

## การพยากรณ์ค่าความเรียบผิวในกระบวนการกลึง S45C ด้วยแผนแบบผิวตอบสนอง

พงศ์ธร รักซ้อน<sup>\*1</sup> และ ศิริประภา ดีประดิษฐ์<sup>2</sup>

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา อ.พระนครศรีอยุธยา

จ.พระนครศรีอยุธยา 13000

Received: 18 June 2019; Revised: 19 September 2019; Accepted: 30 September 2019

### บทคัดย่อ

S45C เป็นเหล็กที่นิยมใช้กันอย่างมาก เนื่องจากถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความเรียบผิวมีค่าต่ำสุดและสร้างแบบจำลองทางสถิติเพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าความเรียบผิวในกระบวนการกลึง S45C โดยใช้แผนแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคน โดยมีปัจจัยควบคุมทั้งสิ้น 3 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อนและระยะป้อนลึก จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกลึง S45C ได้แก่ ความเร็วรอบเท่ากับ 300 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนเท่ากับ 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบและระยะป้อนลึก 0.10 มิลลิเมตรส่งผลทำให้ค่าความเรียบผิวมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.5477 ไมครอนและค่าความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 0.98911

**คำสำคัญ:** การออกแบบการทดลอง, พื้นผิวตอบสนอง, บล็อก-เบห์นเคน, กระบวนการกลึง, เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง, S45C

---

\* Corresponding author. E-mail: pongthornruksorn@gmail.com

<sup>1</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

<sup>2</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

## The Prediction of Surface Roughness in the S45C Turning Process by Using Response Surface Design

Pongthorn Ruksorn<sup>\*1</sup> and Siraprapha Deepradit<sup>2</sup>

Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University,  
Phranakhon Si Ayutthaya, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

Received: 18 June 2019; Revised: 19 September 2019; Accepted: 30 September 2019

### Abstract

S45C is increasing on demand because it has been applied in various fields. The objective of the research was to study appropriate setting of parameters to minimize the surface roughness and the statistical model for surface roughness prediction in the S45C turning process by using Box-Behnken experimental design. Three control factors were investigated including spindle speed, feed rate and depth of cut. The results indicated that the appropriate setting to minimize the surface roughness were spindle speed at 300 meters per minute, feed rate at 0.20 millimeter per round, depth of cut at 0.10 millimeter. The appropriate setting produced the surface roughness of 0.5477 micrometer and the composite desirability equaled 0.98911.

**Keywords:** Design of Experiment, Response Surface, Box-Behnken, Turning Process, Medium Carbon Steel, S45C

---

\* Corresponding author. E-mail: pongthornruksorn@gmail.com

1 Lecturer in Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University

2 Lecturer in Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมในปัจจุบันต่างให้ความสำคัญกับกระบวนการผลิตขึ้นรูปชิ้นส่วนด้วยการตัดเฉือนโลหะให้มีขนาดและความเรียบผิวตามรูปทรงที่ต้องการ โดยการกลึงเป็นกระบวนการกัดแต่งตัดเฉือนเนื้อโลหะที่มีรูปทรงกระบอก [1] ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกระบวนการกลึงเหล็กแต่ละชนิดให้ได้ตามขนาดและความเรียบผิวตามแบบงานที่กำหนดจะมีปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิวของเหล็ก ทั้งนี้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิวของเหล็ก อาทิเช่น ความเร็วรอบ อัตราการป้อน ระยะป้อนลึก เม็ดมีดและสารหล่อเย็น [2-5]

S45C จัดเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ดังรูปที่ 1 ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา [6-10] จะเห็นได้ว่า สามารถชุบแข็งได้ง่าย ทนทานต่อการเสียดสีและความล้าได้ดี มีความแข็งแรงสูง มีโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลเหมาะสำหรับทำชิ้นส่วนพื้นฐานได้หลายชนิด เช่น เฟลาข้อเหวี่ยง ข้อต่อลูกรีด แกนไฮดรอลิก เครื่องมือทางด้านการเกษตร งานเครื่องจักรกล รวมทั้งชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมรถยนต์และแม่พิมพ์ ซึ่งมีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลของ S45C เช่น Bo et al. (2012), Bo et al. (2014) และ Cao et al. (2010) ได้ทำการศึกษาวิธีการดัดแปลงพื้นผิวนาโนคริสตัลอัลตราโซนิก (Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification; UNSM) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของ S45C ได้แก่ ความแข็งแรง ทนทานต่อการเสียดสีและความล้าได้ดีขึ้น [6-8] ส่วน Kida et al. (2013) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับค่าความเค้นของ S45C จากการศึกษาพบว่า ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงจะส่งผลทำให้ค่าความเค้นมีค่าสูงขึ้น [9] นอกจากนี้ Sun et al. (2013) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลของ S45C โดยการเชื่อมด้วยเลเซอร์ จากผลการศึกษาพบว่า S45C โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลที่ทนต่อความร้อนจากการเสียดสีได้ดี [10]

S45C จึงเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างมาก จากงานวิจัยของ พงศ์ธร (2561) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิวในกระบวนการกลึง S45C ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความเรียบผิวในการกลึง S45C มี 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็ว

รอบ อัตราการป้อนและระยะป้อนลึก [11] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัย จุฬาลักษณ์และสุรสิทธิ์ (2560) ได้ใช้แผนแบบผิวตอบสนองแบบบล็อก-เบห์นเคนในหาสภาวะที่เหมาะสมและสร้างแบบจำลองทางสถิติเพื่อพยากรณ์ค่าความเรียบผิวในกระบวนการกลึงอะลูมิเนียม [12] ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาผลกระทบของปัจจัยดังกล่าวที่มีผลต่อความเรียบผิว (Surface Roughness; Ra) ในการกลึง S45C และสร้างตัวแบบจำลองทางสถิติของค่าความเรียบผิว โดยแผนแบบผิวตอบสนองแบบบล็อก-เบห์นเคน [13] รวมถึงการหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมของการกลึงที่ทำให้ค่าความเรียบผิวมีค่าต่ำที่สุด เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดระดับของปัจจัยในการกลึง S45C ที่มีความเหมาะสม



รูปที่ 1 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S45C

## 2. ระเบียบงานวิจัย

### 2.1 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ชิ้นงานที่ใช้สำหรับกลึงคือ S45C มีความแข็งแรงอยู่ช่วง 25-35 รอกเวลล์ซี ซึ่งทุกชิ้นงานตัวอย่างเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางที่มีคุณสมบัติทางโลหะวิทยาที่เหมือนกันที่มีความยาว 100 มิลลิเมตรและมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร

2. ทุกชิ้นงานตัวอย่างทำการกลึงปอกขึ้นนอก 3 มิลลิเมตร ระยะทำการกลึงปอก 50 มิลลิเมตร

3. เม็ดมีดที่ใช้ในการกลึง คือ เม็ดมีดเซอร์เมต รหัส TNGG160404R-C NS9530

4. ใช้เครื่องวัดความเรียบผิว รุ่น Mitutoyo sj-310 ในการวัดความเรียบผิว

## 2.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองกระบวนการกลึง S45C ที่มีความยาว 100 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร โดยทำการกลึงปอกขึ้นนอก 3 มิลลิเมตร ระยะทำการกลึงปอก 50 มิลลิเมตร ทั้งนี้งานวิจัยนี้ได้ใช้แผนแบบการทดลองด้วยแผนแบบผิวตอบสนอง (Response Surface Design) แบบบ็อก-เบห์นเคน (Box-Behnken) ทำการศึกษาปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ทั้งสิ้น 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบ (A) อัตราการป้อน (B) และระยะป้อนลึก (C) โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ค่าความเรียบผิวมีค่าต่ำสุดและสร้างแบบจำลองทางสถิติเพื่อใช้พยากรณ์ค่าความเรียบผิวของ S45C โดยทำการแบ่งระดับของปัจจัยออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ กลางและสูง มีการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางซึ่งทำซ้ำ จำนวน 5 การทดลอง มีรอบทำซ้ำ 3 รอบ ทำให้งานวิจัยนี้ใช้จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 51 ตัวอย่าง ดังสรุปปัจจัยและระดับของปัจจัยการทดลอง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในแผนแบบการทดลอง

| ปัจจัย | หน่วย           | ระดับ |      |      |
|--------|-----------------|-------|------|------|
|        |                 | ต่ำ   | กลาง | สูง  |
| A      | เมตรต่อนาที     | 150   | 225  | 300  |
| B      | มิลลิเมตรตอร์อบ | 0.20  | 0.25 | 0.30 |
| C      | มิลลิเมตร       | 0.1   | 0.2  | 0.3  |

## 2.3 ผลการทดลองและวิจารณ์

แผนแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคนในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ในการพยากรณ์สมการก่อนที่จะนำสมการไปใช้จะต้องทำการทดสอบข้อสมมติที่เกี่ยวข้องกับความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์การถดถอยและวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของสมการถดถอย [13-14] เพื่อทดสอบความเหมาะสมของสมการ โดยที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะสามารถทำได้และรูปแบบสมการจะเหมาะสม เมื่อข้อสมมติทั้ง 4 ประการนี้เป็นจริง นั่นคือ

1. ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ
2. ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับศูนย์
3. ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่

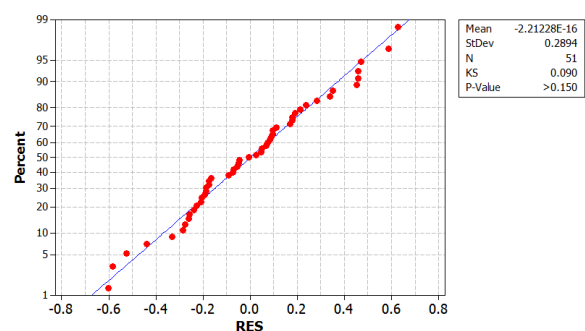
## 4. ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกัน

กรณีตรวจสอบข้อสมมติที่ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติจะใช้กราฟพล็อตความน่าจะเป็นปกติ โดยการทดสอบคอลโมโกรอฟสมิรโนฟ (Kolmogorov-Smirnov) ซึ่งมีสมมุติฐานดังนี้

$H_0$ : ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ

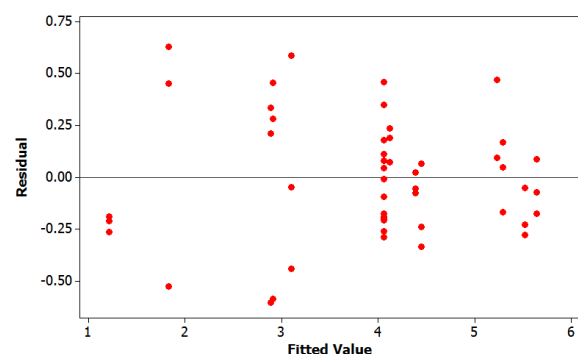
$H_1$ : ความคลาดเคลื่อนไม่มีการแจกแจงปกติ

ทั้งนี้จะปฏิเสธสมมุติฐานหลักก็ต่อเมื่อค่าพี (p-value) มีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 [15]



รูปที่ 2 กราฟพล็อตความน่าจะเป็นปกติของความคลาดเคลื่อนสำหรับค่าความเรียบผิว (Normal Probability Plot)

จากรูปที่ 2 กราฟพล็อตความน่าจะเป็นปกติพบว่า การทดสอบการแจกแจงปกติโดยการทดสอบคอลโมโกรอฟสมิรโนฟ ค่าพหุค่าเท่ากับ 0.150 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมุติฐานหลักได้ นอกจากนี้กราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงสามารถสรุปได้ว่า ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ



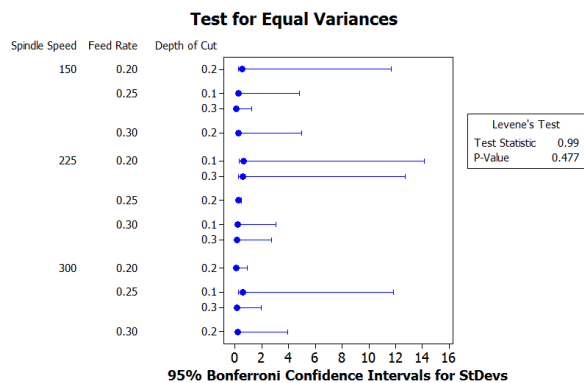
รูปที่ 3 กราฟความคลาดเคลื่อนและค่าประมาณสำหรับค่าความเรียบผิว

จากรูปที่ 3 พบว่า ความคลาดเคลื่อนมีการกระจายรอบเส้นศูนย์กราฟอย่างสมดุลและความกว้างของแถบค่อนข้างคงที่ แสดงว่า ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนค่อนข้างคงที่ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการตรวจสอบว่า ข้อสมมติที่ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่หรือไม่ โดยการทดสอบของเลวิน (Levene's Test) [16] ซึ่งมีสมมุติฐานดังนี้

$H_0$ : ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนคงที่

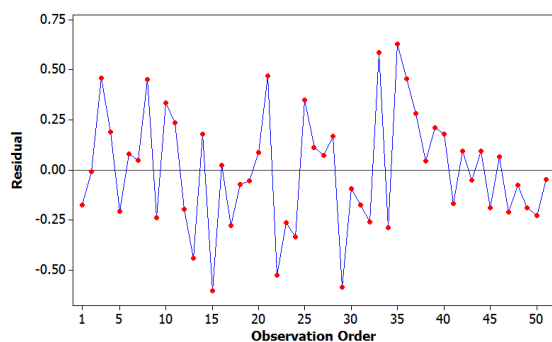
$H_1$ : ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนไม่คงที่

ทั้งนี้จะปฏิเสธสมมุติฐานหลักก็ต่อเมื่อค่าพหุคูณน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 [15]



รูปที่ 4 การทดสอบค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

การทดสอบค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนโดยการทดสอบของเลวินจากโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab พบว่า ค่าพหุคูณเท่ากับ 0.477 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมุติฐานหลัก นั่นคือ ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนคงที่ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 5 กราฟความคลาดเคลื่อนและลำดับเวลาที่เก็บข้อมูลสำหรับค่าความเรียบผิว

จากรูปที่ 5 กราฟความคลาดเคลื่อนและลำดับเวลาที่เก็บข้อมูลที่มีลักษณะไม่มีรูปแบบและกระจายอย่างสุ่ม แสดงว่าความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกัน

เมื่อทำการตรวจสอบข้อสมมติของความคลาดเคลื่อนของสมการแล้ว จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอย โดยได้กำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ 95% (ระดับนัยสำคัญ 0.05) และตั้งสมมุติฐานเกี่ยวกับการทดสอบภาวะพร่องสารรูป (Lack – of – Fit; LOF) ดังนี้

$H_0$ : สมการเหมาะสมแล้ว (There's no LOF)

$H_1$ : สมการขาดความเหมาะสม (There's LOF)

ทั้งนี้จะปฏิเสธสมมุติฐานหลักก็ต่อเมื่อค่าพหุคูณน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 [15]

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคน

| Source         | df | SS    | MS    | F      | P-value |
|----------------|----|-------|-------|--------|---------|
| Regression     | 9  | 72.52 | 8.06  | 78.88  | 0.000   |
| Linear         | 3  | 67.05 | 22.35 | 218.81 | 0.000   |
| Square         | 3  | 1.25  | 0.42  | 4.09   | 0.012   |
| Interaction    | 3  | 4.21  | 1.40  | 13.74  | 0.000   |
| Residual Error | 41 | 4.19  | 0.10  |        |         |
| Lack-of-Fit    | 3  | 0.69  | 0.23  | 2.50   | 0.074   |
| Pure Error     | 38 | 3.50  | 0.10  |        |         |
| Total          | 50 |       |       |        |         |

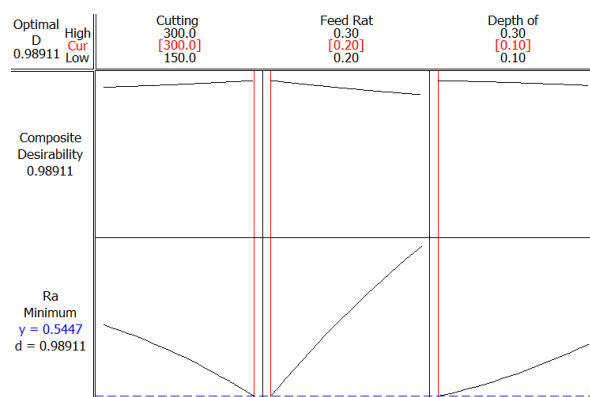
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากแผนแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคนในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า ค่าพหุคูณของ Lack-of-Fit มีค่าเท่ากับ 0.074 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมุติฐาน  $H_0$  นั่นคือ สมการมีความเหมาะสม ดังนั้นสมการของพื้นผิวตอบสนองของค่าความเรียบผิว คือ

$$\text{Surface Roughness} = -4.6439 - 0.0271A + 61.9942B + 3.5943C - (3.2026 \times 10^{-5}) A^2 - 88.1267B^2 + 13.9767C^2 + 0.1159AB + 0.0360AC - 59.6167BC \quad (1)$$

ค่าความเรียบผิวมีค่าการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of Determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 93.34% หมายความว่า ปัจจัยควบคุม (ความเร็วรอบ อัตราการป้อนและระยะป้อนลึก) สามารถอธิบายความผันแปรหรือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม (ค่าความเรียบผิว) ได้ร้อยละ 93.94

## 2.4 การเลือกสถานะที่เหมาะสม

ผู้วิจัยได้นำสมการดังกล่าวไปวิเคราะห์ด้วย Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab ดังรูปที่ 6 จะได้สถานะที่เหมาะสมที่จะทำให้ค่าความเรียบผิวมีค่าต่ำสุด คือ  $A = 300$  เมตรต่อนาที  $B = 0.20$  มิลลิเมตรตอร์อบ และ  $C = 0.10$  มิลลิเมตร ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าความเรียบผิวต่ำสุดเท่ากับ 0.5477 ไมครอนและค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบแทน (Composite Desirability) เท่ากับ 0.98911 ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบแทนมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้ามีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบแทนนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ [14]



รูปที่ 6 การวิเคราะห์ด้วย Response Optimizer

## 3. สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างตัวแบบจำลองทางสถิติของค่าความเรียบผิว โดยแผนแบบผิวตอบสนองแบบบล็อก-เบห์นเคน รวมถึงการหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมของการกลึงที่ทำให้ค่าความเรียบผิวมีค่าต่ำสุด ซึ่งระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่จะทำให้ค่าความเรียบผิวจากกระบวนการกลึง S45C คือ ความเร็วรอบเท่ากับ 300 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนเท่ากับ 0.20 มิลลิเมตรตอร์อบและระยะป้อนลึกเท่ากับ 0.10 มิลลิเมตร ส่งผลทำให้ค่าความ

เรียบผิวมีค่าเท่ากับ 0.5477 ไมครอนและค่าความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 0.98911

## 4. ข้อเสนอแนะ

ควรทำการศึกษาการสึกหรอของเม็ดเม็ดเซอร์เมตในกระบวนการกลึง S45C ซึ่งงานวิจัยของ Tiwari et al. (2018) [17] ได้ทำการศึกษาการสึกหรอของเม็ดเม็ดคาร์ไบด์ในกระบวนการกลึง S45C ที่ระดับของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราการป้อนและระยะป้อนลึกที่จะทำให้ S45C มีค่าความเรียบผิวที่ต่ำสุด ทั้งนี้เป็นแนวทางในการศึกษาในอนาคต

## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, *กระบวนการผลิต*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2559.
- [2] กัมพล เพชรคง, *ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม*. คุรุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต. คุรุศาสตร์อุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.
- [3] ธวัชชัย อาจปฐ, *การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็กหล่อเหนียว FCD450*. คุรุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต. คุรุศาสตร์อุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.
- [4] มณเฑียร พลศรีลาภ, *การศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็ก S50C*. คุรุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต. คุรุศาสตร์อุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2554.
- [5] I. Asilturk and H. Akkus, "Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method," *Measurement*, Vol. 44, pp.1697-1704, 2011.
- [6] B. Wu, P. Wang, Y. S. Pyoun, J. Zhang and R. Murakami, "Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on the fatigue behaviors of plasma-nitrided S45C steel," *Surface & Coating Technology*, Vol. 213, pp.271-277, 2012.

- [7] B. Wu, J. Zhanga, L. Zhanga, Y. S. Pyoun and R. Murakami, "Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on surface and fatigue properties of quenching and tempering S45C steel," *Applied Surface Science.*, Vol. 321, pp.318-330, 2014.
- [8] X. J. Cao, Y. S. Pyoun and R. Murakami, "Fatigue properties of a S45C steel subjected to ultrasonic nanocrystal surface modification," *Applied Surface Science.*, Vol. 256, pp.6297-6303, 2010.
- [9] K. Kida, E.C. Santos, M. Uryu, T. Handa, J.A. Rozwadowska and K. Saruwatari, "Changes in magnetic field intensities around fatigue crack tips of medium carbon low alloy steel (S45C, JIS)," *International Journal of Fatigue.*, Vol. 56, pp33-41, 2013.
- [10] Y. F. Sun, Y. Konishi, M. Kamai and H. Fujii, "Microstructure and mechanical properties of S45C steel prepared by laser-assisted friction stir welding," *Materials and Design.*, Vol. 47, pp.842-849, 2013.
- [11] พงศ์ธร รักซ้อน. "การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวในกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S45C," *ประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม อุตรดิตถ์ ประจำปี 2561*. 23-26 กรกฎาคม. โรงแรมสุนีย์ แกรนด์ โฮเทล แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์: 936-938, 2561.
- [12] จุฬาลักษณ์ โจนานุกูล และ สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์. "การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกลึงอะลูมิเนียมหล่อ กิ่งของแข็ง 5083 โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง." *การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ ประจำปี 2560*. 2-3 มีนาคม. โรงแรมบาร์โอส รีสอร์ท เขาใหญ่: 196-203, 2560.
- [13] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, *การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลองพิมพ์ครั้งที่ 1*. กรุงเทพฯ: บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2551.
- [14] D.C. Montgomery, 7th ed., *Design and Analysis of Experiment*. New York: John Wiley & Sons, 2009.
- [15] D.C. Montgomery, G.C. Runger and N.F. Hubele, 5th ed., *Engineering Statistics*. New York: John Wiley & Sons, 2012.
- [16] ดวงพร หัซชะวณิช, "การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนชนิดที่ 1 และอำนาจการทดสอบของสถิติทดสอบความเป็นเอกพันธ์ของความแปรปรวน," *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, ปีที่ 23 (ฉบับ 1), หน้า 17-28, 2557.
- [17] R. Tiwari, D. Das, A. Sahoo, R. Kumar, R. Das and B. Routara, "Experimental investigation on surface roughness and tool in hard turning JIS S45C steel," *Materials Today.*, Proceedings 5, pp. 24535-24540, 2018.