut} \times \text{Depth of cut}) + 0.0843(\text{Overhang} \times \text{Overhang}) - \\
 & 0.0020(\text{Speed} \times \text{Feed rate}) - 0.0020(\text{Speed} \times \text{Depth of cut}) + 0.0002(\text{Speed} \times \text{Overhang}) - 0.0430(\text{Feed rate} \\
 & \times \text{Depth of cut}) + 0.0083(\text{Feed rate} \times \text{Overhang}) - 0.0425(\text{Depth of cut} \times \text{Overhang})
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

เนื่องจากสมการถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ ยังมี 2-Way Interaction ที่ประกอบไปด้วยอันตรกิริยาระหว่าง ความเร็วรอบกับอัตราป้อน ความเร็วรอบกับความลึกในการตัด ความเร็วรอบกับความยาวด้ามมีด และ

อัตราป้อนกับความยาวด้ามมีด ไม่ส่งผลต่อความขรุขระผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C จึงทำการลดรูปสมการโดยการตัดอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญออก เพื่อนำผลการพยากรณ์ที่ได้จากสมการลดรูป เปรียบเทียบกับผลการพยากรณ์ที่ได้จากสมการเต็มรูปที่สภาวะการทดลอง คือความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.06 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.35 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 25 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 5 โดยการพิจารณาสมการถดถอยที่มีความสมรูปกับข้อมูลนั้น จะพิจารณาค่าความผิดพลาดที่ต่ำก่อน แต่หากว่าค่านั้นไม่มีความแตกต่างกัน จะพิจารณาจากค่า Adjust-R Square ที่มีค่าสูงกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 5 ผลพยากรณ์ของสมการเต็มรูปเปรียบเทียบกับสมการลดรูป

รูปแบบสมการ (Model)		ค่าพยากรณ์ (Predicted, μm)	ค่าจริง (Actual, μm)	ค่าความคลาดเคลื่อน (% Error)	R-Sq%	R-Sq(pred)%
ค่าความ ขรุขระผิว (Ra)	สมการเต็มรูป (Full Model)	2.275	2.306	1.34	99.72	98.44
	สมการลดรูป (Reduced Model)	2.267	2.306	1.69	99.71	98.96

จากตารางที่ 5 พบว่าผลการพยากรณ์ที่ได้จากสมการเต็มรูปนั้น มีค่าความผิดพลาด (Error) ที่ต่ำกว่าผลการพยากรณ์ที่ได้จากสมการที่ลดรูป มีค่า Predicted R Square ต่ำกว่าผลการพยากรณ์ที่ได้จากสมการลดรูปแต่ก็เพียงเล็กน้อย งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สมการถดถอยเต็มรูปในการนำเสนอการพยากรณ์ความขรุขระผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ดังตารางที่ 6 และสมการที่ (2)

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความขรุขระผิวกับปัจจัยต่าง ๆ

General regression analysis : Ra versus Speed, Feed rate, Depth of cut, Overhang				
Coefficients				
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	2.3287	0.0168	138.48	0.000
Speed	-0.59358	0.00841	-70.60	0.000
Feed rate	0.11708	0.00841	13.93	0.000
Depth of cut	0.07917	0.00841	9.42	0.000
Overhang	0.10867	0.00841	12.92	0.000
Speed $\times$ Speed	0.0427	0.0126	3.39	0.004
Feed rate $\times$ Feed rate	0.0802	0.0126	6.36	0.000
Depth of cut $\times$ Depth of cut	0.0761	0.0126	6.03	0.000
Overhang $\times$ Overhang	0.0843	0.0126	6.69	0.000
Feed rate $\times$ Depth of cut	-0.0430	0.0146	-2.95	0.009
Depth of cut $\times$ Overhang	-0.0425	0.0146	-2.92	0.010
S = 0.0291263 R-Sq = 99.71% R-Sq(adj) = 99.53% R-Sq(pred) = 98.96%				

จากตารางที่ 6 จะได้สมการจำลองแบบลดรูปสำหรับการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว ดังสมการที่ (2)

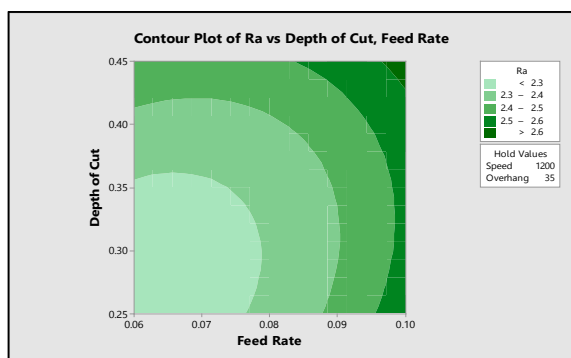
$$Ra = 2.3287 - 0.59358(\text{Speed}) + 0.11708(\text{Feed rate}) + 0.07917(\text{Depth of cut}) + 0.10867(\text{Overhang}) + 0.0427(\text{Speed} \times \text{Speed}) \\ + 0.0802(\text{Feed rate} \times \text{Feed rate}) + 0.0761(\text{Depth of cut} \times \text{Depth of cut}) + 0.0843(\text{Overhang} \times \text{Overhang}) - 0.0430 \\ (\text{Feed rate} \times \text{Depth of cut}) - 0.0425(\text{Depth of cut} \times \text{Overhang}) \quad (2)$$

ซึ่งสมการจะอยู่ในรูปแบบของ Regression Equation in Uncoded Units ซึ่งจะต้องเข้ารหัสของระดับแต่ละปัจจัย โดยค่าสูงสุดจะแทนด้วย 1 ค่าต่ำสุดจะแทนด้วย -1 และค่าตรงกลางจะแทนด้วย 0

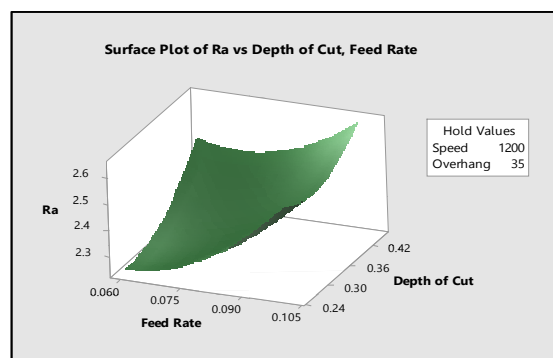
โดยที่ R_a คือ ความขรุขระผิว (ไมโครเมตร), Speed คือ ความเร็วรอบ (อยู่ในช่วง 800–1,700 รอบต่อนาที), Feed Rate คือ อัตราป้อน (อยู่ในช่วง 0.06–0.10 มิลลิเมตรต่อรอบ), Depth of Cut คือ ความลึกในการตัด (อยู่ในช่วง 0.25–0.45 มิลลิเมตร) และ Overhang คือ ความยาวค้ำมีด (อยู่ในช่วง 25–45 มิลลิเมตร)

3.1.4 การสร้างพื้นผิวตอบสนอง

จากสมการถดถอยของค่าความขรุขระผิวในกระบวนการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C สามารถนำมาสร้างแผนภาพพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface plot) เพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยระหว่าง อัตราป้อนกับความลึกในการตัด และความลึกในการตัดกับความยาวค้ำมีด ที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C โดยใช้โปรแกรม Minitab 17 ในการสร้างพื้นผิวผลตอบสนอง



(ก) แผนภาพโครงร่าง

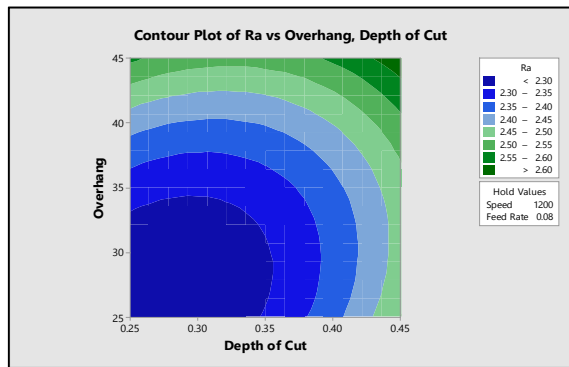


(ข) แผนภาพพื้นผิวผลตอบสนอง

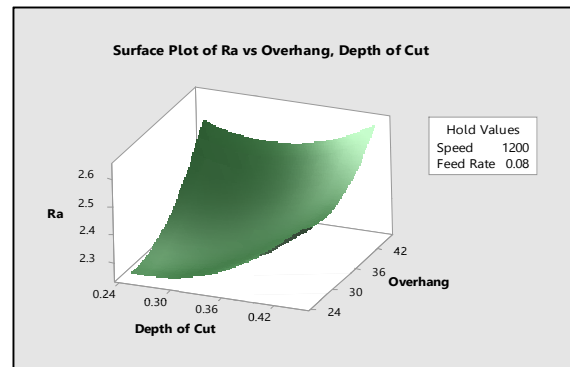
รูปที่ 5 แผนภาพโครงร่างและแผนภาพพื้นผิวผลตอบสนองระหว่างอัตราป้อนกับความลึกในการตัด

การวิเคราะห์ผลกระทบของอันตกริยา ระหว่างอัตราป้อนกับความลึกในการตัดในรูปที่ 5 พบว่าถ้าใช้อัตราป้อนเพิ่มขึ้น ความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น จะทำให้ความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นด้วย ในทางกลับกันถ้าใช้อัตราป้อนลดลง ความลึกในการตัดลดลง จะทำให้ความขรุขระผิวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์ผลกระทบของอันตกริยาระหว่างความลึกในการตัดกับความยาวค้ำมีดในรูปที่ 6 พบว่าถ้าใช้ความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น ความยาวค้ำมีดเพิ่มขึ้น จะทำให้ความขรุขระผิวเพิ่มสูงขึ้นด้วย ในทางกลับกันถ้าใช้ความลึกในการตัดที่ลดลง ความยาวค้ำมีดที่ลดลง จะทำให้ความขรุขระผิวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ



(ก) แผนภาพโครงร่าง



(ข) แผนภาพพื้นผิวผลตอบสนอง

รูปที่ 6 แผนภาพโครงร่างและแผนภาพพื้นผิวผลตอบสนอง

ระหว่างความลึกในการตัดกับความยาวด้ามมีด

และจากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่ามีปัจจัยร่วมที่ไม่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว ของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C อย่างมีนัยสำคัญ และจะไม่นำไปใช้คิดต่อในสมการถดถอย คือ ปัจจัยระหว่าง ความเร็วรอบกับอัตราป้อน ความเร็วรอบกับความลึกในการตัด ความเร็วรอบกับความยาวด้ามมีด และอัตราป้อนกับความยาวด้ามมีด

3.1.5 การหาค่าสถานะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว

การวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมในการกลึง โดยใช้โปรแกรม Minitab 17 ช่วยในการวิเคราะห์ เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์ โดยจะเลือกค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว (Ra) มีค่าน้อยที่สุด และพิจารณาค่าความพึงพอใจโดยรวมของสถานะที่เหมาะสม (Composite desirability) โดยมีค่าความพึงพอใจโดยรวมของสถานะที่เหมาะสมนั้น จะมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งค่าความพึงพอใจโดยรวมของสถานะที่เหมาะสมให้ค่าเป็น 0 แสดงว่าปัจจัยตัวใดตัวหนึ่ง หรือมากกว่าอยู่นอกขีดจำกัดที่ยอมรับได้ และถ้าค่าความพึงพอใจโดยรวมของสถานะที่เหมาะสมให้ค่าเป็น 1 แสดงว่าสถานะที่เหมาะสมนั้น ได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 7 ค่าสถานะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว

Response optimization						
Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Ra	Minimum	1.716	1.716	3.196	1	1
Global solution						
Speed = 1,700 Feed rate = 0.06 Depth of cut = 0.25 Overhang = 25						
Predicted response						
Ra = 1.6387 Desirability = 1.0000						
Composite desirability = 1.000						



รูปที่ 7 สถานะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C

ในการวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความขรุขระผิว จากตารางที่ 7 และรูปที่ 7 พบว่า ค่าความพึงพอใจโดยรวมของสถานะที่เหมาะสม มีค่าเท่ากับ 1.00 ซึ่งอยู่ในระดับความพึงพอใจสูงสุด และที่ระดับความพึงพอใจดังกล่าว ทำให้ได้สถานะที่เหมาะสมในกระบวนการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ที่ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวต่ำที่สุด คือ ความเร็วรอบ 1,700 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.06 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.25 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 25 มิลลิเมตร โดยมีค่าความขรุขระผิวเท่ากับ 1.6387 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าความขรุขระผิวสำเร็จ แบบการตัดละเอียดที่มีค่าความขรุขระผิวในช่วง 0.1–1.0 ไมโครเมตร ซึ่งสถานะที่เหมาะสมดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ R. S. Patil, S.M. Jadhav and S.Y. Gajjal [12] กล่าวคือ สถานะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูในคือ ความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร หรือค่าความขรุขระผิวจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ และลดอัตราป้อนกับความลึกในการตัด อีกทั้งนี้ หากพิจารณาในวัสดุชนิดเดียวกันและวิธีการออกแบบการทดลองเดียวกันพบว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ พงศ์ธร รักซ้อน และศิริประภา ติประดิษฐ์ [3] กล่าวคือ สถานะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูในคือ ความเร็วรอบ 300 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.10 มิลลิเมตร หรือค่าความขรุขระผิวจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบและลดอัตราป้อนกับความลึกในการตัด เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ หากพิจารณาประเด็นของอัตราป้อนและความลึกในการตัดที่ลดลงซึ่งมีผลต่อค่าความขรุขระผิวที่ลดลงนั้น พบว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ ศิริวัลย์ จันทร์พ่อง และสมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ [18] โดยประเด็นใหม่ที่พบเพิ่มเติมจากงานวิจัยนี้คือ ความยาวด้ามมีดที่ลดลงมีแนวโน้มให้ค่าความขรุขระผิวจะลดลงนั่นเอง

3.2 การทดลองเพื่อยืนยันผล

ในส่วนนี้เป็นการนำผลการทดลองมาพยากรณ์ความขรุขระผิว โดยสุ่มสถานะการกลึงคว้านรูในตามขอบเขตที่กำหนด แล้วนำผลที่ได้จากการพยากรณ์ (F_p) เปรียบเทียบค่าจริง (d_p) ที่ได้จากการทดลอง โดยกำหนดสถานะในการทดลอง 10 สถานะ วัดซ้ำ 3 ครั้ง และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความขรุขระผิวของค่าจริงกับค่าพยากรณ์มาคำนวณได้ดังตารางที่ 8 และรูปที่ 8

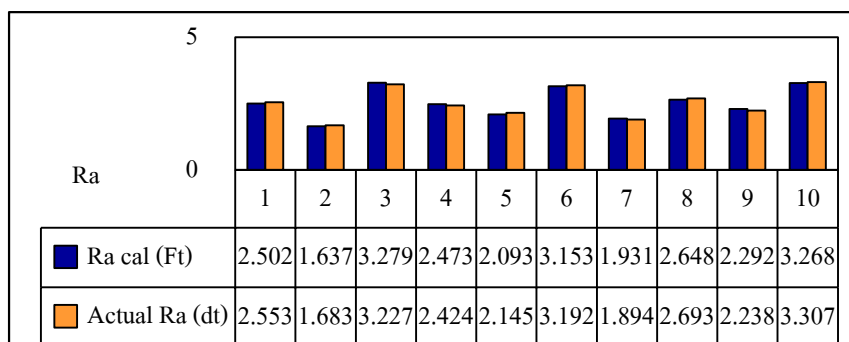
การหาค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ หรือ ค่า MAPE แสดงดังสมการที่ (3)

$$MAPE = \frac{\left(\sum_{t=1}^T \frac{|e_t|}{d_t} \right)}{n} \times 100 = \left(\frac{19.23}{10} \right) = 1.92\% \quad (3)$$

โดยที่ d_t คือ ค่าความขรุขระผิวจากการทดลอง (Actual Ra), F_t คือ ค่าความขรุขระผิวที่คำนวณจากสมการ (Ra Cal.) และ n คือ จำนวนสภาวะการทดลอง

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่คำนวณจากสมการถดถอย และค่าความขรุขระผิวที่วัดได้จริง

ที่	ความเร็วรอบ (Speed, rpm)	อัตราการป้อน (Feed rate, mm/rev)	ความลึกในการตัด (Depth of cut, mm)	ความยาวด้ามมีด (Overhang, mm)	ค่าความขรุขระผิว จากการคำนวณ Ra Cal. (F _t)	ค่าความขรุขระผิวจริง Actual Ra (d _t)	ความคลาดเคลื่อน (Error) [e _t = d _t - F _t]	MAPE $\frac{ e_t }{d_t} \times 100$
1	1,200	0.08	0.45	25	2.502	2.553	0.051	1.998
2	1,700	0.06	0.25	25	1.637	1.683	0.046	2.733
3	800	0.1	0.45	35	3.279	3.227	-0.052	1.611
4	1,200	0.06	0.25	45	2.473	2.424	-0.049	2.021
5	1,700	0.1	0.45	25	2.093	2.145	0.052	2.424
6	800	0.06	0.45	25	3.153	3.192	0.039	1.222
7	1,700	0.08	0.45	35	1.931	1.894	-0.037	1.954
8	1,200	0.1	0.45	25	2.648	2.693	0.045	1.671
9	1,200	0.06	0.35	35	2.292	2.238	-0.054	2.413
10	800	0.06	0.45	45	3.268	3.307	0.039	1.179
							รวม (Total)	19.23

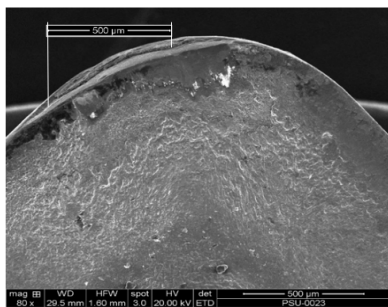


รูปที่ 8 การเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิว

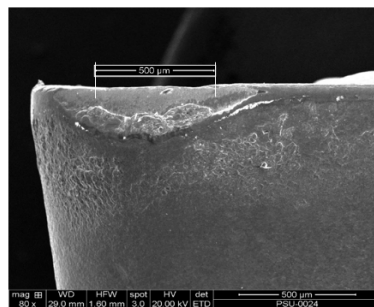
จากการทดลองเพื่อยืนยันผลเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการถดถอยกับค่าที่วัดจริงจากการทดลองโดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สำหรับวัดค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการทดลองหาค่า MAPE ของสมการความขรุขระผิวเท่ากับ 1.92 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ และค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

3.3 การสึกหรอของเม็ดมีด

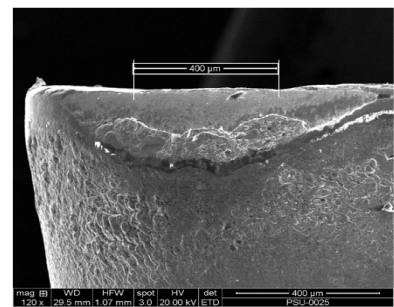
การวิเคราะห์พฤติกรรมการสึกหรอของเม็ดมีด (Tool wear) ของการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ที่สภาวะการกลึงที่เหมาะสมและใช้เวลากลึง 487 นาที แล้วนำเม็ดมีดที่ผ่านการกลึงไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเม็ดมีดจะมีลักษณะการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear, FW) เกิดจากการเสียดสีกันอย่างรุนแรงระหว่างชิ้นงานกับเม็ดมีดกลึง ส่งผลให้บริเวณคมตัดมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ทำให้โครงสร้างและคุณสมบัติทางกลของเม็ดมีดเปลี่ยนแปลงในทางลบ คือค่าความแข็งและความต้านทานต่อการหกรจะลดลง เป็นสาเหตุให้เกิดการสึกหรอ โดยขนาดของการสึกหรอกว้างกว่า 0.500 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยและการนำเสนอของสมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ [20] และทฤษฎีของเทย์เลอร์ [21] คือ การพิจารณาอายุการใช้งานของมีดตัดค่า FW จะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.500 มิลลิเมตร แต่หากค่า FW มากกว่า 0.500 มิลลิเมตร แสดงว่ามีดเกิดการสึกหรอ ซึ่งส่งผลค่าความขรุขระผิว โดยลักษณะการสึกหรอของเม็ดมีดแสดงดังรูปที่ 9 (ก) – (ค)



(ก) กำลังขยายที่ 80 x



(ข) กำลังขยายที่ 80 x



(ค) กำลังขยายที่ 120 x

รูปที่ 9 ลักษณะการสึกหรอของเม็ดมีด

4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคนด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง สำหรับการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C นั้น ทำให้ทราบแนวทางกำหนดปัจจัยในการกลึงคว้านรูในให้มีความเหมาะสมภายใต้ปัจจัยที่พิจารณาในระดับต่าง ๆ และได้สมการในการพยากรณ์ความขรุขระผิว รวมถึงทราบพฤติกรรมการสึกหรอของเม็ดมีด โดยงานวิจัยฉบับนี้สามารถสรุปผลการทดลองในประเด็นที่สำคัญและข้อเสนอแนะในประเด็นต่าง ๆ ได้ดังนี้

1) ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวมากที่สุด คือ ความเร็วรอบ รองลงมา คือ อัตราป้อน ความยาวด้ามมีด และความลึกในการตัด ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบสูง อัตราป้อนต่ำ ความลึกในการตัดต่ำ และความยาวด้ามมีดต่ำ จะส่งผลทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง ซึ่งประเด็นความยาวด้ามมีดถือเป็นประเด็นใหม่ที่พบเพิ่มเติมจากงานวิจัยนี้ที่วิเคราะห์กับการทดลองในวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C กล่าวคือ ถ้าความยาวด้ามมีดที่ลดลงจะมีแนวโน้มให้ค่าความขรุขระผิวลดลงด้วย

2) จากการทดลองทำให้ได้ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด ตัวแปรตามคือ ค่าความขรุขระผิว ซึ่งการนำผลการไปใช้ควรอยู่ในขอบเขตของการทดลอง และการใช้ผลการจะต้องแทนระดับของปัจจัยควบคุมในการทดลองให้เป็นรหัส

3) ผลการวิเคราะห์พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ความเร็วรอบ 1,700 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.25 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 25 มิลลิเมตร

4) จากการทดลองเพื่อยืนยันผลเปรียบเทียบค่าที่ได้จากผลการทดลองกับค่าที่วัดจริงจากการทดลอง โดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สำหรับวัดค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการทดลองหาค่า MAPE เท่ากับ 1.92 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้และค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

5) จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการสึกหรอของเม็ดมีด โดยการกลึงที่สภาวะที่เหมาะสม ใช้เวลาถึง 487 นาที พบว่าเม็ดมีดจะมีลักษณะการสึกหรอบนผิวหลัก

โดยข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้พบว่า ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปปรับใช้ในการทดลองกับชิ้นงานวัสดุเม็ดตัด หรือกระบวนการผลิตอื่น ๆ ได้ และควรศึกษาร่วมกับภาคอุตสาหกรรม เพื่อให้ได้แนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริง และควรพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ เพิ่มเติมเพื่อให้สมการมีความสามารถในการทำนายมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องจักรและสถานที่ประกอบการทำวิจัย และขอบคุณนายธนกรณ์ ดำราม และนายอนุชา ไพริน ที่มีส่วนช่วยในการทดลองในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] มนัส สติธิจิน, เหล็กกล้า (Steel), พิมพ์ครั้งที่ 4, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ, 2538.
- [2] มนัส ศรีสวัสดิ์, เฉลิมศักดิ์ ถาวรวัตร และ อรรถกร จันทน์ชนะ, “อิทธิพลของขนาดพื้นที่สัมผัสขอบคมตัดเม็ดมีด CBN ที่มีผลต่อความหยาบผิวในการกลึงเหล็ก AISI 1050,” วารสารวิชาการปทุมวัน, ปีที่ 25, ฉบับที่ 9, 2562, หน้า 1-12.
- [3] พงศ์ธร รักซ้อน และ ศิริประภา ดีประดิษฐ์, “การพยากรณ์ค่าความเรียบผิวในกระบวนการกลึง S45C ด้วยแผนแบบผิวตอบสนอง,” วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, 2562, หน้า 13-19.
- [4] S. Singh and R. Kumar, “Optimization of Process Parameters in Boring Operation: A Review,” Pramana Research Journal, Vol. 8, No. 8, 2018, pp. 498-502.

- [5] 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, Vol. 4, No. 6, 2014, pp. 647-655.
- [6] I.A. Choudhury and M.A. EI-Baradie, “Surface Roughness Prediction in the Turning of High-strength Steel by Factorial Design of Experiments,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 67, No.3, 2013, pp. 55-61.
- [7] C. Chennu, V. S. Nitish, A. S. Kumar, K. B. Narayana and J. Moghaveera, “Optimization of Parameters Affecting Surface Roughness and Hole Diameter in Boring Process,” International Journal of Research in Engineering and Technology, Vol. 5, No. 13, 2016, pp. 165-168.
- [8] A.M. Badadhe, S.Y. Bhave and L.G. Navale, “Optimization of Cutting Parameters in Boring Operation,” Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2013, pp. 10-15.
- [9] 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, Vol. 3 No. 8, 2014, pp. 59-63.
- [10] A. Sankar and D. Soumyalata, “Comparative Assessment of Carbide Insert and Cermet Insert on Surface Roughness in Boring of ASTM A48Grey Cast Iron,” International Journal of Advanced Mechanical Engineering, Vol. 6, No. 6, 2015, pp. 440-445.
- [11] S. Rohit and S.M. Jadhav, “Boring Parameters Optimization for Minimum Surface Roughness Using CNC Boring Machine with Passive Damping Material,” 2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT), India, 2017, pp. 300-303.
- [12] R. S. Patil, S.M. Jadhav and S.Y. Gajjal, “Improvement of Surface Roughness in Boring Operation using Viscoelastic Material Damper,” International Journal of Innovative Research in Technology, Vol. 3, No. 2, 2016, pp. 259-264.
- [13] 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, Vol. 2, No. 4, 2015, pp. 863-868.
- [14] J. Suteja, Y. Haryono, A. Harianto and E. Rinawiyanti, “Optimization of Boring Process Parameters in Manufacturing of Polyacetal Bushing using High Speed Steel,” The 1st International Conference on Automotive, Manufacturing, and Mechanical Engineering (IC-AMME 2018), 2019, pp. 1-7.

- [15] D. Vivek and K. Ramesh, "Optimization of the Cutting Responses in Boring Operation Using Response Surface Methodology," International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 3, No. 5, 2014, pp. 1739-1744.
- [16] 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, Vol. 69, No. 7, 2016, pp. 1443-1448.
- [17] สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์, ชาตรี หอมเขียว, จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล และ อภิชาล ทองมั่ง กำเนิดว่า, "การประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองในการหาค่าที่เหมาะสมและการพยากรณ์ความขรุขระผิวในการกลึงว้านรูในอะลูมิเนียม เกรด 2024 ด้วยมีดคาร์ไบด์," การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2562, กรุงเทพฯ, 2562, หน้า 184-190.
- [18] ศิริวัทย์ จันทรพงศ์ และ สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ, "การพยากรณ์ความขรุขระผิวในกระบวนการกลึงโดยการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง," การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2554, กรุงเทพฯ, 2554, หน้า 73-77.
- [19] จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล, ชาตรี หอมเขียว และ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์, "การพยากรณ์ความขรุขระผิวในการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 2024 โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง," การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2562, กรุงเทพฯ, 2562, หน้า 492-498.
- [20] สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ, วิศวกรรมการผลิตขั้นสูง, พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2561.
- [21] ปณัฏดา นิรนาทล้ำพงศ์, การสีกหรอในงานอุตสาหกรรม, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, 2545.