



การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดสำหรับกระบวนการกลึงซีเอ็นซีด้วยอัตราส่วนแรงตัด

IN-PROCESS PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS FOR CNC TURNING PROCESS BY USING THE CUTTING FORCE RATIO

สมเกียรติ ตั้งจิตสัจเจริญ, ศักดิ์ดา ศรีอนุศาสตร์, ดวงตา ละอัยคดี

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเสนอสมการการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดในกระบวนการกลึง โดยการประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงตัดเพื่อใช้กับเครื่องจักรกลอัจฉริยะให้เป็นประโยชน์มากยิ่งขึ้น สมการจากงานวิจัยนี้ได้พัฒนามาจากการทดลองโดยอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลที่ประกอบด้วยตัวแปรห้าตัวแปร ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อน รัศมีจุกมิดตัด ความลึกในการตัด และอัตราส่วนแรงตัด ค่าสัมประสิทธิ์ในฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ทั้งนี้งานวิจัยยังสร้างขอบเขตการพยากรณ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในการพยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงาน จากผลการนำไปประยุกต์ใช้พบว่าสมการที่สร้างขึ้นสามารถพยากรณ์ความขรุขระผิวขณะตัดได้ออกมาอย่างแม่นยำและเป็นที่ยอมรับได้

คำสำคัญ: อัตราส่วนแรงตัด, การกลึง, ความขรุขระผิวชิ้นงาน, การพยากรณ์, การตรวจติดตาม

Abstract

In order to realize the intelligent machine tools, the objective of this research is to propose a practical model to predict the in-process surface roughness during the turning process by using the cutting force ratio. The proposed in-process surface roughness model is developed based on the experimentally obtained results by employing the exponential function with five factors of the cutting speed, the feed rate, the tool nose radius, the depth of cut, and the cutting force ratio. The multiple regression analysis is utilized to calculate the regression coefficients with the use of the least square method. The prediction interval of the in-process surface roughness model has been also presented to monitor and control the in-process predicted surface roughness at 95% confident level. It is proved by the cutting tests that the proposed and developed in-process surface roughness model can be used to predict the in-process surface roughness by utilizing the cutting force ratio with the highly acceptable prediction accuracy.

Keywords: Cutting force ratio, Turning, Surface roughness, Prediction, Monitoring

บทนำ

กระบวนการกลึงนั้นเป็นหนึ่งในกระบวนการการผลิตที่สำคัญและใช้กันมากในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ปัญหาความขรุขระผิวชิ้นงานนั้นเป็นปัญหาสำคัญประการหนึ่งของกระบวนการกลึง การวัดค่าความขรุขระผิวนี้ไม่สามารถทำได้ทันทีขณะตัดอยู่และมีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน เนื่องจากเครื่องจักรกลอัจฉริยะมีบทบาทในอนาคตอันใกล้ ด้วยเหตุนี้การพัฒนาระบบที่สามารถตรวจติดตามและประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาระบบนั้นขึ้นมา

มีงานวิจัยอื่นๆ ที่พยายามพัฒนาสมการความขรุขระผิวชิ้นงาน [1-2] หรือทำการศึกษาและค้นคว้าสมการเกี่ยวกับผลกระทบจากเงื่อนไขการตัด [3-4] นอกจากนี้เทคนิคการออกแบบการทดลองยังถูกนำมาใช้ร่วมกับระบบเซนเซอร์เพื่อพัฒนาสมการความขรุขระผิวชิ้นงาน [5-6] แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวต้องทดสอบกับเงื่อนไขการตัดที่หลากหลายเพื่อต้องการการจัดเก็บข้อมูลที่เหมาะสม ปัจจุบันเซนเซอร์ได้ถูกนำมาใช้เพื่อพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน [7-9] ในระบบการตรวจติดตามหนึ่งในนั้นคือ เซนเซอร์วัดแรงซึ่งใช้กันแพร่หลายในเครื่องจักรอัจฉริยะ โดยเซนเซอร์แรงจะสร้างสัญญาณตอบสนองต่อความขรุขระผิวชิ้นงานได้ [10-13] โดยมีการศึกษาว่าแรงป้อนเป็นแรงที่มีผลกระทบมากที่สุดต่อความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะที่แรงตัดหลักนั้นเกิดจากเงื่อนไขการตัดเท่านั้น [14-17] ด้วยเหตุนี้แรงตัดหลักและแรงป้อนจึงถูกนำมาใช้เพื่อทำการประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะกลึงชิ้นงาน อย่างไรก็ตามแรงตัดนั้นอาจแปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันไป อัตราส่วนของ

แรงตัดจึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน เนื่องจากอัตราส่วนแรงตัดนั้นถูกสันนิษฐานว่าสามารถคำนวณความขรุขระผิวชิ้นงานได้โดยไม่แปรเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขการตัด โดยอัตราส่วนแรงตัดนี้ประกอบด้วยแรงตัดหลัก (F_2) และแรงป้อน (F_y) ซึ่งสามารถใช้คำนวณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานได้ในขณะตัด เป็นที่ทราบกันดีว่าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานนั้นขึ้นกับเงื่อนไขการตัดอันได้แก่ อัตราการป้อน ความเร็วตัดและความลึกในการตัด รวมถึงขนาดรัศมีงูมมิด ทำให้นักศึกษาว่าตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันอย่างไรต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน ดังนั้นตัวแปรข้างต้นในเงื่อนไขการตัดจะถูกนำมาคำนวณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ การเสนอวิธีการที่จะประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดโดยใช้ค่าอัตราส่วนแรงตัดที่วัดได้ในขณะตัดจริง โดยทำการประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดและค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นที่นิยมใช้ สมการค่าความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดนี้ถูกพัฒนาภายใต้เงื่อนไขการตัดที่หลากหลายโดยนำฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลมาใช้อธิบายสมการ และใช้สมการถดถอยพหุคูณในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

1. การพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะกลึง

การตรวจติดตามอัตราส่วนแรงตัด

เป็นที่สังเกตว่าแรงตัดมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะการตัด และแรงตัดนี้เองเป็นปัจจัยสำคัญต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน แรงตัดที่สนใจในงานวิจัยมี 2 ประเภท คือ แรงป้อนหรือแรงป้อน

มีด (feed force) ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวโดยตรง ส่วนแรงตัดอีกประเภท คือ แรงตัดหลัก ซึ่งมีค่าแปรผันกับเงื่อนไขการตัด วัสดุชิ้นงานและปริมาณเศษโลหะหรือการสึกหรอของมีดตัด ด้วยเหตุนี้การประมาณค่าความขรุขระผิวจากแรงนั้นต้องทำการพิจารณาโดยตัดลวดอิทธิพลจากตัวแปรที่มีผลต่อแรงตัดจากสภาวะการตัดออกไป เพื่อให้สามารถประมาณค่าความขรุขระผิวได้แม่นยำมากขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะกำหนดสัญลักษณ์แรงป้อนด้วยสัญลักษณ์ F_y ส่วนแรงตัดหลักนั้นจะใช้สัญลักษณ์แทน F_z คือ ส่วนอัตราส่วนแรงตัดที่สนใจนั้นจะแสดงอยู่ในรูปของ $\left(\frac{F_y}{F_z}\right)$ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญหนึ่งซึ่งใช้ประมาณค่าความขรุขระผิวขณะตัดชิ้นงาน โดยคาดว่าอัตราส่วนแรงตัดนี้จะสามารถใช้พยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงานที่กำลังตัดได้ แม้ว่าค่าสภาวะการตัดจะแปรเปลี่ยนไปก็ตาม

ความสัมพันธ์ของสภาวะการตัด แรงตัด และความขรุขระผิวของชิ้นงาน

เป็นที่ทราบกันดีว่าในกระบวนการกลึงนั้น ปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิว คือ เงื่อนไขการตัดซึ่งได้แก่ อัตราป้อน ความเร็วตัด ความลึกในการตัด และรัศมีจุมุกมีดตัด [18] ค่าอัตราป้อนและรัศมีจุมุกมีดนั้นสามารถวัดค่าได้ง่ายจึงมักจะนำมาใช้อ้างอิงถึงค่าความขรุขระผิวได้โดยตรงตามทฤษฎี ค่ารัศมีจุมุกมีดตัดที่ใหญ่จะให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่น้อย แต่หากให้อัตราการป้อนมีค่าสูงค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่าสูงขึ้น

ความขรุขระผิวชิ้นงานที่ดีจะต้องมีรอยร่องลึกจากกระบวนการกลึงบางและไม่ลึกนัก หากพิจารณาถึงแรงตัดแล้ว แรงตัดจะส่งผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัด การสั่นนี้จะทำให้ความขรุขระผิวชิ้นงานออกมาไม่ดีเท่าที่ควร โดยทั่วไปแล้วแรงตัดจะเพิ่มขึ้นหากเพิ่มค่าอัตรา

ป้อนและความลึกในการตัด แต่ในทางกลับกัน หากเพิ่มความเร็วตัดจะได้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ดีขึ้นเนื่องจากความเร็วตัดที่สูงจะทำให้เกิดอุณหภูมิในการตัดชิ้นงานสูงขึ้น อุณหภูมินี้ทำให้วัสดุของชิ้นงานอ่อนตัวลงและตัดได้ง่ายขึ้น เป็นผลทำให้ผิวสำเร็จของงานมีความขรุขระผิวน้อย

เนื่องจากปัจจัยข้างต้นที่กล่าวล้วนมีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิว จึงควรจะหาความสัมพันธ์ของปัจจัยข้างต้นต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงานด้วย เพื่อที่จะนำค่าพารามิเตอร์มาประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดได้แม่นยำขึ้น

สมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัด

จากทฤษฎีพบว่าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานแสดงความสัมพันธ์ต่ออัตราป้อนและรัศมีจุมุกมีดในลักษณะของฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลมาใช้เพื่อพัฒนาสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัด โดยจัดให้ภายในสมการประกอบด้วยค่าอัตราส่วนแรงตัดและพารามิเตอร์อื่นๆ จากเงื่อนไขการตัดที่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยสามารถจัดรูปแบบของสมการออกมาได้ดังนี้

$$R_a = C_1 (V)^{a_1} (f)^{a_2} (R_n)^{a_3} (D)^{a_4} \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{a_5} \quad (1)$$

$$R_z = C_2 (V)^{a_6} (f)^{a_7} (R_n)^{a_8} (D)^{a_9} \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{a_{10}} \quad (2)$$

โดยกำหนดให้ R_a คือ ความขรุขระเฉลี่ยของผิวชิ้นงานตัด ส่วน R_z คือ ความขรุขระผิวสูงสุดของผิวชิ้นงานตัด V คือ ความเร็วตัด f คือ อัตราป้อน R_n คือ ค่ารัศมีจุมุกมีดตัด D คือ ความลึกตัดและ $\left(\frac{F_y}{F_z}\right)$ คือ อัตราส่วนแรงตัด โดยมีค่า $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}$, และ

C_1 และ C_2 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยพหุคูณ

สมการทั้งสองสมการข้างต้น (1) และ (2) ยังไม่เป็นสมการที่อยู่ในรูปแบบของสมการเส้นตรง จึงต้องทำการจัดรูปแบบของสมการให้เป็นแบบเส้นตรงพหุคูณโดยใช้ลอการิทึมมาใช้ในการแปลงรูปสมการได้ดังนี้

$$\ln R_a = a_1 \ln V + a_2 \ln f + a_3 \ln R_n + a_4 \ln D + a_5 \ln \left(\frac{F_y}{F_z} \right) \quad (3)$$

$$\ln R_z = a_6 \ln V + a_7 \ln f + a_8 \ln R_n + a_9 \ln D + a_{10} \ln \left(\frac{F_y}{F_z} \right) \quad (4)$$

จากการวิเคราะห์ด้วยการถดถอยพหุคูณสมการข้างต้นสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการถดถอยพหุคูณได้ดังนี้

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 \quad (5)$$

$$y_2 = \beta_6 + \beta_7 x_1 + \beta_8 x_2 + \beta_9 x_3 + \beta_{10} x_4 + \beta_{11} x_5 \quad (6)$$

โดยตัวแปร y_1 และ y_2 เป็นตัวแทนของค่า $\ln R_n$ และ $\ln R_z$ ส่วนตัวแปร x_1, x_2, x_3, x_4 , และ x_5 เป็นตัวแปรของการแปลงรูปลอการิทึม $\ln V, \ln f, \ln R_n, \ln D$ และ $\ln \left(\frac{F_y}{F_z} \right)$ โดย β_0 และ β_6 เป็นค่าตัดแกน y แสดงค่า y_1 และ y_2 เมื่อตัวแปรในสมการถดถอยทั้งหมดมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนค่า $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6 + \beta_7 + \beta_8 + \beta_9 + \beta_{10}$ และ β_{11} เป็นสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยพหุคูณ

ในขั้นสุดท้ายได้ทำการคำนวณขอบเขตการพยากรณ์ (Prediction Interval, PI) โดยตั้งระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เพื่อสร้างขอบเขตความเป็นไปได้ที่ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากการใช้งานจริงจะตกอยู่ในช่วงขอบเขตนั้น

2. ขั้นตอนการทดลองและเงื่อนไขการตัด

กระบวนการการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดอัตราส่วนแรงตัดและความขรุขระผิวชิ้นงาน

การจะตั้งสมการถดถอยที่ (5) และ (6) ได้นั้น ต้องมีผลการทดลองที่เพียงพอ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองกับเครื่องกลึงซีเอ็นซี การทดลองนี้จะอยู่ภายใต้สถานการณ์ตัดแบบแห้ง โดยใช้มีดตัด 2 ชนิด คือ มีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว TPMR 160304 HQ และ TPMR 160308 HQ โดยเคลือบผิวเกรด CVD ประกอบด้วย 3 ชั้นหลัก คือ TiN, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, TiCN เป็นเม็ดมีดตัดทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีมุมคายเศษโลหะเป็นบวกรขนาด 11 องศา ซึ่งคุณสมบัติของมีดตัดแบบนี้ คือ แรงตัดจะน้อยเนื่องจากเศษโลหะสามารถไหลออกได้ดี จึงทำให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบสูง มีดตัดทั้งสองแตกต่างกันที่เม็ดมีดตัด TPMR 160304 HQ และ TPMR 160308 HQ จะมีขนาดรัศมีจุมกมีดตัด คือ 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ และใช้ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1 โดยได้ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เข้าที่ป้อมมีดกลึงซีเอ็นซีเพื่อวัดแรงตัดดังแสดงในภาพที่ 1

ขั้นตอนการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ยึดจับด้วยเครื่องกลึง ยันศูนย์ชิ้นงาน แล้วทำการปอกผิวนอก 1 มิลลิเมตร (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานลดลง 2 มิลลิเมตร) เพื่อให้ขนาดของชิ้นงานเท่ากัน
2. เมื่อขึ้นชิ้นงานเรียบร้อยแล้วจึงทำการเขียนโปรแกรมลงบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อตัดชิ้นงานให้ได้ปริมาตรตามที่ต้องการ
3. ทำการกลึงปอกผิวด้วยเงื่อนไขการตัดที่จะทำการทดลอง ตามตารางที่ 1

4. วัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ปริมาตรเริ่มต้น (0 ลูกบาศก์เซนติเมตร) และทุกๆ การตัดที่ปริมาตร 500, 1000, 1500, 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

5. เมื่อกลึงชิ้นงานจนถึงปริมาตร 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรหรือมีดตัดสึกหรือจนไม่สามารถใช้งานได้ก็จะทำการเปลี่ยนมีดตัดและทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดต่อไป

6. เขียนกราฟระหว่างปริมาตรการตัดกับผลตอบต่างๆ คือ ความสึกหรอของมีดตัด ความขรุขระผิวชิ้นงานแรงในการตัด ที่เงื่อนไขการทดลองต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อตัดด้วยเงื่อนไขต่างๆ

7. จากกราฟที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรว่ามีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานหรือไม่ เพื่อพิจารณาเลือกเป็นตัวแปรสำหรับใช้ในสมการวิธีวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

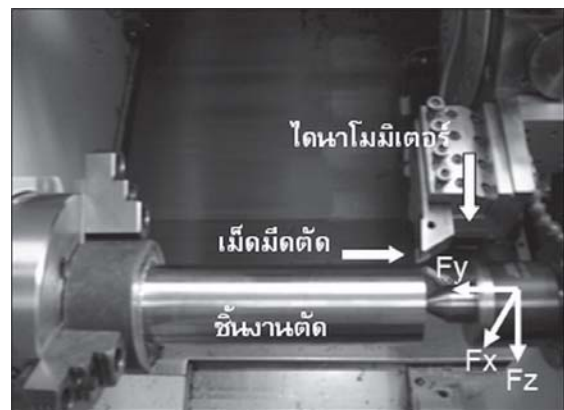
8. สร้างรูปแบบสมการการพยากรณ์ด้วยวิธีวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression) เพื่อใช้เป็นสมการต้นแบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน

9. เมื่อได้สมการต้นแบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน ทำการหาค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจากสมการ โดยการใส่ค่าของเงื่อนไขการตัดเข้าไป

10. นำค่าที่ได้จากสมการต้นแบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวมาเปรียบเทียบกับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลอง

11. ส่วนต่างของค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการต้นแบบการพยากรณ์กับค่าที่ได้จากการทดลอง จะนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของสมการการพยากรณ์

12. สรุปผลเกี่ยวกับความสามารถของสมการต้นแบบการพยากรณ์และแนวทางปรับปรุง



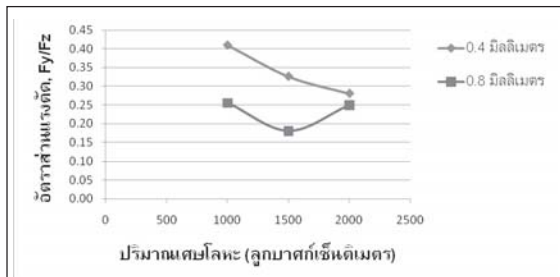
ภาพที่ 1 การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เข้าที่ป้อมมีดกลึงซีเอ็นซีเพื่อวัดแรงตัด

ตารางที่ 1 เงื่อนไขในการตัดสำหรับการทดลอง

ชนิดของมีดตัด	คาร์ไบด์เคลือบผิว TPMR 160304 HQ	คาร์ไบด์เคลือบผิว TPMR 160308 HQ
รัศมีจุ่มกมีดตัด (มิลลิเมตร)	0.4	0.8
อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)	0.15, 0.18	0.15, 0.18
ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	150, 250	150, 250
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.25, 0.5	0.15, 0.25
ปริมาณเศษโลหะ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	0, 500, 1000, 2000	0, 500, 1000, 2000, 7.

ผลการวิจัย

ในการพัฒนาเครื่องกลึงซีเอ็นซีให้ทำงานได้อย่างเครื่องจักรกลอัจฉริยะจำเป็นต้องมีการตรวจสอบและพัฒนาหาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับเงื่อนไขการตัดซึ่งความสัมพันธ์นี้เราจะได้ผลมาจากการทดลอง ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณเศษโลหะที่เพิ่มขึ้นกับอัตราส่วนแรงตัดที่ลดลง จากภาพแสดงว่า แรงตัดหลักมีค่าสูงขึ้นมากกว่าแรงป้อนขณะที่ปริมาณเศษโลหะหรือความลึกตัดของเครื่องมือตัดเพิ่มขึ้น



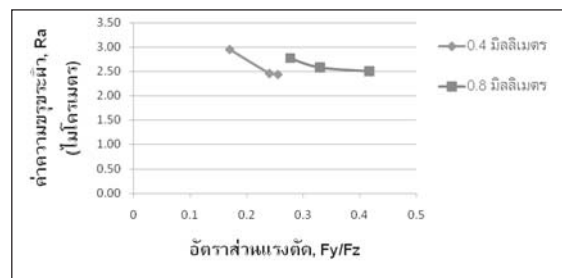
ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงตัด และปริมาณเศษโลหะ ที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีจุมุกมีดตัด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร และความลึกตัด 0.25 มิลลิเมตร

จากผลการทดลอง อัตราส่วนแรงตัดของผลการทดลองที่ใช้เครื่องมือตัดที่มีรัศมีจุมุกมีดตัดเท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร จะมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนแรงตัดที่ใช้กับเครื่องมือตัดรัศมีจุมุกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร ทั้งนี้เป็นเพราะว่าแรงป้อนมีขนาดมากกว่าแรงตัดหลักเมื่อรัศมีจุมุกมีดตัดมีขนาดเล็กลง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่ารัศมีจุมุกมีดตัดที่ใหญ่จะให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ดีกว่า

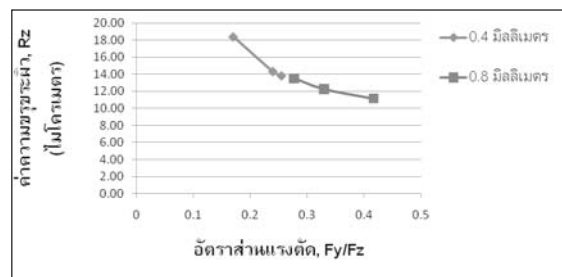
อย่างไรก็ตาม จากภาพที่ 2 จะเห็นว่าอัตราส่วนแรงตัดของมีดตัดที่มีรัศมีจุมุกมีดตัด 0.8

มิลลิเมตรจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อตัดเหล็กไปเป็นปริมาณ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาณ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้งนี้เป็นเพราะรัศมีจุมุกมีดตัดมีค่าสูงขึ้นจากการสึกหรอ ทำให้ความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าที่ดีขึ้น

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนแรงตัดของมีดตัดที่มีรัศมีจุมุกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร ในภาพที่ 2 จะพบว่าค่าอัตราส่วนของแรงตัดลดลงเมื่อปริมาณเศษโลหะเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีดตัดเกิดการสึกหรอ จึงทำให้แรงตัดหลักมีขนาดมากกว่าแรงป้อน จึงส่งผลให้ความขรุขระผิวชิ้นงานมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของแรงตัดมีค่าน้อยลงซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 3



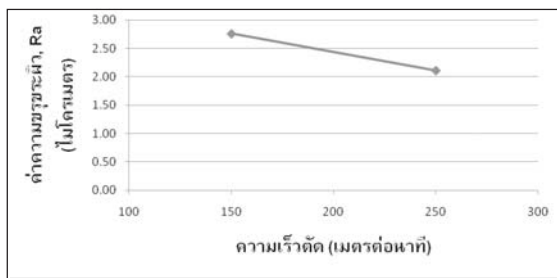
(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย



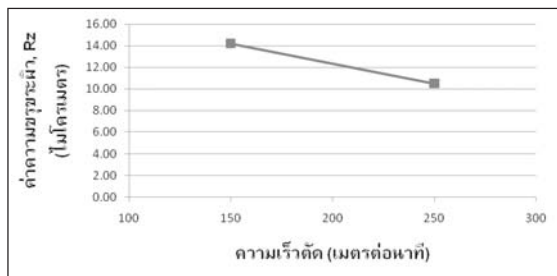
(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและอัตราส่วนแรงตัด ที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีจุมุกมีดตัด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร และความลึกตัด 0.25 มิลลิเมตร

ในภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนแรงตัดมีผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน ซึ่งจุดนี้สามารถนำมาใช้อ้างอิงเพื่อทำการประมาณค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานขณะตัดได้ สังเกตได้ว่ายิ่งค่าอัตราส่วนแรงตัดสูงขึ้น ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุดจะมีค่าน้อยลง นั่นแสดงว่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นขณะที่ปริมาณเศษโลหะและมีดตัดสึกหรอมากขึ้น



(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย



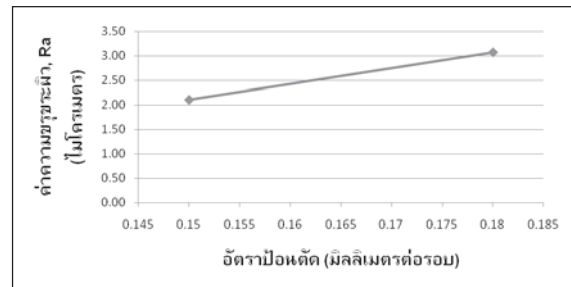
(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและความเร็วตัด ที่อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีปลายจุกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ปริมาณเศษโลหะ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

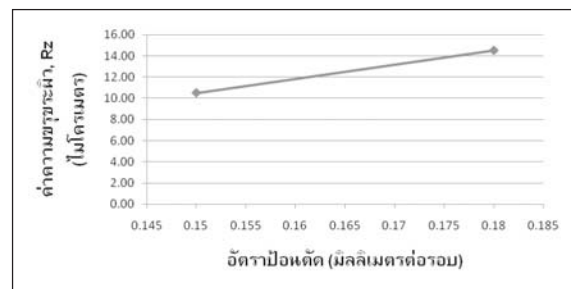
ภาพที่ 4 ได้แสดงอิทธิพลของความเร็วตัดเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ความขรุขระผิวชิ้นงานจะลดลงเนื่องจากความเร็วตัดที่สูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิในการตัดสูงขึ้นด้วย อุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะ

ทำให้วัสดุอ่อนนุ่มขึ้นและตัดได้ง่ายขึ้น ด้วยเหตุนี้เองพื้นผิวสำเร็จจึงออกมาเรียบมากขึ้น

อัตราส่วนแรงตัดจึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วตัดสูงขึ้นจากวัสดุทำงานมีความอ่อนนุ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันผิวสำเร็จของชิ้นงานก็ดีขึ้นด้วยเมื่ออัตราส่วนแรงตัดลดลง



(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย

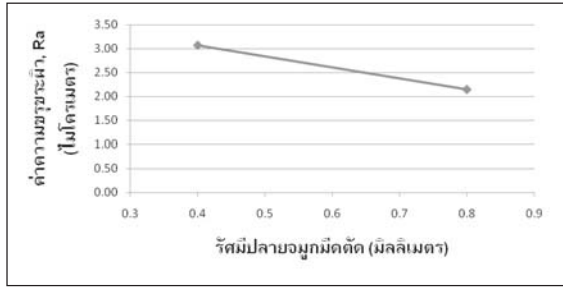


(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

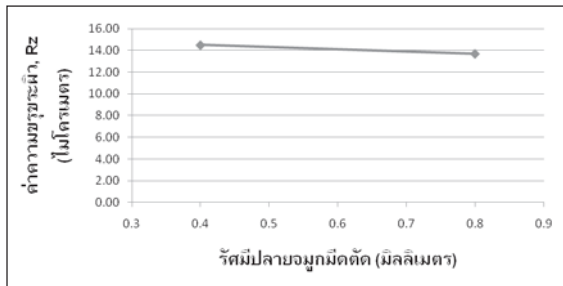
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและอัตราป้อนตัด ที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที รัศมีปลายจุกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ปริมาณเศษโลหะ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ภาพที่ 5 แสดงค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นโดยแปรผันตามอัตราป้อนที่เพิ่มขึ้นเช่นกันสอดคล้องกับทฤษฎีความขรุขระผิวชิ้นงานที่ว่า อัตราการป้อนที่มากขึ้นจะทำให้เกิดรอยตัดจากการป้อนที่ผิวของชิ้นงานสูงขึ้น ทำให้ความขรุขระผิวแย่ลง อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ค่าความขรุขระผิวมี

ค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราป้อน คือ อัตราป้อนที่เร็วขึ้นจะทำให้เกิดแรงตัดที่สูงขึ้น แรงตัดนี้เองเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสั่นของมีดตัดทำให้ผิวชิ้นงานออกมาแย่งลงเช่นกัน



(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย



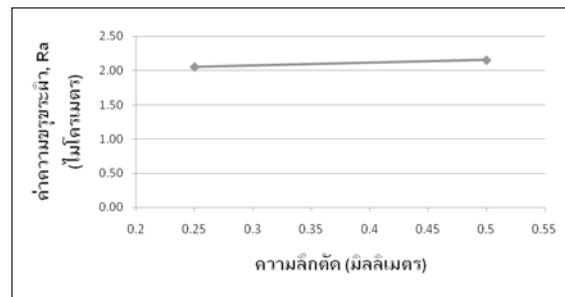
(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและรัศมีจุมักมีดตัด ที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ปริมาณเศษโลหะ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

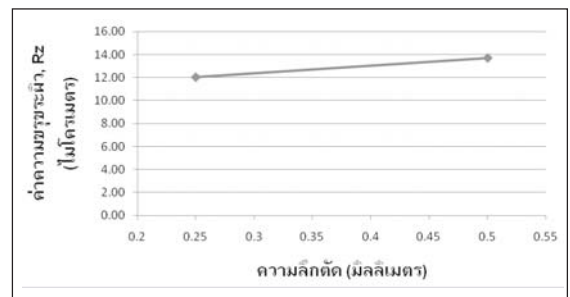
ส่วนภาพที่ 6 แสดงค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดที่เพิ่มขึ้นจากการทดลองที่ตอบสนองต่อค่ารัศมีจุมักมีดที่เพิ่มขึ้น โดยสอดคล้องกับทฤษฎีความขรุขระผิวชิ้นงานที่ว่ารัศมีจุมักมีดช่วยลดรอยบนผิวชิ้นงานจากการป้อนมีดตัด ทำให้ความขรุขระผิวลดลง อีกเหตุผลหนึ่งคือพื้นที่สัมผัสของรัศมีจุมักมีดกับชิ้นงาน ช่วยลดความร้อนที่เกิด

บริเวณขอบมีดตัดทำให้การสึกหรอของชิ้นงานเกิดขึ้น

อีกปัจจัยหนึ่งมีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานคือความลึกตัดตั้งภาพที่ 7 เห็นได้ว่าชิ้นงานจะมีความขรุขระผิวชิ้นงานที่ดีเมื่อใช้ค่าความลึกตัดเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร เพราะความลึกตัดที่มากขึ้นจะทำให้เกิดแรงตัดที่สูงขึ้นด้วยส่งผลให้ความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามมาเป็นที่ทราบกันดีว่าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสามารถปรับให้ดีขึ้นได้โดยการลดค่าความลึกตัด



(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย



(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและความลึกตัด ที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีจุมักมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร ปริมาณเศษโลหะ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากภาพที่ 2 ถึงภาพที่ 7 สามารถสรุปได้ว่าค่าความขรุขระผิวจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนต่ออัตราป้อน และความลึกตัด ในทางตรงกันข้ามค่าความขรุขระผิวจะมีค่าลดลงเป็นสัดส่วนต่อค่าความเร็วตัด คาร์ตมีจุ่มกมิต และอัตราส่วนแรงตัด

สมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน

จากการทดลองสามารถสร้างสมการความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) ได้ดังนี้

$$y_1 = 4.50 - 0.342X_1 + 1.31X_2 - 0.397X_3 + 0.221X_4 + 0.439X_5 \quad (7)$$

$$y_2 = 6.17 - 0.398X_1 + 0.984X_2 - 0.085X_3 + 0.329X_4 + 0.484X_5 \quad (8)$$

สมการที่ (7) และ (8) เป็นสมการที่ได้มาจากการแปลงรูปลอกการิทึมต่อตัวแปรแต่ละตัว จากรูปสมการเอ็กโปเนนเชียลเดิมตั้งสมการที่ (9) และ (10)

$$R_1 = 89.9 \cdot (V)^{-0.342} \cdot (f)^{1.31} \cdot (R_n)^{-0.397} \cdot (D)^{0.221} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{-0.439} \quad (9)$$

$$R_2 = 478 \cdot (V)^{-0.398} \cdot (f)^{0.984} \cdot (R_n)^{-0.085} \cdot (D)^{0.329} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{-0.484} \quad (10)$$

สมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดนี้ให้ค่าพยากรณ์ที่มีค่านัยสำคัญอย่างสูงที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (P-value = 0.000) ดังนั้นสมการนี้จึงสามารถใช้พยากรณ์ความขรุขระผิวได้เป็นอย่างดี โดยค่าสัมประสิทธิ์นั้นแสดงถึงค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่แปรผันต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนั้นๆ ซึ่งอาจจะเพิ่มหรือลดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานแล้วแต่สัญลักษณ์ที่เป็นบวกหรือลบหน้าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร

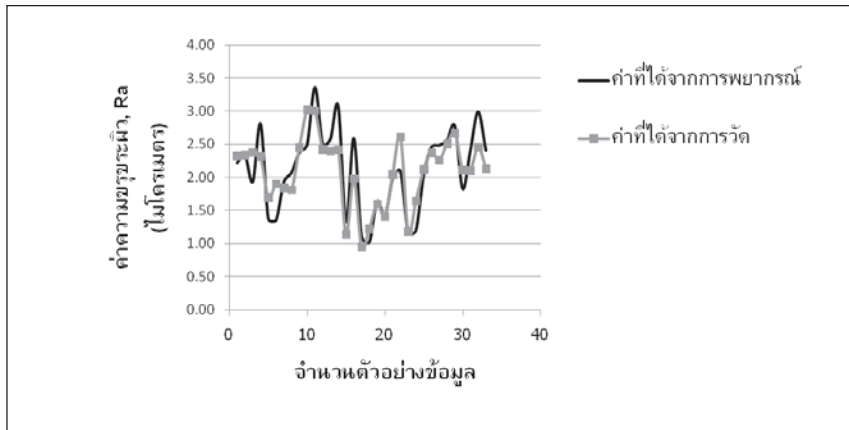
ความแม่นยำของสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน

การทดสอบสมการการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากการตัดเพื่อทดสอบว่า

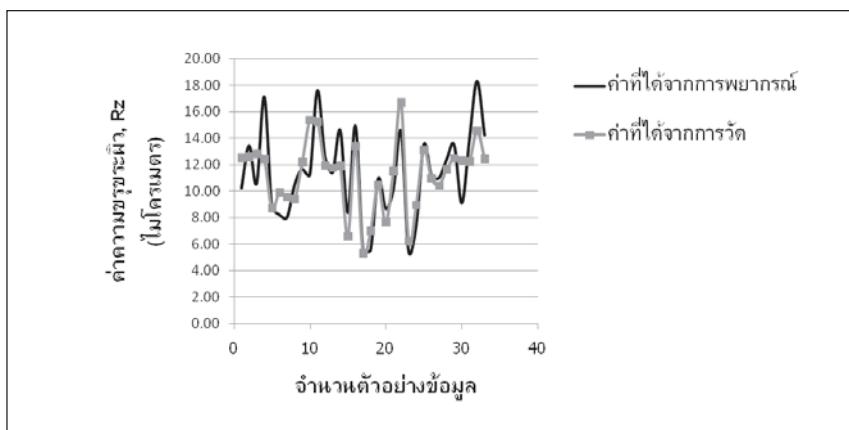
สมการการพยากรณ์ที่นำเสนอมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือหรือไม่ โดยการทดลองได้นำเอาผลการวัดค่า ความขรุขระผิวเฉลี่ย และความขรุขระผิวสูงสุด เปรียบเทียบกับค่าพยากรณ์ที่ได้จากสมการโดยใช้เงื่อนไขการทดลองใหม่ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปเงื่อนไขในการตัดใหม่ เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานที่พัฒนาขึ้น

ชนิดของมีดตัด	คาร์ไบด์เคลือบผิว DNMG 1144FN KC9100
รัศมีจุกมีดตัด (มิลลิเมตร)	0.4
อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)	0.15, 0.18
ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	150, 250, 350
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.5, 1.0
ปริมาณเศษโลหะ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	0, 500, 1000, 2000



(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย

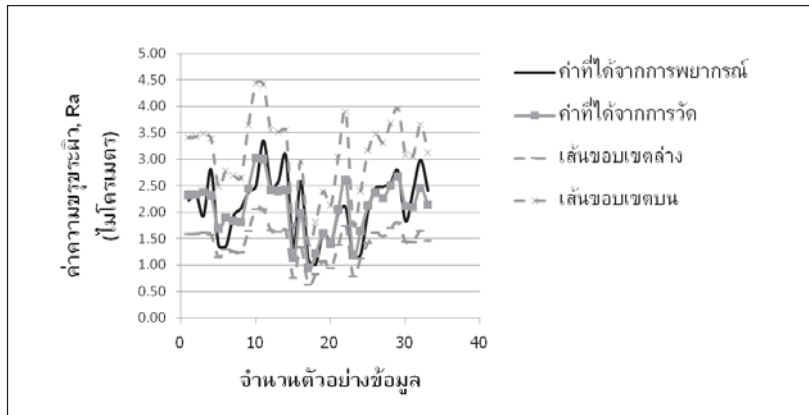


(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

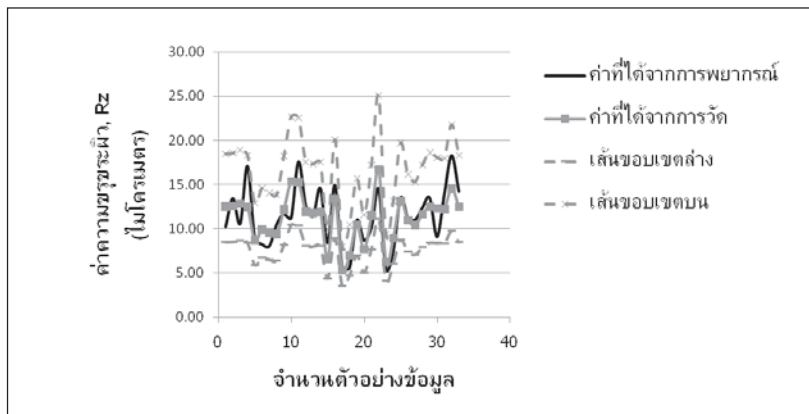
ภาพที่ 8 ผลการเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากการวัดจริงและจากการพยากรณ์

จากภาพที่ 8 พบว่า การพยากรณ์ด้วยสมการที่นำเสนอมีความแม่นยำ ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวสูงสุด อยู่ที่ 87.3 และ 86.5 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากความแม่นยำดังกล่าวสรุปได้ว่าสมการที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้ในการช่วยพยากรณ์ความ

ขรุขระผิวชิ้นงานในระหว่างการตัดได้ อย่างไรก็ตามที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์สามารถสร้างเส้นขอบเขตการพยากรณ์เพื่อตรวจสอบการกระจายของข้อมูลในแต่ละการทดลอง พบว่าค่าที่ได้จากการวัดยังอยู่ในเส้นขอบเขตดังกล่าว ซึ่งได้แสดงไว้ในภาพที่ 9



(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย



(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

ภาพที่ 9 การเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการวัดจริง ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการพยากรณ์ เส้นขอบเขตบน และเส้นขอบเขตล่าง

ในการนำสมการการพยากรณ์เพื่อไปใช้ในกระบวนการตัดจริง เส้นขอบเขตบนและเส้นขอบเขตล่างดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบและ

ควบคุมคุณภาพผิวชิ้นงานได้ โดยอ้างอิงเส้นขอบเขตบนและเส้นขอบเขตล่างจากการพยากรณ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

สรุปและอภิปรายผล

เพื่อตระหนักถึงเครื่องจักรกลอัจฉริยะในอนาคตอันใกล้ ระบบตรวจติดตามอัตราส่วนแรงตัดและอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ เพื่อพัฒนาสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัด

สมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในงานวิจัยถูกพัฒนาขึ้นจากข้อมูลที่ได้จากการตัดจริง ทำให้การพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดมีความแม่นยำในการพยากรณ์ทั้งค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวสูงสุดซึ่งสามารถนำไปใช้ได้จริงไม่ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป

ประโยชน์ที่ได้จากการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัด คือ คุณภาพผิวชิ้นงานที่ดีขึ้น ช่วยให้อัตราการผลิตที่ดีขึ้นรวมไปถึงลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากการลดของเสียจากกระบวนการตัด โดยสมการการพยากรณ์ที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ประโยชน์และประยุกต์ใช้ในการตรวจติดตามและควบคุมคุณภาพผิวชิ้นงาน เพื่อให้ได้กระบวนการตัดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sahin, Y., and Motorcu A.R. (2008). Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 26: 84-90.
- [2] Palanikumar K., Mata F., and Paulo Davim J. (2008). Analysis of surface roughness parameters in turning of FRP tubes by PCD tool. *Journal of materials processing technology*. 204: 469-474.
- [3] Davim J. P., Gaitonde V.N., and Karnik S.R. (2008). Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models. *Journal of materials processing technology*. 205: 16-23.
- [4] Cakir M. C., Ensarioglu C., and Demirayak I. (2009). Mathematical models of surface roughness for evaluating the effects cutting parameters and coating materials. *Journal of materials processing technology*. 209: 102-109.
- [5] Feng C.X. and Wang X.F. (2003). Surface roughness predictive modeling: neural networks versus regression. *IIE Transactions*. 35(1): 11-27.
- [6] Choudhury S.H. and Bartarya G. (2003). Role of temperature and surface finish in predicting tool wear using neural network and design of experiments. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 43: 747-753.

- [7] Shiraishi M. (1981). In-Process Measurement of Surface Roughness in Turning by Laser Beams. *Journal of Engineering for Industry*. 103: 203-209.
- [8] Nara J. (1969). Two dimensional Representation of Surface Roughness. *Annals of the C.I.R.P.*, pp. 485-493.
- [9] Grandy D., Koshy P., and Klocke F. (2009). Pneumatic non-contact roughness assessment of moving surfaces. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 58: 515-518.
- [10] Lu C. (2008). Study on prediction of surface quality in machining process. *Journal of materials processing technology*. 205: 439-450.
- [11] Lalwani D.I., N.K. Mehta, and P.K. Jain (2008). Experimental investigation of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel. *Journal of materials processing technology*. 206: 167-179.
- [12] Azouzi R. and Guillot M. (1997). On-line prediction of surface finish and dimensional deviation in turning using neural network based sensor fusion. *International Journal of Machine Tool & Manufacture* 37, pp. 1201-1217.
- [13] Ignatov M.G., Perminov A.E., and Prokof'ev E. Yu. (2008). Influence of the vertical cutting force on the surface precision and roughness in opposed milling. *Russian Engineering Reserch*. 28(9): 864-865.
- [14] Moriwaki T., Shibasaki T., and Somkiat T. (2004). Development of in-process tool wear monitoring system for CNC turning. *International Journal of Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*. 47(3): 933-938.
- [15] Tlustý J. and Andrews G.C. (1983). A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining. *CIRP Annals*, pp. 563-572.
- [16] Choudhury S.K. and Kishore K.K. (2000). Tool wear measurement in turning using force ratio. *International Journal of Machine Tool & Manufacture*. 40: 899-909.
- [17] Lee J.H., Kim D.E., and Lee S.J. (1998). Statistical analysis of cutting force ratios for flank-wear monitoring. *Journal of Materials Processing Technology*. 74: 104-114.
- [18] Somkiat T. (2009). In-Process Investigation of Turning Process Applied with and without Cutting Fluid. *Journal of Mechanical Engineering*. 6: 85-102.