



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การพัฒนาระบบการตรวจติดตามภายในกระบวนการตัดและการพยากรณ์
สำหรับผิวชิ้นงานตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

โดย: รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และคณะ

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การพัฒนาระบบการตรวจติดตามภายในกระบวนการตัดและการพยากรณ์
สำหรับผิวชิ้นงานตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ
- ศ.ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ประจำปีงบประมาณ 2552 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้เห็นความสำคัญของงานวิจัยนี้และได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยนี้มาตลอด

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: TRG5280014

ชื่อโครงการ: การพัฒนาระบบการตรวจติดตามภายในกระบวนการตัดและการพยากรณ์สำหรับ
ผิวชิ้นงานตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

ชื่อนักวิจัย: รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ
ศ.ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยชื่อ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail Address : Somkiat.t@eng.chula.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี

เทคโนโลยีการควบคุมเครื่องจักรกลซีเอ็นซีได้ถูกพัฒนาขึ้นมาก เพื่อตระหนักถึงเครื่องจักร
อัจฉริยะในอนาคตอันใกล้ ซึ่งเครื่องจักรกลอัจฉริยะสามารถกำหนดเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมและ
สามารถเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดได้โดยอัตโนมัติ อันเนื่องมาจากสภาวะแวดล้อมของการตัดที่
เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่เครื่องจักรกลในปัจจุบันจะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขการตัดล่วงหน้าก่อนที่จะ
เริ่มต้นทำงาน

กระบวนการกลึงเป็นหนึ่งในกระบวนการที่สำคัญที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตชิ้นส่วน โดย
ปัจจัยที่มีความสำคัญในกระบวนการกลึงคือความขรุขระผิวของชิ้นงาน ซึ่งความขรุขระผิวของชิ้นงานไม่
สามารถวัดได้ในขณะที่ทำการตัด และในขณะเดียวกันก็มีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อความขรุขระผิว
ของชิ้นงาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทราบความขรุขระผิวชิ้นงานในระหว่างการตัดจริง

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอสมการการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดใน
กระบวนการกลึงโดยการประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงตัด เพื่อตระหนักถึงเครื่องจักรกลอัจฉริยะ สมการจาก
งานวิจัยนี้ได้พัฒนามาจากผลการทดลอง โดยอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลที่ประกอบด้วย
ตัวแปรหกตัวแปร ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อน รัศมีมุมมีดตัด ความลึกในการตัด อัตราส่วนแรง
ตัด และมุมคายเศษ ค่าสัมประสิทธิ์ในฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการถดถอย
พหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ทั้งนี้งานวิจัยยังสร้างขอบเขตการพยากรณ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
ในการพยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงาน จากผลการทดลองโดยการนำสมการการพยากรณ์ความ
ขรุขระผิวชิ้นงานไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการตัดจริงพบว่า สมการที่สร้างขึ้นสามารถพยากรณ์ความ
ขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดได้อย่างแม่นยำ

คำหลัก : กระบวนการกลึง, ความขรุขระผิวชิ้นงาน, อัตราส่วนแรงตัด, การพยากรณ์

Abstract

Project Code : TRG5280014

Project Title :Development of In-Process Monitoring and Prediction System for Machining Surface on CNC Turning

Investigator : Assoc.Prof.Dr. Somkiat Tangjitsitcharoen Chulalongkorn University

Prof.Dr. Sirichan Thongprasert

E-mail Address :Somkiat.t@eng.chula.ac.th

Project Period : 2 years

As the control technologies of CNC machine tools are highly developed, the intelligent machine tool is expected to be realized in the near future, which can autonomously determine the optimum cutting conditions and can change them automatically as required due to changes in the environmental conditions, etc., while the current machine tools must be given the cutting conditions in advance before they start to cut.

Turning process is one of the most important processes which are widely used to produce the mechanical parts. One of the long-term concerns in the turning process is the surface roughness of the machined parts. However, the surface roughness cannot be measured while cutting at the same time as there are many factors affecting to the surface roughness of the machining parts. It is therefore required to know the surface roughness during the in-process cutting.

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 six factors of the cutting speed, the feed rate, the tool nose radius, the depth of cut, the cutting force ratio, and the rake angle. 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 :Turning process, Surface roughness, Cutting force ratio, Prediction

บทสรุปผู้บริหาร

สัญญาเลขที่ TRG5280014

ชื่อโครงการ: (ภาษาไทย) การพัฒนาระบบการตรวจติดตามภายในกระบวนการตัดและการพยากรณ์
สำหรับผิวชิ้นงานตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

(ภาษาอังกฤษ) Development of In-Process Monitoring System and Prediction for
Machining Surface on CNC Turning

คณะผู้วิจัย 1. รศ.ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตตติ์เจริญ หัวหน้าโครงการ

2. ศ.ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ นักวิจัยที่ปรึกษา

สถาบันต้นสังกัด/สถานที่ติดต่อ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย

ระยะเวลาของโครงการ 2 ปี

งบประมาณโครงการ 480,000 บาท

บทสรุปโครงการวิจัย

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตได้มีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสภาวะ
แวดล้อมของธุรกิจที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลา ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของอุปสงค์ตลาดจากราคา
น้ำมันที่สูงขึ้น หรือกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น ดังนั้นระบบการผลิตในอนาคต
ต้องมีลักษณะคล่องแคล่วอัจฉริยะ มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง รองรับการ
ผลิตปริมาณน้อย ตอบสนองความต้องการเฉพาะราย เกิดการมีส่วนร่วมกับผู้ซื้อและตระหนักใน
สิ่งแวดล้อม ระบบการผลิตที่สามารถตอบสนองต่อคุณลักษณะต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวมาคือ ระบบการ
ผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing systems, IMS) เพื่อตอบสนองต่อระบบการผลิตอัจฉริยะ
เครื่องจักรที่จะนำมาทำงานร่วมกันก็ต้องเป็นเครื่องจักรกลที่มีความเป็นอัจฉริยะด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้
เครื่องจักรกลอัจฉริยะจึงได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้น

ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่พยายามศึกษาค้นคว้าหาเทคนิคต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงให้
กระบวนการผลิตเป็นไปในทิศทางของระบบการผลิตอัจฉริยะ โดยหลักการทั่ว ๆ ไป คือการประยุกต์ใช้
เซนเซอร์ต่าง ๆ ติดตั้งเข้าร่วมทำงานกับเครื่องจักรกลเพื่อที่จะทำการตรวจจับการทำงานของเครื่องจักร
ในระหว่างกระบวนการผลิต ทำให้สามารถตรวจเช็คได้ว่าเกิดความผิดพลาดในระหว่างกระบวนการผลิต
หรือไม่ เพื่อเป็นการลดต้นทุนต่าง ๆ ในด้านการผลิต

สำหรับในกระบวนการกลึงชิ้นรูปนั้น ตัวแปรหลักที่มีผลต่อการผลิตนอกเหนือจากขนาดที่
ถูกต้องแม่นยำแล้ว ความหยาบของผิวของชิ้นงานก็มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของชิ้นงานเช่นกัน
ปกติแล้วการตรวจสอบคุณภาพผิวชิ้นงานสามารถทำได้หลังจากการผลิตชิ้นงานเสร็จสิ้น หรือไม่ก็อาจ
ตรวจสอบโดยการอ้างอิงจากอายุการใช้งานของมีดตัด ซึ่งในบางครั้งมีดตัดอาจแตกหักโดยการกระแทก
ก่อนครบอายุงานมีดตัดเองก็เป็นได้ สำหรับกรณีหลังนี้อาจเกิดผลเสียต่อกระบวนการผลิตมากเนื่องจาก

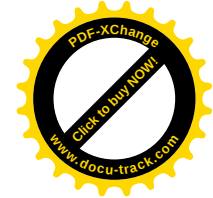
อาจมีชิ้นงานหลายชิ้นที่ผิวชิ้นงานไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพ และเนื่องจากแรงตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อความเรียบผิวที่ได้ในขณะตัด แต่เนื่องจากแรงตัดขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการตัด ดังนั้นอัตราส่วนของแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดจะถูกนำมาพิจารณา เพื่อตัดอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้สามารถพยากรณ์ความเรียบผิวได้ในกระบวนการตัดจริง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการสำหรับการตรวจติดตามในกระบวนการผลิตสำหรับการเครื่องกลึงซีเอ็นซี เพื่อรู้สาเหตุของปัญหาและสามารถแก้ปัญหาได้อย่างทันท่วงที ด้วยการวิเคราะห์แรงตัดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัดด้วยเครื่องมือวัดแรงไดนาโมมิเตอร์ และนำเสนอรูปแบบสมการพยากรณ์ค่าความเรียบผิวของชิ้นงานตัดที่แตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดกับอัตราส่วนแรงตัดที่ได้ในขณะตัด ซึ่งอัตราส่วนแรงตัดนี้จะเป็นตัวช่วยพยากรณ์ความเรียบผิวชิ้นงานในขณะกลึงชิ้นงานได้อย่างดี โดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ค่าแรงตัดที่วัดได้จะถูกนำมาพยากรณ์หาความเรียบผิวชิ้นงานตัดจากสมการต้นแบบการพยากรณ์ค่าความเรียบผิวชิ้นงานที่พัฒนาขึ้น เพื่อเป็นการสอบเทียบสมการต้นแบบการพยากรณ์ให้มีประสิทธิภาพและสามารถใช้งานได้จริง

จากข้อสมมติฐานแรงตัดที่สูงขึ้นในกระบวนการตัด ส่งผลให้ผิวชิ้นงานตัดมีผิวชิ้นงานที่ด้อยคุณภาพ การตรวจติดตามในกระบวนการด้วยเซนเซอร์วัดแรงตัด ทำให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าแรงตัดที่มีค่าสูงขึ้นส่งผลต่อคุณภาพผิวหรือมีความหมายอีกนัยว่าการตัดเป็นไปได้อย่างยากจึงเกิดแรงตัดที่สูง การทดลองตัดได้พยายามศึกษาถึงอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแรงตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด แรงตัดในกระบวนการ รวมไปถึงรูปทรงของมีดตัด

แรงตัดในกระบวนการทั้ง 3 แนวแกนได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์กับค่าความขรุขระผิวชิ้นงานตัด พบว่าแรงตัดสามารถใช้ในการตรวจติดตามความขรุขระผิวชิ้นงานได้แต่ยังคงเปลี่ยนแปลงต่อค่าพารามิเตอร์ในการตัดค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามจากการตรวจติดตามในกระบวนการพบว่าอัตราส่วนแรงตัดระหว่างแรงป้อนตัดกับแรงตัดหลัก สามารถนำมาใช้ในการตรวจติดตามความขรุขระผิวของชิ้นงานตัด อีกทั้งยังช่วยลดผลการเปลี่ยนแปลงต่อค่าพารามิเตอร์ในการตัดได้ นอกจากนี้ยังพบว่ารัศมีปลายมีดตัดและมุมคายเศษของมีดตัดเป็นพารามิเตอร์ที่มีผล ต่อแรงตัดและผิวชิ้นงานโดยตรงการพัฒนาต้นแบบพยากรณ์ จึงได้นำรัศมีปลายมีดตัดและมุมคายเศษมาพิจารณาร่วมด้วย เพื่อให้สามารถประมาณค่าความขรุขระผิวได้แม่นยำมากขึ้น

ผลการทำนายค่าความขรุขระผิวในกระบวนการด้วยสมการต้นแบบที่พัฒนาขึ้น โดยพิจารณาความเร็วตัด อัตราป้อนตัด รัศมีปลายมีดตัด อัตราส่วนแรงตัด และมุมคายเศษ มีความถูกต้องเฉลี่ยในการทำนายค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) และ ค่าความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) อยู่ที่ 86.65 เปอร์เซ็นต์และ 87.78 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สมการการพยากรณ์ที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ประโยชน์และประยุกต์ใช้ในการตรวจติดตามและควบคุมคุณภาพผิวชิ้นงาน เพื่อให้ได้กระบวนการตัดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ รายงานการใช้จ่ายเงินตลอดโครงการ



บทที่ 1

บทนำและความเป็นมา

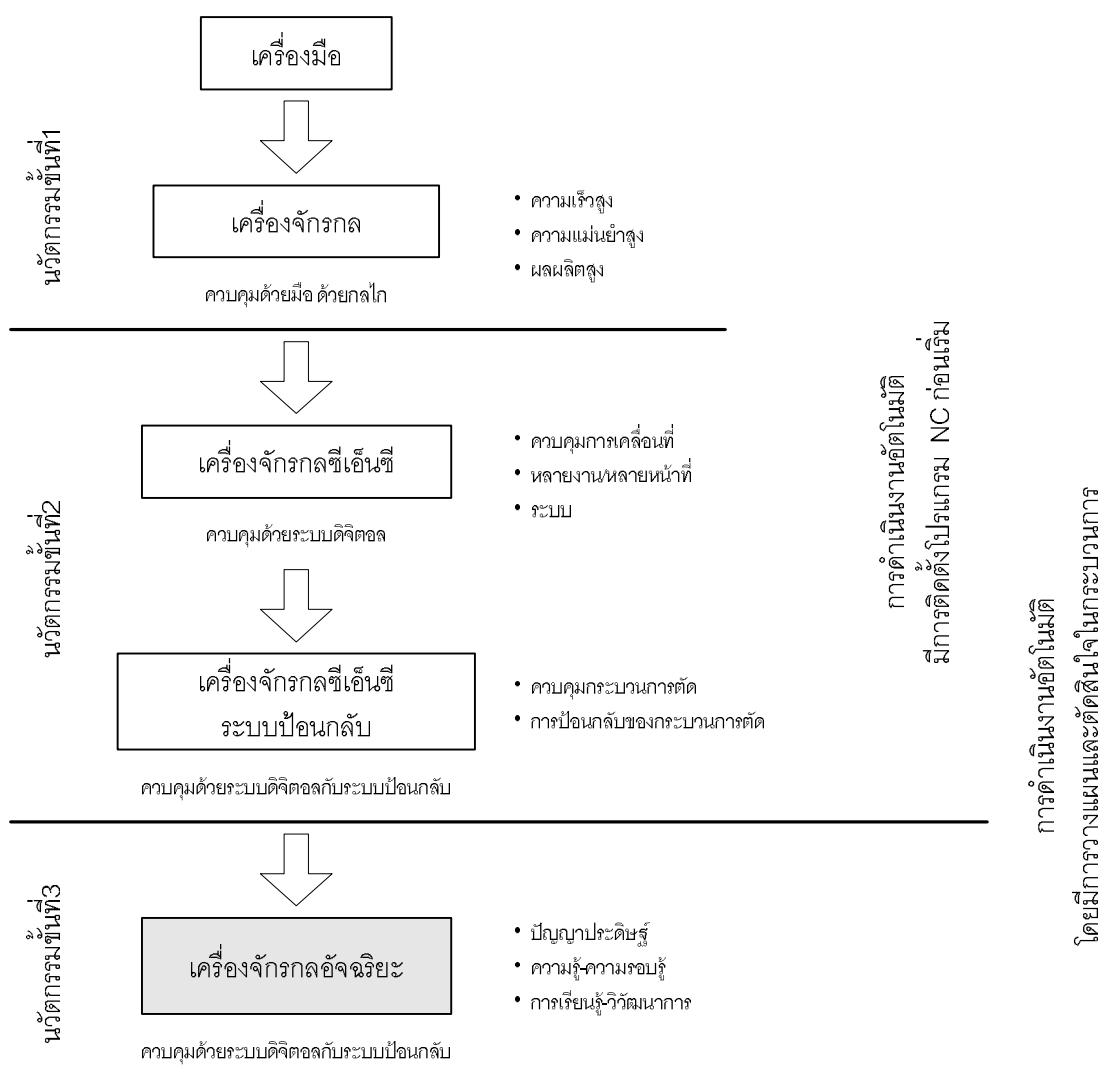
ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตได้มีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสภาวะแวดล้อมของธุรกิจที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลา ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของอุปสงค์ตลาดจากราคาน้ำมันที่สูงขึ้น หรือกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น ดังนั้นระบบการผลิตในอนาคตต้องมีลักษณะคล่องแคล่วอัจฉริยะ มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงรองรับการผลิตปริมาณน้อย ตอบสนองความต้องการเฉพาะราย เกิดการมีส่วนร่วมกับผู้ซื้อและตระหนักในสิ่งแวดล้อม ระบบการผลิตที่สามารถตอบสนองต่อคุณลักษณะต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวมาคือระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing systems, IMS) ซึ่งได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง โดยระบบการผลิตอัจฉริยะเป็นระบบการผลิตที่สามารถควบคุมและตรวจสอบกระบวนการทำงานด้วยตัวเองได้ ซึ่งระบบการผลิตอัจฉริยะเป็นระบบการผลิตที่เกิดขึ้นจากการผสมผสานกันระหว่างเทคโนโลยีสารสนเทศขั้นสูงกับเครื่องจักรกลอัจฉริยะ เพื่อให้ระบบการผลิตสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่กล่าวมาข้างต้นได้

1.1 เครื่องจักรกลอัจฉริยะ

เพื่อตอบสนองต่อระบบการผลิตอัจฉริยะ เครื่องจักรที่จะนำมาทำงานร่วมกันก็ต้องเป็นเครื่องจักรกลที่มีความเป็นอัจฉริยะด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้เครื่องจักรกลอัจฉริยะจึงได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นโดยมีวิวัฒนาการตามรูปที่ 1.1 เครื่องจักรกลที่มีความอัจฉริยะอยู่ภายในจะสามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง สามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่น ๆ และสิ่งอำนวยความสะดวกทางการผลิต ดังนั้นเครื่องจักรกลที่มีการทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่นและทำงานได้ด้วยตัวเองนี้มีความอัจฉริยะที่สูงมาก โดยนวัตกรรมของเครื่องจักรกลอัจฉริยะเริ่มจากการนำเครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันมาทำการวิจัยและพัฒนาเพื่อปรับปรุงให้เป็นเครื่องจักรกลอัจฉริยะ ด้วยการเพิ่มระบบควบคุมให้กับเครื่องจักรกลซีเอ็นซีอีก 2 ระบบ คือ ระบบการควบคุมแบบปรับได้ และระบบของการสั่งการ ซึ่งได้รับการป้อนกลับมาจากการวัดชิ้นงานที่ทำการผลิตเสร็จสิ้นแล้วเพื่อที่จะนำมาประเมินผลของการตัดในลำดับต่อไป

ระบบควบคุมที่เพิ่มเติมเข้าไปในเครื่องจักรกลอัจฉริยะโดยส่วนมากแล้วจะประกอบไปด้วยเซนเซอร์หรือตัวตรวจวัดต่าง ๆ มากมายติดตั้งอยู่เพื่อทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตัวอย่างเช่น ตัวตรวจการเปลี่ยนรูป (Deformation sensors) เพื่อที่จะวัดการเปลี่ยนรูปของเครื่องจักร เทอร์มोकอปเปิล (Thermocouple) เพื่อที่จะวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวตรวจจับการสั่นสะเทือน

(Vibration sensors) เพื่อวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น หรืออาจจะเป็น ตัวตรวจจับแรง (Force sensors) เพื่อทำการวัดแรงที่เกิดขึ้น เป็นต้น

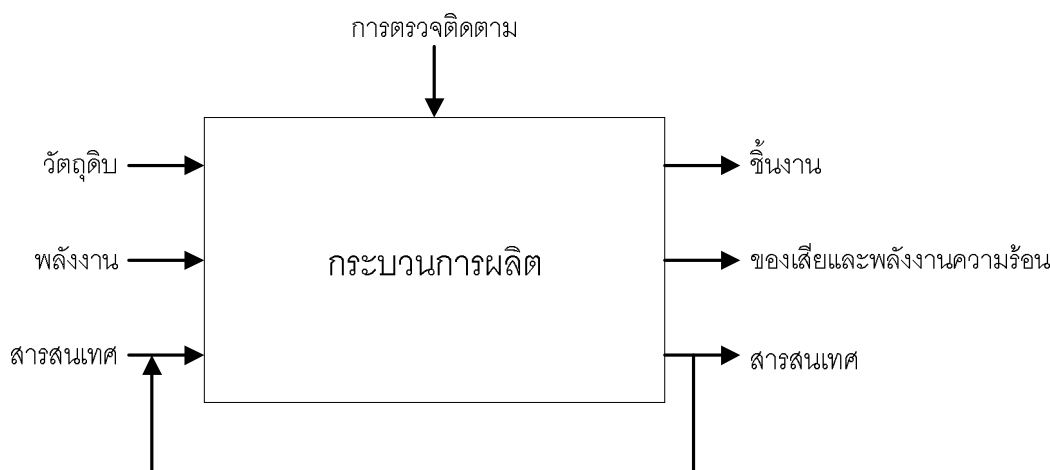


รูปที่ 1.1 วิวัฒนาการของเครื่องจักรกลอัตโนมัติ

1.2 บทบาทของเซนเซอร์ในกระบวนการผลิต

การประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในกระบวนการผลิตและระบบการผลิตกำลังกลายเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากขึ้นเรื่อย ๆ ในฐานะที่เป็นอุปกรณ์ใหม่ที่สามารถตรวจติดตามในกระบวนการผลิตได้นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้เพื่อพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพเทคโนโลยีการผลิต และการออกแบบเครื่องจักรกล เช่น การตัดความเร็วสูง และการกลึงงานแข็ง เพื่อที่จะปรับปรุงอัตราผลิตภาพ เพิ่มคุณภาพและความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ ลดรอบเวลาการผลิต และลดค่าแรงงาน เป็นต้น

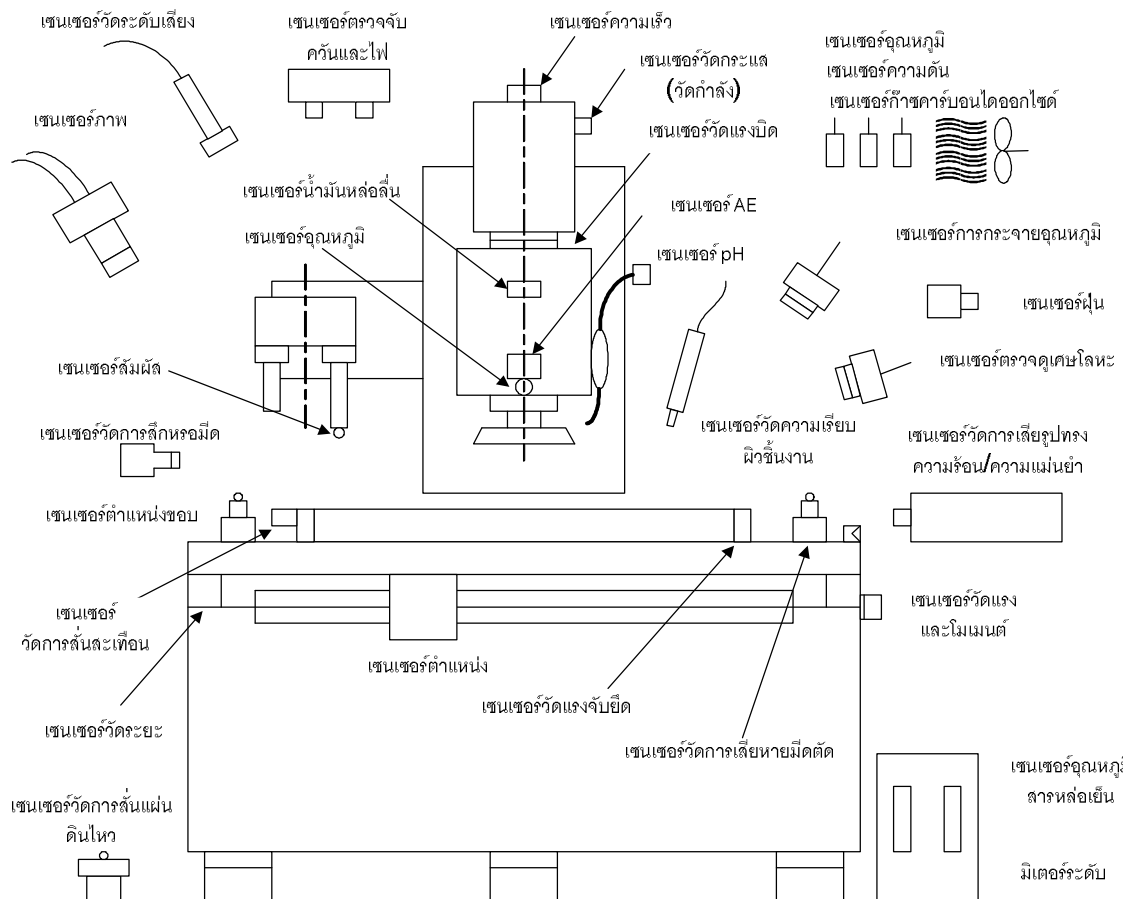
การตรวจติดตามในกระบวนการผลิตสำหรับกระบวนการผลิตใด ๆ สามารถที่จะถูกนำมาพิจารณาให้เป็นกระบวนการการเปลี่ยนรูปวัสดุพลังงาน และสารสนเทศดังรูปที่ 1.2 แล้ว กระบวนการผลิตนั้นควรที่จะมีการตรวจติดตามอย่างพิถีพิถันเพื่อที่จะผลิตสินค้าได้ตรงตามความต้องการ และนอกเหนือจากการสัมผัสรับรู้ต่าง ๆ ด้วยมนุษย์แล้ว อาจต้องใช้เครื่องตรวจจับอย่างอื่นที่มนุษย์ไม่สามารถรับรู้ได้ติดตั้งเข้าไปเพื่อทำการตรวจจับการทำงานแทนการรับรู้ของมนุษย์ เพื่อที่จะประสบความสำเร็จในการตรวจติดตามกระบวนการผลิตและระบบการผลิตได้อย่างอัตโนมัติ สิ่งที่กำลังกล่าวมาก็คือการใช้เซนเซอร์บางชนิดที่จะตรวจรู้สัญญาณที่วิญญูมนุษย์ไม่สามารถตรวจรู้ได้ โดยเซนเซอร์จะทำหน้าที่รับรู้สัญญาณในตอนแรกและเปลี่ยนสัญญาณหรือพลังงานเข้าไปสู่สัญญาณหรือพลังงานออกในรูปแบบอื่นสำหรับการใช้งานต่อไป



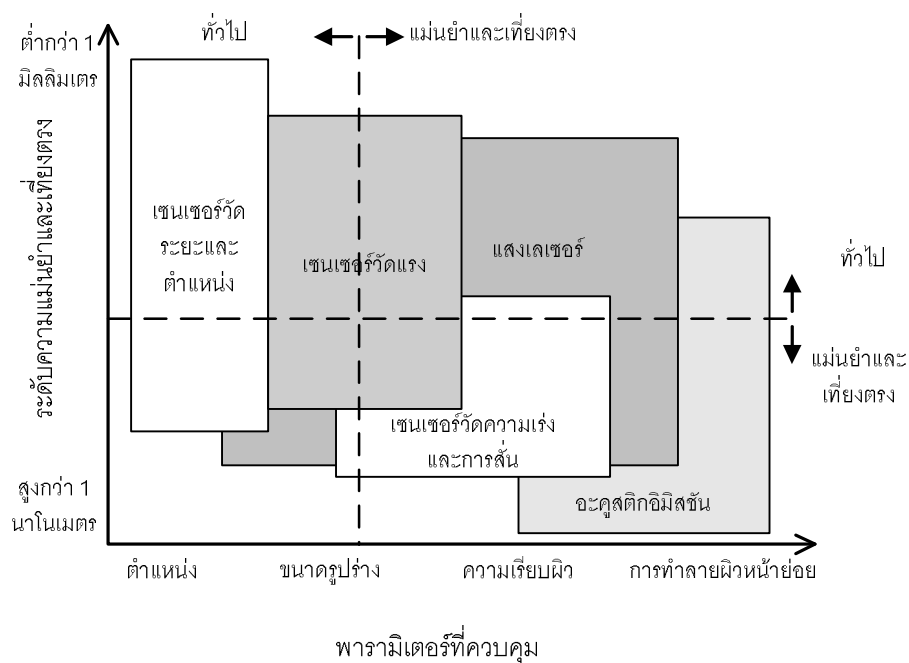
รูปที่ 1.2 กระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม

ชนิดของเซนเซอร์ต่าง ๆ มากมายที่ใช้สำหรับการตรวจติดตามในกระบวนการผลิตและเงื่อนไขการตัดถูกแสดงไว้ในรูปที่ 1.3 เซนเซอร์ที่ใช้กันทั่วไปในเงื่อนไขการตัดทางอุตสาหกรรม คือ เซนเซอร์แรง เซนเซอร์กำลัง และเซนเซอร์อะคูสติกอิมิตชัน การออกแบบเซนเซอร์ขึ้นสูงร่วมกับเทคโนโลยีกรรมวิธีสัญญาณทำให้เกิดการปรับปรุงสารสนเทศเกี่ยวกับสถานะของระบบเพื่อที่จะทำให้เกิดกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดและควบคุมได้

การเลือกใช้เซนเซอร์แต่ละชนิดนั้นต้องคำนึงถึงความเหมาะสมและการติดตั้งในกระบวนการผลิตชนิดต่าง ๆ เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.4 จากรูปการเลือกใช้เซนเซอร์นั้นสามารถพิจารณาได้จากตัวแปรที่ควบคุมและความแม่นยำที่ต้องการ เพื่อเลือกเซนเซอร์ให้เหมาะสมกับการผลิตต่าง



รูปที่ 1.3 เซนเซอร์สำหรับการตรวจติดตามเครื่องจักรกล



รูปที่ 1.4 การประยุกต์ใช้เซนเซอร์กับขั้นของความแม่นยำและเที่ยงตรง



จากที่กล่าวมาข้างต้นในปัจจุบันได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่พยายามศึกษาค้นคว้าหาเทคนิคต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงให้กระบวนการผลิตเป็นไปในทิศทางของระบบการผลิตอัจฉริยะ โดยหลักการทั่ว ๆ ไป คือการประยุกต์ใช้เซนเซอร์ต่าง ๆ ติดตั้งเข้าร่วมทำงานกับเครื่องจักรกลเพื่อที่จะทำการตรวจจับการทำงานของเครื่องจักรในระหว่างกระบวนการผลิต ทำให้สามารถตรวจเช็คได้ว่าเกิดความผิดพลาดในระหว่างกระบวนการผลิตหรือไม่ เพื่อเป็นการลดต้นทุนต่าง ๆ ในด้านการผลิต

สำหรับในกระบวนการกลึงขึ้นรูปนั้นตัวแปรหลักที่มีผลต่อการผลิตนอกเหนือจากขนาดที่ถูกต้องแม่นยำแล้ว ความหยาบของผิวของชิ้นงานก็มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของชิ้นงานเช่นกัน ปกติแล้วการตรวจสอบคุณภาพผิวชิ้นงานสามารถทำได้หลังจากการผลิตชิ้นงานเสร็จสิ้น หรือไม่ก็อาจตรวจสอบโดยการอ้างอิงจากอายุการใช้งานของมีดตัด ซึ่งในบางครั้งมีดตัดอาจแตกหักโดยการกระแทกก่อนครบอายุงานมีดตัดเองก็เป็นได้ สำหรับกรณีหลังนี้อาจเกิดผลเสียต่อกระบวนการผลิตมากเนื่องจากอาจมีชิ้นงานหลายชิ้นที่ผิวชิ้นงานไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพ จากเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระบบตรวจติดตามความเรียบผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงและพัฒนาเครื่องกลึงซีเอ็นซีอัจฉริยะให้สามารถทำการผลิตแบบการผลิตอัจฉริยะได้โดยระบบที่พัฒนาขึ้นจะทำการตรวจติดตามถึงคุณภาพผิวชิ้นงานในกระบวนการตัด เพื่อเป็นการลดปริมาณของเสียที่เกิดในกระบวนการตัดและเป็นการปรับปรุงอัตราผลิตภาพให้สูงขึ้นอีกทางหนึ่งด้วย



บทที่ 2

วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

ปัจจุบันการแข่งขันทางด้านกรรมวิธีการผลิตนั้นมีการแข่งขันที่สูงขึ้นเพื่อผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงแต่ต้นทุนต่ำ ทางเลือกหนึ่งคือการใช้เครื่องจักรกลซีเอ็นซี ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราการผลิตและทั้งยังช่วยลดต้นทุนทางด้านค่าแรงอีกด้วยเนื่องจากใช้จำนวนคนงานน้อยลง เครื่องกลึงซีเอ็นซีเป็นเครื่องจักรกลซีเอ็นซีชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับกระบวนการผลิตที่ชิ้นงานมีลักษณะโค้งสมมาตร ซึ่งชิ้นงานลักษณะดังกล่าวใช้เป็นชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องจักรกล เป็นต้น การใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซีมาช่วยในการผลิตนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรให้เต็มประสิทธิภาพ นั่นคือต้องทำการตัดชิ้นงานด้วยอัตราการป้อน ความเร็วตัด ความลึกตัดที่สูงเพื่อลดเวลาในการผลิตให้น้อยลง การตัดชิ้นงานด้วยเงื่อนไขดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อการใช้หรือของมีดตัด และการสึกหรอของมีดตัดนั้นจะส่งผลกระทบต่อชิ้นงานคือ ขนาดของชิ้นงานคลาดเคลื่อนไป และผิวชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพ ซึ่งคุณภาพของผิวชิ้นงานนั้นมีความสำคัญมากสำหรับการผลิตชิ้นส่วนสำหรับใช้ในเครื่องจักรที่มีวิทยาการขั้นสูง โดยคุณภาพผิวชิ้นงานจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงาน และอายุการใช้งานเป็นต้น การที่ไม่สามารถตรวจติดตามในระหว่างการผลิตว่าคุณภาพผิวชิ้นงานมีแนวโน้มไปทางใดอาจจะมีผลกระทบต่ออัตราการผลิตได้ เช่น อาจทำให้เสียเวลาในการหยุดเครื่องเพื่อทำการเปลี่ยนมีดตัดบ่อยครั้งหรืออาจเปลี่ยนมีดตัดทั้งที่มีมีดตัดอาจใช้งานได้ อยู่ ในทำนองเดียวกันหากไม่มีการเปลี่ยนมีดตัดอาจทำให้ชิ้นงานในลำดับต่อไปเกิดความเสียหายซึ่งทำให้อัตราการผลิตเกิดความล่าช้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต นักวิจัยจำนวนมากได้พยายามที่จะพัฒนากระบวนการผลิตต่าง ๆ ให้เป็นกระบวนการผลิตแบบอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing) ซึ่งข้อได้เปรียบสำหรับกระบวนการผลิตแบบอัจฉริยะ คือ การที่สามารถตรวจติดตามระหว่างกระบวนการผลิตได้ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการผลิตแบบเปิดหรือกระบวนการผลิตแบบปิด และยังสามารถระบุว่ามีปัญหาเกิดขึ้นระหว่างการผลิตหรือไม่ ทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถหยุดการผลิตได้อย่างทันทั่วทั้งที อีกทั้งยังลดจำนวนผู้ปฏิบัติงานทำให้ลดต้นทุนในการผลิตได้อีกทางหนึ่ง สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตแบบอัจฉริยะเพื่อทำการตรวจติดตามคุณภาพผิวชิ้นงานในกระบวนการผลิตเพื่อที่สามารถปรับเปลี่ยนการผลิตได้อย่างทันทั่วทั้งที เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดจากการผลิต

ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยจำนวนมากพยายามที่จะพัฒนาเทคนิคต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตสำหรับงานกลึงให้เป็นกระบวนการผลิตแบบอัจฉริยะ เพื่อที่จะตรวจติดตามในกระบวนการผลิตว่าควรหยุดการผลิตเพื่อเปลี่ยนมีดตัด เงื่อนไขการตัด หรือหยุดการผลิตในกรณีที่มีปัญหาเกิดขึ้นระหว่างการผลิตได้อย่างทันทั่วทั้งที เพื่อที่จะไม่ให้เกิดผลเสียต่อชิ้นงานที่ทำการผลิตทั้งใน



ด้านขนาดชิ้นงานที่ถูกต้องและคุณภาพผิวชิ้นงานที่ดี การตรวจติดตามคุณภาพของผิวชิ้นงาน สำหรับกระบวนการผลิตแบบอัจฉริยะนั้นสามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์สัญญาณที่เกิดขึ้นในขณะกลึงชิ้นงาน วิธีที่เป็นที่ยอมรับและกำลังได้รับความนิยมในปัจจุบันคือการติดเซนเซอร์เพิ่มเข้าไปบริเวณค้ำมิดกึ่ง เพื่อตรวจจับสัญญาณที่เกิดขึ้นในขณะกลึงชิ้นงาน เช่น การวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างการกลึงชิ้นงาน เป็นต้น สัญญาณดังกล่าวสามารถนำมาหาความสัมพันธ์เพื่อที่สร้างรูปแบบสมการสำหรับการพยากรณ์ความเรียบผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงได้ ผลงานวิจัยที่ผ่านมา [1-15] ได้มีการสร้างรูปแบบสมการสำหรับการพยากรณ์จากการพิจารณาตัวแปรเงื่อนไขการตัดร่วมกับสัญญาณที่เกิดขึ้นในขณะตัดทั้งสามแนวแกน (แกน X, แกน Y, แกน Z) เช่น พิจารณาเงื่อนไขการตัดร่วมกับสัญญาณแรงตัด 3 แกน หรือพิจารณาเงื่อนไขการตัดกับสัญญาณการสะท้อนทั้ง 3 แกน เป็นต้น แต่งานวิจัยดังกล่าวไม่ได้คำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้การพยากรณ์ความเรียบผิวของชิ้นงานไม่ถูกต้องในขณะตัด ซึ่งจะต้องทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ในสมการสำหรับการพยากรณ์ความเรียบผิวเมื่อเงื่อนไขการตัดเปลี่ยนไป

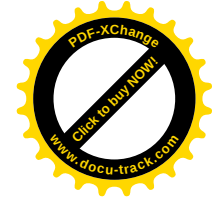
เนื่องจากแรงตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อความเรียบผิวที่ได้ในขณะตัด แต่เนื่องจากแรงตัดขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการตัด ดังนั้นอัตราส่วนของแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดจะถูกนำมาพิจารณา เพื่อตัดอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้สามารถพยากรณ์ความเรียบผิวได้ในกระบวนการตัดจริง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการสำหรับการตรวจติดตามในกระบวนการผลิตสำหรับการเครื่องกลึงซีเอ็นซี เพื่อรู้สาเหตุของปัญหาและสามารถแก้ปัญหาได้อย่างทันทั่วทั้ง ด้วยการวิเคราะห์แรงตัดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัดด้วยเครื่องมือวัดแรงไดนาโมมิเตอร์ และนำเสนอรูปแบบสมการพยากรณ์ค่าความเรียบผิวของชิ้นงานตัดที่แตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดกับอัตราส่วนแรงตัดที่ได้ในขณะตัด ซึ่งอัตราส่วนแรงตัดนี้จะเป็นตัวช่วยพยากรณ์ความเรียบผิวชิ้นงานในขณะกลึงชิ้นงานได้อย่างดี โดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ค่าแรงตัดที่วัดได้จะถูกนำมาพยากรณ์หาความเรียบผิวชิ้นงานตัดจากสมการต้นแบบการพยากรณ์ค่าความเรียบผิวชิ้นงานที่พัฒนาขึ้น เพื่อเป็นการสอบเทียบสมการต้นแบบการพยากรณ์ให้มีประสิทธิภาพและสามารถใช้งานได้จริง

2.1 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาสมการต้นแบบการพยากรณ์ค่าความเรียบผิวชิ้นงานในกระบวนการ (In-Process) ของกระบวนการกลึง (Turning Process)

2.2 ขอบเขตการวิจัย



1. ทดลองด้วยกระบวนการตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน
2. วัสดุทดสอบเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน S45C
3. มีดตัด 3 ชนิด
 - มีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว KC9110 รัศมีงมูกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร
 - มีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว TPMR 160304 HQ รัศมีงมูกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร
 - มีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว TPMR 160308 HQ รัศมีงมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร
4. เงื่อนไขการตัด แบ่งออกเป็น
 - ความเร็วตัด (เมตร/นาที)
 - อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)
 - ความลึกการตัด (มิลลิเมตร)
5. สมการต้นแบบจะประกอบด้วยความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัด

2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

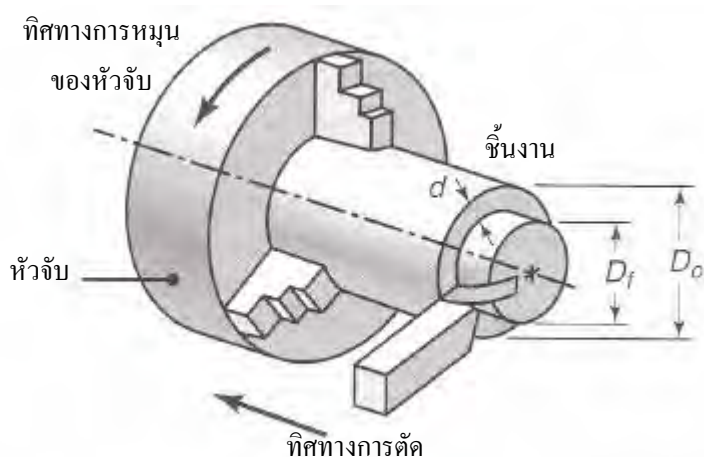
1. พัฒนาศมการต้นแบบการพยากรณ์เพื่อพยากรณ์ความเรียบผิวชิ้นงานกลึงในกระบวนการตัดจริงได้
2. เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตให้เป็นการผลิตแบบอัจฉริยะ
3. เป็นแนวทางในการลดปริมาณของเสียที่เกิดจากการผลิต เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต

บทที่ 3

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 การตัดเศษโลหะ

เครื่องมือตัดโลหะ (Metal Cutting Tools) ที่จะกล่าวถึงในที่นี้คือ เครื่องมือตัดแบบจุดเดียว ประเภทเครื่องกลึงตัด ลักษณะเครื่องมือเป็นเครื่องมือในระนาบมุมฉาก (Orthogonal Tool) ซึ่งจะมีขอบการตัดตั้งฉากกับทิศทางการตัด การจับยึดชิ้นงานและลักษณะการตัดสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.1 เครื่องกลึงเป็นเครื่องจักรกลพื้นฐานที่ทำงานโดยการจับยึดชิ้นงานให้แน่นและหมุน ในขณะที่ทำการตัดชิ้นงานจะถูกหมุนให้อยู่ในศูนย์กลางเดียวกันกับแนวศูนย์กลางของเครื่องมือตัดจะเคลื่อนที่เพื่อทำการตัดไปตามความยาวของชิ้นงานที่กำลังหมุนเพื่อให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการ งานส่วนใหญ่จะเป็นการผลิตชิ้นงานที่เป็นทรงกระบอกหรือชิ้นงานที่มีโค้งสมมาตร



รูปที่ 3.1 การจับยึดชิ้นงานและลักษณะการตัดชิ้นงาน [2]

โดยที่

d = ความลึกตัด

D_o = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนตัด

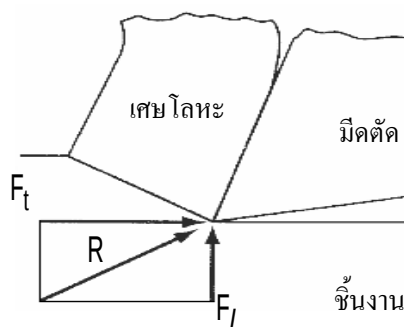
D_f = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังตัด

3.1.1 แรงตัด

พิจารณาการตัดแบบระนาบมุมฉาก (Orthogonal Cutting) ตามรูปที่ 3.2 สามารถแบ่งแรงที่กระทำต่อมีดตัดออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. แรงตามแนวสัมผัสหรือแรงในแนวตั้ง (Tangential tool force, F_t) เป็นแรงที่กระทำต่อมีดตัดในทิศทางสัมผัสกับทิศทางของชิ้นงาน แรงชนิดนี้จะมีค่ามากที่สุด
2. แรงตามแนวยาวหรือแรงในแนวขนาน (Longitudinal tool force, F_l) เป็นแรงที่กระทำต่อมีดตัดในทิศทางขนานกับแกนของชิ้นงาน หรือเรียกอีกอย่างว่า Feeding tool force แรงชนิดนี้จะมีค่าประมาณ 40% ของแรงแนวสัมผัส
3. แรงตามแนวรัศมี (Radial tool force, F_r) เป็นแรงที่กระทำต่อมีดตัดในทิศทางจากจุดศูนย์กลางของชิ้นงานออกมาตามแนวรัศมี ซึ่งเป็นแรงที่มีค่าน้อยที่สุดประมาณ 50% ของแรงตามแนวยาว

แรงที่กระทำต่อมีดตัดในระหว่างการตัดทั้ง 3 ชนิดนี้ สามารถวัดได้จากเครื่องวัดแรงไดนาโมมิเตอร์ โดยแรงตัดเหล่านี้จะมีผลกับความขรุขระผิวชิ้นงานด้วยเช่นกัน นั่นคือ ยิ่งแรงมีค่ามากแสดงว่าผิวชิ้นงานก็จะมีความขรุขระสูง



รูปที่ 3.2 แรงตัดที่กระทำต่อมีดตัดในรูปแบบ 2 มิติ [2]



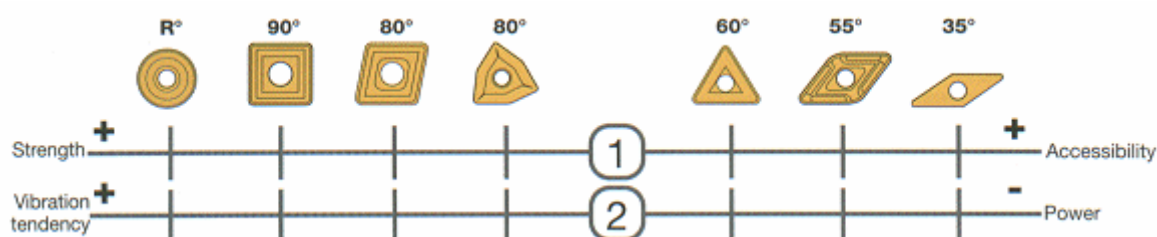
ลักษณะและรูปร่างและมุมต่าง ๆ ของมิดคัตสามารถอธิบายตามรูปที่ 3.4



- มุมลิ้มหรือมุมปาก (Lip angle) เป็นมุมที่คมมีดเดินเข้าปาดผิวโลหะ มุมยิ่งเล็กจะตัดชิ้นงานได้ง่าย แต่ถ้ามุมยิ่งเล็กอาจจะหักง่าย มุมลิ้มของมีดจะขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานที่ตัด โดยวัสดุอ่อนจะใช้มุมลิ้มที่เล็กกว่าวัสดุที่แข็ง

- มุมฟรี (Free angle) เป็นมุมระหว่างผิวของสันคมตัดกับชิ้นงาน มุมนี้มีไว้เพื่อให้ผิวมีดตัดหลบพื้นผิวชิ้นงาน มุมฟรีของมีดตัดจะมีอยู่ 2 มุมคือ มุมฟรีด้านข้างล่างสันคมตัด (Side clearance angle) และมุมฟรีด้านข้างล่างสันข้างคมตัด (Front clearance angle)
- มุมคาย (Rake angle) เป็นมุมที่อยู่บนผิวหน้าของมีดตัดที่จะต้องทำมุมกับสันคมตัด เพื่อให้เศษโลหะหลุดพ้นจากจุดงานไปได้ ขนาดของมุมจะขึ้นอยู่กับวัสดุชิ้นงานและยังส่งผลต่อเศษโลหะที่คายออกมาด้วย มุมคายของมีดมีด้วยกัน 2 มุมคือ มุมคายด้านข้าง (Side rake angle) ขึ้นอยู่กับขนาดของมุมลิ้มและวัสดุที่ทำการปาด และมุมคายด้านหลัง (Back rake angle) เป็นมุมที่ได้จากการตัดมุมมีด

สำหรับมีดตัดในงานเครื่องกลึงซีเอ็นซีนั้นจะเป็นชนิดเม็ดมีดตัด (Cutting tool insert) ซึ่งจะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับมีดตัดที่กล่าวมาข้างต้น แต่จะมีลักษณะเป็นเม็ดมีดเล็กยึดติดเข้ากับด้ามมีด (Tool holder) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีราคาถูกและสามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานหลากหลายรูปแบบ เม็ดมีดที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีสามารถแบ่งแยกตามรูปร่างของเม็ดมีด ความแข็งแรงและลักษณะการใช้งานได้ตามรูปที่ 3.5



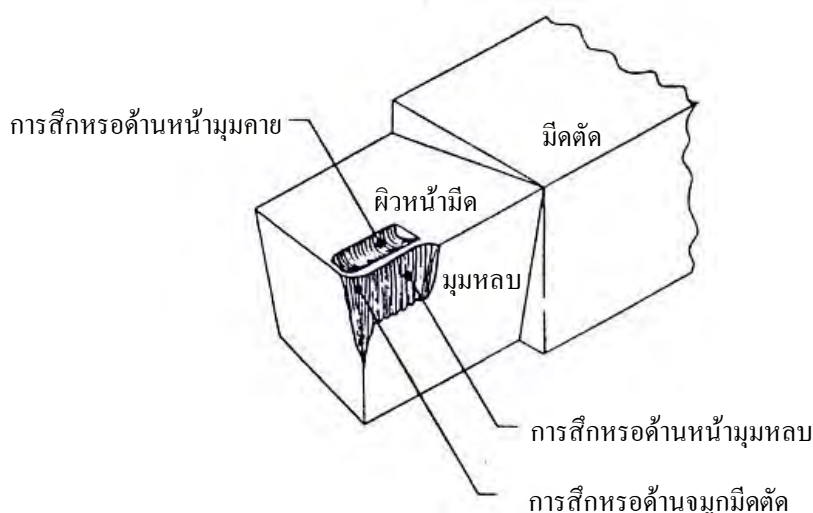
รูปที่ 3.5 การเลือกเม็ดมีดตามลักษณะงาน [5]

1. เม็ดมีด R° เหมาะสำหรับงานตัดที่ต้องการความแข็งแรงสูง และสามารถทนการสั่นสะเทือนได้ดี ส่วนเม็ดมีดมุมต่าง ๆ จะรับแรงได้น้อยลดหลั่นกันไปตามขนาดมุมของมีด และเม็ดมีดที่รับแรงได้น้อยสุดคือเม็ดมีด 35°
2. เม็ดมีด 35° เหมาะสำหรับงานตัดภายใต้แรงตัดและการสั่นสะเทือนน้อย แต่สามารถผลิตชิ้นงานได้ขนาดที่มีความถูกต้องมากกว่าเม็ดมีด R°

3.1.3 การสึกหรอและอายุการใช้งานของมีดตัด

ขณะที่ทำการตัดชิ้นงานจะมีความเค้น การเสียดสี และความร้อนสูงเกิดขึ้นกับมีดตัด เป็นผลให้อายุการใช้งานของมีดตัดสั้นลง โดยสามารถสังเกตได้จากการสึกหรอของมีดตัด ซึ่งการสึกหรอนี้จะส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีขนาดที่ผิดไปจากที่ต้องการและความขรุขระผิวชิ้นงานไม่ได้คุณภาพ อัตราการสึกหรอส่วนมากมีสาเหตุมาจาก การเลือกใช้มีดตัดที่ไม่เหมาะสมกับวัสดุที่ทำการตัด และที่สำคัญคือ

การเลือกเงื่อนไข ความเร็วรอบ ความเร็วตัด อัตราการป้อน และความลึกตัดที่ไม่ถูกต้อง การสึกหรอของมีดตัดมีอยู่สองชนิด คือ การสึกหรอด้านหน้ามุมหลบ (Flank wear) และการเกิดการสึกหรอด้านหน้ามุมคาย (Cater wear) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 บริเวณการสึกหรอของมีดตัด [6]

การสึกหรอด้านหน้ามุมหลบ (Flank wear) จะเกิดบริเวณด้านมุมหลบของมีดตัด เนื่องมาจากการขัดสีกับชิ้นงาน จึงเป็นสาเหตุให้การเกาะยึดกันของวัสดุมีดตัดเกิดการหลุดและสึกหรอในที่สุด

การสึกหรอด้านหน้ามุมคาย (Cater wear) จะเกิดบริเวณผิวคายเศษและต้นคมตัดของมีดตัด ซึ่งจะทำให้เป็นบ่อหลุม สาเหตุมาจากการกระทบของเศษตัดที่มีอุณหภูมิสูง จึงทำให้มีดตัดเกิดการสึกกร่อน

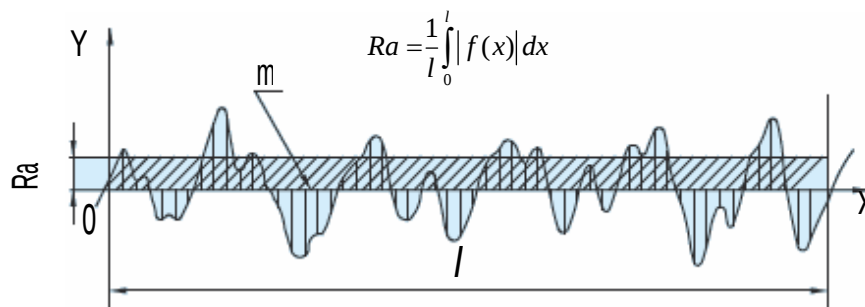
3.2 การวัดความขรุขระพื้นผิว

ผิวหน้าของชิ้นงานจะมีความหยาบที่เกิดจากการที่ถูกปาดผิวออกไปทำให้เกิดเป็นรอยคลื่นเล็ก ๆ รอยคลื่นเล็ก ๆ นั้นเกิดจากมุมเม็ดมีดที่ทำการตัดชิ้นงาน รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของความหยาบของผิวชิ้นงาน ประกอบด้วย ความลึกของรอยขรุขระ (Roughness height) ความกว้างของรอยขรุขระ (Roughness width) และความหยาบของผิวจะไม่สม่ำเสมอจนทำให้เกิดเป็นรอยคลื่นเกิดเป็นช่วง ๆ คือ ช่วงของความลึกของคลื่นหยาบ (Waviness height) และความกว้างของคลื่นหยาบ (Waviness width)

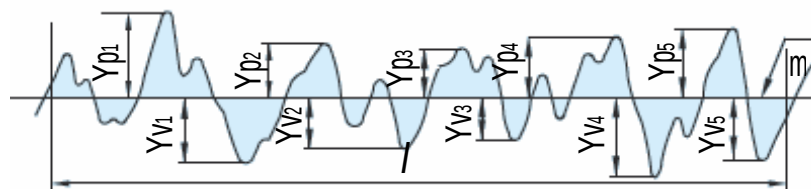


รูปที่ 3.7 ลักษณะความขรุขระผิวชิ้นงาน [4]

วิธีการวัดความขรุขระของผิวชิ้นงาน สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องมือวัดความลึกอิเล็กทรอนิกส์ที่มีปากกาหัวเพชร (Diamond stylus) ลากสัมผัสไปตามผิวงาน เนื่องจากความไม่เรียบของผิวทำให้ปากกาหัวเพชรนั้นเลื่อนขึ้น-ลงตามเนินของผิวขรุขระ จากนั้นจะส่งสัญญาณเข้าสู่เครื่องขยายสัญญาณให้อ่านค่าและบันทึกได้ แล้วนำเอาความลึกของรอยขรุขระมาคำนวณค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ (Arithmetical Average Roughness, R_a) หรือค่าเฉลี่ยความสูง 10 จุด (Ten-Point Average Roughness, R_z) เทียบกับแกนอ้างอิง



รูปที่ 3.8 ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย R_a [7]



$$R_z = \frac{|Y_{p1} + Y_{p2} + Y_{p3} + Y_{p4} + Y_{p5}| + |Y_{v1} + Y_{v2} + Y_{v3} + Y_{v4} + Y_{v5}|}{5}$$

รูปที่ 3.9 ค่าความขรุขระผิวแบบ 10 จุด [7]



ความขรุขระผิวชิ้นงานสำหรับงานกลึงจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ โดยสามารถแบ่งออกเป็นได้ดังนี้

1. ปัจจัยทางเรขาคณิต (Geometric Factors)

- อัตราการป้อนตัด (f , มม./รอบ)
 - อัตราการป้อนที่มีค่ามากจะมีผลทำให้ความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่ามากขึ้น
 - สำหรับงานกลึงละเอียดช่วงอัตราการป้อนตัดจะอยู่ประมาณ 0.125 – 0.4 มม./รอบ
- รัศมีงูมกมิด (R_n , มม.)
 - รัศมีงูมกมิดที่มีขนาดใหญ่จะทำให้ผิวชิ้นงานที่ได้มีความขรุขระที่ดีกว่ารัศมีงูมกมิดที่มีขนาดเล็ก ความขรุขระผิวเฉลี่ยทางอุดมคติสามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ของรัศมีงูมกมิดดังสมการด้านล่าง

$$R_a = \frac{f^2}{8R_n}$$

โดยที่ R_a = ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย, มม.

f = การป้อนตัด, มม./รอบ

R_n = รัศมีงูมกมิด, มม. และ $R_n \neq 0$

- ความเร็วตัด (V , เมตร/นาที)
 - ความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วตัดมีค่าสูงขึ้น โดยพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการด้านล่าง

$$R_a = \frac{0.032 f_r^2}{R_n N^2} = \frac{0.032 f_r^2}{R_n \left(\frac{V}{\pi D_0} \right)^2}$$

โดยที่ f_r = อัตราการป้อนตัด, มม./นาที

N = ความเร็วรอบ, รอบ/นาที

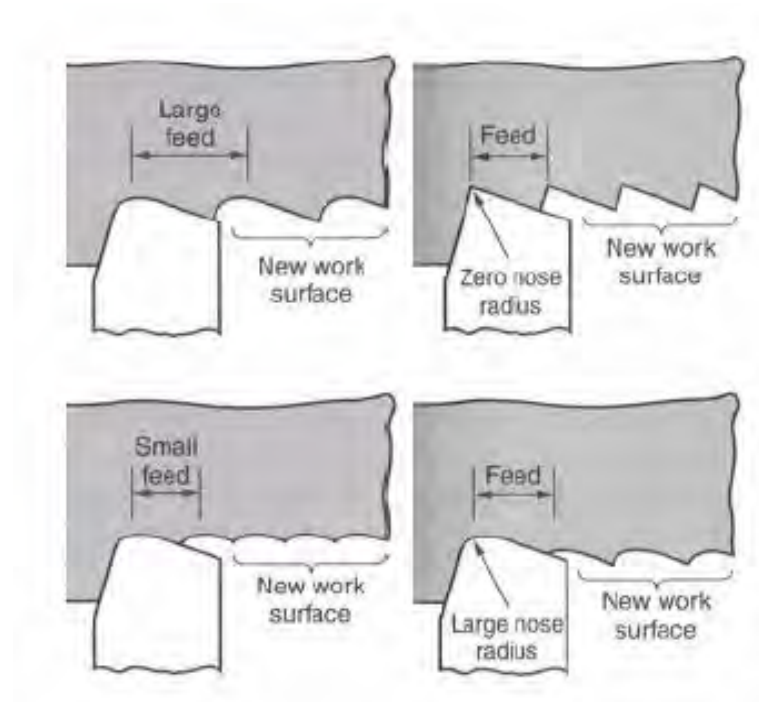
V = ความเร็วตัด, เมตร/นาที

D_0 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น, เมตร และ $R_n \neq 0$

- ความลึกตัด (D, มม.)
 - ความลึกตัดส่งผลต่อความขรุขระผิวน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรอื่น ๆ
- การสึกหรอของเม็ดมีด (Tool wear)
 - เมื่อขนาดของการสึกหรอของเม็ดมีดมีค่ามากขึ้นจะพบว่าส่งผลต่อความขรุขระผิวจนขึ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีค่าความขรุขระผิวที่มากขึ้นตามไปด้วย

2. Vibration and Machine Tool Factors

- การสั่นสะเทือนระหว่างกระบวนการตัดนั้นจะส่งผลทำให้เกิดการตัดเป็นรูปคลื่น ซึ่งจะส่งผลให้ผิวชิ้นงานไม่มีความสม่ำเสมอทำให้ค่าความขรุขระมีค่ามากขึ้น สามารถแก้ไขได้ด้วยการลดอัตราการป้อนและความลึกตัด



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีงูมกับค่าความขรุขระผิวขึ้นงาน [8]

3.3 การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis)

การวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว และตัวแปรตาม 1 ตัว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้เป็นความสัมพันธ์อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง สามารถอธิบายและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ว่าตัวแปรใดมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง Y มากที่สุด เขียนอยู่ในสมการรูปแบบความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p$$

เมื่อ $\hat{y}$ = ตัวแปรตาม และ $X_1, X_2, \dots, X_p$ = เป็นตัวแปรอิสระ
 β = จุดตัดบนแกน Y และ $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient)

3.4 พื้นผิวผลตอบแทน (Response Surface)

3.4.1 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบแทน (Response Surface Design)

วิธีการพื้นผิวผลตอบแทน (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบแทนที่สนใจขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ ตัวอย่างเช่น สมมติว่าวิศวกรเคมีคนหนึ่งต้องการหาระดับของอุณหภูมิ (X_1) และความดัน (X_2) ที่จะทำให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิและความดัน กล่าวคือ

$$y = f(X_1, X_2) + \varepsilon$$

โดยที่ ε คือค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากทดลอง

ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(X_1, X_2) = f(X_1, X_2)$

ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = f(X_1, X_2)$$

ซึ่งเรียกว่า พื้นผิวตอบ (Response Surface)

โดยมากแล้วจะแสดงพื้นผิวตอบในรูปแบบของกราฟฟิก ตัวอย่างในรูปแบบ โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ X_1 และ X_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวตอบได้ดียิ่งขึ้น โดยมากแล้วจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Control Plot) ของพื้นผิวตอบดังแสดงในรูปแบบ ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ X_1 และ X_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง

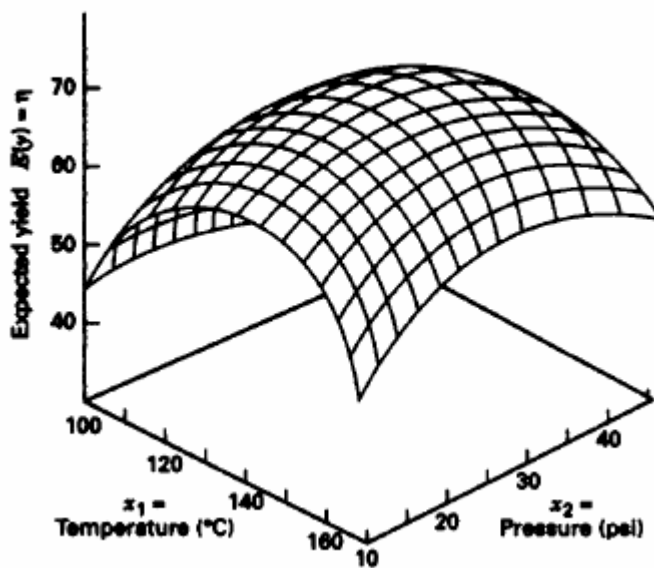
ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบส่วนมากจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นตอนแรกคือ จะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำ ๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ก็คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$$

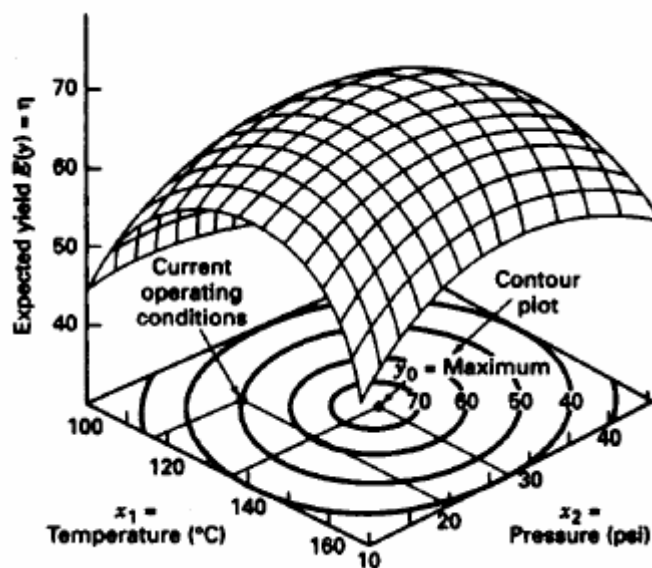
แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลัง

สอง

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$



รูปที่ 3.11 พื้นผิวผลตอบแทนแบบสามมิติ [23]

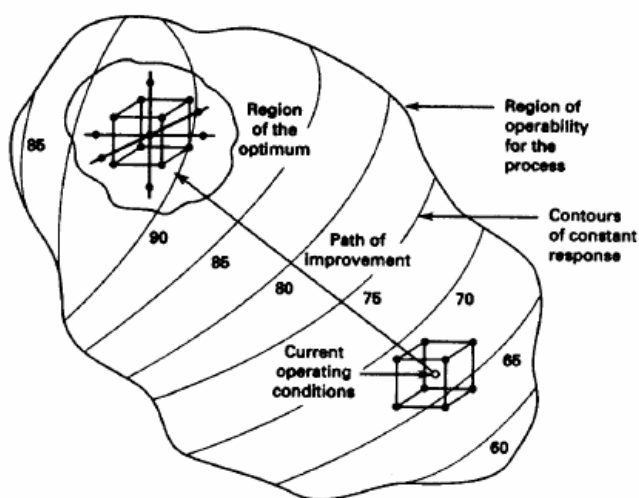


รูปที่ 3.12 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบแทน [23]

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนองมากจะใช้แบบจำลองหนึ่งในสองแบบที่กล่าวมานี้ แน่แน่นอนว่าแบบจำลองพหุนามที่กล่าวมานี้จะไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ แต่ทว่าถ้าพื้นผิวที่สนใจอยู่นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กแล้ว แบบจำลองเหล่านี้จะใช้งานได้ดีพอสมควร

วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองแบบพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นมานี้สามารถถูกประมาณได้เป็นอย่างดี ถ้าทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบสำหรับการสร้างพื้นผิวตอบสนองเรียกว่าการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design)

การวิเคราะห์พื้นผิว เช่น เป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอน ป้อยครั้งที่อยู่ที่จุดบนพื้นผิวผลตอบที่ห่างไกลออกไปจากจุดที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น ที่เงื่อนไขการทำงานในปัจจุบันในรูปที่ 3.11 ซึ่งจะพบว่าผลตอบของระบบนี้ไม่ค่อยเป็นส่วนโค้งและแบบจำลองกำลังหนึ่งก็พอเพียงในการสร้างแบบจำลองแล้ววัตถุประสงค์คือการนำการทดลองไปตามแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุดและอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อที่จะไปใกล้จุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด และเมื่อพบอาณาเขตของค่าที่ดีที่สุดแล้ว จะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้น เช่น แบบจำลองกำลังสอง เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ และการทดลองเช่นนี้จะทำเพื่อที่จะให้สามารถหาจุดที่ดีที่สุดได้ จากรูปที่ 3.12 พบว่าการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบเปรียบเสมือนกับการปีนภูเขา ซึ่งยอดของมันเป็นจุดที่มีผลตอบสูงสุด หรือถ้าหาค่าที่ดีที่สุดคือค่าที่ต่ำที่สุด ในที่นี้อาจจะคิดเสมือนว่า กำลังเคลื่อนที่ลงสู่หุบเขา จุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง คือ การหาเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยก่อให้เกิดการทำงานอย่างน่าพอใจ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ [23]

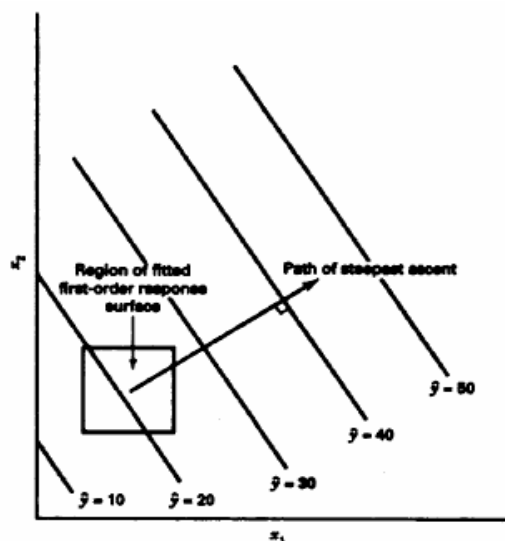
3.4.2 วิธีการสตีเพสแอสเซนท (Steepest Ascent Method) [23]

โดยทั่วไปเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมที่สุด (สูงที่สุด) ของระบบในช่วงเริ่มต้นจะอยู่ห่างจากเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงของระบบ ดังนั้นเป้าหมายของผู้ทำการทดลองคือการเคลื่อนที่เข้าไปใกล้บริเวณของเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมที่สุดอย่างรวดเร็วและถูกต้อง โดยใช้วิธีการทดลองที่ไม่ยุ่งยาก ประหยัด และมีประสิทธิภาพ ซึ่งในขณะที่เงื่อนไขการทำงานในช่วงเริ่มต้นอยู่ห่างจากเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงของระบบ จะสามารถใช้รูปแบบของสมการลำดับที่ 1 ในการประมาณพื้นผิวที่แท้จริง (True Surface) ในช่วงของ X ที่ไม่กว้างนัก

วิธีการสตีเพสแอสเซนทเป็นวิธีการเคลื่อนที่อย่างเป็นลำดับไปในทิศทางที่มีการเพิ่มขึ้นมากที่สุดของผลตอบแทน (Maximal Increase in the Response) โดยในกรณีที่เป็นปัญหาเกี่ยวกับการหาค่าน้อยที่สุด (Minimization Problem) วิธีการนี้จะเรียกว่า สตีเพสดีเซนท (Steepest Descent) จากรูปแบบของสมการลำดับที่ 1

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon$$

จะได้ว่าพื้นผิวสะท้อนหรือเส้นระดับ (Control) ของ y คือ ชุดของเส้นขนานดังรูป



รูปที่ 3.14 วิธีการสตีเพสแอสเซนท [23]

โดยทิศทางที่มีการเพิ่มขึ้นมากที่สุดของผลตอบแทน (Direction of Steepest Ascent) คือทิศทางที่ค่าของ y เพิ่มขึ้นมากที่สุด โดยทิศทางนี้จะขนานกับเส้นตั้งฉากของพื้นผิวสะท้อน โดยทั่วไปเส้นทางของสตีเพสแอสเซนท คือ เส้นตรงซึ่งผ่านจุดศูนย์กลางของบริเวณที่สนใจและตั้งฉากกับพื้นผิวสะท้อน

โดยขนาดของช่วงในการเคลื่อนที่ (Step Size) ในเส้นทางของสถิติเพสแอสเกนที่จะเป็นสัดส่วนกับสัมประสิทธิ์ของการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Coefficient หรือ β_i) โดยขนาดของช่วงในการเคลื่อนที่จะถูกกำหนดโดยผู้ทำการทดลองซึ่งขึ้นอยู่กับความรู้ในกระบวนการผลิตและความสะดวกในการปฏิบัติ

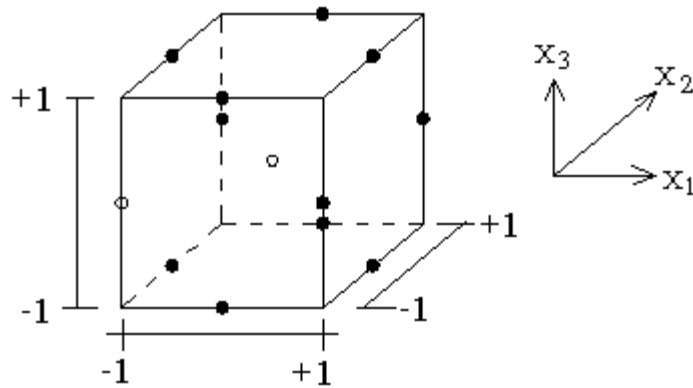
3.4.3 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพิดพื้นผิวตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^K กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

ตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัว รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.15 สังเกตว่าการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลม ที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ นอกจากนั้น การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนไม่ได้รวมเอาจุดใด ๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดในด้านสภาพของกระบวนการ

ตารางที่ 3.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

Run	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



รูปที่ 3.15 รูปแบบทางเรขาคณิตสำหรับแผนการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน [23]

3.4.5 การออกแบบ Central Composite

การออกแบบ Central Composite เป็นการออกแบบที่มีความยืดหยุ่นมากในด้านความสามารถในการทำให้เกิดการบล็อก ถ้า k มีค่าใหญ่พอ ส่วนของแฟกทอเรียลของการออกแบบจะสามารถถูกแบ่งออกเป็น 2 บล็อกหรือมากกว่าได้ (จำนวนของบล็อกแฟกทอเรียลจะต้องมีค่าเป็นกำลังสองโดยที่ส่วนในแนวแกนจะทำให้เกิดบล็อกขึ้นหนึ่งบล็อก)

มี 2 ประเด็นที่สำคัญเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อการออกแบบพื้นผิวตอบถูกรันในบล็อก ประการแรกเกี่ยวกับการใช้จุดศูนย์กลางเพื่อคำนวณตัวประมาณของค่าความผิดพลาดบริสุทธิ์ เฉพาะจุดศูนย์กลางที่ถูกรันในบล็อกเดียวกันเท่านั้นที่สามารถถูกนำมาพิจารณาว่าเป็นเรพลิเคตได้ ดังนั้น พจน์ของค่าความผิดพลาดบริสุทธิ์จะถูกคำนวณได้ภายในบล็อกเท่านั้น ถ้าความแปรปรวนมีความอยู่ร่อกับรอยตลอดทั้งบล็อกแล้ว ตัวประมาณค่าผิดพลาดบริสุทธิ์เหล่านี้จะสามารถถูกนำมารวมกลุ่ม (Pooled) กันได้ ประการที่สองเกี่ยวกับผลของบล็อก ถ้าการออกแบบมีการบล็อกอย่างเชิงตั้งฉากใน m บล็อกแล้ว ผลรวมกำลังสองสำหรับบล็อกจะมีค่าเท่ากับ

$$SS_{Blocks} = \sum_{b=1}^m \frac{B_b^2}{n_b} - \frac{G^2}{N}$$

โดยที่ B_b คือ ผลรวมทั้งหมดของ n_b ค่าสังเกตในบล็อกที่ b และ G คือค่าผลรวมทั้งหมดของ N ค่าสังเกตใน m บล็อกทั้งหมด เมื่อบล็อกไม่ได้เป็นแบบเชิงตั้งฉากตรงๆแล้ว สามารถนำเอาการทดสอบความมีนัยสำคัญของการถดถอยแบบทั่วไปมาใช้ได้



การควบคุมผลการทดลองที่ดีนั้นจะต้องมีกระบวนการออกแบบการทดลองที่มีการควบคุมให้ได้ผลการทดลองที่ได้รับความน่าเชื่อถือที่สุด การพิจารณาค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของผลการทดลองที่ได้จากกระบวนการทดลองจึงเป็นสิ่งที่ต้องให้การควบคุมอย่างดี

การหาผลที่ดีที่สุด หลังจากทำการหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองแล้ว การหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยนั้น ๆ สามารถหาได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง ซึ่งอยู่ในรูปแบบคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมที่สุดสามารถใช้หลักการของแผนภาพของผลตอบสนอง (Response Surface Plot) และโครงร่างของผลตอบสนอง (Contour Plot) หรือ ใช้หลักการหาโดยเทคนิคของการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization)

3.5 การวิเคราะห์ผล [20]

3.5.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) [20]

เทคนิคในการจัดสรรความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในกลุ่มของข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยต่าง ๆ ตามแหล่งที่ทำให้เกิดความแปรปรวน สมการเบื้องต้นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน คือ

ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล

สมการดังกล่าว ได้จากข้อคิดที่ว่าความแตกต่างกันของข้อมูลอาจมีมาจากสาเหตุของความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล (หรือความผิดพลาดแบบสุ่ม) เพียงอย่างเดียว หรืออาจจะมาจากการที่ปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลาย ๆ ปัจจัยทำให้เกิดความแปรผัน ทำให้สามารถสร้างสมการได้ 4 ลักษณะ

- 1.) ถ้าความแปรผันในข้อมูลนั้น เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ จะได้สมการ

$$Y_i = \mu + \varepsilon_i$$

ค่า Y_i จะแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของประชากร μ ด้วยค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม ε_i

- 2.) ถ้าจากการทดลองหรือการเก็บรวบรวมข้อมูล พบว่าความแปรผันของข้อมูลมาจากปัจจัยตัวหนึ่ง จะได้สมการ

$$Y_{ij} = \mu + T_j + \varepsilon_{ij}$$

ค่า Y_i จะแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของประชากร μ ด้วยความแปรผันจากปัจจัย T และค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม ε_i



3.) ถ้าจากการทดลองพบว่า ความแปรผันของข้อมูลเกิดจากปัจจัย n ตัวที่ทำให้เกิดความแปรผันในข้อมูลจะได้สมการ

$$Y_{ijk} = \mu + T_j + N_k + \dots + \varepsilon_{ijk}$$

4.) ถ้าความแปรผันของข้อมูล เนื่องมาจากปัจจัย 2 ปัจจัยและอิทธิพลร่วมกันของปัจจัยจะได้สมการ

$$Y_{ijk} = \mu + T_j + N_k + TN_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

สมการ Y เป็น รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการทดลองซึ่งได้จากการจัดสรรความแปรผันออกเป็น ส่วน ๆ ตามที่มาของแหล่งที่ทำให้เกิดความแปรผัน

จากรูปแบบของ Y การวิเคราะห์กระทำโดยการหาขนาดของความแปรผันของปัจจัยในรูปแบบของผลบวกกำลังสอง (Sum of Square) เทียบกับขนาดของความผิดพลาดแบบสุ่มในรูปแบบของผลบวกกำลังสอง เพื่อพิจารณาว่าขนาดของความแปรผันของปัจจัยนั้น ๆ มีนัยสำคัญทางสถิติที่จะยอมรับว่าปัจจัยนั้น ๆ มีอิทธิพลที่ทำให้เกิดความแปรผันในข้อมูลจริง ๆ โดยใช้สถิติในการทดสอบคือ ตัวสถิติ F โดยที่

$$F = \frac{\text{ผลบวกกำลังสองของปัจจัย} / \text{องศาความอิสระของปัจจัย}}{\text{ผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม} / \text{องศาความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม}}$$

$$F = \frac{\text{ผลบวกกำลังสองของปัจจัย} / \text{องศาความอิสระของปัจจัย}}{\text{ผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม} / \text{องศาความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม}}$$

เปรียบเทียบค่า F ที่คำนวณได้กับค่า $F_{\alpha, a, b}$ จากตารางการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบ F

โดยที่ α = ระดับนัยสำคัญ

a = องศาความอิสระของปัจจัย

b = องศาความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

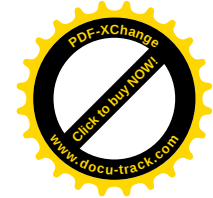
ถ้า $F > F_{\alpha, a, b}$ ยอมรับอิทธิพลของปัจจัย และถ้า $F \leq F_{\alpha, a, b}$ ปฏิเสธอิทธิพลของปัจจัย

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบสมมติฐานทางสถิติในการทดลองที่มีปัจจัยที่สนใจศึกษา 2 ตัว คือ A และ B ต้องการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ 3 อย่าง คือ

1) การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลหลักของปัจจัย A คือ

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$



2) การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลหลักของปัจจัย B คือ

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

3) การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย คือ

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ ทุก } i, j$$

$$H_1: (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

3.5.2 การหาค่า P (P value)

โดยทั่วไปเมื่อต้องการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานนั้น สิ่งที่น่าสนใจ คือ สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) จะถูกยอมรับหรือปฏิเสธ ถ้าถูกยอมรับ หมายถึง สมมติฐานเป็นจริง และถ้าถูกปฏิเสธ หมายถึง สมมติฐานนั้นไม่เป็นจริง จึงมีการกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ เพื่อที่จะบอกยอมรับหรือปฏิเสธ Null hypothesis เรียกว่า Probability Value (P-Value) ค่า P Value นี้จะอ้างอิงอยู่กับ α โดยที่ P-Value คือ ค่าจริง (Actual) ของ probability ซึ่งได้จากการคำนวณ ส่วน α คือเส้นกำหนดหรือจุดแบ่งระหว่าง การยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานหลัก ซึ่งก็คือ Probability เหมือนกัน โดยจะยอมรับสมมติฐานหลัก ถ้า P-Value มากกว่า α และปฏิเสธ ถ้า P-Value เท่าหรือน้อยกว่า

3.5.3 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Residual Analysis)

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของปัจจัย 2 ปัจจัย และผลจากการทดสอบอิทธิพลร่วมพบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยนั้น จึงเขียนตัวแบบสถิติของ การทดลองนี้ซึ่งไม่มีอิทธิพลร่วม คือ

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk}$$

- เมื่อ
- y_{ijk} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม
 - μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่
 - τ_i คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของปัจจัย
 - ε_{ijk} คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

ก่อนที่จะสรุปผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ควรตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบสถิตินี้ก่อน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบก็คือการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน ขั้นตอนแรกของการ

วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนคือ การคำนวณค่าประมาณของความคลาดเคลื่อนของตัวแบบการทดลอง
แฟกทอเรียลที่มี 2 ปัจจัย และ 2 ปัจจัยนั้นไม่มีอิทธิพลร่วมกันคือ

$$e_{ijk} = y_{ijk} - \hat{y}_{ijk} \quad \text{เมื่อ } \hat{y}_{ijk} = \bar{y}_{i..} + \bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..}$$

3.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

B. Fnides, H. Aouici และ M.A. Yallese [9] ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการตัดกับความ
ขรุขระผิวชิ้นงานสำหรับงานกลึง โดยใช้มีดตัดแบบ Mixed ceramic ทำการตัดวัสดุชนิด X38CrMoV5-1
จากงานวิจัยพบว่า

1. ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัด เมื่ออัตราป้อนตัดมีค่าเพิ่มขึ้น
เนื่องจากการเพิ่มอัตราป้อนตัดเป็นการเพิ่มช่วงความกว้างของการตัด ซึ่งส่งผลให้ช่วงผิวที่เกิดจากการ
ตัดมีช่วงที่กว้างและลึกขึ้น
2. ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่าลดลงและค่อย ๆ คงที่เมื่อความเร็วตัดมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก
การที่ความเร็วตัดมีค่ามากขึ้นทำให้ระยะสัมผัสระหว่างผิวชิ้นงานกับมีดตัดมีมากขึ้นจึงเป็นการปรับ
ระดับความลึกผิวที่เกิดจากมุมมีดตัดให้ราบเรียบมากขึ้น
3. ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความลึกตัดมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการ
เพิ่มระยะสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับมีดตัด จึงทำให้มีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานเพียงเล็กน้อย
4. เมื่อขนาดความสึกหรอของมีดตัด (Flank wear) มีขนาดเพิ่มขึ้น เป็นผลให้แรงตัดมีค่ามากขึ้น
ตามไปด้วย เนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานมีมากขึ้น นั่นคือมีแรงเสียดทานมากขึ้น ผลที่
ตามมาทำให้คุณภาพผิวชิ้นงานแย่ลง

Luke Huang และ Joseph C. Chen [10] ใช้สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple regression model)
เพื่อพยากรณ์ความขรุขระผิวในระหว่างกระบวนการตัดสำหรับงานกลึงโดยใช้ตัววัดอัตราเร่ง
(Accelerometer) งานวิจัยนี้ได้แบ่งข้อมูลออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ข้อมูลสำหรับ Training (162
ข้อมูล) และข้อมูลสำหรับ Testing (54 ข้อมูล) ข้อมูลในส่วนของ Training นั้นจะถูกใช้เป็นตัวแบบและ
ข้อมูล Testing จะถูกใช้เพื่อทดสอบความแม่นยำของข้อมูล Training ตัวแปรสำหรับงานวิจัยแบ่ง
ออกเป็นตัวแปรต้น (ความเร็วรอบ อัตราป้อนตัด ความลึกการตัด และสัญญาณแอมพลิจูดเฉลี่ยของการ
สั่นสะเทือน) และตัวแปรตาม (ความขรุขระผิวชิ้นงาน) จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีวิเคราะห์สมการ
ถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple regression) และสรุปความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ผ่าน Pearson
correlation coefficients พบว่า อัตราป้อนตัด มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์มากที่สุด และสัญญาณแอม
พลิจูดเฉลี่ยของการสั่นสะเทือนมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์รองลงมา

E. Daniel Kirby, Zhe Zhang และ Joseph C. Chen [11] ทำการพัฒนาระบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานจากตัววัดอัตราเร่ง (Accelerometer) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression) สำหรับงานกลึง งานวิจัยนี้ได้แบ่งตัวแปรสำหรับการทดลองออกเป็นตัวแปรต้น (ความเร็วรอบ อัตราป้อนตัด ความลึกการตัด) และตัวแปรตาม (ความขรุขระผิวชิ้นงาน สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวแกน X สัญญาณการสั่นสะเทือนแนวแกน Z) โดยทำการตัดชิ้นงานที่เงื่อนไขต่าง ๆ และทำการเก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนระหว่างขั้นตอน Finish cut จากนั้นทำการวัดความขรุขระผิวชิ้นงานที่ผ่านการตัด ผลจากการวิเคราะห์ตามวิธีสมการถดถอย (Regression) พบว่า ความเร็วรอบและความลึกการตัดแทบจะไม่มีผลกระทบต่อความขรุขระของผิวชิ้นงาน ส่วนอัตราป้อนตัดนั้นจะมีผลกระทบต่อความขรุขระผิวมากกว่าเมื่อเทียบกับความเร็วรอบและความลึกการตัด

Tug̃rul Õ zel* และ Yig̃it Karp̃at [12] ได้ทำการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานจากการสึกหรอของมิดตัดด้วยวิธีวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression) และ Neural networks งานวิจัยได้ทำการสร้างข้อมูล Train เพื่อเป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานและการสึกหรอของมิดตัดสำหรับเงื่อนไขการตัดอื่น ๆ ตัวแปรที่ใช้พยากรณ์คือ ความแข็งวัสดุ (H) รูปร่างคมมิด (E) ความเร็วตัด (V) อัตราป้อนตัด (f) และความยาวตัด (L) จากการวิเคราะห์ด้วย ANOVA สำหรับขรุขระผิวชิ้นงานพบว่า ตัวแปรความแข็งวัสดุ และความยาวตัดมีผลกระทบต่อความขรุขระผิวชิ้นงานน้อยมาก ($H \times f$, $H \times L$, $V \times L$, $E \times L$, $f \times L$) ส่วนการสึกหรอของมิดตัดพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $H \times V$, $H \times E$, $V \times L$ และ $E \times L$ มีผลต่อการสึกหรอของมิดตัดน้อยมาก ผลจากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์พบว่าการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานและการสึกหรอของมิดตัดด้วย Neural networks มีความแม่นยำสำหรับเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ที่อยู่ในช่วงของข้อมูล Train และเมื่อเทียบกับวิธีวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression) พบว่าวิธี Neural networks สามารถพยากรณ์ได้ดีกว่าเนื่องจากสามารถคำนวณความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนได้ดีกว่าการคำนวณด้วยวิธีเชิงเส้นและเอ็กโปเนนเชียลอย่างวิธีวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression)

Tug̃rul Õ zel, Yigit Karp̃at, Lũ's Figueira, และ J. Paulo Davim [13] ศึกษาสมการแบบจำลองของผิวสำเร็จและการสึกหรอของมิดตัดสำหรับงานกลึงเหล็ก AISI D2 ด้วย Ceramic wiper insert จากงานวิจัยทำการเก็บผลการทดลองทั้งหมด 27 ชุดการทดลองจากการกำหนดค่า ความเร็วตัดเท่ากับ 80, 115, 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.05, 0.1, 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ และเวลาการตัด 5, 10, 15 นาที โดยใช้ค่าความลึกตัดคงที่ 0.2 มิลลิเมตร จากข้อมูลการทดลองได้ทำการวัดค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) และค่าการสึกหรอของมิดตัด (VB_c) จากข้อมูลที่ได้ทำการสร้างแบบสมการจำลองเพื่อพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานและการสึกหรอของมิดตัดได้ตามสมการด้านล่าง



$$R_a = -1.8 \times 10^{-3} V_c + 3.44 f + 1.4 \times 10^{-2} t_c + 1.6$$
$$VB_c = 2.16 \times 10^{-4} V_c + 0.23 f + 6.5 \times 10^{-3} t_c - 8.7 \times 10^{-3}$$

จากงานวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. อัตราการป้อนตัดและความเร็วตัดมีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยผิวชิ้นงานมีค่าดีที่สุดเมื่อเลือกใช้อัตราการป้อนตัดต่ำและความเร็วตัดที่สูงสุด
2. อัตราการป้อนตัดและความเร็วตัดมีผลต่อการสึกหรอของมีดตัด

Chen-Xue Feng [14] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อความขรุขระผิวชิ้นงานสำหรับงานกลึง ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ วัสดุชิ้นงาน มุมมีด ความเร็วรอบ ความลึกตัด และอัตราป้อนตัด การหาความสัมพันธ์แบ่งออกเป็นตัวแปรหลัก 5 ตัวแปร และความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรอีก 10 ตัวแปร ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า

1. วัสดุชิ้นงาน มุมมีด ความเร็วรอบตัด และอัตราป้อนตัด มีผลต่อความขรุขระของผิวชิ้นงานมาก ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรพบว่า วัสดุ×มุมมีด, วัสดุ×ความลึกตัด, มุมมีด×ความเร็วรอบ มีผลต่อความขรุขระของผิวชิ้นงานเช่นกัน
2. สามารถปรับปรุงความขรุขระผิวชิ้นงานโดยเลือกใช้วัสดุชิ้นงานที่อ่อน อัตราป้อนตัดต่ำ มุมมีดขนาดใหญ่ และความเร็วรอบสูง
3. สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปร ที่สามารถปรับปรุงความขรุขระผิวชิ้นงาน คือ
 - ควรใช้มุมมีดใหญ่กับวัสดุที่อ่อน
 - ถ้าวัสดุอ่อนควรใช้ความลึกตัดที่มาก
 - ความเร็วรอบสูงกับมุมมีดเล็ก สามารถปรับปรุงคุณภาพผิวชิ้นงานได้เล็กน้อยเมื่อเทียบกับความเร็วรอบสูงกับมุมมีดใหญ่

Chen-Xue Feng และ Xian-Feng Wang [15] ศึกษาแบบจำลองการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้วิธี Neural Networks กับ วิธีวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression) สำหรับวิธีวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression) งานวิจัยได้นำเสนอแบบจำลองการพยากรณ์เอ็กโพเนนเชียลตามสมการด้านล่าง

$$R_a = Ch^{a1} f^{a2} r^{a3} d^{a4} s^{a5}$$



โดยมีตัวแปรอิสระ คือ ความแข็งแรงวัสดุ อัตราการป้อนตัด จมูกมิดตัด ความลึกตัด และ ความเร็วตัด เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน จากสมการทำการใส่ค่า $\log$ ทั้งสองข้างและทำการแทนค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรได้ดังสมการด้านล่าง

$$\ln R_a = \ln C + a_1 \ln h + a_2 \ln f + a_3 \ln r + a_4 \ln d + a_5 \ln s$$
$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5$$

หลังจากหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม MINITAB จะได้สมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานดังสมการด้านล่าง

$$R_a = \frac{4.437 f^{1.925}}{s^{6.138} r^{3.176}} e^{1.358 \ln d \ln s + 0.702 \ln h \ln r - 0.347 \ln h \ln f}$$

จากสมการได้ทำการตัดตัวแปรความแข็งแรงของวัสดุ และความลึกการตัดออกเนื่องจากว่ามีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานน้อยมาก และทำการเพิ่มความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปรเข้าไปในสมการ คือ ความสัมพันธ์ระหว่าง ความลึกการตัดกับความเร็วรอบตัด ความแข็งแรงของวัสดุกับรัศมีจมูกมิด และ ความแข็งแรงวัสดุกับอัตราการป้อนตัด จากแบบจำลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ความขรุขระผิวชิ้นงาน (ยิ่งมีค่าน้อยยิ่งดี) สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ด้วยการลดอัตราการป้อนตัด ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของวัสดุกับรัศมีจมูกมิดตัด และความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงวัสดุและความเร็วตัด อย่างไรก็ตาม การเพิ่มรัศมีจมูกมิดตัด, ความเร็วตัด หรือ ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงวัสดุกับอัตราการป้อนตัด ก็สามารถปรับปรุงคุณภาพผิวชิ้นงานให้ดีขึ้นได้เช่นกัน

Somkiat T [16] เสนองานวิจัยในการพัฒนาระบบการตรวจติดตามที่ได้แยกสถานะการกลึงออกเป็น 4 แบบ คือ การเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง การเกิดเศษโลหะแบบแตก การเกิดเศษโลหะแบบแตกผสมต่อเนื่อง และการเกิดการสั่นในขณะตัด ซึ่งระบบที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถแยกสถานะของการกลึงได้เป็นอย่างดีเยี่ยม โดยการเกิดเศษโลหะแบบแตกเป็นสถานะของการกลึงที่ต้องการให้เกิด เพื่อลดปัญหาการพ่นกันของเศษโลหะแบบต่อเนื่อง และลดปัญหาความหยาบของผิวที่เกิดจากการสั่นในขณะตัด โดยใช้เซนเซอร์วัดแรงตัดเป็นเครื่องมือในการตรวจวัด และตรวจจับแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกลึง ระบบที่พัฒนาขึ้นยังได้เสนอดัชนีในการตรวจจับสถานะของการกลึงจากแรงตัดที่วัดได้ในขณะทำการกลึงจริง สุดท้ายแรงตัดที่ตรวจวัดได้จะถูกนำมาวิเคราะห์และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะทำให้งานกระบวนการกลึงได้สถานะตามที่ต้องการในที่สุด

Moriwaki T, Somkiat T, และ Shibasaka T [17] เสนอระบบและขั้นตอนต่าง ๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อหาค่าความเร็วตัดที่เหมาะสมในระหว่างกระบวนการกลึงจริงสำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซี ไดนาโมมิเตอร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นและติดตั้งในเครื่องกลึงซีเอ็นซีสำหรับใช้วัดแรงตัดในขณะที่ทำการกลึงชิ้นงาน โดยแรงตัดที่วัดได้ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าขนาดรอยสึกหรอของมีดตัดและตรวจสอบเสถียรภาพในขณะกลึงชิ้นงาน ว่าเศษโลหะที่เกิดขึ้นเป็นแบบใด ขนาดรอยสึกหรอของมีดตัดที่ประมาณได้ถูกนำมาคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและอัตราการสึกหรอของมีดตัดในระหว่างกระบวนการกลึงจริง สมการอายุมีดตัดสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและอัตราการสึกหรอของมีดตัดทั้งหมดที่คำนวณในฐานข้อมูลโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด สมการอายุมีดตัดที่คำนวณได้ถูกนำไปใช้เพื่อหาค่าความเร็วตัดที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากเกณฑ์ต้นทุนการผลิตต่ำสุดหรืออัตราการผลิตสูงสุด ระบบจะเปลี่ยนค่าความเร็วตัดปัจจุบันเป็นค่าความเร็วตัดใหม่ที่เหมาะสมที่คำนวณได้ใหม่ในกระบวนการกลึงจริง ชิ้นงานเหล็กกล้าและมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบถูกนำมาใช้ในการทดลองระบบที่พัฒนาขึ้น จากผลการทดลองได้พิสูจน์ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณค่าความเร็วตัดที่เหมาะสมได้เองอย่างเป็นที่น่าพอใจในระหว่างกระบวนการกลึงจริง และระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับชิ้นงานและมีดตัดชนิดอื่นได้โดยระบบจะทำการหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมเองได้ในระหว่างการกลึงจริง

Moriwaki T, Shibasaka T, และ Somkiat T [18] เป็นงานวิจัยที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อจะพัฒนาระบบการตรวจติดตามการสึกหรอของมีดตัดในระหว่างกระบวนการกลึงสำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซี ฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียลแบบเสื่อมถอยถูกนำมาใช้เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการตัดเฉพาะและอัตราการป้อนตัด ค่าดัชนี d ในฟังก์ชันถูกกำหนดเป็นตัวชี้วัดขนาดของการสึกหรอของมีดตัด ซึ่งดัชนี d มีค่าเทียบเท่ากับอัตราส่วนความต้านทานการตัดเฉพาะ ที่อัตราการป้อนตัดศูนย์และที่อัตราการป้อนตัดอนันต์ เพื่อที่ต้องการจะหาค่า d ทฤษฎีได้ถูกเสนอให้แทรกคำสั่งเพิ่มเติมในกระบวนการตัดจริงเมื่อต้องการตรวจสอบหาขนาดการสึกหรอของมีดตัด โดยในคำสั่งเพิ่มเติมจะเปลี่ยนอัตราการป้อนตัดปัจจุบันในกระบวนการตัดปกติให้เป็นอัตราการป้อนตัดแบบขั้นขึ้นหรือขั้นลงที่อัตราการป้อนตัดต่ำ ๆ อย่างตั้งใจ เพื่อวัดแรงตัดและระบุอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านทานการตัดเฉพาะ ไดนาโมมิเตอร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นและติดตั้งในเครื่องกลึงซีเอ็นซีสำหรับใช้วัดแรงตัดในขณะที่ทำการกลึงชิ้นงาน จากผลการทดลองการประมาณขนาดของการสึกหรอของมีดตัดในระหว่างกระบวนการตัดจริง ได้พิสูจน์แล้วว่าดัชนี d เป็นตัวชี้วัดที่ดีในการประมาณขนาดของการสึกหรอของมีดตัด ถึงแม้เงื่อนไขการตัดจะแตกต่างกัน

Moriwaki T, Shibasaka T, และ Somkiat T [19] งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะเชิงปัญญาขึ้น เพื่อประกันความเชื่อมั่นของระบบปฏิบัติการตัดอัตโนมัติให้สูงขึ้น ซึ่งการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะมีความสำคัญต่อระบบปฏิบัติการการตัดอัตโนมัติอย่างมากในระหว่างกระบวนการตัดจริง

จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ สามารถจำแนกลักษณะความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงป้อนตัดพลวัตที่เกิดขึ้นของเศษโลหะได้สองประเภท หนึ่งคือความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดพลวัตที่มีขนาดใหญ่ในช่วงความถี่ต่ำ จะเกิดขึ้นขณะที่เศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่อง ส่วนอีกประเภทคือความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดพลวัตที่มีขนาดใหญ่มากในช่วงความถี่ที่แน่นอน ซึ่งจะสอดคล้องกับความถี่ของการแตกหักของเศษโลหะ ดังนั้นการแตกหักของเศษโลหะสามารถตรวจจับได้โดยการประยุกต์ใช้ความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงป้อนตัดพลวัต ทฤษฎีและอัลกอริทึมได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะ ในระหว่างกระบวนการตัดจริง โดยอ้างอิงจาก อัตราส่วนของความหนาแน่นเพาเวอร์สเปกตรัมของแรงป้อนตัดพลวัตในช่วงความถี่ของการแตกหักของเศษโลหะเทียบกับความถี่ทั้งหมด

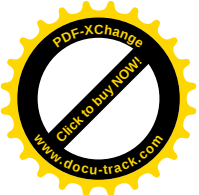
จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ได้พิสูจน์แล้วว่า ระบบและทฤษฎีที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับการเกิดเศษโลหะแบบแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ได้โดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกัน ดังนั้นระบบที่พัฒนาขึ้นจึงสามารถนำไปใช้ตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะได้จริง ในระหว่างกระบวนการตัดจริง เพื่อหาเสถียรภาพและสภาพเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมได้ และอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ที่มีผลต่อรูปร่างของเศษโลหะและชนิดของเศษโลหะเช่น ความเร็วตัด รัศมี จมูกมีดตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด และขนาดการสึกหรอของมีดตัด ได้ถูกอภิปรายจากข้อมูลผลการทดลองทั้งหมด

งานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอข้างต้น [12, 13, 14, 15] ส่วนมากทำการศึกษาสมการการพยากรณ์ความเรียบผิวชิ้นงานแบบ off-line โดยเป็นการสร้างสมการค้นแบบจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่เสร็จสิ้นแล้ว และตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างสมการส่วนใหญ่เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความแข็งของวัสดุและเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ

มีบางงานวิจัยที่สร้างสมการค้นแบบการพยากรณ์ความเรียบผิวชิ้นงานที่เป็นแบบ on-line เช่น งานวิจัย [10, 11] ติดตั้งเซนเซอร์วัดอัตราเร่ง (Accelerometer) ไว้ที่ปลายมีดกลึงเพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณที่เกิดขึ้นทั้ง 3 แนวแกน แล้วนำค่าที่ได้ไปใช้สำหรับสร้างสมการการพยากรณ์ความเรียบผิวชิ้นงาน ส่วนงานวิจัย [13] นำเซนเซอร์วัดแรง (Dynamometer) มาใช้เพื่อเป็นตัวแปรเพิ่มเข้าไปในสมการ แต่เป็นการเพิ่มตัวแปรในรูปของแรงตัดทั้งสามแกนว่ามีผลต่อความเรียบผิวชิ้นงานอย่างไร

จากการประยุกต์ใช้เซนเซอร์ทั้งสองชนิด จะเห็นได้ว่าเป็นการวิเคราะห์จากสัญญาณที่ได้จาก 3 แนวแกน แล้วนำมาหาความสัมพันธ์เพื่อสร้างสมการการพยากรณ์ความเรียบผิวชิ้นงาน ซึ่งสัญญาณทั้ง 3 แกนนี้สามารถเปลี่ยนแปลงมากขึ้นหรือน้อยลงโดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการตัดที่เลือกใช้ และจะมีเพียง 2 สัญญาณที่มีค่ามากที่สุดและรองลงมา หากนำสัญญาณทั้ง 2 ดังกล่าวมาหาความสัมพันธ์ในรูปของสัดส่วนของสัญญาณ ก็จะสามารถสร้างสมการที่ประยุกต์ใช้กับเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ได้กว้างมากขึ้นไม่ว่าสัญญาณมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอสมการการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานด้วยการประยุกต์ใช้เซนเซอร์วัดแรง (Dynamometer) โดยการเพิ่มความสัมพันธ์ในรูปแบบของสัดส่วนแรงตัดที่มีค่ามากที่สุด



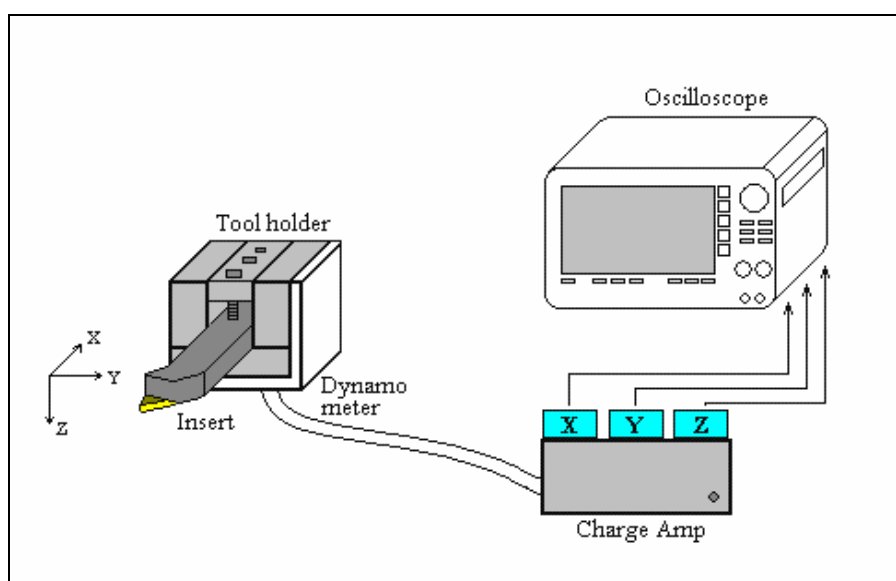
2 แร่ร่วมกับตัวแปรเงื่อนไขการตัด เพื่อที่ว่าสมการที่ได้จะสามารถพยากรณ์ความเรียบผิวชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขการตัดที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น

บทที่ 4

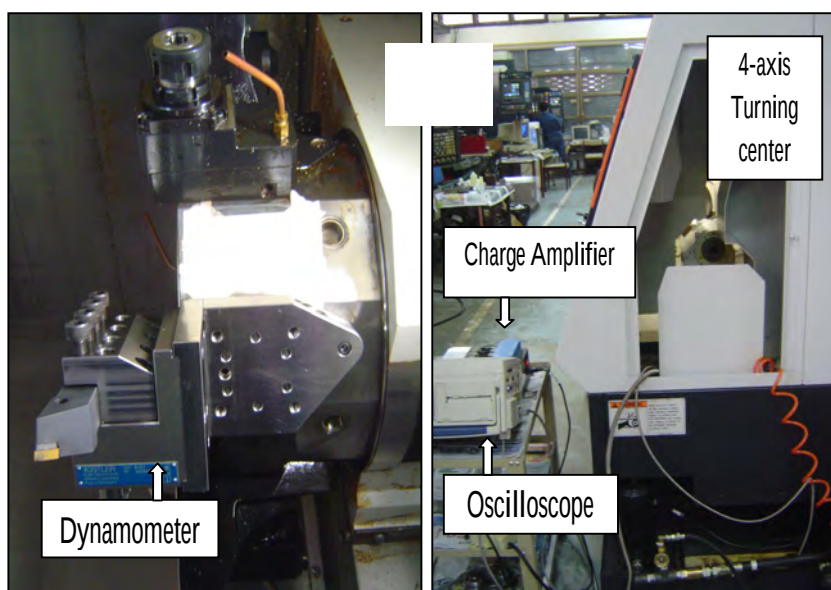
การดำเนินงานวิจัย

4.1 ขั้นตอนการติดตั้งมิดตัดและเครื่องมือวัดแรงตัด

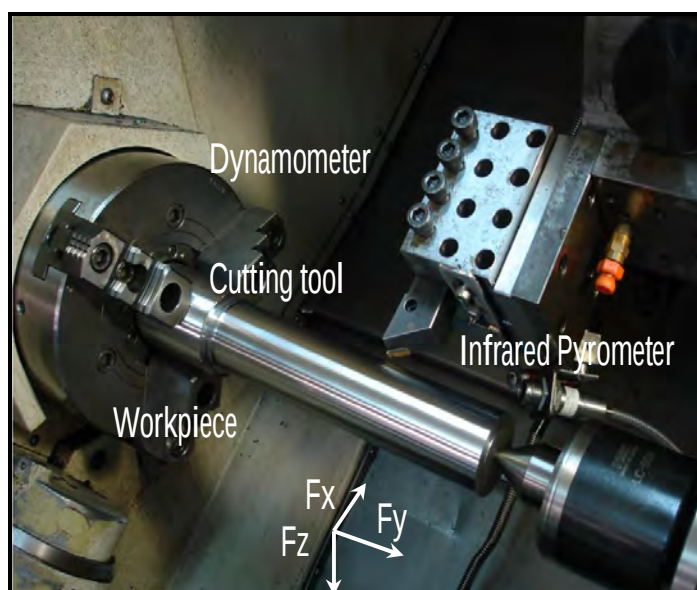
1. ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดแรง (Dynamometer) เข้ากับชุดจับยึดชิ้นงาน (Tool holder) ที่ออกแบบมาเพื่อติดตั้งเข้ากับป้อมมิดของเครื่องกลึง ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2
2. เชื่อมต่อเครื่องมือวัดแรงเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณเพื่อทำการขยายสัญญาณ
3. ต่อเครื่องขยายสัญญาณเข้ากับออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่อทำการเก็บสัญญาณ
4. ติดตั้งเม็ดมิดตัดกับด้ามมิดแล้วนำไปจับยึดเข้ากับชุดจับยึดที่ติดตั้งเครื่องมือวัดแรงตัด
5. ติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Infrared Pyrometer) เข้ากับป้อมมิดกลึงเพื่อวัดอุณหภูมิในการตัดดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 การติดตั้งเครื่องมือวัดแรง (Dynamometer) สำหรับการวัดและเก็บสัญญาณแรงตัด



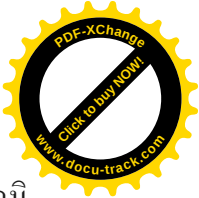
รูปที่ 4.2 การติดตั้งเครื่องมือวัดแรง (Dynamometer) ภายในเครื่องกลึงซีเอ็นซี



รูปที่ 4.3 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Infrared Pyrometer)

4.2 ขั้นตอนการออกแบบการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลการตัด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ การศึกษาและพัฒนาการตัดให้ดีขึ้นโดยการประยุกต์ใช้การตัดแบบแห้งและเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดจากการตัดแบบแห้ง ที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของมีดตัด ความเรียบผิวของชิ้นงาน แรงตัด และอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ดังนั้นในการทดลองจะทำการ



แปรผันปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน ความสึกหรอของมีดตัด แรงตัด และอุณหภูมิ การออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกลึงปอกผิวชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C เพื่อควบคุมความเรียบผิวให้ได้ตามที่กำหนด ดังนั้นในการทดลองจะทำการแปรผันปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน ความสึกหรอของมีดและแรงตัดที่เป็นพารามิเตอร์ในการกลึงชิ้นงาน (Cutting Condition) คือ อัตราการป้อน ความเร็ว และ ความลึกตัด โดยในขั้นตอนของการเก็บข้อมูลการตัดดังต่อไปนี้

1. เตรียมชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ยึดจับด้วยเครื่องกลึง ยันศูนย์ชิ้นงาน แล้วทำการปอกผิวนอกที่มีความแข็งกว่าปกติทิ้ง
2. เมื่อชิ้นงานเรียบร้อยแล้วจึงทำการเขียนโปรแกรมลงบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อตัดชิ้นงานให้ได้ปริมาตรตามที่ต้องการ
3. ติดตั้งมีดตัด
4. ทำการกลึงปอกผิวด้วยเงื่อนไขการตัดที่จะทำการทดลอง
5. วัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ปริมาตรเริ่มต้น (0 ลูกบาศก์เซนติเมตร) และ ทุก ๆ การตัดที่ปริมาตร 500, 1000, 1500, 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร
6. เมื่อกลึงชิ้นงานจนถึงปริมาตร 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตรหรือมีดตัดสึกหรอจนไม่สามารถใช้งานได้ก็จะทำการเปลี่ยนมีดตัดและทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดต่อไป
7. เขียนกราฟระหว่างปริมาตรการตัดกับผลตอบต่าง ๆ คือ ความสึกหรอของมีดตัด ความเรียบผิวชิ้นงาน แรงในการตัด และอุณหภูมิขณะตัด ที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ
8. สรุปผลที่ได้จากการทดลอง

สำหรับการทดลองนี้จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขการตัดแบบแห้ง โดยใช้มีดตัด 3 ชนิด คือ มีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว KC9110, TPMP 160304 HQ และ TPMP 160308 HQ และใช้ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน โดยกำหนดระดับของปัจจัย (Level) จะกำหนดเป็นแบบคงที่ โดยอาศัยข้อมูลเชิงเทคนิคของบริษัทผู้ผลิตมีดตัดที่แนะนำจากคู่มือการใช้งานมีดตัดโดยกำหนดให้

- 1) อัตราป้อน ทำการวิจัย 3 ค่า ดังนี้ 0.15, 0.175, 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ
 - 2) ความเร็วรอบ ทำการวิจัย 3 ค่า ดังนี้ 150, 250, 350 เมตรต่อนาที
 - 3) ความลึกในการตัด ทำการวิจัย 2 ค่า ดังนี้ 0.5, 0.75, 1.0 มิลลิเมตร
- โดยค่าปัจจัยต่าง ๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 สรุปเงื่อนไขในการตัดสำหรับการทดลองที่เงื่อนไขการตัดแบบแห้ง

ชนิดของมีดตัด	คาร์ไบด์เคลือบผิว KC9110	คาร์ไบด์เคลือบผิว TPMR 160304 HQ	คาร์ไบด์เคลือบผิว TPMR 160308 HQ
รัศมีงูมมีดตัด (มิลลิเมตร)	0.4	0.4	0.8
อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)	0.15, 0.18	0.15, 0.18	0.15, 0.18
ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	150, 250, 350	150, 250	150, 250
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.5, 1.0	0.25, 0.5	0.15, 0.25
ปริมาณเศษโลหะ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	0, 500, 1000, 2000	0, 500, 1000, 2000	0, 500, 1000, 2000

4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.3.1 วัสดุชิ้นงาน (Workpiece material) ชิ้นงานทดสอบเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน S45C มีลักษณะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร และยาว 300 มิลลิเมตร สำหรับตัดให้ได้ปริมาตรตามที่ต้องการ



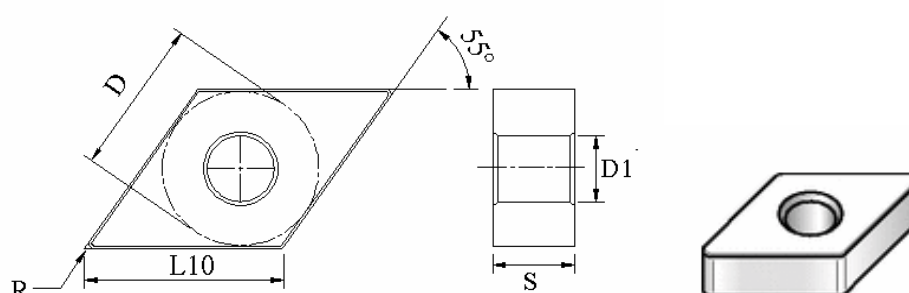
รูปที่ 4.4 เหล็กที่ใช้ในการทดลอง

4.3.2 วัสดุชิ้นงาน (Workpiece material) ชิ้นงานทดสอบเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน S45C มีลักษณะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร และยาว 300 มิลลิเมตร สำหรับวัดความเรียบผิวเมื่อครบปริมาตรหนึ่ง ๆ



รูปที่ 4.5 เหล็กที่ใช้ในการวัดความเรียบผิว

4.3.3 เม็ดมิดคิ่ง (Insert) เม็ดมิดที่ใช้ในการทดลองเป็นของ KENNAMENTAL รุ่น DNMG144FNKC9110 เป็นเม็ดมิดสำหรับกลึงละเอียด



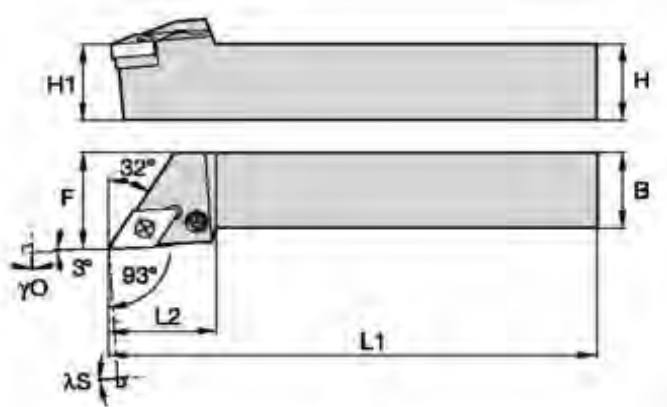
รูปที่ 4.6 เม็ดมิดที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ขนาดเม็ดมิดที่ใช้ในการทดลอง

ISO Catalog number	ANSI Catalog	Dimensions				
		D	L10	S	Rn	D1

	number										
DNMG150604	DNMG441	inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm
FN	FN	1/2	12.70	0.61	15.50	1/4	6.35	1/64	0.4	0.203	5.16

4.3.4 ค้ำมิด (Tool holder) ที่ใช้ในการทดลองเป็นของ KENNAMETAL รุ่น PDJNR2525M15



รูปที่ 4.7 ค้ำมิดที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.3 ขนาดค้ำมิดและส่วนประกอบต่าง ๆ (KENLEVER Toolholders/Kenloc Insert)

Catalog number (Right hand/ Left hand)	H=	B	F	L1	L2	FA	L1A	λS°	γO°
PDJNR2525M15	H1	25	32,0	150	36,0	-	-	-7,0	-6,0
Gage Insert	Shim	Shim Pin	Pin Punch	Lever	Lever Screw	Torx plus			
DI	51111111	51	5	5	51111111	15 IP			

4.3.5 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Infrared Pyrometer) Raytek (RAYFA2BCF13)



รูปที่ 4.8 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (IR)

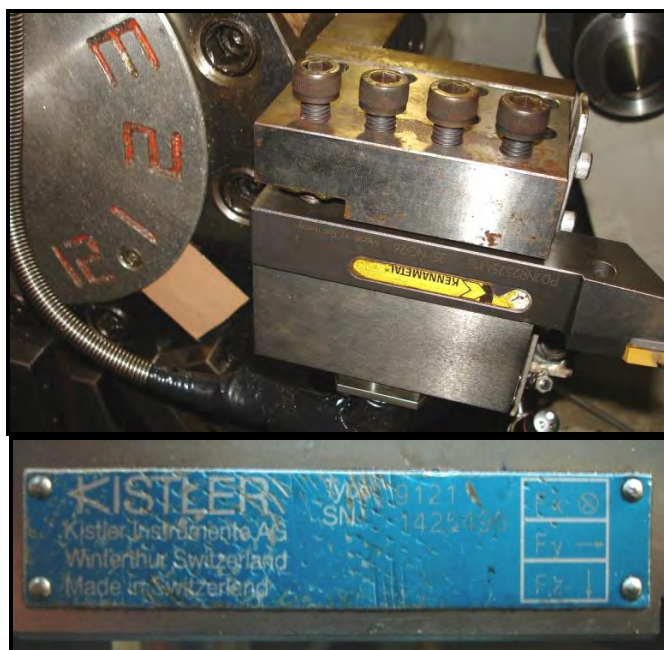
4.3.6 เครื่องจักรและอุปกรณ์วัดแรงตัดที่ใช้ในการทดลอง

1) เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC turning machine) ของ Mazak รุ่น Quick Turn Nexus200MY



รูปที่ 4.9 เครื่องกลึง CNC ที่ใช้ในการทดลอง

2) ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ของ Kister รุ่น 9720 สำหรับวัดแรงตัด ชาร์จแอมพลิไฟเออร์ (Charge amplifier) ของ Kister สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด



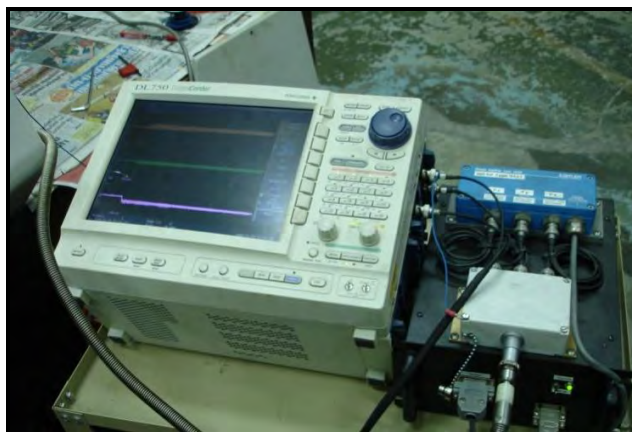
รูปที่ 4.10 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)



รูปที่ 4.11 ชาร์จแอมป์ไฟเออร์ (Charge amplifier)

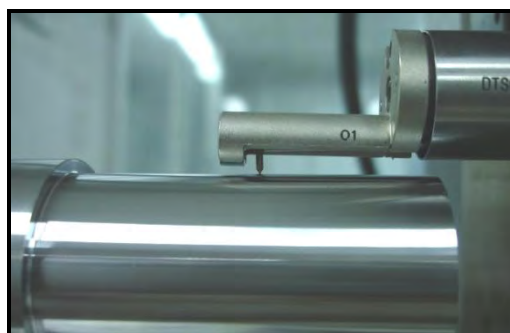
3) ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ของ YOKOKAWA สำหรับแสดงผลสัญญาณแรง

ตัด



รูปที่ 4.12 ออสซิลโลสโคป(Oscilloscope)

4.3.7 เครื่องวัดความเรียบผิว (Roughness tester)



รูปที่ 4.13 เครื่องวัดความเรียบผิว (Roughness tester)

4.3.8 ไมโครสโคป (Microscope) สำหรับวัดความลึกหยาบของเม็ดมีด

4.3.9 เครื่องมือวัดขนาดชิ้นงาน (Vernier Calipers)

4.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล

1. จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรว่ามีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานหรือไม่ เพื่อพิจารณาเลือกเป็นตัวแปรสำหรับใช้ในสมการวิธีวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression) และวิธีพื้นผิวผลตอบแทน (Response Surface Methodology) ด้วยเทคนิค ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยโปรแกรม Minitab

2. จากข้อมูลนำปัจจัยทั้งสาม คือ อัตราการป้อน ความเร็วตัดและความลึกตัดมาออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพิ่มเติม เพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบแทน (Response Surface Methodology) แบบ Box-Behnken Design ด้วยโปรแกรม Minitab
3. สร้างรูปแบบสมการการพยากรณ์ด้วยวิธีวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression) เพื่อใช้เป็นสมการต้นแบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน

การทดลองเพื่อหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมที่สุด คือการหาเงื่อนไขการตัดที่ให้ความเรียบผิวชิ้นงานมีค่าต่ำ ไม่เกิน 12.5 ไมโครเมตร ตาม JIS B0601 (1982) ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความเรียบผิว คือ Roughness Tester โดยการใช้เครื่อง CNC Turning แล้วหาเงื่อนไขการตัดที่สามารถตัดเหล็กได้นานที่สุดโดยที่ความเรียบผิวชิ้นงานสูงสุดไม่เกินกำหนด แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านวัตถุดิบ และอุปกรณ์ในการวัดชิ้นงาน ซึ่งไม่สามารถวัดความเรียบผิวชิ้นงานได้ตลอดปริมาตรการตัด ทำให้ต้องทำการวัดค่าความเรียบผิวชิ้นงานทุก ๆ ปริมาตรการกลึง 0.5 ลูกบาศก์เมตร แล้วทำการหาช่วงปริมาตรการตัดที่เหมาะสม และนำแต่ละเงื่อนไขการทดลองมาเปรียบเทียบกันได้

ในการวิเคราะห์เบื้องต้นก่อนจะนำไปสู่การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วย ANOVA จึงทำการหาปริมาตรการกลึงเพื่อที่จะนำข้อมูลผลตอบแทนที่ปริมาตรการกลึงหนึ่ง ๆ มาทำการวิเคราะห์โดยเลือกปริมาตรการกลึง (Chip volume) ที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ข้อมูลทางสถิติ โดยการสังเกตค่าความเรียบผิวเฉลี่ยจากกราฟอิทธิพลหลัก (Main Effect Plot) หลังที่เลือกปริมาตรการกลึง (Chip volume) ที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแล้ว ก็จะนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ

4.5 การวางแผนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบแทน ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

3.3.1 การออกแบบการทดลองในกระบวนการกลึง

จากการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในกระบวนการกลึง ผู้วิจัยกำหนดค่าที่ใช้ในการทดลองดังนี้

1. ความเร็วตัด
 - ระดับต่ำ 150 เมตร/นาที
 - ระดับสูง 350 เมตร/นาที
2. อัตราการป้อน
 - ระดับต่ำ 0.15 มิลลิเมตร/รอบ

- ระดับสูง 0.20 มิลลิเมตร/รอบ
3. ระยะลัด
- ระดับต่ำ 0.5 มิลลิเมตร
 - ระดับสูง 1.0 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.4 สรุประดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองของกระบวนการกลึง

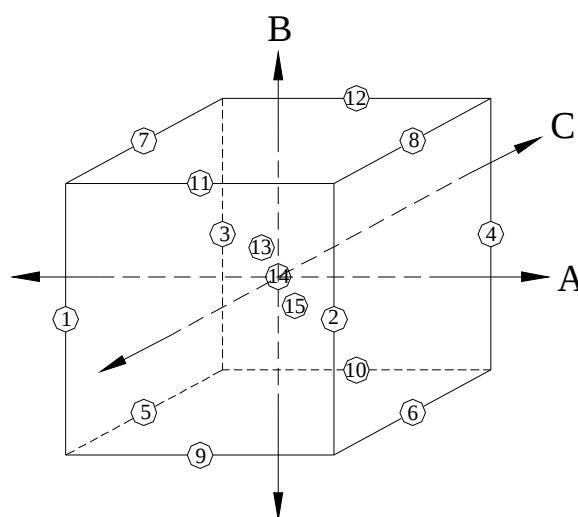
ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับต่ำ	ระดับสูง
ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	A	150	350
อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)	B	0.150	0.200
ระยะลัด (มิลลิเมตร)	C	0.5	1.0

4.6 การออกแบบการทดลอง

เมื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษแล้ว นำไปออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ช่วยในการออกแบบการทดลอง ซึ่งได้รูปแบบของการทดลองดังนี้

4.6.1 การทดลองแบบ Box- Behnken (Box-Behnken Design)

การทดลองนี้เป็นการทดลองปัจจัยที่ 3 ระดับ (3-level design) ในการสร้างสมการตัวแทนโดยใช้หลักการของการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^2 ผสมกับจุดกึ่งกลาง (Central Point)



ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

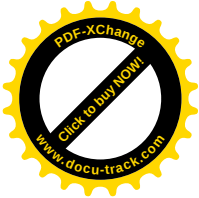
รูปที่ 4.14 รูปแบบเลขาคณิตของแผนการทดลอง Box-Behnken ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.5 ระดับของปัจจัยและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

ปัจจัย/หน่วย	ระดับการตั้งค่า			สัญลักษณ์
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)	
1) ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	150	250	350	A
2) อัตราป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)	0.15	0.18	0.20	B
3) ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.5	0.75	1.0	C

ตารางที่ 4.6 เมตริกการออกแบบการทดลองพร้อมการสุ่มลำดับการทำการทดลอง

Std Order	Run Order	Machining Factor			Ra (μm)	Rz (μm)	Vba (mm)	Vbm (mm)
		Speed (A)	Feed (B)	Depth (C)				
1	8	-1	-1	0				
2	13	1	-1	0				
3	4	-1	1	0				
4	1	1	1	0				
5	2	-1	0	-1				
6	6	1	0	-1				
7	3	-1	0	1				
8	10	1	0	1				
9	5	0	-1	-1				
10	14	0	1	-1				
11	7	0	-1	1				
12	12	0	1	1				
13	15	0	0	0				
14	9	0	0	0				
15	11	0	0	0				



ตารางที่ 4.7 เมตริกการออกแบบการทดลองพร้อมการสุ่มลำดับการทำการทดลอง (ต่อ)

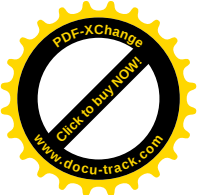
Std Order	Run Order	Machining Factor			Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fy/Fz	Temp (°C)
		Speed (A)	Feed (B)	Depth (C)					
1	8	-1	-1	0					
2	13	1	-1	0					
3	4	-1	1	0					
4	1	1	1	0					
5	2	-1	0	-1					
6	6	1	0	-1					
7	3	-1	0	1					
8	10	1	0	1					
9	5	0	-1	-1					
10	14	0	1	-1					
11	7	0	-1	1					
12	12	0	1	1					
13	15	0	0	0					
14	9	0	0	0					
15	11	0	0	0					

4.7 ขั้นตอนการเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิว

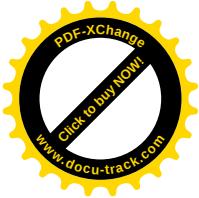
0. เมื่อได้ผลการต้นแบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน ทำการหาค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจากสมการ โดยการใส่ค่าของเงื่อนไขการตัดเข้าไป
1. นำค่าที่ได้จากสมการต้นแบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวมาเปรียบเทียบกับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลอง
2. ส่วนต่างของค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการต้นแบบการพยากรณ์กับค่าที่ได้จากการทดลอง จะนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของสมการการพยากรณ์
3. สรุปผลเกี่ยวกับความสามารถของสมการต้นแบบการพยากรณ์และแนวทางปรับปรุง

4.8 สรุปผลการทดลอง

1. สรุปความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการตัดต่าง ๆ ที่มีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน



2. สรุปเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมสำหรับการทดลองด้วยวิธีพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology)
3. สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression Analysis)
4. สรุปเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำค่าความขรุขระจากสมการการพยากรณ์ความขรุขระผิว



บทที่ 5

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ 5.1 ตารางเก็บผลการทดลองของวิธีการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) ของมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว KC9110

Experiment no.	Chip Volume	Cutting Condition no.	Rn	V	f	D	F (N)			R (μ m)	
	cm ³		mm	m/min	mm/rev	mm	Fx	Fy	Fz	Ra	Rz
1	0	1	0.4	150	0.15	0.5	125	119	211	2.0157	8.66
2	0	2	0.4	150	0.15	1	139	237	397	2.1079	10.848
3	0	3	0.4	250	0.15	0.5	119	120	219	2.0283	8.624
4	0	4	0.4	250	0.15	1	130	223	386	2.1314	10.1533
5	0	5	0.4	350	0.15	0.5	126	120	217	2.1532	10.8392
6	0	6	0.4	350	0.15	1	135	215	380	1.982	10.532
7	0	7	0.4	150	0.18	0.5	111	123	226	3.2924	14.388
8	0	8	0.4	150	0.18	1	151	256	449	2.7695	14.652
9	0	9	0.4	250	0.18	0.5	138	139	261	2.878	12.872
10	0	10	0.4	250	0.18	1	145	232	424	2.7529	13.988
11	0	11	0.4	350	0.18	0.5	133	130	240	2.9461	12.944
12	0	12	0.4	350	0.18	1	134	211	383	2.8239	14.972
13	500	1	0.4	150	0.15	0.5	120	119	217	2.1703	11.192
14	500	2	0.4	150	0.15	1	133	233	400	2.1492	10.88
15	500	3	0.4	250	0.15	0.5	115	107	214	2.0864	8.92
16	500	4	0.4	250	0.15	1	125	221	389	1.9647	9.4933
17	500	5	0.4	350	0.15	0.5	106	105	208	1.9172	10.576
18	500	6	0.4	350	0.15	1	142	234	402	2.649	11.864
19	500	7	0.4	150	0.18	0.5	149	147	289	2.7411	11.68
20	500	8	0.4	150	0.18	1	149	244	441	2.8256	14.144
21	500	9	0.4	250	0.18	0.5	149	139	271	1.7961	8.4
22	500	10	0.4	250	0.18	1	157	236	430	2.8147	14.604
23	500	11	0.4	350	0.18	0.5	149	142	264	1.9386	11.396
24	500	12	0.4	350	0.18	1	190	262	465	2.1701	12.68
25	1000	1	0.4	150	0.15	0.5	121	106	198	1.5088	9.832
26	1000	2	0.4	150	0.15	1	139	235	401	2.1122	11.684
27	1000	3	0.4	250	0.15	0.5	104	88	199	2.0735	9.648
28	1000	4	0.4	250	0.15	1	124	231	398	2.0966	10.6853

ตารางที่ 5.1 ตารางเก็บผลการทดลองของวิธีการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) ของมิดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว KC9110 (ต่อ)

Experiment no.	Chip Volume cm ³	Cutting Condition no.	R _n	V	f	D	F (N)			R (μm)	
			mm	m/min	mm/rev	mm	F _x	F _y	F _z	R _a	R _z
29	1000	5	0.4	350	0.15	0.5	109	104	205	1.9749	8.348
30	1000	6	0.4	350	0.15	1	155	199	379	1.977	10.092
31	1000	7	0.4	150	0.18	0.5	161	148	297	2.6678	12.484
32	1000	8	0.4	150	0.18	1	152	240	452	2.6209	12.12
33	1000	9	0.4	250	0.18	0.5	161	136	271	1.8774	8.636
34	1000	10	0.4	250	0.18	1	183	252	449	2.751	13.664
35	1000	11	0.4	350	0.18	0.5	232	166	270	2.5959	12.712
36	1000	12	0.4	350	0.18	1	274	270	440	2.2826	11.084
37	1500	1	0.4	150	0.15	0.5	131	119	226	1.8924	10.22
38	1500	2	0.4	150	0.15	1	139	239	412	1.8781	10.88
39	1500	3	0.4	250	0.15	0.5	98	94	199	1.5487	6.396
40	1500	4	0.4	250	0.15	1	124	237	403	2.2921	11.6453
41	1500	5	0.4	350	0.15	0.5	111	104	204	2.1482	10.068
42	1500	6	0.4	350	0.15	1	221	237	403	1.8997	9.676
43	1500	7	0.4	150	0.18	0.5	165	139	276	2.2421	10.336
44	1500	8	0.4	150	0.18	1	168	249	466	2.4001	12.701
45	1500	9	0.4	250	0.18	0.5	172	128	253	1.9204	8.624
46	1500	10	0.4	250	0.18	1	191	216	418	2.4731	10.2166
47	1500	11	0.4	350	0.18	0.5	283	268	283	2.9403	13.744
48	1500	12	0.4	350	0.18	1	475	384	466	3.3159	17.852
49	2000	1	0.4	150	0.15	0.5	134	121	225	2.2251	12.296
50	2000	2	0.4	150	0.15	1	142	237	412	1.8839	10.616
51	2000	3	0.4	250	0.15	0.5	97	90	191	2.1364	7.864
52	2000	4	0.4	250	0.15	1	109	204	376	1.7082	9.268
53	2000	5	0.4	350	0.15	0.5	125	134	212	2.3897	12.292
54	2000	6	0.4	350	0.15	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
55	2000	7	0.4	150	0.18	0.5	136	118	239	2.0345	10.076
56	2000	8	0.4	150	0.18	1	161	237	448	2.4515	13.876
57	2000	9	0.4	250	0.18	0.5	250	231	278	1.6758	7.196
58	2000	10	0.4	250	0.18	1	175	224	425	2.0262	9.628
59	2000	11	0.4	350	0.18	0.5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
60	2000	12	0.4	350	0.18	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

ตารางที่ 5.2 ตารางเก็บผลการทดลองของวิธีการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) ของมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว
TPMR 160304 HQ

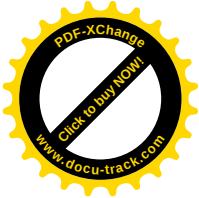
Experi ment no.	Chip Volume	Cutting Condition no.	Rn	V	f	D	F (N)			R (μ m)	
	cm ³		mm	m/min	mm/rev	mm	Fx	Fy	Fz	Ra	Rz
1	0	1	0.4	250	0.18	0.25	95	49	133	2.4528	11.2120
2	0	2	0.4	150	0.15	0.5	79	82	175	2.2175	10.2184
3	0	3	0.4	250	0.15	0.5	99	105	160	1.3752	8.8792
4	0	4	0.4	150	0.18	0.5	128	130	180	2.3746	11.6864
5	0	5	0.4	250	0.18	0.5	122	124	179	2.7270	12.2112
6	500	1	0.4	150	0.15	0.5	102	78	167	2.3295	13.4368
7	500	2	0.4	250	0.15	0.5	112	92	183	1.3529	8.2360
8	500	3	0.4	150	0.18	0.5	112	95	224	2.2963	11.5584
9	500	4	0.4	250	0.18	0.5	119	113	228	2.5011	12.5776
10	1000	1	0.4	250	0.18	0.25	90	34	84	2.4823	11.0080
11	1000	2	0.4	150	0.15	0.5	100	83	184	1.9303	10.5824
12	1000	3	0.4	250	0.15	0.5	117	103	192	1.9267	8.0352
13	1000	4	0.4	150	0.18	0.5	121	99	223	2.4941	11.2568
14	1000	5	0.4	250	0.18	0.5	139	111	218	2.5789	11.4120
15	1500	1	0.4	250	0.18	0.25	100	41	127	2.5565	12.3872
16	2000	1	0.4	250	0.18	0.25	103	35	123	2.7734	13.4776
17	2000	2	0.4	150	0.15	0.5	102	79	166	2.8036	17.1008
18	2000	3	0.4	250	0.15	0.5	116	95	170	2.0715	10.4944
19	2000	4	0.4	150	0.18	0.5	116	86	190	3.3533	17.6000
20	2000	5	0.4	250	0.18	0.5	119	92	185	3.0665	14.5864

ตารางที่ 5.3 ตารางเก็บผลการทดลองของวิธีการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) ของมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว
TPMR 160308 HQ

Experiment no.	Chip Volume	Cutting Condition no.	Rn	V	f	D	F (N)			R (μ m)	
	cm ³		mm	m/min	mm/rev	mm	Fx	Fy	Fz	Ra	Rz
1	0	1	0.8	150	0.15	0.15	32	63	91	1.3312	8.4000
2	0	2	0.8	250	0.15	0.15	32	66	92	1.1054	5.6064
3	0	3	0.8	150	0.18	0.15	39	75	102	1.4182	8.6800
4	0	4	0.8	250	0.18	0.15	38	74	100	1.1701	5.4824
5	0	5	0.8	250	0.18	0.25	96	34	133	1.8269	9.1104
6	500	1	0.8	150	0.15	0.15	120	62	178	2.6385	9.7640
7	500	2	0.8	250	0.15	0.15	138	77	192	1.0170	5.5808
8	500	3	0.8	150	0.18	0.15	141	69	217	1.9778	10.1400
9	500	4	0.8	250	0.18	0.15	137	75	214	1.2012	7.4360
10	1000	1	0.8	250	0.18	0.25	89	24	93	2.4025	13.8784
11	1000	2	0.8	150	0.15	0.15	89	28	117	1.3362	8.9088
12	1000	3	0.8	250	0.15	0.15	90	32	115	2.3113	11.8984
13	1000	4	0.8	150	0.18	0.15	103	34	142	1.3506	7.2736
14	1000	5	0.8	250	0.18	0.15	100	34	136	2.2673	10.1144
15	1500	1	0.8	250	0.18	0.25	46	20	108	2.9865	18.3040
16	2000	1	0.8	150	0.15	0.15	114	60	166	2.5872	14.9240
17	2000	2	0.8	250	0.15	0.15	125	66	165	1.6357	10.9608
18	2000	3	0.8	150	0.18	0.15	124	62	187	2.0861	14.5016
19	2000	4	0.8	250	0.18	0.15	135	67	185	2.0341	13.4992
20	2000	5	0.8	250	0.18	0.25	109	32	130	2.4028	14.2320

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ตลอดปริมาตรเหล็กที่กลึงครบ 2,000 ลูกบาศก์ เซนติเมตร

Experiment no.	Chip Volume cm ³	Cutting Condition no.	Rn	V	f	D	F (N)				Temp °C	R (μm)	
			mm	m/min	mm/rev	mm	Fx	Fy	Fz	Fy/Fz		Ra	Rz
1	0	1	0.4	150	0.150	0.75	138	195	310	0.629032	438.2	2.2334	9.4044
2	0	2	0.4	350	0.150	0.75	123	156	299	0.521739	487	2.2665	9.5703
3	0	3	0.4	150	0.200	0.75	164	216	393	0.549618	435.6	3.5913	14.5798
4	0	4	0.4	350	0.200	0.75	150	193	372	0.518817	444.4	5.3386	20.305
5	0	5	0.4	150	0.175	0.50	165	139	276	0.503622	446.6	3.2924	14.388
6	0	6	0.4	350	0.175	0.50	283	268	283	0.946997	489.8	2.9461	12.944
7	0	7	0.4	150	0.175	1.00	168	249	466	0.534335	452.7	2.7695	14.652
8	0	8	0.4	350	0.175	1.00	475	384	466	0.824034	487.9	2.8239	14.972
9	0	9	0.4	250	0.150	0.50	152	108	205	0.526829	452.2	1.8259	8.22
10	0	10	0.4	250	0.200	0.50	176	129	257	0.501946	487.4	3.6128	15.0745
11	0	11	0.4	250	0.150	1.00	124	237	403	0.588089	410.4	2.1314	10.1533
12	0	12	0.4	250	0.200	1.00	251	313	574	0.545296	434.5	3.9056	16.3486
13	0	13	0.4	250	0.175	0.75	199	188	358	0.52514	448.2	2.9133	13.66
14	0	14	0.4	250	0.175	0.75	135	177	332	0.533133	481.7	3.1053	13.66
15	0	15	0.4	250	0.175	0.75	128	149	327	0.455657	495.9	3.3154	13.4725
16	500	1	0.4	150	0.150	0.75	128	175	300	0.583333	458.2	2.4424	11.1698
17	500	2	0.4	350	0.150	0.75	156	153	290	0.527586	491.6	2.9871	10.2255
18	500	3	0.4	150	0.200	0.75	162	210	388	0.541237	425.4	3.7229	16.0793
19	500	4	0.4	350	0.200	0.75	175	205	381	0.538058	417.3	3.4471	8.4336
20	500	5	0.4	150	0.175	0.50	149	147	289	0.508651	460.5	2.7411	11.68
21	500	6	0.4	350	0.175	0.50	149	142	264	0.537879	499.4	1.9386	11.396
22	500	7	0.4	150	0.175	1.00	149	244	441	0.553287	468.2	2.8256	14.144
23	500	8	0.4	350	0.175	1.00	190	262	465	0.563441	469.4	2.1701	12.68
24	500	9	0.4	250	0.150	0.50	132	117	204	0.573529	467	1.808	8.404
25	500	10	0.4	250	0.200	0.50	161	131	258	0.507752	494.2	3.9089	16.5144
26	500	11	0.4	250	0.150	1.00	125	221	389	0.568123	425.6	1.9647	9.4933
27	500	12	0.4	250	0.200	1.00	184	264	491	0.537678	453.9	3.775	14.9047
28	500	13	0.4	250	0.175	0.75	199	202	343	0.588921	450.5	2.6066	10.725



ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ตลอดปริมาตรเหล็กที่กลึงครบ 2,000 ลูกบาศก์ เซนติเมตร (ต่อ)

Experi ment no.	Chip Volume cm ³	Cutting Condition no.	Rn mm	V m/min	f mm/rev	D mm	F (N)				Temp °C	R (μm)	
							Fx	Fy	Fz	Fy/Fz		Ra	Rz
29	500	14	0.4	250	0.175	0.75	147	170	340	0.5	481.7	3.225	12.661
30	500	15	0.4	250	0.175	0.75	147	170	340	0.5	481.7	3.225	11.4543
31	1000	1	0.4	150	0.150	0.75	138	195	310	0.629032	478.2	1.6776	9.5118
32	1000	2	0.4	350	0.150	0.75	166	165	286	0.576923	496.2	2.5981	10.1893
33	1000	3	0.4	150	0.200	0.75	156	208	411	0.506083	421.7	3.7653	15.9534
34	1000	4	0.4	350	0.200	0.75	209	199	382	0.520942	507.8	3.8336	20
35	1000	5	0.4	150	0.175	0.50	161	148	297	0.498316	452.7	2.6678	12.484
36	1000	6	0.4	350	0.175	0.50	232	166	270	0.614815	490.5	2.5959	12.712
37	1000	7	0.4	150	0.175	1.00	152	240	452	0.530973	474.4	2.6209	12.12
38	1000	8	0.4	350	0.175	1.00	274	270	440	0.613637	485.7	2.2826	11.084
39	1000	9	0.4	250	0.150	0.50	140	125	223	0.560538	472.1	1.8107	8.864
40	1000	10	0.4	250	0.200	0.50	192	143	266	0.537594	519.5	4.5323	10.0802
41	1000	11	0.4	250	0.150	1.00	124	231	398	0.580402	454.1	2.0966	10.6853
42	1000	12	0.4	250	0.200	1.00	249	265	477	0.555556	464.1	3.9397	14.3039
43	1000	13	0.4	250	0.175	0.75	223	191	344	0.555233	467.2	2.8895	14.3066
44	1000	14	0.4	250	0.175	0.75	131	130	407	0.31941	492.4	2.9637	11.6835
45	1000	15	0.4	250	0.175	0.75	131	130	407	0.31941	492.4	3.1637	11.7535
46	1500	1	0.4	150	0.150	0.75	130	189	276	0.684783	457	2.3103	11.2144
47	1500	2	0.4	350	0.150	0.75	123	156	299	0.521739	484.1	1.9419	9.2034
48	1500	3	0.4	150	0.200	0.75	164	216	393	0.549618	497.3	3.7495	14.696
49	1500	4	0.4	350	0.200	0.75	150	193	381	0.506561	515.4	4.6345	13.1508
50	1500	5	0.4	150	0.175	0.50	111	123	226	0.544248	474.1	2.2421	10.336
51	1500	6	0.4	350	0.175	0.50	133	130	240	0.541667	494.3	2.9403	13.744
52	1500	7	0.4	150	0.175	1.00	151	256	449	0.570156	461	2.4001	12.701
53	1500	8	0.4	350	0.175	1.00	134	211	383	0.550914	499	3.3159	17.852
54	1500	9	0.4	250	0.150	0.50	122	110	187	0.588235	479	1.896	10.0115
55	1500	10	0.4	250	0.200	0.50	138	123	249	0.493976	496.3	4.5449	9.4898
56	1500	11	0.4	250	0.150	1.00	130	223	386	0.57772	467.2	2.2921	11.6453

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ตลอดปริมาตรเหล็กที่กลึงครบ 2,000 ลูกบาศก์ เซนติเมตร (ต่อ)

Experiment no.	Chip Volume cm ³	Cutting Condition no.	Rn	V	f	D	F (N)				Temp	R (μm)	
			mm	m/min	mm/rev	mm	Fx	Fy	Fz	Fy/Fz	°C	Ra	Rz
57	1500	12	0.4	250	0.200	1.00	148	243	450	0.54	472	4.1146	14.4412
58	1500	13	0.4	250	0.175	0.75	135	177	340	0.520588	491.6	2.8669	17.9993
59	1500	14	0.4	250	0.175	0.75	131	160	327	0.489297	493.6	3.1063	11.896
60	1500	15	0.4	250	0.175	0.75	133	165	327	0.504587	498.3	2.9956	12.5427
61	2000	1	0.4	150	0.150	0.75	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
62	2000	2	0.4	350	0.150	0.75	208	199	306	0.650327	511.7	2.3069	9.2574
63	2000	3	0.4	150	0.200	0.75	165	210	411	0.510948	521.8	3.6009	13.4272
64	2000	4	0.4	350	0.200	0.75	536	467	549	0.850638	545.9	9.5456	29.6602
65	2000	5	0.4	150	0.175	0.50	136	118	239	0.493724	478.2	2.0345	10.076
66	2000	6	0.4	350	0.175	0.50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
67	2000	7	0.4	150	0.175	1.00	161	237	448	0.529018	457.6	2.4515	13.876
68	2000	8	0.4	350	0.175	1.00	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
69	2000	9	0.4	250	0.150	0.50	143	108	204	0.529412	465.2	1.1888	8.684
70	2000	10	0.4	250	0.200	0.50	168	130	266	0.488722	512.7	4.3764	17.7857
71	2000	11	0.4	250	0.150	1.00	109	204	376	0.542553	486.2	1.7082	9.268
72	2000	12	0.4	250	0.200	1.00	233	259	478	0.541841	467.1	3.7902	15.9976
73	2000	13	0.4	250	0.175	0.75	217	192	354	0.542373	512.7	3.3593	13.6258
74	2000	14	0.4	250	0.175	0.75	122	150	327	0.458716	518.9	3.2608	13.401
75	2000	15	0.4	250	0.175	0.75	122	150	327	0.458716	518.8	3.2608	13.3019

หมายเหตุ 1) N/A: Not Available หมายถึงไม่มีค่า เนื่องจากมีดตัดชำรุดจนไม่สามารถตัดได้

2) Name of Cutting Condition เรียงตามลำดับดังนี้ อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)

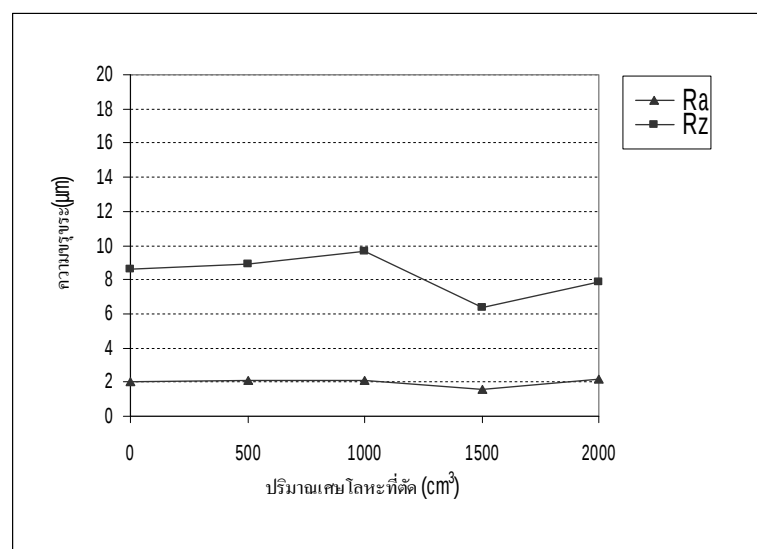
ความเร็วตัด (เมตร/นาที) ความลึกตัด (มิลลิเมตร) ปริมาตรการตัดโลหะ (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)

บทที่ 6

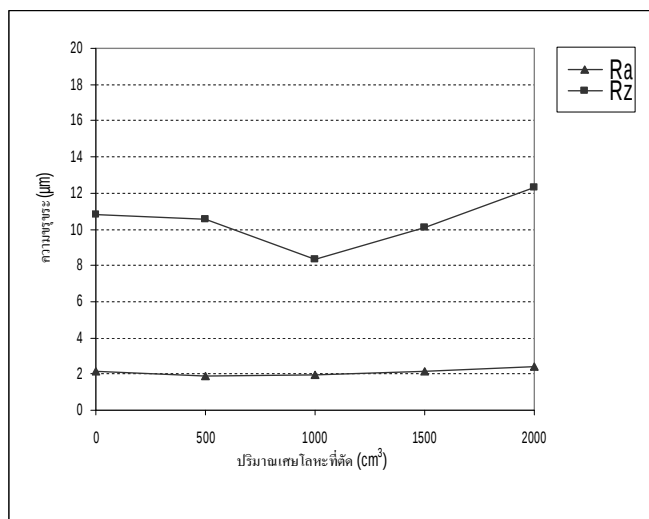
สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองของเงื่อนไขการตัดแบบแห้ง

6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะที่ตัดและความขรุขระชิ้นงาน

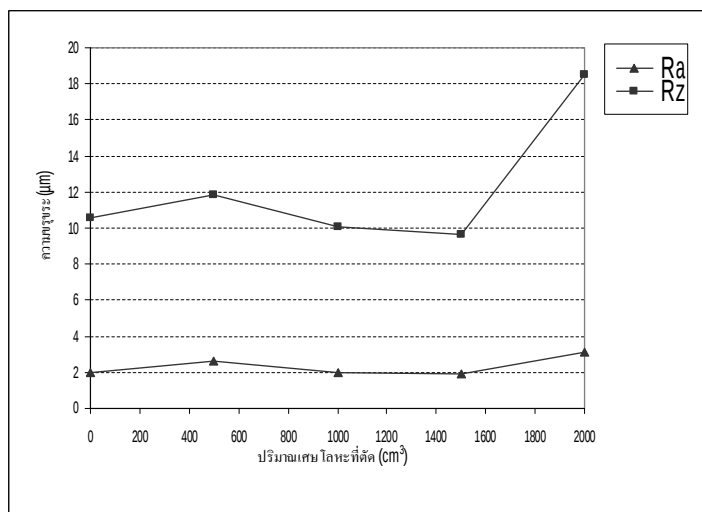
การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะที่ตัดและความขรุขระชิ้นงานมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเปรียบเทียบผลการตัดต่าง ๆ เนื่องจากในการทดลองพบว่าความขรุขระของผิวชิ้นงานไม่ได้แปรผันโดยตรงกับปริมาณโลหะที่ตัดตลอด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งในการวิเคราะห์ผลจะต้องทราบปริมาณเศษโลหะที่เหมาะสมสำหรับนำผลตอบต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะที่ตัดและความขรุขระ ที่การตัดแบบแห้ง
ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร
ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร



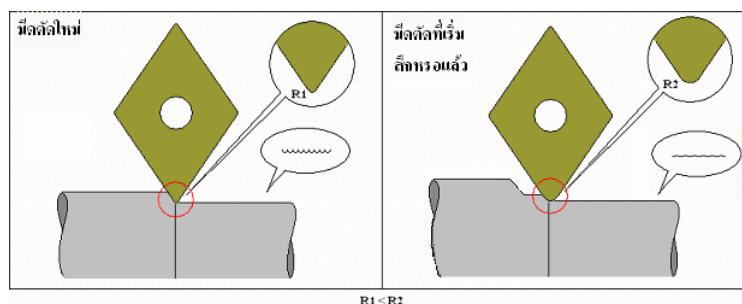
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะที่ตัดและความขรุขระ ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะที่ตัดและความขรุขระ ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

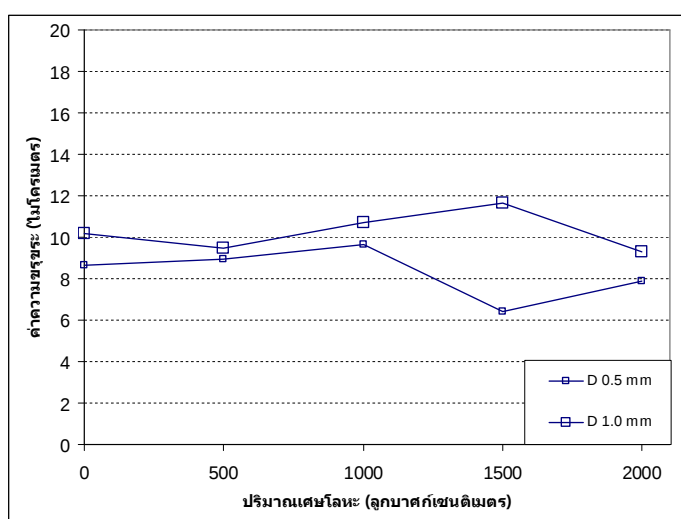
จากรูปที่ 6.1 ถึง 6.3 จะพบว่าความขรุขระมีแนวโน้มสูงขึ้นที่ปริมาณเศษโลหะที่ตัดจาก 0 ถึง 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากอิทธิพลของการสึกหรอของมีดตัด อย่างไรก็ตาม เมื่อเศษโลหะเพิ่มขึ้น ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานเริ่มลดลง สามารถอธิบายได้ว่า รัศมีงูของมีดตัดมีขนาดเพิ่มมากขึ้น

จึงทำให้ค่าความขรุขระลดลง แต่ผิวปรากฏของชิ้นงานนั้นมีลักษณะขุ่นมัวไม่สวย เนื่องจากความคมของมีดตัดเริ่มลดลงเช่นกัน



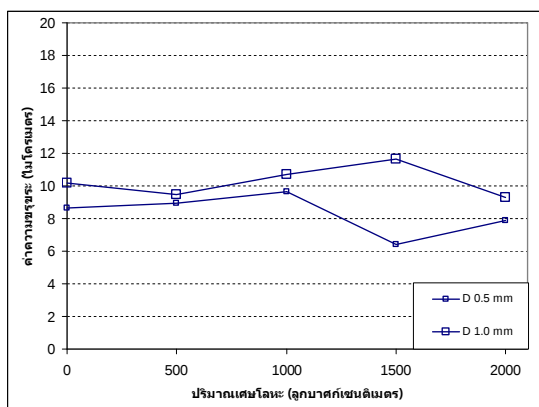
รูปที่ 6.4 การสึกหรอของจุมุกมีดตัดที่ป้านมากขึ้นจากการตัด

จากรูปที่ 6.4 เมื่อทำการตัดชิ้นงานไปได้ระยะหนึ่งจะเกิดการสึกหรอของจุมุกมีดตัดขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เกิดความป้านของปลายจุมุกมีดตัดมากขึ้นหรือรัศมีจุมุกมีดตัดมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานต่ำลงไปด้วย แต่เมื่อทำการตัดชิ้นงานต่อไปค่าความสึกหรอของมีดตัดก็จะเพิ่มขึ้น และแรงตัดก็จะสูงขึ้นด้วยส่งผลให้ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานกลับมาเพิ่มมากขึ้น

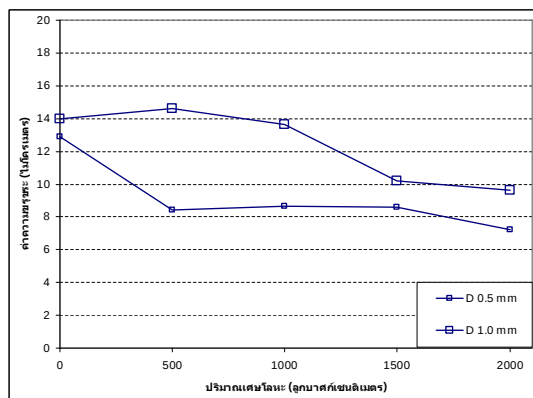


รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะกับค่าความขรุขระ (R_z) ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5, 1.0 มิลลิเมตร ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากรูปที่ 6.5 จะพบว่าความขรุขระมีแนวโน้มสูงขึ้นที่ปริมาณเศษโลหะที่ตัดจาก 0 ถึง 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากอิทธิพลของการสึกหรอของมีดตัด แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเศษโลหะเพิ่มสูงขึ้น ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานเริ่มลดลงสอดคล้องกับเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



(ก) อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ



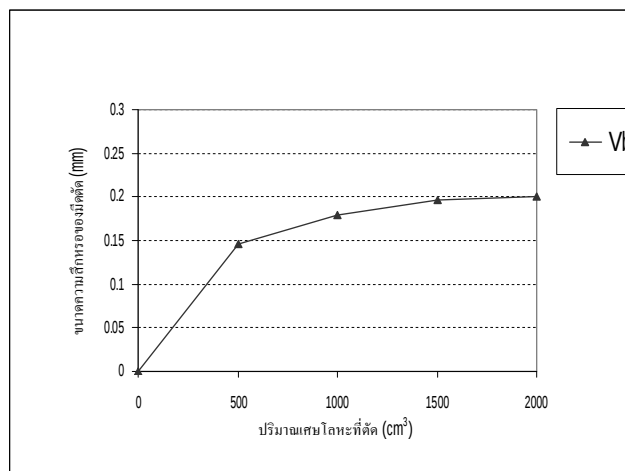
(ข) อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตร/รอบ

รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะกับค่าความขรุขระ (R_z) ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15, 0.18 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5, 1.0 มิลลิเมตร ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

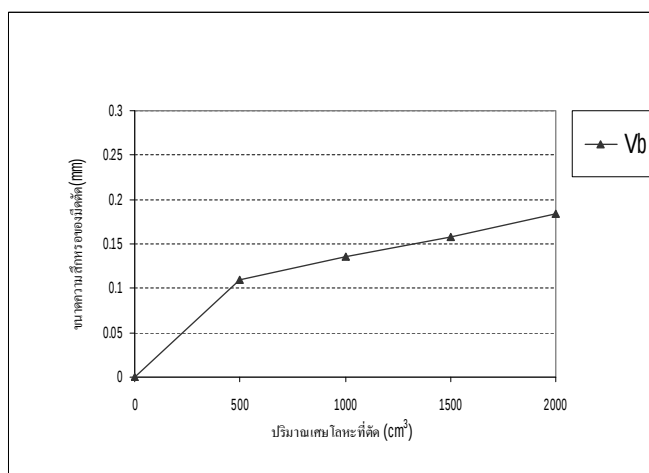
จากรูปที่ 6.6 จะพบว่าความขรุขระผิวที่อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตร/รอบ จะค่อนข้างมีมากกว่าความขรุขระผิวและมีขนาดความสึกหรอมากกว่าที่อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ จึงทำให้การตัดเป็นไปได้ยาก ความขรุขระผิวก็มากตามไปด้วย ซึ่งจะเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนที่ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร เนื่องจากความสึกหรอมีดตัดค่อนข้างแตกต่างกันมาก

ที่ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร ในการตัดช่วงต้นของรูป (ข) จะเกิดค่าความขรุขระผิวที่ค่อนข้างมากเนื่องจากอุณหภูมิในการตัดยังเกิดขึ้นไม่มากพอ แต่เมื่อตัดมาได้ระยะหนึ่งก็จะทำให้เกิดความเรียบผิวที่ดีขึ้นจากการสึกหรอของปลายจุมูกมีดตัด และเมื่อตัดนานขึ้นอุณหภูมิจากการตัดจะสะสมมากขึ้นจนเหมาะสมกับการตัดแบบแห้ง แต่เมื่อตัดนานมากขึ้นอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้เศษโลหะมีความเหนียวและหลุดจากชิ้นงานยาก แต่สำหรับการตัดที่อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตร/รอบ ในรูป (ข) จะเกิดผลดีตรงที่เมื่ออัตราป้อนตัดมากขึ้นจะทำให้เศษโลหะหลุดจากชิ้นงานได้ดีกว่าที่การตัดด้วยอัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ดังนั้นในช่วงท้ายของการตัดจึงเกิดความเรียบผิวที่ดีกว่าในช่วงท้ายของการตัดเมื่อเทียบกับรูป (ก) ในส่วนของการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะที่ตัดและความขรุขระชิ้นงานจะพบว่าช่วงการตัดที่เหมาะสมต่อการนำผลตอบมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกันคือ ปริมาณเศษโลหะที่ 1,500 และ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการตัดที่จะส่งผลให้ความเรียบผิวกับมามีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง

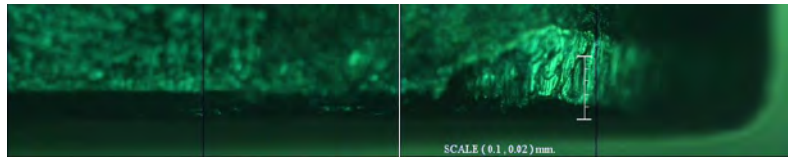
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะที่ตัดและขนาดความลึกหรือของมิดตัด



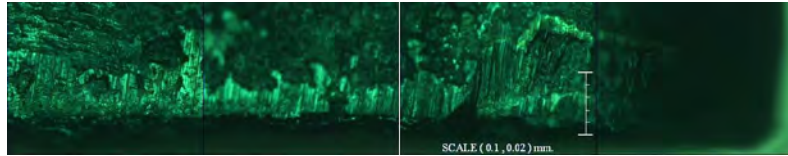
รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะที่ตัดและขนาดความลึกหรือของมิดตัด ที่การตัดแบบ
แห้ง ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร ตลอด
ปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร



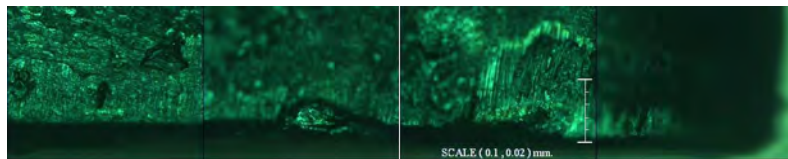
รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะที่ตัดและขนาดความลึกหรือของมิดตัด ที่การตัดแบบ
แห้ง ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร ตลอด
ปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร



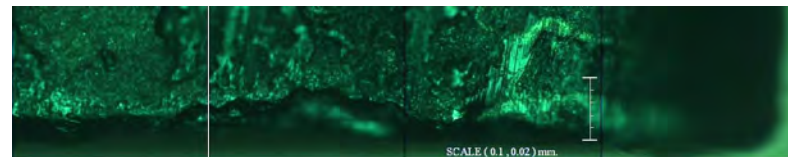
(a) ขนาดความลึกห่อหุ้มตะกั่วโลหะได้ 500 cm^3



(b) ขนาดความลึกห่อหุ้มตะกั่วโลหะได้ $1,000 \text{ cm}^3$

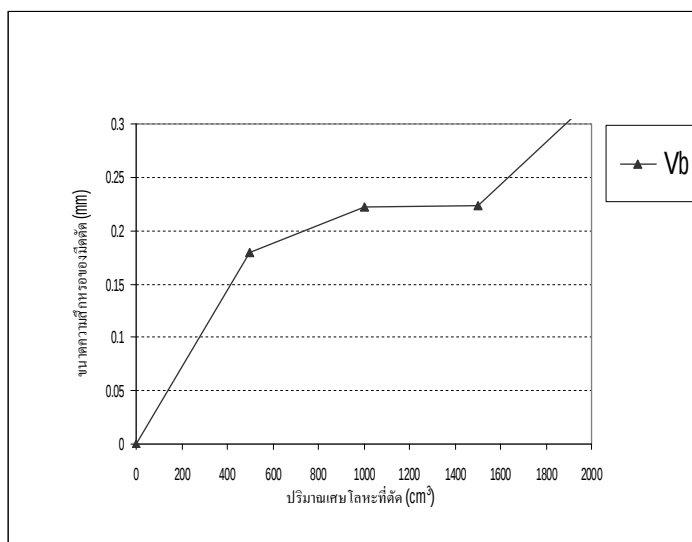


(c) ขนาดความลึกห่อหุ้มตะกั่วโลหะได้ $1,500 \text{ cm}^3$

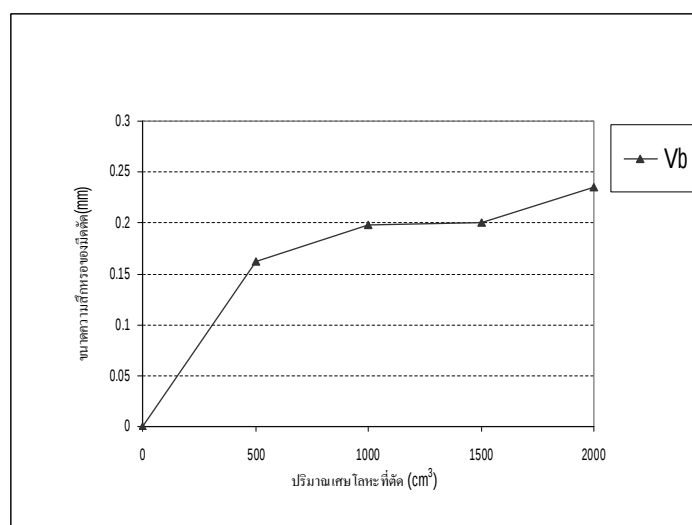


(d) ขนาดความลึกห่อหุ้มตะกั่วโลหะได้ $2,000 \text{ cm}^3$

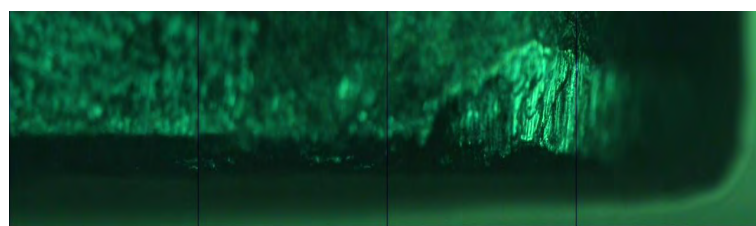
รูปที่ 6.9 รูปถ่ายขนาดความลึกห่อหุ้มที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเศษโลหะที่ตัด ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร



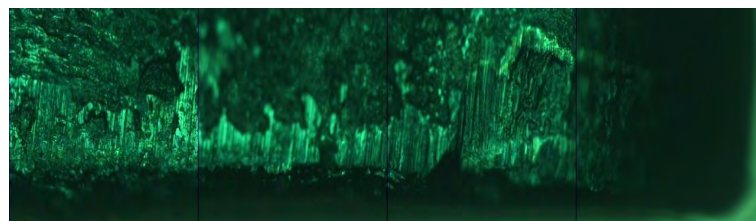
รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะที่ตัดและขนาดความลึกของมิดตัด ที่การตัดแบบ
แห้ง ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร ตลอด
ปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร



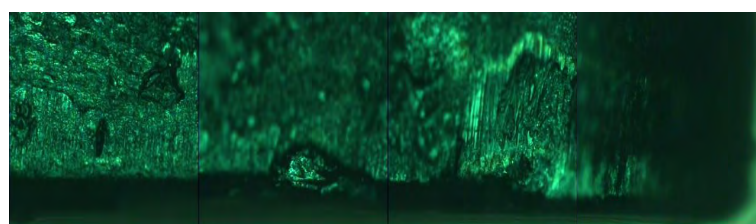
รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะที่ตัดและขนาดความลึกของมิดตัด ที่การตัดแบบ
แห้ง ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร ตลอด
ปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร



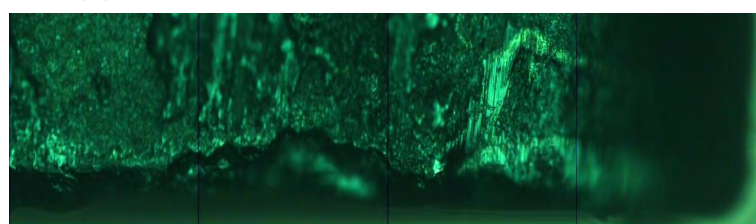
(a) ขนาดความลึกหรือขณะตัดเศษโลหะได้ 500 cm³



(b) ขนาดความลึกหรือขณะตัดเศษโลหะได้ 1,000 cm³



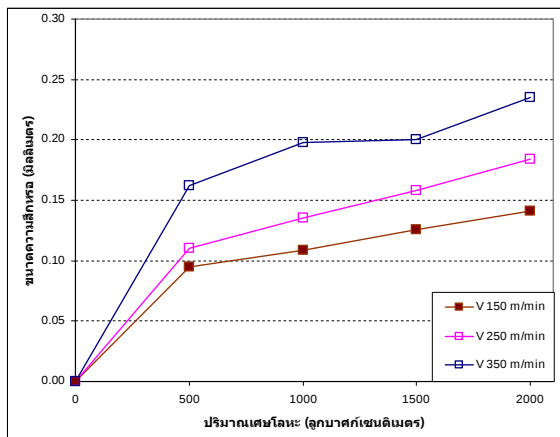
(c) ขนาดความลึกหรือขณะตัดเศษโลหะได้ 1,500 cm³



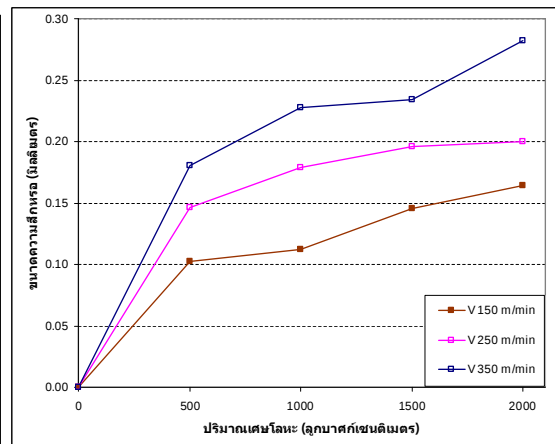
(d) ขนาดความลึกหรือขณะตัดเศษโลหะได้ 2,000 cm³

รูปที่ 6.12 รูปถ่ายขนาดความลึกหรือที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเศษโลหะที่ตัด ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร ตลอด ปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ต่อ)

ผลการทดลองและรูปถ่ายแสดงความลึกหรือของเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.7 ถึง 6.12 แสดงให้เห็นถึงขนาดการสึกหรอของมีดตัดเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณเศษโลหะที่ตัดเพิ่มมากขึ้น โดยในช่วงแรกจะมีอัตราการสึกหรอที่สูงมาก หลังจากทำการตัดไปได้สักพัก อัตราการสึกหรอเริ่มคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของนักวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมาและเป็นไปตามทฤษฎีของเทย์เลอร์



(ก) ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร

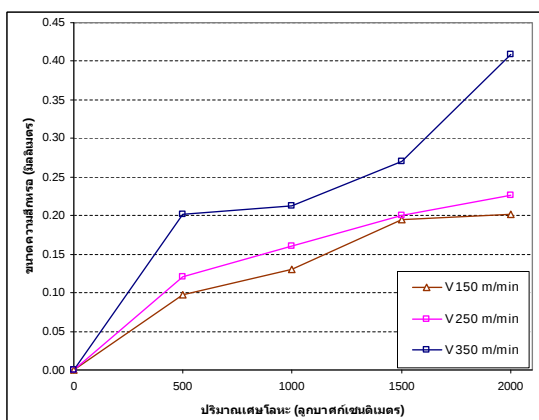


(ข) ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร

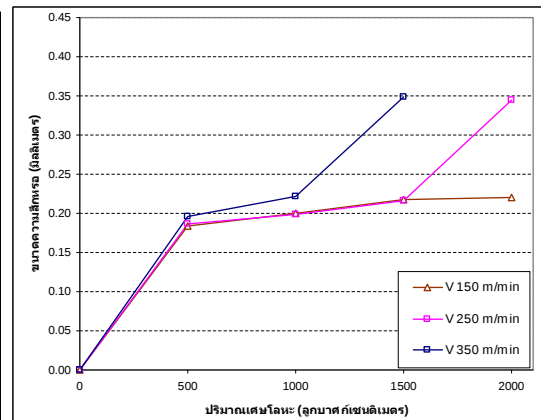
รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะกับขนาดความลึกห่อมีดตัด ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 150, 250, 350 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5, 1.0 มิลลิเมตร ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปที่ 6.13 (ก) แสดงให้เห็นถึงขนาดการสึกหรอของมีดตัดที่ความเร็วตัดต่างกัน ด้วยความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดการสึกหรอของมีดตัดเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณเศษโลหะที่ตัดเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกันและที่ความเร็วตัดที่มากขนาดการสึกหรอของมีดตัดก็จะเกิดขึ้นมากตามไปด้วย

รูปที่ 6.13 (ข) แสดงให้เห็นถึงขนาดการสึกหรอของมีดตัดที่ความเร็วตัดต่างกัน ด้วยความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร ขนาดการสึกหรอของมีดตัดเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณเศษโลหะที่ตัดเพิ่มมากขึ้นซึ่งการเปลี่ยนแปลงจะคล้ายกันกับรูปที่ 6.13 (ก) แต่ที่แตกต่างออกไป คือ ที่การตัดด้วยความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร จะมีขนาดความสึกหรอที่ต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการตัดด้วยความลึกการตัดที่มากจะทำให้ใช้ระยะเวลาในการตัดที่ต่ำลงไปด้วย



(ก) ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร



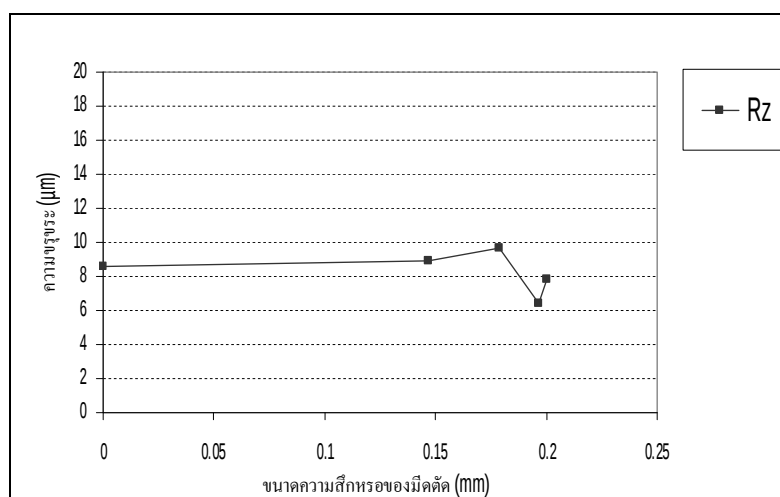
(ข) ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร

รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะกับขนาดความลึกห่อมีดตัด ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 150, 250, 350 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5, 1.0 มิลลิเมตร ตลอดปริมาตรกรัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปที่ 6.14 (ก) แสดงให้เห็นถึงขนาดการสึกหรอของมิดดัดที่ความเร็วตัดต่างกัน ขนาดการสึกหรอของมิดดัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณเศษโลหะที่ตัดเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะที่ความเร็วตัดมาก ขนาดความสึกหรอของมิดดัดก็จะเกิดขึ้นมากตามไปด้วย สอดคล้องกับรูปที่ 6.13 (ก)

รูปที่ 6.14 (ข) แนวโน้มลักษณะการเปลี่ยนแปลงของขนาดการสึกหรอจะคล้ายกันกับรูป 6.14 (ก) และสอดคล้องกับรูปที่ 6.13 (ข) แต่ที่แตกต่างออกไป คือ เมื่อเปรียบเทียบอัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบในรูปที่ 6.13 และอัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตร/รอบในรูปที่ 6.14 จะพบว่า ที่อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตร/รอบจะมีขนาดความสึกหรอที่ต่ำกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้จากเหตุผลเช่นเดียวกับความถี่การตัด เพราะว่าที่อัตราป้อนตัดมากกว่า จะใช้เวลาในการตัดต่ำกว่าเช่นกัน

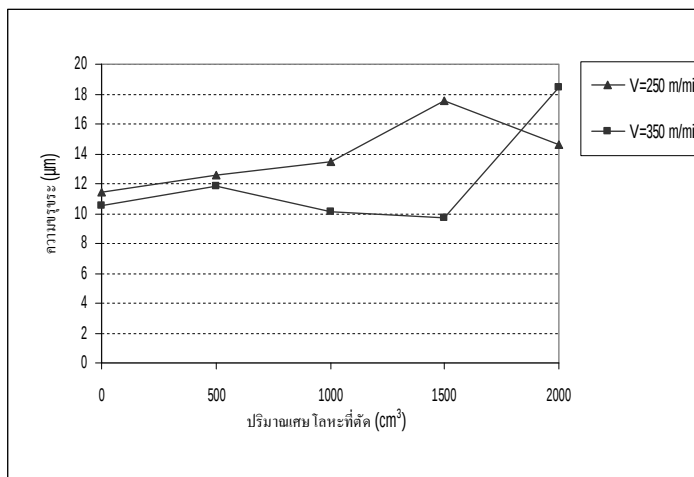
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอของมิดดัดและความขรุขระ



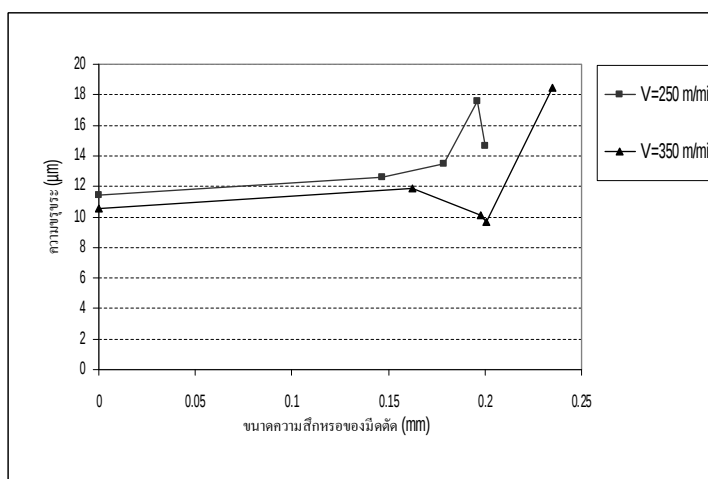
รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอของมิดดัดและความขรุขระ ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความถี่การตัด 0.5 มิลลิเมตร/รอบ ปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสึกหรอของมิดดัดและความขรุขระของชิ้นงาน สามารถบอกได้ว่าความขรุขระของผิวชิ้นงานค่อนข้างสม่ำเสมอ ในช่วงที่อัตราการสึกหรอคงที่ โดยเมื่อปริมาณเศษโลหะที่ตัดเพิ่มมากขึ้นในช่วงต้นนั้นความขรุขระก็เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อเทียบกับขนาดการสึกหรอของมิดดัด และในช่วงปลายของรูป ความขรุขระก็เริ่มลดลงเมื่อขนาดการสึกหรอของมิดดัดกว้างมากขึ้น แต่ในช่วงสุดท้ายของอายุมิดดัดนั้น อัตราการสึกหรอของมิดดัดมีค่าสูงขึ้นกะทันหัน เหตุผลของปรากฏการณ์นี้ได้ถูกอธิบายไว้ข้างต้นแล้ว ที่ว่าความกว้างรัศมีงูมมิดดัดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลของขนาดการสึกหรอมิดดัดนั้นเป็นไปตามทฤษฎีอายุของมิดดัดของเทย์เลอร์ ทำให้ค่าความขรุขระของชิ้นงานที่ได้มีค่าสูงมากขึ้นด้วยเช่นกัน

ดังนั้นอายุใช้งานของมิดดิลจะถูกละเลือกให้อยู่ในช่วงเริ่มต้น และช่วงอัตราการสึกหรอของมิดดิลที่คงที่ เพื่อให้ได้ ความขรุขระของผิวชิ้นงานที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ และทำให้ความสามารถในการตัดดีขึ้นด้วย โดยดูได้จากแรงตัดที่ได้ในขณะที่ตัดชิ้นงานดังซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป



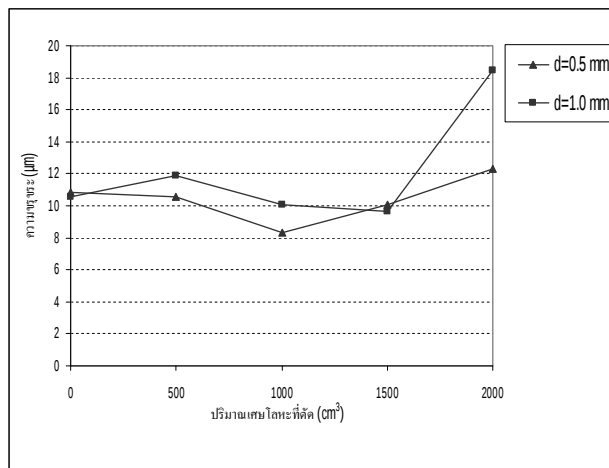
รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะที่ตัดและความขรุขระของผิวชิ้นงาน ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 250, 350 เมตร/นาที่ อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร



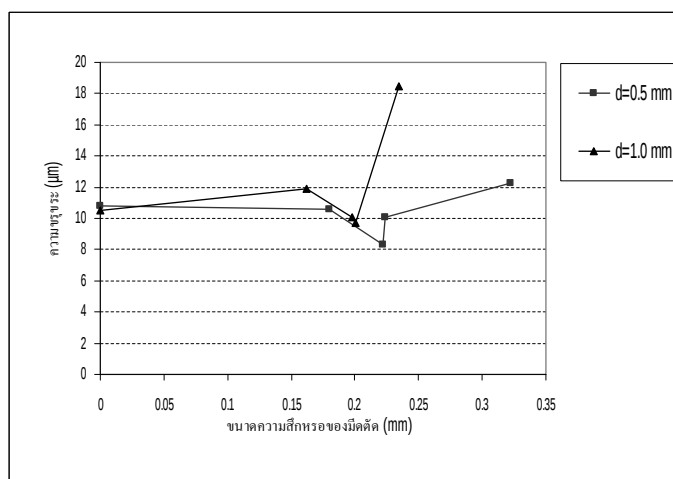
รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความสึกหรอของมิดดิลและความขรุขระของผิวชิ้นงาน ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 250,350 เมตร/นาที่ อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปที่ 6.16 และ 6.17 ค่าความขรุขระที่ได้จากการตัดที่มีความเร็วตัด 250 เมตร/นาที่ มีค่าสูงกว่าที่ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที่ สามารถอธิบายได้ว่า ความเร็วตัดที่สูงขึ้นทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่าง

การตัดมีค่าสูงมากขึ้น เป็นเหตุให้เนื้อวัสดุชิ้นงานมีความอ่อนลงและส่งผลให้สามารถตัดชิ้นงานได้ดีขึ้น แรงตัดที่เกิดขึ้นจะต่ำลง ส่งผลให้ความขรุขระของผิวชิ้นงานลดลงไปด้วย ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 6.16 และ 6.17 แม้ว่าขนาดการสึกหรอของมิดดัดจะเพิ่มมากขึ้นก็ตาม



รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษโลหะที่ตัดและความขรุขระของผิวชิ้นงานที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5, 1.0 มิลลิเมตร ตลอด ปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

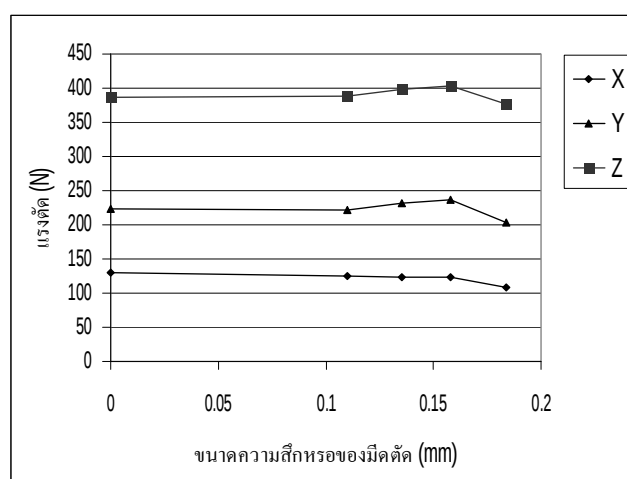


รูปที่ 6.19 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกหรือของมิดดัดและความขรุขระของผิวชิ้นงาน ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5, 1.0 มิลลิเมตร ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

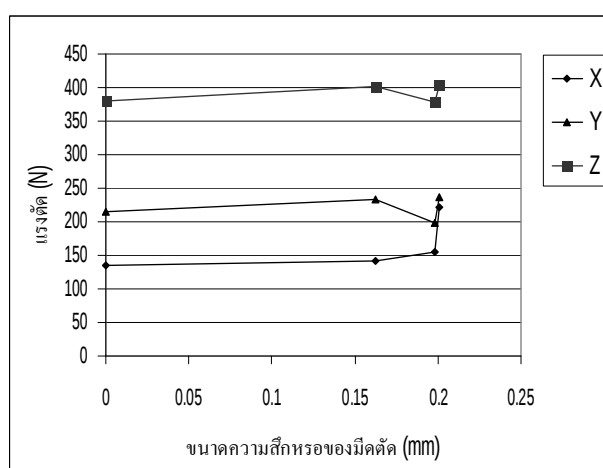
รูปที่ 6.18 พบว่า ความขรุขระของผิวชิ้นงานที่ความลึกในการตัด 1.0 มิลลิเมตร มีค่าสูงกว่าที่ความลึกในการตัดที่ 0.5 มิลลิเมตร เนื่องจากในการตัดที่ความลึกในการตัดสูง ๆ จะทำให้แรงตัดที่เกิดขึ้น

มีค่าสูงตามไปด้วยเช่นกันซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี ดังนั้นเมื่อแรงตัดสูงมากขึ้น ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานก็จะมากขึ้นด้วยเช่นกัน และเนื่องจากความลึกในการตัดที่สูงขึ้น จะทำให้อายุของมีดตัดสั้นลงหรือทำให้อัตราการสึกหรอของมีดตัดเร็วขึ้น ซึ่งส่งผลให้แรงตัดยิ่งเพิ่มสูงมากขึ้นอีก ดังนั้นความขรุขระของผิวชิ้นงานจึงมีค่าสูงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับความขรุขระของผิวชิ้นงานที่ได้จากผลการทดลองใน รูปที่ 6.19

6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเศษโลหะที่ตัดและแรงตัด

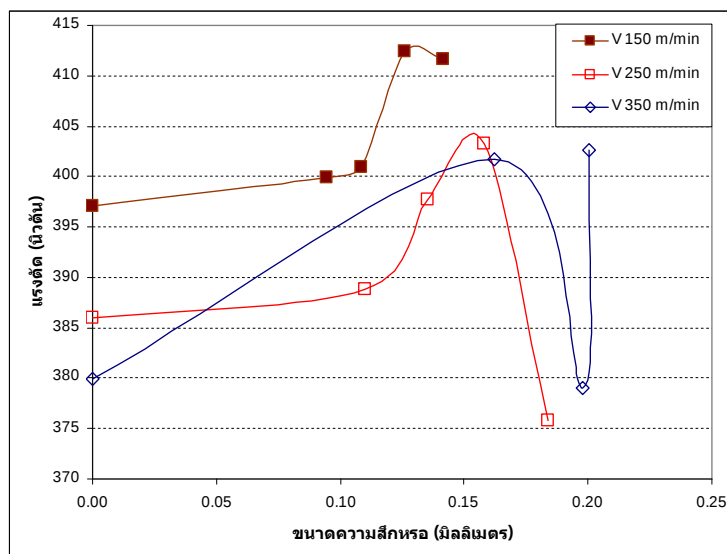


รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเศษโลหะที่ตัดและแรงตัด ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที่ อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความลึกหระของมีดตัดและแรงตัด ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที่ อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

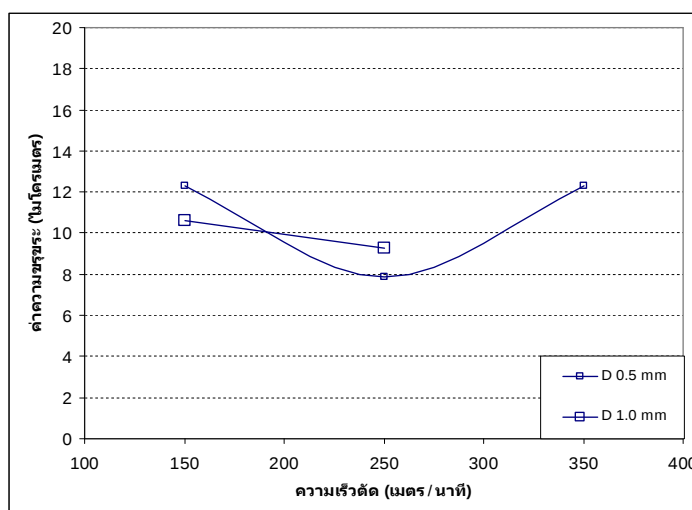
จากรูปที่ 6.20 และ 6.21 สังเกตเห็นว่าแรงตัดทั้ง 3 มีแนวโน้มที่สูงขึ้นในขณะที่ความลึกหระของมิดตัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากคมตัดของมิดเริ่มสึกหรอ ดังนั้นแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะนั้นจึงเพิ่มขึ้น



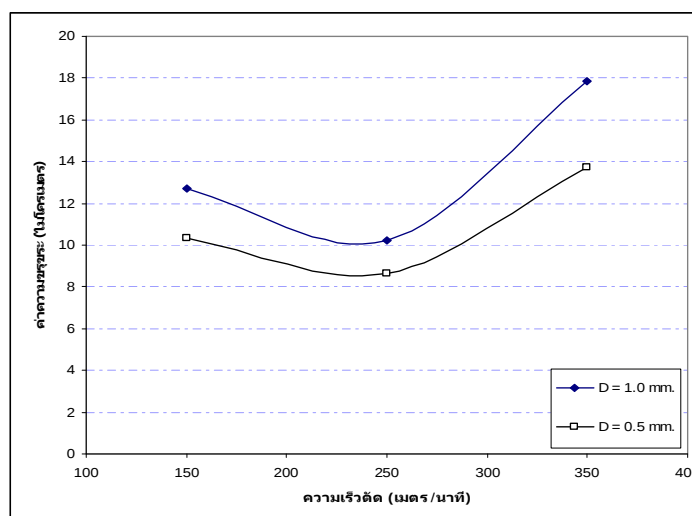
รูปที่ 6.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดกับขนาดความลึกหระมิดตัด ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 150, 250, 350 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากรูปที่ 6.22 ความสัมพันธ์ของแรงตัดกับขนาดความลึกหระมิดตัด มีแนวโน้มว่าแรงตัดจะเพิ่มมากขึ้นตามขนาดความลึกหระของมิดตัดที่สึกมากขึ้น แต่ในช่วงท้าย ๆ แรงตัดกลับมีต่ำลง ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการตัดในตอนท้ายนี้ มิดตัดเกิดการสึกหรอที่ผิวคายของมิดตัดและเกิดเป็นแอ่ง ทำให้มิดตัดกลับมาคมอีกครั้ง การไหลออกของเศษโลหะก็ดีขึ้นและทำให้แรงตัดลดลง

6.5 ปัจจัยจากเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ



รูปที่ 6.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดกับค่าความขรุขระ (R_z) ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 150, 250, 350 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5, 1.0 มิลลิเมตร ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร



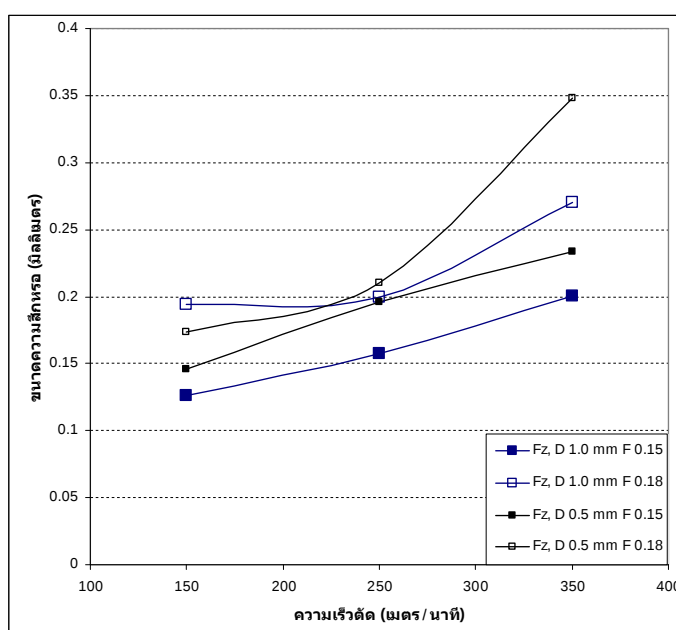
รูปที่ 6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดกับค่าความขรุขระ (R_z) ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 150, 250, 350 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5, 1.0 มิลลิเมตร ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากรูปที่ 6.23 และ 6.24 แสดงให้เห็นว่าทั้งอัตราป้อนตัด 0.15 และ 0.18 มิลลิเมตร/รอบที่ความเร็วตัดทั้ง 3 พบว่า จะมีความขรุขระผิวที่ต่ำที่สุด ที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร เนื่องจากว่าอุณหภูมิการตัดที่เหมาะสมทำให้ เนื้อโลหะของชิ้นงานอ่อนตัวจึงทำให้ตัดได้ง่าย

กรณี ความเร็วตัดต่ำที่ 150 เมตร/นาที ซึ่งทำให้การตัดเป็นได้ยากขึ้นเนื่องจากว่าอุณหภูมิการตัดที่เกิดขึ้นอาจต่ำไม่เหมาะสม จึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งมากกว่าที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที

ส่วนที่ความเร็วตัดสูงที่ 350 เมตร/นาที ความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดอุณหภูมิการตัดที่สูงขึ้น ทำให้เนื้อโลหะของชิ้นงานร้อนและความร้อนที่ยังสะสมในเศษโลหะเองก็จะไปเพิ่มอุณหภูมิการตัดให้สูงมากขึ้น อีกทั้งที่ความเร็วตัดที่สูงขึ้นจะทำให้ขนาดความลึกหรือของมีดตัดมีมากขึ้นด้วยและทำให้ผิวชิ้นงานมีความขรุขระสูง

จากรูปที่ 6.23 และ 6.24 ยังพบว่าในเงื่อนไขที่ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตร ก็มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกันกับที่ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร

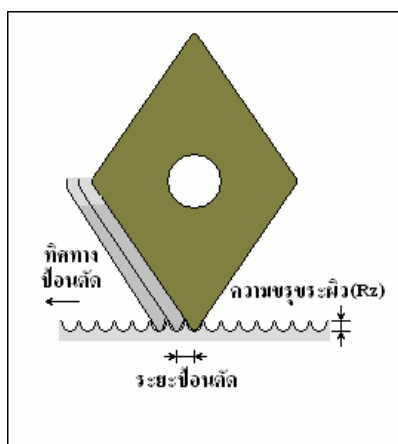


รูปที่ 6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดกับขนาดความลึกหรือ ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 150, 250, 350 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15, 0.18 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5, 1.0 มิลลิเมตร ตลอด ปริมาณเศษโลหะที่ตัด 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากรูปที่ 6.25 แสดงให้เห็นว่าการตัดที่ความเร็วตัดต่างๆมีความสัมพันธ์กันกับขนาดความลึกหรือ ซึ่งแปรผันโดยตรงกัน กล่าวคือถ้าหากใช้ความเร็วตัดต่ำขนาดความลึกหรือของมีดตัดจะต่ำ แต่ถ้าใช้ความเร็วตัดที่สูงมากขึ้นขนาดความลึกหรือของมีดตัดจะเพิ่มตามไปด้วย ตามเหตุผลที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดความลึกหรือของมีดตัด ที่อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตร/รอบ มีมากกว่าอัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ซึ่งเกิดจากการเพิ่มอัตราป้อนตัดจะทำให้เกิดพื้นที่การตัดที่มากขึ้น จะทำในระยะป้อนตัดต่อรอบและพื้นที่การตัดมากขึ้น ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.25 ว่าระยะป้อนตัดที่มากขึ้น

และแสดงในรูปที่ 6.26 ว่าแรงตัดที่มากขึ้นจากการเพิ่มอัตราป้อนตัดขึ้น แรงตัดดังกล่าวที่เกิดขึ้นก็จะ สอดคล้องกันกับความเรียบผิว (R_z) ในรูปที่ 6.22 และ 6.23

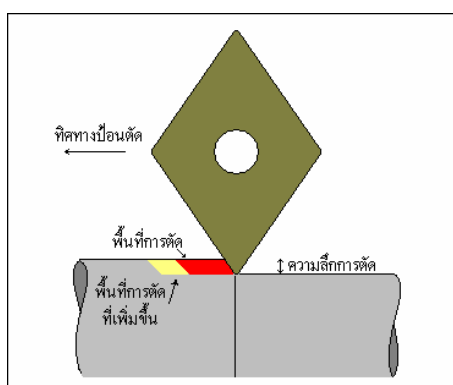


รูปที่ 6.26 การเกิดความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจากการตัด

รูปที่ 6.26 แสดงให้เห็นถึงการเกิดความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจากการตัด ซึ่งจากอัตราป้อนตัดที่ใช้ สามารถทำให้คำนวณค่าความขรุขระทางทฤษฎีได้

$$\text{ความขรุขระผิว}(R_z) = \frac{(\text{อัตราป้อนตัด})^2}{8 \times \text{รัศมีงูมกมิดตัด}} \times 1000 \quad (\text{ไมโครเมตร})$$

นอกจากนี้แรงตัดที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มอัตราป้อนตัด ก็ยังมีผลต่อความเรียบผิวด้วยเช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มอัตราป้อนตัดจะทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มมากขึ้น



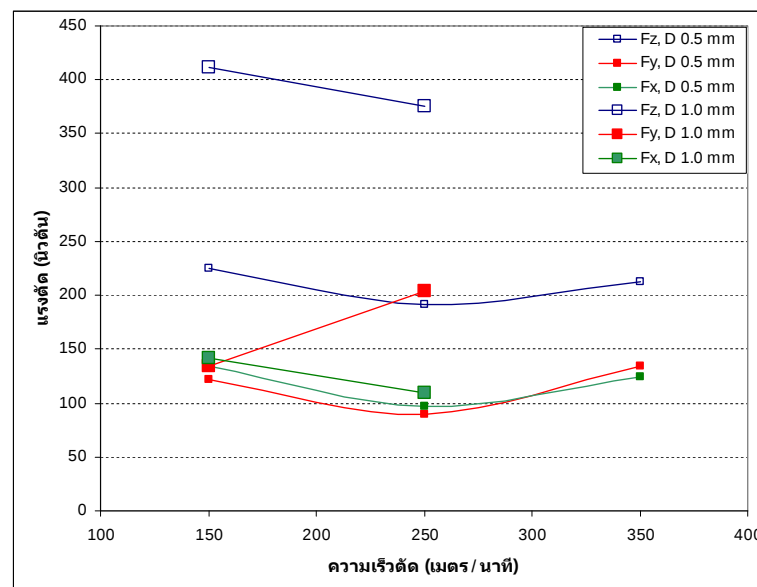
รูปที่ 6.27 พื้นที่การตัดชิ้นงาน

จากรูปที่ 6.27 จะได้ว่า พื้นที่การตัด = อัตราป้อนตัด $\times$ ความลึกการตัด และแรงที่เกิดจากการตัด นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ของการตัด ดังนั้นแรงตัดที่เกิดขึ้นจากการตัดด้วย อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ จะมีแรงตัดที่ต่ำกว่าการตัดที่อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตร/รอบ เนื่องจากพื้นที่การตัดที่

เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มอัตราป้อนตัด ในทางกลับกันถ้าอัตราป้อนตัดต่ำลงแรงตัดก็จะต่ำลง เพราะพื้นที่การตัดต่ำลง ผิวงานก็จะเรียบมากขึ้นไปด้วย

อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการตัดขึ้นในการตัดไม้ได้ทำให้เกิดผลเสียเสมอไป เพราะจากเหตุผลที่เคยได้กล่าวมาก่อนหน้านี้แล้วว่า การที่เพิ่มอัตราป้อนตัดจะช่วยให้เกิดการแตกหักของเศษโลหะได้ดีกว่าอัตราป้อนตัดที่ต่ำซึ่งบางครั้งจะทำให้เกิดผลที่ขึ้นทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการตัดถึงแม้ว่าแรงในการตัดจะสูงขึ้นจากการเพิ่มอัตราป้อนตัดก็ตาม

ในกรณีของความลึกการตัด ถ้าความลึกการตัดมาก ถึงแม้มีดตัดจะเกิดความสึกหรอต่ำกว่าแต่แรงที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดจะมีค่ามากกว่า ด้วยเหตุนี้เองการตัดที่ใช้ความลึกการตัดมาก ส่วนใหญ่มักจะได้รับความเรียบผิวของชิ้นงานไม่ค่อยดี อันเนื่องมาจากเกิดการสั่นในระหว่างการตัด ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงตัดกับความเร็วตัดสามารถดูได้จากรูปที่ 6.29

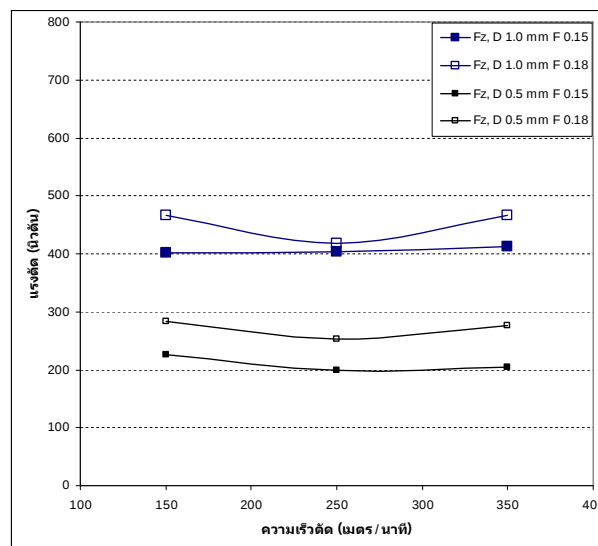


รูปที่ 6.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดกับแรงตัด ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 150, 250, 350 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5, 1.0 มิลลิเมตร ตลอดปริมาณเศษโลหะที่ตัด 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปที่ 6.28 เป็นแรงตัดที่เกิดขึ้นจากการตัด ประกอบไปด้วยแรง 3 แกน ได้แก่ แรงตัดหลัก (F_z) แรงตัดตามแนวแกน (F_y) และแรงตัดตามแนวรัศมี (F_x) จากรูปเห็นได้ชัดเจนว่าแรงตัดหลักมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันกับความขรุขระผิวตามรูปที่ 6.23 แสดงให้เห็นว่าที่ ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร มีค่าขรุขระผิวที่ต่ำที่สุด เนื่องจากการตัดเป็นไปได้อย่างง่ายดายเพราะผลจากอุณหภูมิการตัดที่เหมาะสมและเนื้อโลหะของชิ้นงานอ่อนตัวลง ทำให้แรงที่เกิดจากการตัดต่ำ ผลที่ตามมาค่าความเรียบผิวชิ้นงานจะค่อนข้างดี

ที่ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร ความร้อนทำให้เนื้อโลหะของชิ้นงานอ่อนตัวลงด้วยเหมือนกันกับที่ ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที ก็จริง แต่จากที่ได้เคยกล่าวไปก่อนหน้านี้แล้ว ถึงเรื่องความลึกหรือที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วตัดที่สูงขึ้น ดังนั้นเมื่อมีดตัดลึกก็ทำให้การตัดเป็นไปได้ง่ายขึ้น แรงตัดที่เกิดขึ้นจึงมีมากกว่าที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที

ที่ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร มีแรงตัดที่สูงกว่าความเร็วตัดอื่น เนื่องจากกว่าความเร็วตัดที่ช้าทำให้อุณหภูมิการตัดที่ต่ำดังนั้นเนื้อโลหะของชิ้นงานยังมีความแข็งอยู่ แรงจากการตัดจึงมาก ส่วนที่ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตรจะพบว่าแรงจากการตัดจะมากกว่าความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตรประมาณ 2 เท่า แต่แนวโน้มก็ยังคงสอดคล้องกันกับรูปที่ 6.28



รูปที่ 6.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดกับแรงตัดหลัก ที่การตัดแบบแห้ง ความเร็วตัด 150, 250, 350 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15, 0.18 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5, 1.0 มิลลิเมตร ตลอดจนปริมาณเศษโลหะที่ตัด 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปที่ 6.29 แสดงแรงตัดที่เกิดขึ้นจากการตัด โดยเปรียบเทียบแรงตัดหลัก (F_z) กับเงื่อนไขการตัดที่อัตราป้อนตัด ซึ่งการป้อนตัดที่ใช้อัตราป้อนตัดต่ำกว่าจะเกิดแรงตัดที่ค่อนข้างต่ำกว่า นอกจากนี้รูปที่ 6.29 ยังแสดงให้เห็นว่าที่ ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร มีค่าขรุขระผิวที่ต่ำที่สุด เนื่องจากว่าการตัดเป็นไปได้ง่ายเพราะผลจากอุณหภูมิการตัดที่เหมาะสมและเนื้อโลหะของชิ้นงานอ่อนตัวลง ทำให้แรงที่เกิดจากการตัดต่ำ ผลที่ตามมาค่าความเรียบผิวชิ้นงานจะค่อนข้างดี

ที่ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร ความร้อนทำให้เนื้อโลหะของชิ้นงานอ่อนตัวลงด้วยเหมือนกันกับที่ ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที ก็จริง แต่จากที่ได้เคยกล่าวไปก่อนหน้านี้แล้ว ถึงเรื่องความลึกหรือที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วตัดที่สูงขึ้น ดังนั้นเมื่อมีดตัดลึกก็ทำให้การตัดเป็นไปได้ง่ายขึ้น แรงตัดที่เกิดขึ้นจึงมีมากกว่าที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที



ที่ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร มีแรงตัดที่สูงกว่าความเร็วตัดอื่น เนื่องจากกว่าความเร็วตัดที่ช้าทำให้อุณหภูมิการตัดที่ต่ำดังนั้นเนื้อโลหะของชิ้นงานยังมีความแข็งแรงอยู่ แรงจากการตัดจึงมาก ส่วนที่ความลึกการตัด 1.0 มิลลิเมตรจะพบว่าแรงจากการตัดจะมากกว่าความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตรประมาณ 2 เท่า

จากแรงในการตัดที่เกิดขึ้นระหว่างการตัด ที่ความเร็วตัด และความลึกการตัดที่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างอัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ กับอัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตร/รอบ จากรูปที่ 6.23 จะพบว่าแรงตัดที่เกิดจากอัตราป้อนตัดที่มากขึ้นแรงตัดจะมากขึ้นตามไปด้วย

แรงตัดที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดการสึกหรอของมิดมีแนวโน้มเริ่มมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานมีโอกาสสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นขนาดการสึกหรอของมิดตัดและค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานสามารถคาดการณ์ได้จากแรงตัดที่วัดได้ในขณะตัดจริง โดยไม่จำเป็นต้องหยุดเครื่องจักรเพื่อตรวจสอบขนาดการสึกหรอของมิดตัด

ดังนั้นการประยุกต์การตรวจติดตามในกระบวนการตัดโดยใช้แรงตัดที่วัดได้จากไดนาโมมิเตอร์ สามารถนำมาอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในขณะทำการตัดจริง ซึ่งเป็นข้อดีและประโยชน์ของระบบการตรวจติดตามภายในกระบวนการตัด

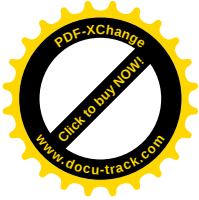
6.6 สรุปผลการตัดแบบแห้ง

การประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นต่ำที่สุดในการทดลองการตัดแบบแห้ง โดยใช้มิดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิวและชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ที่เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ กัน ให้ผลที่ค่อนข้างเหมือนกันดังนี้

- 1) ความขรุขระของผิวชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อขนาดความสึกหรอของมิดตัดเพิ่มมากขึ้น
- 2) ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อแรงตัดที่วัดได้มีขนาดเพิ่มมากขึ้น
- 3) แรงตัดที่วัดได้ในขณะกระบวนการตัดจริงมีค่าสูงขึ้นเมื่อการสึกหรอของมิดตัดเพิ่มมากขึ้น

สำหรับการทดลองการตัดแบบแห้งที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ความขรุขระของชิ้นงานต่ำสามารถสรุปลักษณะที่ควรเกิดขึ้นในเงื่อนไขการตัดได้ดังนี้

- 1) ความเร็วการตัดที่เหมาะสมทำให้อุณหภูมิในการตัดที่เกิดขึ้นพอเหมาะ ทำให้ตัดชิ้นงานได้ง่าย จึงทำให้แรงตัดที่เกิดขึ้นต่ำ
- 2) อัตราป้อนตัดต่ำ ทำให้พื้นที่การตัดต่ำ แรงตัดที่เกิดขึ้นต่ำส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวดำ
- 3) ความลึกการตัดต่ำ ทำให้พื้นที่การตัดต่ำ ส่งผลให้แรงตัดที่เกิดขึ้นต่ำ แรงที่เกิดขึ้นในการตัดจะต่ำด้วย



บทที่ 7

สมการการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน

7.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความเรียบผิวที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

เนื่องจากตัวแปรผลตอบของค่าความเรียบผิวมีอยู่ด้วยกัน 2 ค่า จากผลการทดลองในตารางที่ 5.4 นำมาทำการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ของผลตอบ โดยดูได้จากค่า R-sq ถ้าค่า R-Sq มีค่าสูงแสดงว่าค่า Ra และ Rz มีความสัมพันธ์กัน ไม่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ค่าผลตอบของความเรียบผิวทั้งสองค่า และถ้าค่า R-sq มีค่าต่ำแสดงว่าค่า Ra และ Rz ไม่มีความสัมพันธ์กันจะต้องนำผลตอบทั้งสองมาวิเคราะห์

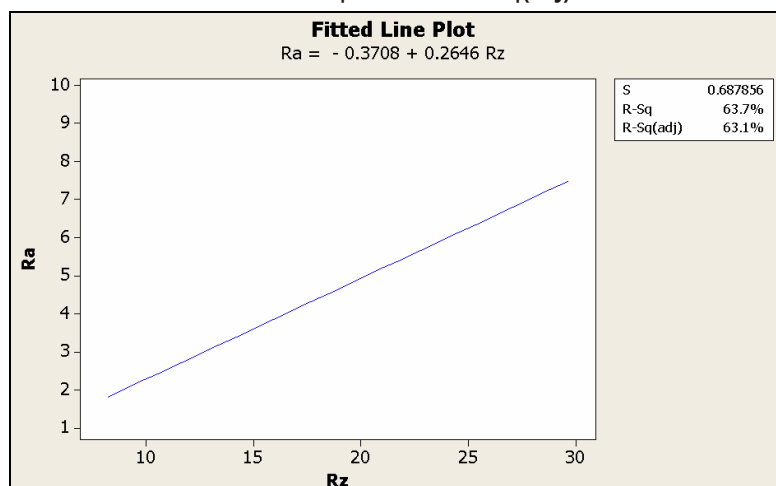
ตารางที่ 7.1 ค่า Ra และ Rz ที่ได้จากการทดลอง

No	Ra	Rz		No	Ra	Rz		No	Ra	Rz
1	2.2334	9.4044		25	4.5323	10.0802		49	2.4515	13.8760
2	2.4424	11.1698		26	4.5449	9.4898		50	2.8239	14.9720
3	1.6776	9.5118		27	4.3764	17.7857		51	2.1701	12.6800
4	2.3103	11.2144		28	2.1314	10.1533		52	2.2826	11.0840
5	2.2665	9.5703		29	1.9647	9.4933		53	3.3159	17.8520
6	2.9871	10.2255		30	2.0966	10.6853		54	1.8259	8.2200
7	2.5981	10.1893		31	2.2921	11.6453		55	1.8080	8.4040
8	1.9419	9.2034		32	1.7082	9.2680		56	1.8107	8.8640
9	2.3069	9.2574		33	3.9056	16.3486		57	3.7902	15.9976
10	3.5913	14.5798		34	3.7750	14.9047		58	2.9133	13.660
11	3.7229	16.0793		35	3.9397	14.3039		59	2.6066	10.7250
12	3.7653	15.9534		36	4.1146	14.4412		60	2.8895	14.3066
13	3.7495	14.6960		37	2.7411	11.6800		61	2.8669	17.9993
14	3.6009	13.4272		38	2.6678	12.4840		62	3.3593	13.6258
15	5.3386	20.3050		39	2.2421	10.3360		63	3.1053	13.66
16	3.4471	8.4336		40	2.0345	10.0760		64	3.225	12.661
17	3.8336	20.000		41	2.9461	12.9440		65	2.9637	11.6835
18	4.6345	13.1508		42	1.9386	11.3960		66	3.1063	11.896
19	9.5456	29.6602		43	2.5959	12.7120		67	3.2608	13.401
20	3.2924	14.3880		44	2.9403	13.7440		68	3.3154	13.4725
21	1.8960	10.0115		45	2.7695	14.6520		69	3.225	11.661
22	1.1888	8.6840		46	2.8256	14.1440		70	3.1637	11.7535
23	3.6128	15.0745		47	2.6209	12.1200		71	2.9956	12.5427
24	3.9089	16.5144		48	2.4001	12.7010		72	3.2608	13.3019

จากข้อมูลในตารางที่ 7.1 นำมาทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่า R_a และ R_z ด้วยวิธีสมการถดถอยแบบเส้นตรง (Linear Regression) ได้ดังนี้

$$R_a = -0.3708 + 0.2646 R_z \quad (7.1)$$

$S = 0.687856$, $R\text{-Sq} = 63.7\%$, $R\text{-Sq(adj)} = 63.1\%$

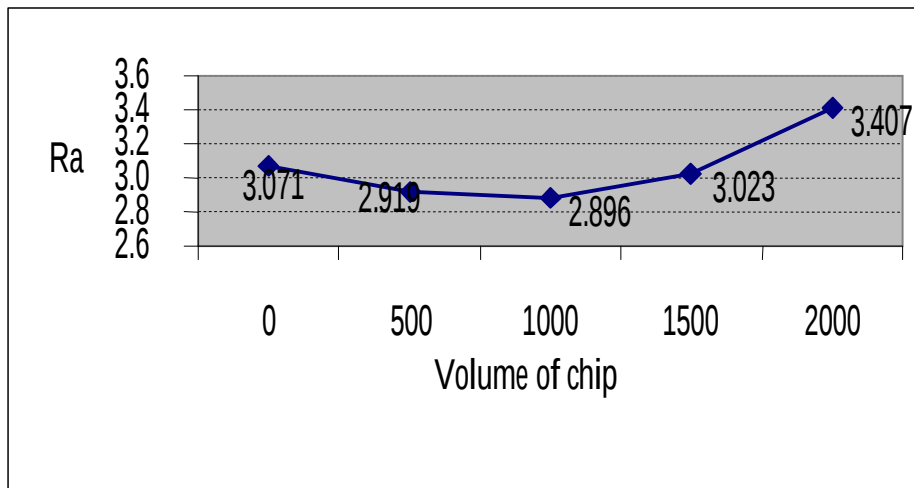


รูปที่ 7.1 กราฟความสัมพันธ์ของค่า R_a กับ R_z

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_a และ R_z มีความสัมพันธ์กัน โดยดูจากค่า $R\text{-Sq (adj)}$ เท่ากับ 63.1% นั้นหมายความว่า ถ้าค่า R_z หรือ R_a มีการเปลี่ยนแปลงไป ก็จะส่งผลให้ R_a หรือ R_z มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นกัน ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องวิเคราะห์ผลตอบทั้งสอง ทำการวิเคราะห์แค่ผลตอบตัวใดตัวหนึ่งก็จะสามารถอธิบายผลตอบอีกตัวได้

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองจะใช้ค่า R_a มาพล็อตเพื่อดูอิทธิพลเนื่องจากปริมาตรการกลึงตั้งแต่ 0 ลูกบาศก์เซนติเมตร จนถึง 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากรูปที่ 7.2 ในส่วนของความเรียบผิวเฉลี่ยกับปริมาตรเหล็กที่ตัด จะพบว่าความเรียบผิวเฉลี่ยเริ่มต้นที่ปริมาตร 0 ลูกบาศก์เซนติเมตรอยู่ที่ 3.07143 ไมโครเมตร หลังจากตัดเหล็กไป 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยลดลงเหลือ 2.91921 ไมโครเมตรและ ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยยังคงลดลงเหลือ 2.88253 ไมโครเมตรที่ปริมาตรการกลึง 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรและเมื่อนำมีดตัด ไปกลึงชิ้นงานต่ออีกจะพบว่าความเรียบผิวเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเป็น 3.18920 ไมโครเมตร ที่ปริมาตรกลึงชิ้นงานที่ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรและเป็น 3.02340 ไมโครเมตร ที่ปริมาตรกลึงชิ้นงานที่ 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร และเป็น 3.40699 ไมโครเมตร ที่ปริมาตรกลึงชิ้นงานที่ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 7.2 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Ra กับ Volume of chip

จากผลความเรียบผิวชิ้นงานที่ปริมาตรการกลึงต่าง ๆ กัน แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีดกลึงใหม่จะให้ความเรียบผิวสูง และเมื่อกลึงไปสักระยะ ความเรียบผิวชิ้นงานจะลดลง และเมื่อกลึงไปสักระยะหนึ่ง จะทำให้รัศมีงูมูกมีดตัดเพิ่มขึ้น ทำให้ลบรอยที่เกิดจากการป้อนมีดลง ส่งผลให้ความเรียบผิวชิ้นงานลดลงในระยะแรก เมื่อกลึงชิ้นงานต่อไปมีดตัดจะเริ่มสึก จนทำให้ความหยาบชิ้นงานกลับมาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

การใช้งานของมีดตัดกลึงชิ้นงานจะดูจากความเรียบผิวชิ้นงานเป็นหลัก เมื่อกลึงชิ้นงานไป ความเรียบผิวชิ้นงานสูงสุด Rz เท่ากับ 12.5 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นมาตรฐานของความเรียบผิวชิ้นงานสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ ก็จะหยุดกลึงและเปลี่ยนมีดตัดใหม่ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่า Ra และ Rz สมการถดถอยคือ $Ra = -0.3708 + 0.2646 Rz$ ความเรียบผิวเฉลี่ยที่ทำให้ค่าความเรียบผิวชิ้นงานสูงสุด Rz เท่ากับ 12.5 ไมโครเมตร คือ Ra เท่ากับ 2.9367 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นปริมาณการกลึงเหล็กบริเวณ 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งแสดงดังตารางที่ 7.2

ดังนั้นค่า Ra และ Rz ที่ปริมาณการกลึง 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะถูกนำมาคำนวณหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมต่อไป

ตารางที่ 7.2 การประมาณค่าความเรียบผิว Ra เฉลี่ยจากผลตอบที่ปริมาตรการกลึงเหล็ก 1,000 ถึง 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ปริมาตรการกลึง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความเรียบผิว Ra เฉลี่ย (μm)
1,000	2.88253
1,192.27	2.9367
1,500	3.02340

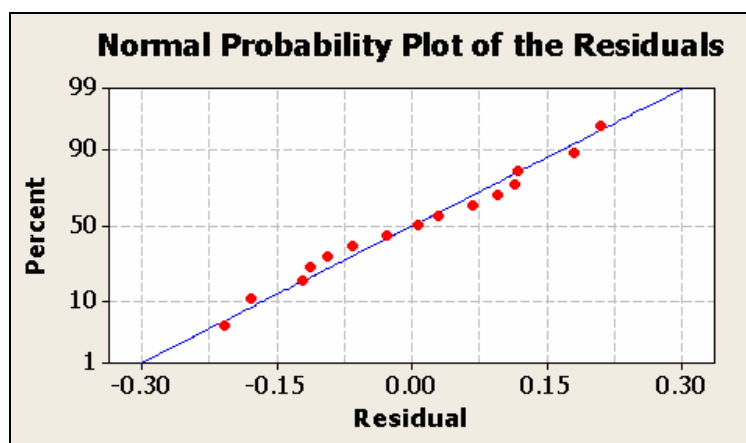
7.2 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการกลึง

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการกลึงผิวชิ้นงานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและเชื่อถือได้ของข้อมูล โดยพิจารณาจาก

7.2.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ (Normality)

นำ Residual ของข้อมูลมาพล็อตกราฟ เพื่อตรวจสอบการกระจายของข้อมูลว่าเป็นแบบปกติหรือไม่โดยกราฟที่ได้จากการพล็อตมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือประมาณเกือบเป็นเส้นตรง แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือได้

1.1 Normal Probability Plot ของข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย (R_a) ดังรูปที่ 4.1

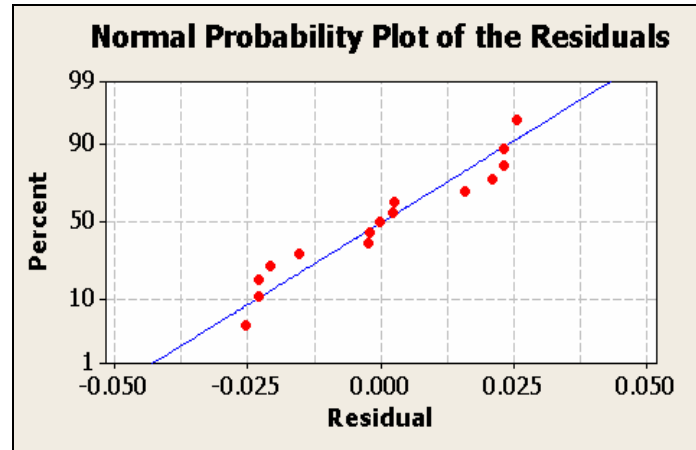


$S = 0.2163$ $R-Sq = 97.9\%$ $R-Sq(adj) = 94.2\%$

รูปที่ 7.3 Normal Probability Plot ของข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย

จากรูปที่ 7.3 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย มีลักษณะประมาณเกือบเป็นเส้นตรง และค่า $R-Sq$ มีค่าสูง แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือได้

1.2 Normal Probability Plot ของข้อมูล Cutting Force Ratio (F_y/F_z)

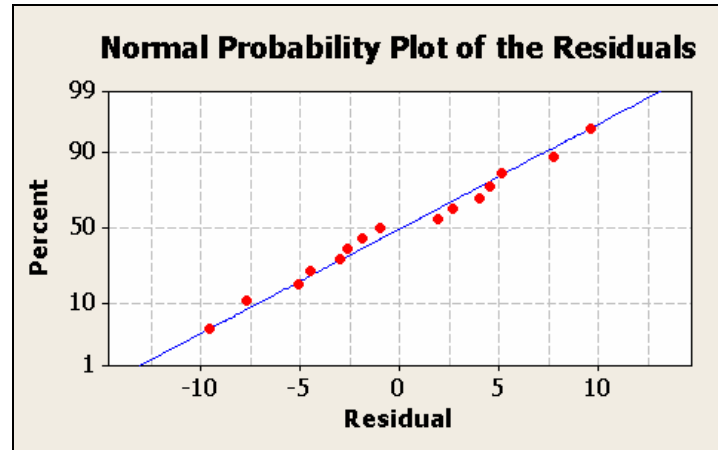


S = 0.03091 R-Sq = 85.6% R-Sq(adj) = 59.7%

รูปที่ 7.4 Normal Probability Plot ของข้อมูล Cutting Force Ratio (F_y/F_z)

จากรูปที่ 7.4 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูล Cutting Force Ratio (F_y/F_z) มีลักษณะประมาณเกือบเป็นเส้นตรง และค่า R-Sq มีค่าสูง แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติและเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้

1.3 Normal Probability Plot ของข้อมูลอุณหภูมิ (C°) ดังรูปที่ 4.3



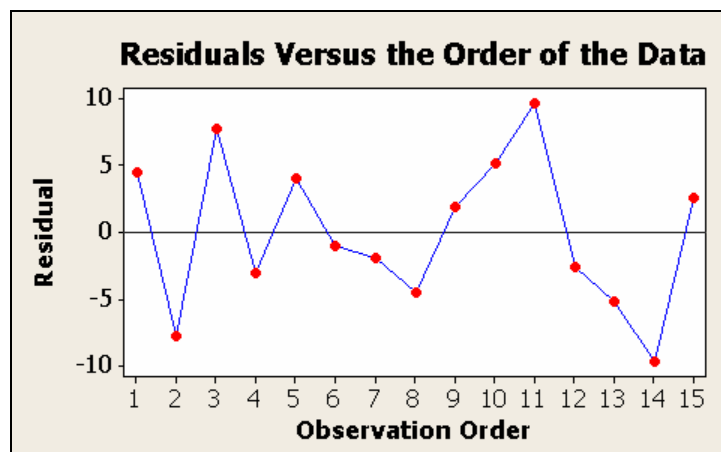
S = 9.437 R-Sq = 88.0% R-Sq(adj) = 66.5%

รูปที่ 7.5 Normal Probability Plot ของข้อมูลอุณหภูมิ (C°)

7.2.2 การทดสอบความเป็นอิสระแก่กัน

นำ Residual ของข้อมูลพล็อตกับลำดับการทดลอง เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่าง Residual โดยความสัมพันธ์ของ Residual ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือกระจายกระจาย แสดงว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

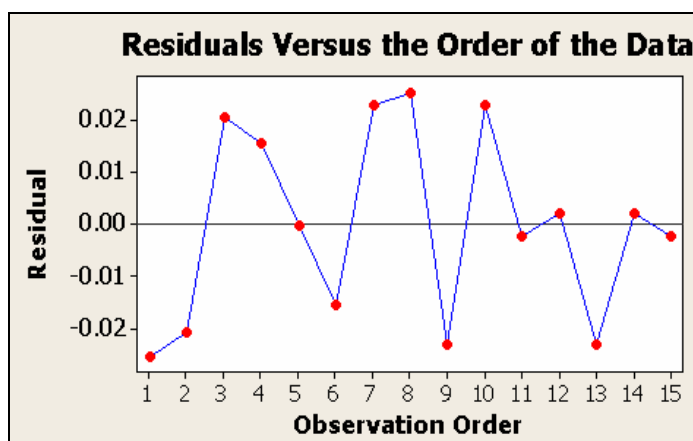
2.1 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลอุณหภูมิกับลำดับการทดลองดังรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.6 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลอุณหภูมิกับลำดับการทดลอง

จากรูปจะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจาย แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

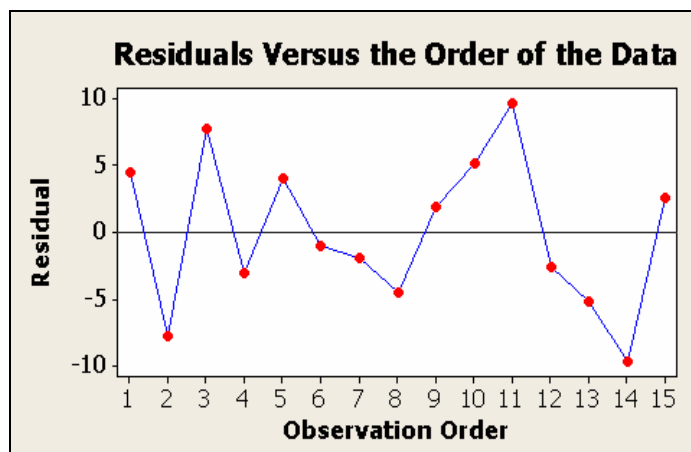
2.2 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูล Cutting Force Ratio (F_y/F_z) กับลำดับการทดลอง ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 7.7 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูล Cutting Force Ratio (F_y/F_z) กับลำดับการทดลอง

จากรูปจะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจาย แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

2.3 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลอุณหภูมิ (C°) กับลำดับการทดลอง ดังรูปที่ 7.8



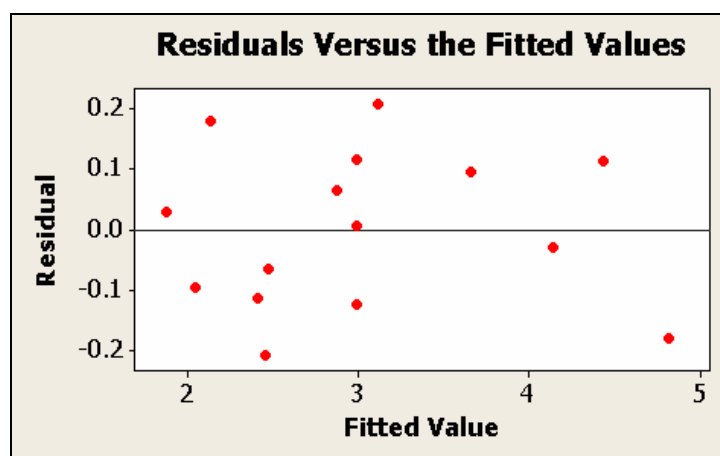
รูปที่ 7.8 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลอุณหภูมิ (C°) กับลำดับการทดลอง

จากรูปจะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจาย แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

7.2.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการพล็อต Residual และ Fit value ถ้าความสัมพันธ์ของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือกระจายแสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

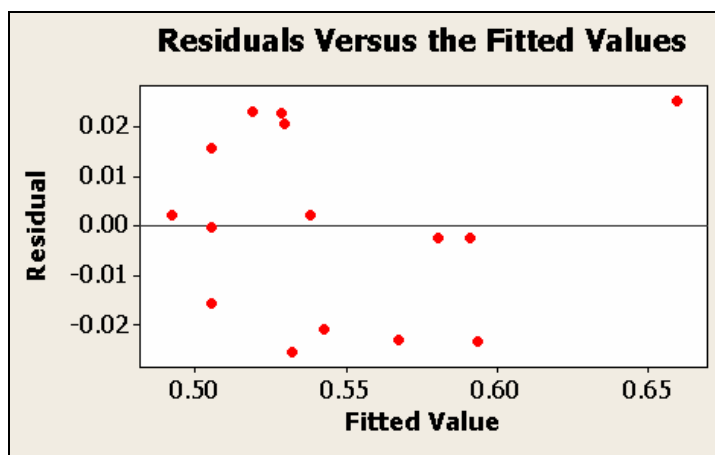
3.1 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตสำหรับค่าความเรียบผิว



รูปที่ 7.9 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตสำหรับค่าความเรียบผิว

จากรูปที่ 7.9 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่า ข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

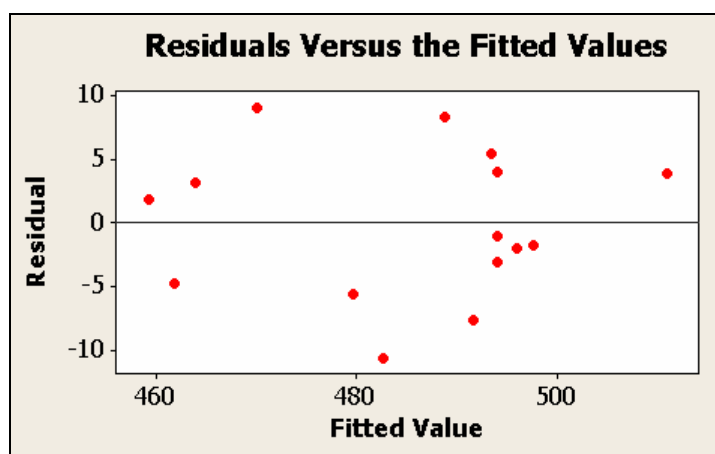
3.2 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตสำหรับค่า Cutting Force Ratio (F_y/F_z)



รูปที่ 7.10 ค่า Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตสำหรับค่าข้อมูล Cutting Force Ratio (F_y/F_z)

จากรูปที่ 7.10 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่า ข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

3.3 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตสำหรับอุณหภูมิ



รูปที่ 7.11 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตสำหรับค่าอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)



จากรูปที่ 7.11 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่า ข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

7.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการวิเคราะห์ค่า P

7.3.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของงานกลึง

1. วิเคราะห์จาก Regression Coefficients for Ra ใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์หาค่า P ของปัจจัยต่าง ๆ ค่า P ที่ได้ จากโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 7.3 ค่า P ที่วิเคราะห์ได้จาก Regression Coefficients for Ra

ปัจจัย	ค่า P
Constant	0.000
Cutting speed	0.018
Feed	0.000
Depth	0.451
Cutting speed*Cutting speed	0.217
Feed*Feed	0.033
Depth*Depth	0.389
Cutting speed*Feed	0.034
Cutting speed*Depth	0.636
Feed*Depth	0.114

จากตารางที่ 7.3 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ ค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้นมีผลกระทบต่อความเรียบผิว คือ

- 1 ความเร็วตัด (Cutting Speed)
- 2 อัตราการป้อนตัด (Feed)
- 3 อันตรกิริยาระหว่างอัตราการป้อนตัด (Feed Rate) กับ อัตราการป้อนตัด (Feed)
- 4 อันตรกิริยาระหว่างความเร็วตัด (Cutting speed) กับ อัตราการป้อนตัด (Feed)

ปัจจัยที่เหลือไม่มีผลพอที่จะสรุปว่าเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือมีผลกระทบต่อความเรียบผิว เนื่องจากค่า P ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

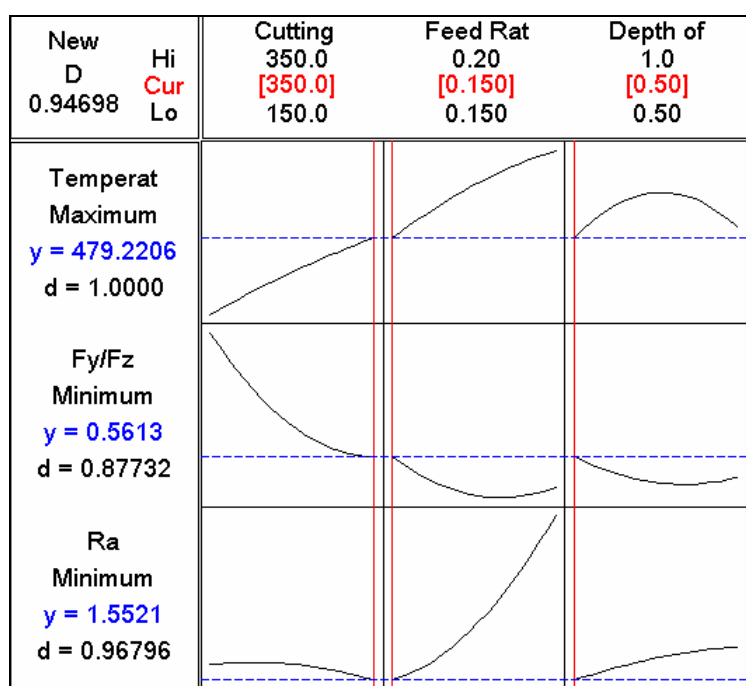
- 1 ความลึกตัด (Depth of cut)
- 2 อันตรกิริยาระหว่างความเร็วตัด (Cutting Speed) กับ ความเร็วตัด (Cutting Speed)

- 3 อันตรกิริยาระหว่างความลึกตัด (Depth of cut) กับ ความลึกตัด (Depth of cut)
- 4 อันตรกิริยาระหว่างความเร็วตัด (Cutting Speed) กับ ความลึกตัด (Depth of cut)
- 5 อันตรกิริยาระหว่างอัตราการป้อนตัด (Feed Rate) กับ ความลึกตัด (Depth of cut)

แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับกระบวนการกลึงงานจริงต้องพิจารณาคุณภาพผิวของชิ้นงานจริงหลังการกลึง ดังนั้นจึงนำปัจจัยทั้งหมดมาพิจารณาอีกครั้งเพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม

7.4 การหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม

โดยการใช้ส่วนโปรแกรมย่อย Response Optimizer ของโปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์หา ระดับปัจจัยที่เหมาะสม ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน โดยจะพิจารณาที่ผลลัพธ์ของตัวแปรตอบสนอง R_a เป็นหลัก ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ควรจะเป็นค่าที่ต่ำที่สุด เนื่องจากเราต้องการความเรียบผิวที่น้อยที่สุด ซึ่งในการพิจารณาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมนี้จะพิจารณาผลลัพธ์ของตัวแปรตอบสนอง Cutting Force Ratio (F_y/F_z) และผลลัพธ์ของตัวแปรตอบสนอง อุณหภูมิประกอบไปด้วยดังแสดงดังรูปที่ 7.12 ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้ข้อมูลอยู่ที่ประมาณ 1.5521 ไมโครเมตร ที่ความเร็วตัดสูงสุด (350 เมตร/นาท) อัตราการป้อนต่ำสุด (0.15 มิลลิเมตร/รอบ) และระยะลึกตัดต่ำสุด (0.5 มิลลิเมตร) ดังแสดงในตารางที่ 7.4



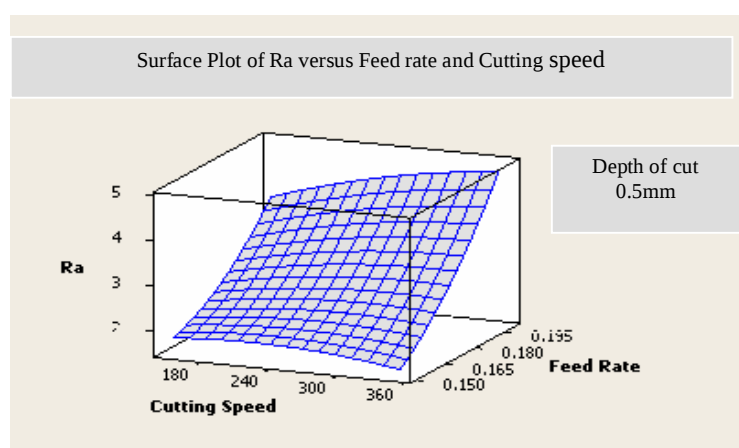
รูปที่ 7.12 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมย่อย Response Optimizer แสดงเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของการกลึง

ตารางที่ 7.4 ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการกลึง

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ค่าที่เหมาะสม
ความเร็วตัด (เมตร/นาท)	A	350
อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	B	0.150
ระยะลึกตัด (มิลลิเมตร)	C	0.5

ความเร็วตัดที่เหมาะสม คือ ความเร็วตัด 350 เมตร/นาท เนื่องจากอุณหภูมิในการตัดที่สูงกว่า ทำให้วัสดุมีความอ่อนนุ่มและง่ายต่อการตัด ใช้แรงตัดน้อยโดยสัดส่วนแรงตัดในแนวอัตราการป้อน (F_y) กับแรงตัดหลัก (F_z) มีค่าน้อยตามไปด้วย

7.5 ความเรียบผิว



รูปที่ 7.13 พื้นผิวผลตอบแทนของความเรียบผิว

จากรูปแสดงพื้นผิวผลตอบแทนของความเรียบผิว(Response) กับความเร็วตัด (Cutting Speed) กับ อัตราการป้อนตัด (Feed Rate) ที่ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่า ความเรียบผิวแปรผันตรงกับอัตราการป้อนตัดซึ่งสอดคล้องกับสมการความเรียบผิวทางทฤษฎี $Ra = f^2/8R_n$

7.6 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบแทน

ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบแทน (Response) โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบแทน จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Minitab เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยวิเคราะห์จากปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยทุกตัวที่มีผลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จะได้สัมประสิทธิ์ของปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 7.5 ตารางแสดงสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบต่าง ๆ กัน

ปัจจัย	ผลตอบ (Response)		
	ความเรียบผิว Ra (μm)	อัตราส่วนแรงตัด (F_y/F_z)	อุณหภูมิ T ($^{\circ}\text{C}$)
Constant	10.3042	3.37098	-3.21875
Cutting Speed	-0.0129570	-0.00382508	0.207500
Feed Rate	-147.417	-22.6522	3640.00
Depth of cut	8.03630	-0.693543	278.000
Cutting Speed*Cutting Speed	-1.58925E-05	3.13073E-06	-1.12500E-04
Feed Rate*Feed Rate	525.400	47.2706	-7400.00
Depth of cut*Depth of cut	-1.69720	0.249836	-174.000
Cutting Speed*Feed Rate	0.125340	0.0119987	-0.90000
Cutting Speed*Depth of cut	0.00217600	-1.66609E-04	0.180000
Feed Rate*Depth of cut	-33.0560	2.26157	-480.000
Constant	10.3042	3.37098	-3.21875
Cutting Speed	-0.0129570	-0.00382508	0.207500
Feed Rate	-147.417	-22.6522	3640.00
Depth of cut	8.03630	-0.693543	278.000
Cutting Speed*Cutting Speed	-1.58925E-05	3.13073E-06	-1.12500E-04

สมการแสดงความสัมพันธ์ที่มีผลต่อความเรียบผิว คือ

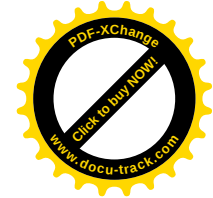
$$Ra = 10.3042 - 0.0129570 v - 147.417 f + 8.03630 d - 0.0000158954 (v^2) + 525.4 (f^2) - 1.69720 (d^2) + 0.125340 (v.f) + 0.00217600 (v.d) - 33.0560 (f.d) \quad (7.2)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

f คือ อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)

d คือ ความลึกตัด (มิลลิเมตร)

สมการแสดงความสัมพันธ์ที่มีผลต่อ Cutting Force Ratio คือ



$$F_y/F_z = 3.371 - 0.00383 v - 22.652 f + 0.6935 d + 0.000031 (v^2) + 47.27 (f^2) + 0.2498 (d^2) + 0.01199 (v.f) + 0.000166 (v.d) + 2.2616 (f.d) \quad (7.3)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

f คือ อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)

d คือ ความลึกตัด (มิลลิเมตร)

สมการแสดงความสัมพันธ์ที่มีผลต่อ อุณหภูมิในการตัด คือ

$$T = -3.21875 + 0.2075 v + 3640 f + 278 d - 0.000113 (v^2) - 7400 (f^2) - 174 (d^2) - 0.90 (v.f) + 0.18 (v.d) - 480 (f.d) \quad (7.4)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

f คือ อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)

d คือ ความลึกตัด (มิลลิเมตร)

7.7 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

หลังจากได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากสมการที่ทำนายคือ ความเร็วในการตัด 350 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร แล้วนำค่าปัจจัยทั้งสามที่ได้ไปทำการทดลอง ซึ่งทำการทดลองจำนวน 3 การทดลองได้ผลดังตารางที่ 7.6 และ 7.7

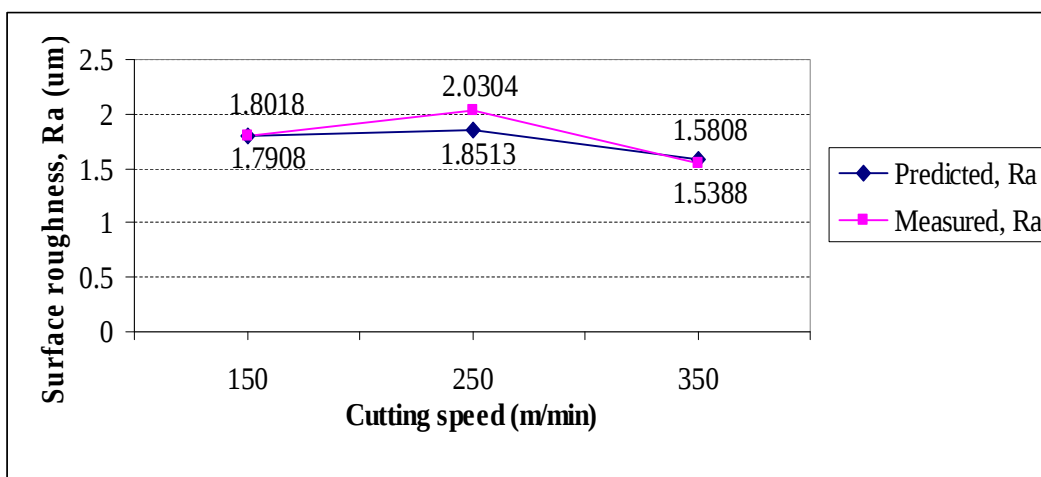


ตารางที่ 7.6 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลของกระบวนการกลึง

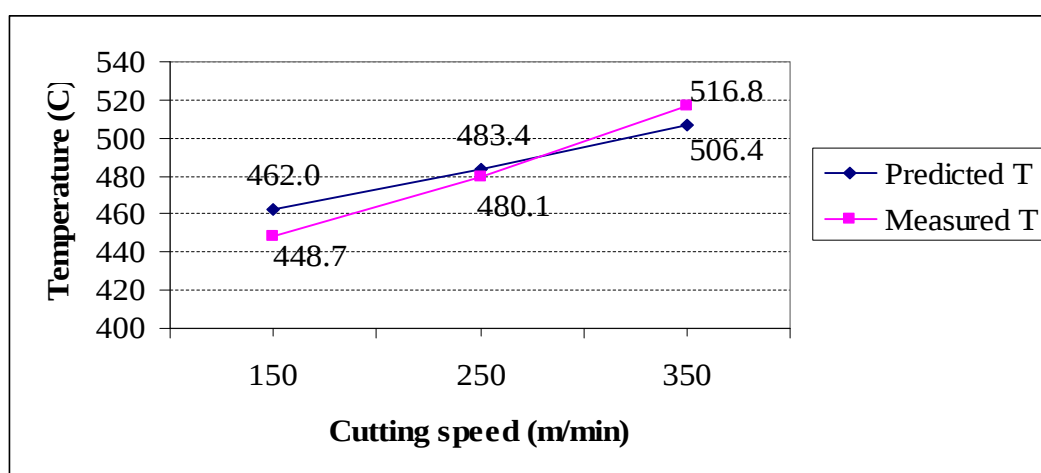
No.	Cutting condition (Speed_Feed_Depth_Volume)	Ra (μm)	Rz (μm)	Vba (mm)	Vbm (mm)
1	350_0.15_0.50_0	2.0369	8.6727	0.0000	0.0000
	350_0.15_0.50_500	1.2891	5.7967	0.1539	0.1721
	350_0.15_0.50_1000	1.3259	5.9056	0.1789	0.1960
	350_0.15_0.50_1500	1.5388	7.0481	0.1846	0.2238
	350_0.15_0.50_2000	1.9003	7.5013	0.2430	0.3290
2	250_0.15_0.50_0	1.8525	8.5134	0.0000	0.0000
	250_0.15_0.50_500	2.8103	11.0489	0.1080	0.1205
	250_0.15_0.50_1000	1.9923	8.5412	0.1253	0.1425
	250_0.15_0.50_1500	2.0304	8.4457	0.1367	0.1587
	250_0.15_0.50_2000	1.6927	7.9042	0.1396	0.1655
3	150_0.15_0.50_0	2.5574	11.2434	0.0000	0.0000
	150_0.15_0.50_500	2.1243	10.7466	0.1436	0.1576
	150_0.15_0.50_1000	2.0432	10.4357	0.1349	0.1456
	150_0.15_0.50_1500	1.7908	7.0481	0.1846	0.2238
	150_0.15_0.50_2000	2.0210	8.932	0.1934	0.2453

ตารางที่ 7.7 ค่าของแรงในการตัดและอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลของกระบวนการกลึง

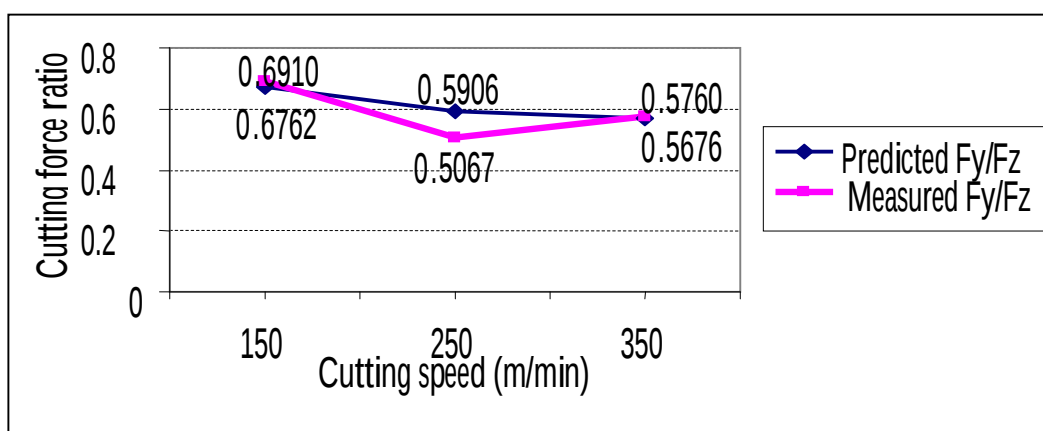
No.	Cutting condition (Speed_Feed_Depth_Volume)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	F _y /F _z	Temp (°C)
1	350_0.15_0.50_0	122	119	208	0.572115	484.3
	350_0.15_0.50_500	182	138	225	0.613333	493.7
	350_0.15_0.50_1000	184	142	235	0.604255	513.3
	350_0.15_0.50_1500	169	129	224	0.575893	516.8
	350_0.15_0.50_2000	189	231	248	0.931452	522.6
2	250_0.15_0.50_0	116	115	209	0.550239	495.5
	250_0.15_0.50_500	124	119	220	0.540909	481.4
	250_0.15_0.50_1000	123	143	221	0.506787	487.1
	250_0.15_0.50_1500	131	113	223	0.506726	480.05
	250_0.15_0.50_2000	116	113	242	0.466942	482.1
3	150_0.15_0.50_0	143	122	276	0.442029	426.3
	150_0.15_0.50_500	153	132	265	0.498100	439.7
	150_0.15_0.50_1000	134	114	243	0.469100	442.4
	150_0.15_0.50_1500	124	172	248	0.690977	448.7
	150_0.15_0.50_2000	121	110	232	0.474138	471.8



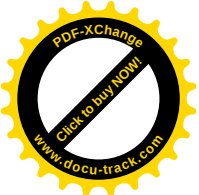
รูปที่ 7.14 เปรียบเทียบความเรียบผิวระหว่างค่าที่วัดกับค่าที่ทำนายจากผลการทดลอง



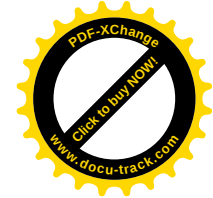
รูปที่ 7.15 เปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างค่าที่วัดกับค่าที่ทำนายจากผลการทดลอง



รูปที่ 7.16 เปรียบเทียบ Cutting force ratio ระหว่างค่าที่วัดกับค่าที่ทำนายจากผลการทดลอง



จากรูปที่ 7.14 ถึง 7.16 สามารถสรุปได้ว่า สมการที่ (7.2), (7.3) และ (7.4) สามารถหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมและนำมาทำนายความเรียบผิวชิ้นงาน อุณหภูมิในการตัด และแรงตัดในขณะตัดที่เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



บทที่ 8

การพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานขณะกลึงด้วยอัตราส่วนแรงตัด

8.1 การตรวจติดตามอัตราส่วนแรงตัด

เป็นที่ทราบกันดีว่าในกระบวนการกลึงนั้นปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวคือ เงื่อนไขการตัดซึ่งได้แก่ อัตราป้อน ความเร็วตัด ความลึกในการตัดและรัศมีจุมกมีดตัด [24] ค่าอัตราป้อนและรัศมีจุมกมีดนั้นสามารถวัดค่าได้ง่ายจึงมักจะนำมาใช้อ้างอิงถึงค่าความขรุขระผิวได้โดยตรงตามทฤษฎี ค่ารัศมีจุมกมีดตัดที่ใหญ่จะให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่น้อย แต่หากให้อัตราการป้อนมีค่าสูงค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่าสูงขึ้น

ความขรุขระผิวชิ้นงานที่ดีจะต้องมีรอยร่องลึกจากกระบวนการกลึงบางและไม่ลึกนัก หากพิจารณาถึงแรงตัดแล้ว แรงตัดจะส่งผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัด การสั่นนี้จะทำให้ความขรุขระผิวชิ้นงานออกมาไม่ดีเท่าที่ควร โดยทั่วไปแล้วแรงตัดจะเพิ่มขึ้นหากเพิ่มค่าอัตราป้อนและความลึกในการตัด แต่ในทางกลับกันหากเพิ่มความความเร็วตัดจะได้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ดีขึ้นเนื่องจากความเร็วตัดที่สูงจะทำให้เกิดอุณหภูมิในการตัดชิ้นงานสูงขึ้น อุณหภูมินี้ทำให้วัสดุของชิ้นงานอ่อนตัวลงและตัดได้ง่ายขึ้นเป็นผลทำให้ผิวสำเร็จของงานมีความขรุขระผิวน้อย

เนื่องจากปัจจัยข้างต้นที่กล่าวมามีส่วนมีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิว จึงควรจะหาความสัมพันธ์ของปัจจัยข้างต้นต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงานด้วย เพื่อที่จะนำค่าพารามิเตอร์มาประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดได้แม่นยำขึ้น

จากผลการทดลองที่ผ่านมา เป็นที่สังเกตว่าแรงตัดมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะการตัด และแรงตัดนี้เองเป็นปัจจัยสำคัญต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน แรงตัดที่สนใจในงานวิจัยมี 2 ประเภทคือ แรงป้อนหรือแรงป้อนมีด (feed force) ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวโดยตรง ส่วนแรงตัดอีกประเภทคือ แรงตัดหลักซึ่งมีค่าแปรผันกับเงื่อนไขการตัด วัสดุชิ้นงานและปริมาณเศษโลหะหรือการสึกหรอของมีดตัด ด้วยเหตุนี้การประมาณค่าความขรุขระผิวจากแรงนั้นต้องทำการพิจารณาโดยตัดลดอิทธิพลจากตัวแปรที่มีผลต่อแรงตัดจากสภาวะการตัดออกไป เพื่อให้สามารถประมาณค่าความขรุขระผิวได้แม่นยำมากขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์แรงป้อนด้วยสัญลักษณ์ F_y ส่วนแรงตัดหลักนั้นจะใช้สัญลักษณ์แทนคือ F_z ส่วนอัตราส่วนแรงตัดที่สนใจนั้นจะแสดงอยู่ในรูปของ $\left(\frac{F_y}{F_z}\right)$ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญหนึ่งซึ่งใช้ประมาณค่าความขรุขระผิวขณะตัดชิ้นงาน โดยคาดว่าอัตราส่วนแรงตัดนี้จะสามารถพยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงานที่กำลังตัดได้แม้ว่าค่าสภาวะการตัดจะแปรเปลี่ยนไปก็ตาม

8.2 สมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัด

จากทฤษฎีพบว่าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานแสดงความสัมพันธ์ต่ออัตราป้อนและรัศมีงูมกมิดในลักษณะของฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลมาใช้ในการพัฒนาสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัด โดยจัดให้ภายในสมการประกอบด้วยค่าอัตราส่วนแรงตัดและพารามิเตอร์อื่น ๆ จากเงื่อนไขการตัดที่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยสามารถจัดรูปแบบของสมการออกมาได้ดังนี้

$$Ra = C_1(V)^{a_1}(f)^{a_2}(R_n)^{a_3}(D)^{a_4}\left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{a_5} \quad (8.1)$$

$$Rz = C_2(V)^{a_6}(f)^{a_7}(R_n)^{a_8}(D)^{a_9}\left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{a_{10}} \quad (8.2)$$

โดยกำหนดให้ Ra คือ ความขรุขระเฉลี่ยของผิวชิ้นงานตัด ส่วน Rz คือ ความขรุขระผิวสูงสุดของผิวชิ้นงานตัด V คือ ความเร็วตัด f คือ อัตราป้อน R_n คือ ค่ารัศมีงูมกมิดตัด D คือ ความลึกตัดและ $\left(\frac{F_y}{F_z}\right)$ คือ อัตราส่วนแรงตัด โดยมีค่า $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, C_1$ และ C_2 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยพหุคูณ

สมการทั้งสองสมการข้างต้น (8.1) และ (8.2) ยังไม่เป็นสมการที่อยู่ในรูปแบบของสมการเส้นตรงจึงต้องทำการจัดรูปแบบของสมการให้เป็นแบบเส้นตรงพหุคูณโดยใช้ลอการิทึมมาใช้ในการแปลงรูปสมการได้ดังนี้

$$\ln Ra = a_1 \ln V + a_2 \ln f + a_3 \ln R_n + a_4 \ln D + a_5 \ln \left(\frac{F_y}{F_z}\right) \quad (8.3)$$

$$\ln Rz = a_6 \ln V + a_7 \ln f + a_8 \ln R_n + a_9 \ln D + a_{10} \ln \left(\frac{F_y}{F_z}\right) \quad (8.4)$$

จากการวิเคราะห์ด้วยการถดถอยพหุคูณ สมการข้างต้นสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการถดถอยพหุคูณได้ดังนี้

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 \quad (8.5)$$

$$y_2 = \beta_6 + \beta_7 x_1 + \beta_8 x_2 + \beta_9 x_3 + \beta_{10} x_4 + \beta_{11} x_5 \quad (8.6)$$

โดยตัวแปร y_1 และ y_2 เป็นตัวแทนของค่า $\ln R_a$ 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 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_7, \beta_8, \beta_9, \beta_{10}$ และ β_{11} เป็นสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยพหุคูณ

ในขั้นสุดท้ายได้ทำการคำนวณขอบเขตการพยากรณ์ (Prediction Interval, PI) โดยตั้งระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เพื่อสร้างขอบเขตความเป็นไปได้ที่ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากการใช้งานจริงจะตกอยู่ในช่วงขอบเขตนั้น

8.3 ขั้นตอนการทดลองและเงื่อนไขการตัด

การจะตั้งสมการถดถอยที่ (8.5) และ (8.6) ได้นั้น ต้องมีผลการทดลองที่เพียงพอ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองกับเครื่องกลึงซีเอ็นซี การทดลองนี้จะอยู่ภายใต้สถานการณ์ตัดแบบแห้ง โดยใช้มีดตัด 2 ชนิด คือ มีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว TPMP 160304 HQ และ TPMP 160308 HQ โดยเคลือบผิวเกรด CVD ประกอบด้วย 3 ชั้นหลัก คือ TiN, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, TiCN เป็นมีดมีดตัดทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่มีมุมคายเศษโลหะเป็นบวกขนาด 11 องศา ซึ่งคุณสมบัติของมีดตัดแบบนี้ คือ แรงตัดจะน้อยเนื่องจากเศษโลหะสามารถไหลออกได้ดี จึงทำให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบสูง มีดตัดทั้งสองแตกต่างกันที่เม็ดมีดตัด TPMP 160304 HQ และ TPMP 160308 HQ จะมีขนาดรัศมีมุมมีดตัด คือ 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ และใช้ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 5.2 และ 5.3

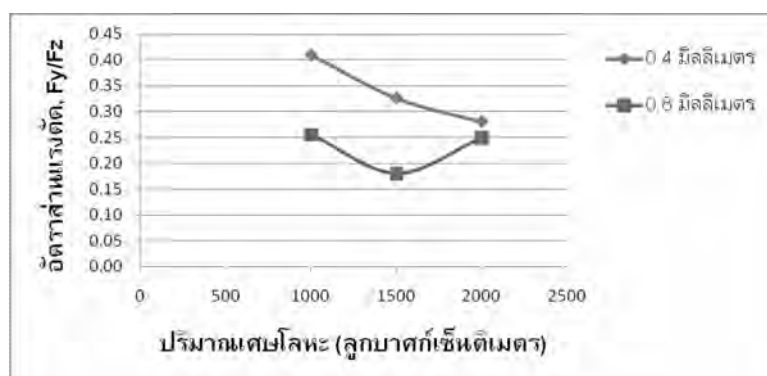
ขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ยึดจับด้วยเครื่องกลึง ยันศูนย์ชิ้นงาน แล้วทำการปอกผิวนอก 1 มิลลิเมตร (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานลดลง 2 มิลลิเมตร) เพื่อให้ขนาดของชิ้นงานเท่ากัน
2. เมื่อชิ้นงานเรียบร้อยแล้วจึงทำการเขียนโปรแกรมลงบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อตัดชิ้นงานให้ได้ปริมาตรตามที่ต้องการ
3. ทำการกลึงปอกผิวด้วยเงื่อนไขการตัดที่จะทำการทดลอง
4. วัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ปริมาตรเริ่มต้น (0 ลูกบาศก์เซนติเมตร) และ ทุก ๆ การตัดที่ปริมาตร 500, 1000, 1500, 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร
5. เมื่อกลึงชิ้นงานจนถึงปริมาตร 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตรหรือมีดตัดสึกหรองจนไม่สามารถใช้งานได้อีกก็จะทำการเปลี่ยนมีดตัดและทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดต่อไป

6. เขียนกราฟระหว่างปริมาตรการตัดกับผลตอบต่าง ๆ คือ ความสึกหรอของมีดตัด ความขรุขระผิวชิ้นงาน แรงในการตัด ที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ
7. จากกราฟที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรว่ามีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานหรือไม่ เพื่อพิจารณาเลือกเป็นตัวแปรสำหรับใช้ในสมการวิธีวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
8. สร้างรูปแบบสมการการพยากรณ์ด้วยวิธีวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression) เพื่อใช้เป็นสมการต้นแบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน
9. เมื่อได้สมการต้นแบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน ทำการหาค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจากสมการ โดยการใส่ค่าของเงื่อนไขการตัดเข้าไป
10. นำค่าที่ได้จากสมการต้นแบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวมาเปรียบเทียบกับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลอง
11. ส่วนต่างของค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการต้นแบบการพยากรณ์กับค่าที่ได้จากการทดลอง จะนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของสมการการพยากรณ์
12. สรุปผลเกี่ยวกับความสามารถของสมการต้นแบบการพยากรณ์และแนวทางปรับปรุง

8.4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

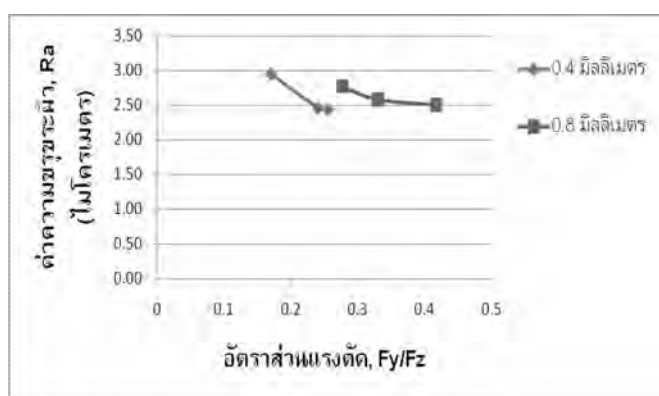
ในการพัฒนาเครื่องกลึงซีเอ็นซีให้ทำงานได้อย่างเครื่องจักรกลอัจฉริยะจำเป็นต้องมีการตรวจสอบและพัฒนาหาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับเงื่อนไขการตัดซึ่งความสัมพันธ์นี้เราจะได้ผลมาจากการทดลอง รูปที่ 8.2 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณเศษโลหะที่เพิ่มขึ้นกับอัตราส่วนแรงตัดที่ลดลง จากรูปแสดงว่า แรงตัดหลักมีค่าสูงขึ้นมากกว่าแรงป้อนขณะที่ปริมาณเศษโลหะหรือความสึกหรอของเครื่องมือตัดเพิ่มขึ้น



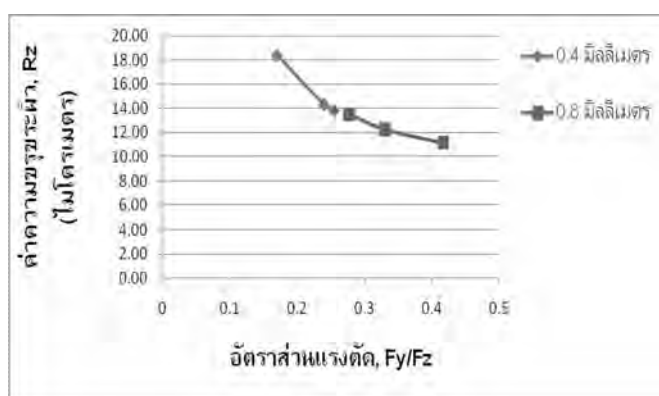
รูปที่ 8.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงตัด และปริมาณเศษโลหะ ที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อ นาที อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีจุมุกมีดตัด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร และความลึกตัด 0.25 มิลลิเมตร

จากผลการทดลอง อัตราส่วนแรงตัดของผลการทดลองที่ใช้เครื่องมือตัดที่มีรัศมีจุมุกมีดตัด เท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร จะมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนแรงตัดที่ใช้กับเครื่องมือตัดรัศมีจุมุกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร ทั้งนี้เป็นเพราะว่าแรงป้อนมีขนาดมากกว่าแรงตัดหลักเมื่อรัศมีจุมุกมีดตัดมีขนาดเล็กลง ซึ่งสอดคล้อง กับทฤษฎีที่ว่ารัศมีจุมุกมีดตัดที่ใหญ่จะให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ดีกว่า

อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 8.1 จะเห็นว่าอัตราส่วนแรงตัดของมีดตัดที่มีรัศมีจุมุกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตรจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อตัดเหล็กไปเป็นปริมาณ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ ปริมาณ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้งนี้เป็นเพราะรัศมีจุมุกมีดตัดมีค่าสูงขึ้นจากการสึกหรอทำให้ ความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าที่ดีขึ้น เมื่อพิจารณาอัตราส่วนแรงตัดของมีดตัดที่มีรัศมีจุมุกมีดตัด 0.4 มิลลิเมตร ในรูปที่ 8.1 จะพบว่าค่าอัตราส่วนของแรงตัดลดลงเมื่อปริมาณเศษโลหะเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีดตัด เกิดการสึกหรอ จึงทำให้แรงตัดหลักมีขนาดมากกว่าแรงป้อน จึงส่งผลให้ความขรุขระผิวชิ้นงานมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนของแรงตัดมีค่าน้อยลงซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 8.2



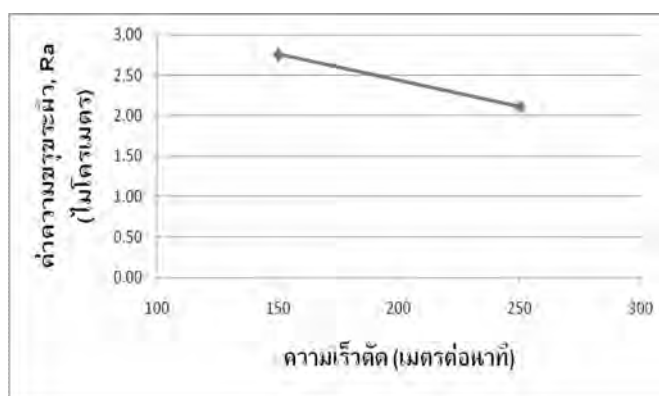
(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย



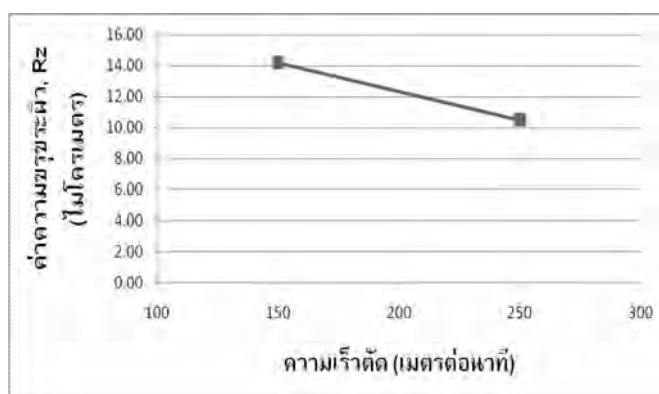
(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

รูปที่ 8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและอัตราส่วนแรงตัด ที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที
อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงูมกมิตัด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร และความลึกตัด 0.25
มิลลิเมตร

ในรูปที่ 8.2 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนแรงตัดมีผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน ซึ่งจุดนี้
สามารถนำมาใช้อ้างอิงเพื่อทำการประมาณค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานขณะตัดได้ สังเกตได้ว่ายิ่งค่า
อัตราส่วนแรงตัดสูงขึ้น ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุดจะมีค่าน้อยลง นั่นแสดงว่า
ความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นขณะที่ปริมาณเศษโลหะและมิดดัดสึกหรอมากขึ้น



(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย

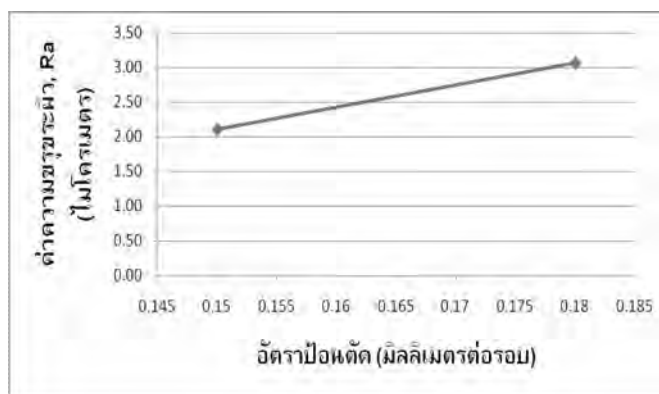


(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

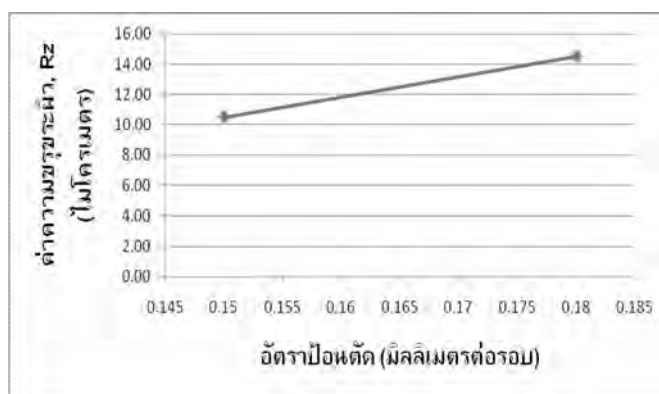
รูปที่ 8.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและความเร็วตัด ที่อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ
รัศมีงูมกมิตัด 0.4 มิลลิเมตร ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ปริมาณเศษโลหะ 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปที่ 8.3 ได้แสดงอิทธิพลของความเร็วตัดเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ความขรุขระผิวชิ้นงานจะ
ลดลงเนื่องจากความเร็วตัดที่สูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิในการตัดสูงขึ้นด้วย อุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะทำให้
วัสดุอ่อนนุ่มขึ้นและตัดได้ง่ายขึ้น ด้วยเหตุนี้เองพื้นผิวสำเร็จจึงออกมาเรียบมากขึ้น

อัตราส่วนแรงตัดจึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วตัดสูงขึ้นจากวัสดุทำงานมีความอ่อนนุ่มขึ้น
ในขณะเดียวกันผิวสำเร็จของชิ้นงานก็ดีขึ้นด้วยเมื่ออัตราส่วนแรงตัดลดลง



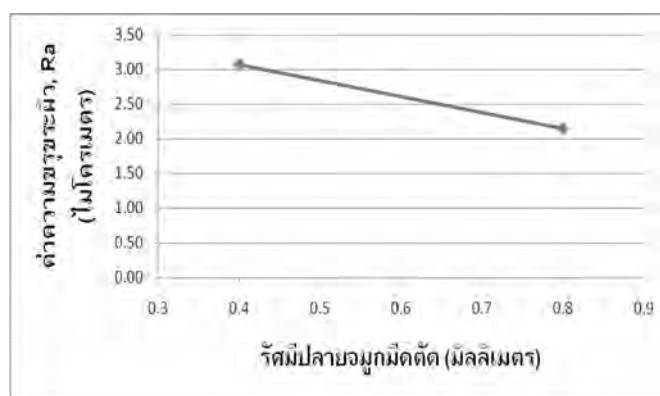
(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย



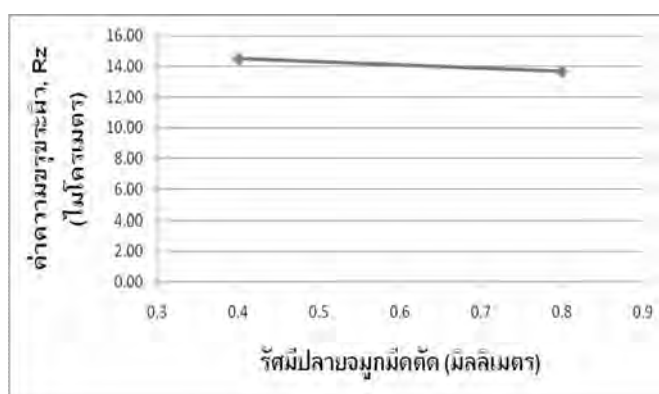
(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

รูปที่ 8.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและอัตราป้อนตัด ที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที รัศมี
ปลายงมกมิตัด 0.4 มิลลิเมตร ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ปริมาณเศษโลหะ 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปที่ 8.4 แสดงค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นโดยแปรผันตามอัตราป้อนที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน
สอดคล้องกับทฤษฎีความขรุขระผิวชิ้นงานที่ว่าอัตราการป้อนที่มากขึ้นจะทำให้เกิดรอยตัดจากการ
ป้อนที่ผิวของชิ้นงานสูงขึ้น ทำให้ความขรุขระผิวแย่ลง อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ค่าความขรุขระผิวมีค่า
เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราป้อนคือ อัตราป้อนที่เร็วขึ้นจะทำให้เกิดแรงตัดที่สูงขึ้น แรงตัดนี้เองเป็นสาเหตุทำ
ให้เกิดการสั่นของมีดตัดทำให้ผิวชิ้นงานออกมาแย่ลงเช่นกัน



(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย

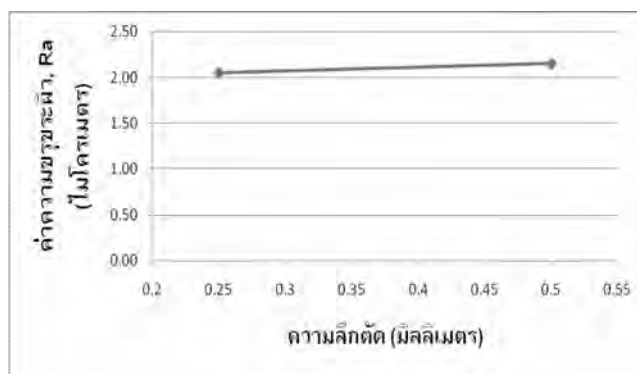


(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

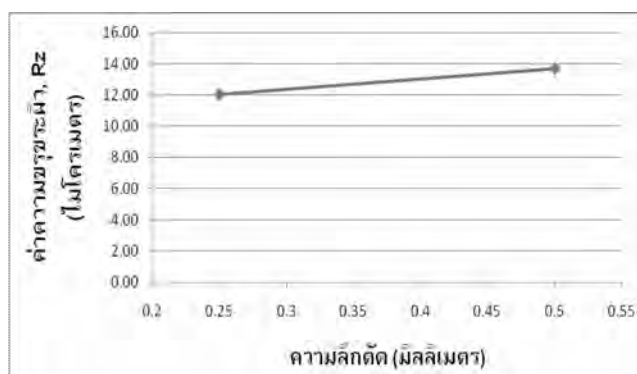
รูปที่ 8.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและรัศมีจุมูกมีดตัด ที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ปริมาณเศษโลหะ 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ส่วนรูปที่ 8.5 แสดงค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดที่เพิ่มขึ้นจากการทดลองที่ตอบสนองต่อค่ารัศมีจุมูกมีดที่เพิ่มขึ้น โดยสอดคล้องกับทฤษฎีความขรุขระผิวชิ้นงานที่ว่ารัศมีจุมูกมีดช่วยลดรอยบนผิวชิ้นงานจากการป้อนมีดตัด ทำให้ความขรุขระผิวลดลง อีกเหตุผลหนึ่งคือพื้นที่สัมผัสของรัศมีจุมูกมีดกับชิ้นงาน ช่วยลดความร้อนที่เกิดบริเวณขอบมีดตัดทำให้การสึกหรอของชิ้นงานเกิดช้าลง

อีกปัจจัยหนึ่งมีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานคือความลึกตัดดังรูปที่ 8.6 เห็นได้ว่าชิ้นงานจะมีความขรุขระผิวชิ้นงานที่ดีเมื่อใช้ค่าความลึกตัดเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร เพราะความลึกตัดที่มากขึ้นจะทำให้เกิดแรงตัดที่สูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามมาเป็นที่ทราบกันดีว่าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสามารถปรับให้ดีขึ้นได้โดยการลดค่าความลึกตัด



(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย



(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

รูปที่ 8.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและความเร็วตัด ที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงูมกมิตัด 0.8 มิลลิเมตร ปริมาณเศษโลหะ 2000 ลูกบาศก์ เซนติเมตร

จากรูปที่ 8.1 ถึงรูปที่ 8.6 สามารถสรุปได้ว่าค่าความขรุขระผิวจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนต่ออัตราป้อน และความลึกตัด ในทางตรงกันข้ามค่าความขรุขระผิวจะมีค่าลดลงเป็นสัดส่วนต่อค่าความเร็วตัด ค่ารัศมีงูมกมิตัด และอัตราส่วนแรงตัด

8.5 สมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน

จากการทดลองสามารถสร้างสมการความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) ได้ดังนี้

$$\hat{y}_1 = 4.50 - 0.342x_1 + 1.31x_2 - 0.397x_3 + 0.221x_4 - 0.439x_5 \quad (8.7)$$

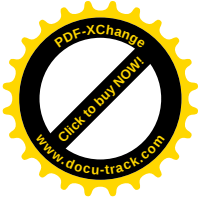
$$\hat{y}_2 = 6.17 - 0.398x_1 + 0.984x_2 - 0.085x_3 + 0.329x_4 - 0.484x_5 \quad (8.8)$$

สมการที่ (8.7) และ (8.8) เป็นสมการที่ได้มาจากการแปลงรูปลอกการพิมพ์ต่อตัวแปรแต่ละตัว จากรูปสมการเอ็กโปเนนเชียลเดิมดังสมการที่ (9) และ (10)

$$\hat{Ra} = 89.9(V)^{-0.342}(f)^{1.31}(R_n)^{-0.397}(D)^{0.221}\left(\frac{Fy}{Fz}\right)^{-0.439} \quad (8.9)$$

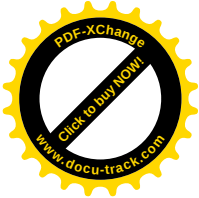
$$\hat{Rz} = 478(V)^{-0.398}(f)^{0.984}(R_n)^{-0.085}(D)^{0.329}\left(\frac{Fy}{Fz}\right)^{-0.484} \quad (8.10)$$

สมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะนี้ให้ค่าพยากรณ์ที่มีค่านัยสำคัญอย่างสูง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p-value = 0.000) ดังนั้นสมการนี้จึงสามารถใช้พยากรณ์ความขรุขระผิวได้ เป็นอย่างดี โดยค่าสัมประสิทธิ์นั้นแสดงถึงค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่แปรผันต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าตัวแปรนั้น ๆ ซึ่งอาจจะเพิ่มหรือลดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานแล้วแต่สัญลักษณ์ที่เป็นบวกหรือลบ หน้าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร



ตารางที่ 8.1 ตารางเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวชิ้นงานระหว่างผลการการวัดและค่าที่ได้จากสมการ
พยากรณ์ วิธีการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) ของมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว TPMR 160304 HQ

Experi ment no.	Chip Volume	Rn	V	f	D	Force ratio Fy/Fz	Measured R (μ m)		Predicted R (μ m)	
	cm ³	mm	m/min	mm/rev	mm	-	Ra	Rz	Ra	Rz
1	0	0.4	250	0.18	0.25	0.3684	2.4528	11.2120	2.5528	11.3120
2	0	0.4	150	0.15	0.5	0.4686	2.2175	10.2184	2.3205	12.4757
3	0	0.4	250	0.15	0.5	0.6563	1.3752	8.8792	1.4252	8.9292
4	0	0.4	150	0.18	0.5	0.7222	2.3746	11.6864	2.3746	11.6864
5	0	0.4	250	0.18	0.5	0.6927	2.7270	12.2112	2.0884	10.1047
6	500	0.4	150	0.15	0.5	0.4671	2.3295	13.4368	2.3301	12.5325
7	500	0.4	250	0.15	0.5	0.5027	1.3529	8.2360	1.8945	9.8698
8	500	0.4	150	0.18	0.5	0.4241	2.2963	11.5584	3.0791	15.6693
9	500	0.4	250	0.18	0.5	0.4956	2.5011	12.5776	2.4192	11.8827
10	1000	0.4	250	0.18	0.25	0.4048	2.4823	11.0080	2.2562	10.3711
11	1000	0.4	150	0.15	0.5	0.4511	1.9303	10.5824	2.3688	12.7623
12	1000	0.4	250	0.15	0.5	0.5365	1.9267	8.0352	1.8334	9.5193
13	1000	0.4	150	0.18	0.5	0.4439	2.4941	11.2568	3.0163	15.3175
14	1000	0.4	250	0.18	0.5	0.5092	2.5789	11.4120	2.3905	11.7276
15	1500	0.4	250	0.18	0.25	0.3228	2.5565	12.3872	2.4990	11.6081
16	2000	0.4	250	0.18	0.25	0.2846	2.7734	13.4776	2.6627	12.4495
17	2000	0.4	150	0.15	0.5	0.4759	2.8036	17.1008	2.3059	12.3894
18	2000	0.4	250	0.15	0.5	0.5588	2.0715	10.4944	1.8044	9.3535
19	2000	0.4	150	0.18	0.5	0.4526	3.3533	17.6000	2.9979	15.2147
20	2000	0.4	250	0.18	0.5	0.4973	3.0665	14.5864	2.4161	11.8660

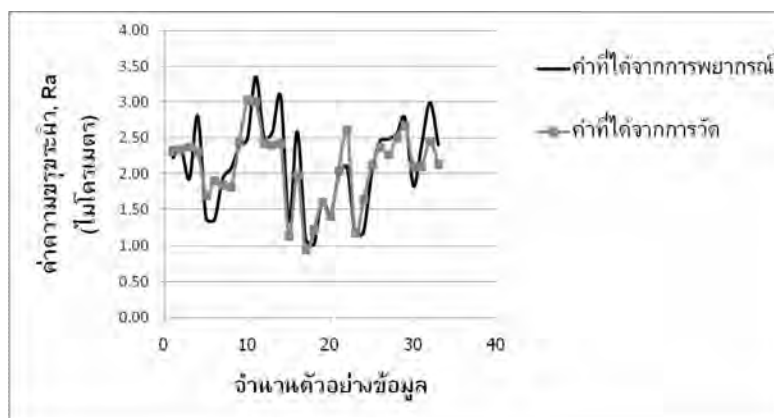


ตารางที่ 8.2 ตารางเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวชิ้นงานระหว่างผลการการวัดและค่าที่ได้จากสมการ
พยากรณ์ วิธีการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) ของมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว TPMR 160308 HQ

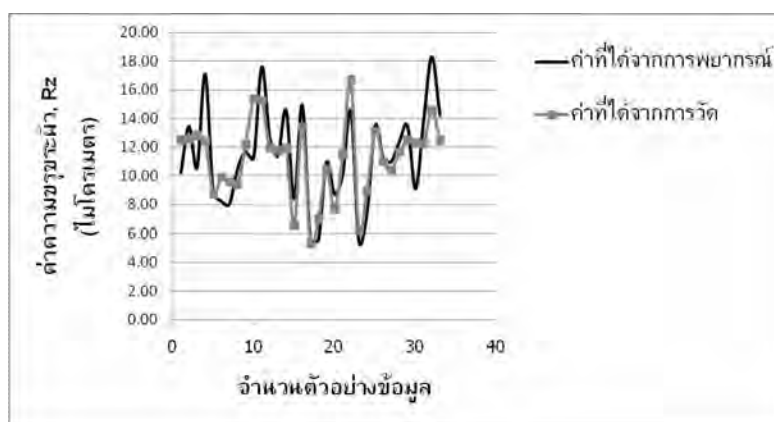
Experi ment no.	Chip Volume	Rn	V	f	D	Force ratio Fy/Fz	Measured R (μm)		Predicted R (μm)	
	cm ³	mm	m/min	mm/rev	mm	-	Ra	Rz	Ra	Rz
1	0	0.8	150	0.15	0.15	0.6923	1.3312	8.4000	1.1395	6.5628
2	0	0.8	250	0.15	0.15	0.7174	1.1054	5.6064	0.9420	5.2639
3	0	0.8	150	0.18	0.15	0.7353	1.4182	8.6800	1.4091	7.6267
4	0	0.8	250	0.18	0.15	0.7400	1.1701	5.4824	1.1800	6.2044
5	0	0.8	250	0.18	0.25	0.2556	1.8269	9.1104	2.1065	12.2782
6	500	0.8	150	0.15	0.15	0.3483	2.6385	9.7640	1.5406	9.1513
7	500	0.8	250	0.15	0.15	0.4010	1.0170	5.5808	1.2161	6.9754
8	500	0.8	150	0.18	0.15	0.3180	1.9778	10.1400	2.0360	11.4427
9	500	0.8	250	0.18	0.15	0.3505	1.2012	7.4360	1.6381	8.9080
10	1000	0.8	250	0.18	0.25	0.2581	2.4025	13.8784	2.0976	12.2205
11	1000	0.8	150	0.15	0.15	0.2393	1.3362	8.9088	1.8166	10.9744
12	1000	0.8	250	0.15	0.15	0.2783	2.3113	11.8984	1.4276	8.3243
13	1000	0.8	150	0.18	0.15	0.2394	1.3506	7.2736	2.3062	13.1283
14	1000	0.8	250	0.18	0.15	0.2500	2.2673	10.1144	1.9000	10.4907
15	1500	0.8	250	0.18	0.25	0.1852	2.9865	18.3040	2.4266	14.3502
16	2000	0.8	150	0.15	0.15	0.3614	2.5872	14.9240	1.5158	8.9892
17	2000	0.8	250	0.15	0.15	0.4000	1.6357	10.9608	1.2174	6.9839
18	2000	0.8	150	0.18	0.15	0.3316	2.0861	14.5016	1.9989	11.2131
19	2000	0.8	250	0.18	0.15	0.3622	2.0341	13.4992	1.6147	8.7675
20	2000	0.8	250	0.18	0.25	0.2462	2.4028	14.2320	2.1415	12.5029

8.6 ความแม่นยำของสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน

การทดสอบสมการการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากการตัด เพื่อทดสอบว่าสมการการพยากรณ์ที่นำเสนอมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือหรือไม่ โดยการทดลองได้นำเอาผลการวัดค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย และความขรุขระผิวสูงสุด เปรียบเทียบกับค่าพยากรณ์ที่ได้จากสมการ โดยใช้เงื่อนไขการทดลองใหม่ในตารางที่ 5.1



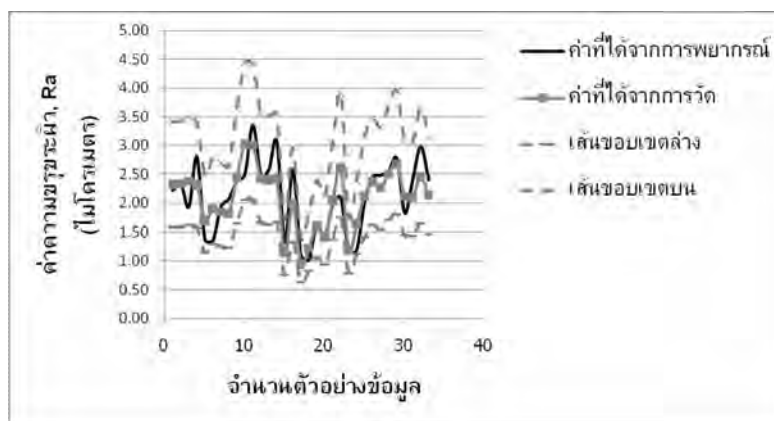
(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย



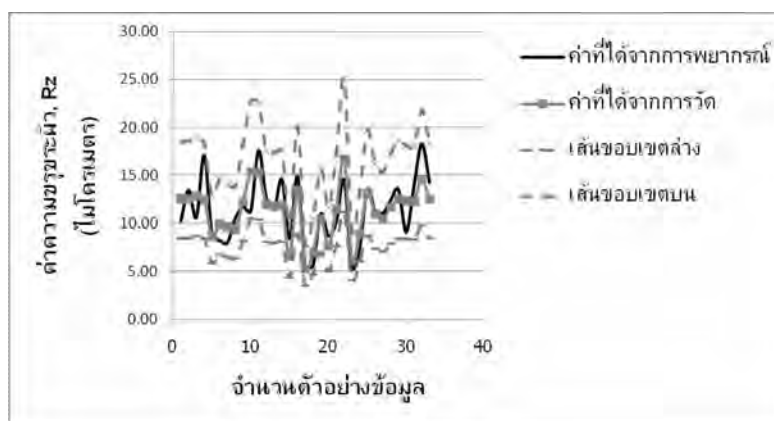
(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

รูปที่ 8.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากการวัดจริงและจากการพยากรณ์

จากรูปที่ 8.7 พบว่า การพยากรณ์ด้วยสมการที่นำเสนอมีความแม่นยำ ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวสูงสุด อยู่ที่ 87.3 และ 86.5 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากความแม่นยำดังกล่าวสรุปได้ว่าสมการที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้ในการช่วยพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในระหว่างการตัดได้ อย่างไรก็ตามที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์สามารถสร้างเส้นขอบเขตการพยากรณ์เพื่อตรวจสอบการกระจายของข้อมูลในแต่ละการทดลอง พบว่าค่าที่ได้จากการวัดยังอยู่ในเส้นขอบเขตดังกล่าว ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 8.8



(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย



(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

รูปที่ 8.8 การเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการวัดจริง ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการพยากรณ์
เส้นขอบเขตบน และเส้นขอบเขตล่าง

ในการนำสมการการพยากรณ์เพื่อไปใช้ในกระบวนการตัดจริง เส้นขอบเขตบนและเส้นขอบเขตล่างดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพผิวชิ้นงานได้ โดยอ้างอิงเส้นขอบเขตบนและเส้นขอบเขตล่างจากการพยากรณ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

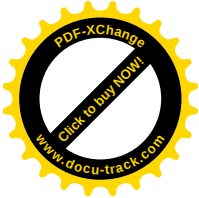
ตารางที่ 8.3 ตารางเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวชิ้นงานระหว่างผลการการวัดและค่าที่ได้จากสมการ
พยากรณ์ วิธีการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) ของมิตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว KC9110

Experi ment no.	Chip Volume	Rn	V	f	D	Force ratio Fy/Fz	Measured R (μ m)		Predicted R (μ m)	
	cm ³	Mm	m/min	mm/rev	mm	-	Ra	Rz	Ra	Rz
1	0	0.4	150	0.15	0.5	0.5640	2.0157	8.66	2.1422	11.4233
2	0	0.4	150	0.15	1.0	0.5970	2.1079	10.848	2.4353	13.9598
3	0	0.4	250	0.15	0.5	0.5479	2.0283	8.624	1.8218	9.4528
4	0	0.4	250	0.15	1.0	0.5777	2.1314	10.1533	2.0746	11.5738
5	0	0.4	350	0.15	0.5	0.5530	2.1532	10.8392	1.6172	8.2314
6	0	0.4	350	0.15	1.0	0.5658	1.982	10.532	1.8661	10.2259
7	0	0.4	150	0.18	0.5	0.5442	3.2924	14.388	2.7630	13.9057
8	0	0.4	150	0.18	1.0	0.5702	2.7695	14.652	3.1553	17.0787
9	0	0.4	250	0.18	0.5	0.5326	2.878	12.872	2.3423	11.4672
10	0	0.4	250	0.18	1.0	0.5472	2.7529	13.988	2.6978	14.2171
11	0	0.4	350	0.18	0.5	0.5417	2.9461	12.944	2.0722	9.9480
12	0	0.4	350	0.18	1.0	0.5509	2.8239	14.972	2.3974	12.3942
13	500	0.4	150	0.15	0.5	0.5484	2.1703	11.192	2.1688	11.5794
14	500	0.4	150	0.15	1.0	0.5825	2.1492	10.88	2.4617	14.1266
15	500	0.4	250	0.15	0.5	0.5000	2.0864	8.92	1.8965	9.8811
16	500	0.4	250	0.15	1.0	0.5681	1.9647	9.4933	2.0899	11.6680
17	500	0.4	350	0.15	0.5	0.5048	1.9172	10.576	1.6833	8.6027
18	500	0.4	350	0.15	1.0	0.5821	2.649	11.864	1.8430	10.0863
19	500	0.4	150	0.18	0.5	0.5087	2.7411	11.68	2.8463	14.3685
20	500	0.4	150	0.18	1.0	0.5533	2.8256	14.144	3.1972	17.3288
21	500	0.4	250	0.18	0.5	0.5129	1.7961	8.4	2.3813	11.6778
22	500	0.4	250	0.18	1.0	0.5488	2.8147	14.604	2.6942	14.1961
23	500	0.4	350	0.18	0.5	0.5379	1.9386	11.396	2.0786	9.9819
24	500	0.4	350	0.18	1.0	0.5634	2.1701	12.68	2.3739	12.2600
25	1000	0.4	150	0.15	0.5	0.5354	1.5088	9.832	2.1918	11.7150
26	1000	0.4	150	0.15	1.0	0.5860	2.1122	11.684	2.4552	14.0853
27	1000	0.4	250	0.15	0.5	0.4422	2.0735	9.648	2.0016	10.4863
28	1000	0.4	250	0.15	1.0	0.5804	2.0966	10.6853	2.0704	11.5479

ตารางที่ 8.3 ตารางเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวชิ้นงานระหว่างผลการการวัดและค่าที่ได้จากสมการ
พยากรณ์ วิธีการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) ของมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว KC9110 (ต่อ)

Experi ment no.	Chip Volume	Rn	V	f	D	Force ratio Fy/Fz	Measured R (μ m)		Predicted R (μ m)	
	cm ³	Mm	m/min	mm/rev	mm	-	Ra	Rz	Ra	Rz
29	1000	0.4	350	0.15	0.5	0.5073	1.9749	8.348	1.6796	8.5821
30	1000	0.4	350	0.15	1.0	0.5251	1.977	10.092	1.9283	10.6024
31	1000	0.4	150	0.18	0.5	0.4983	2.6678	12.484	2.8721	14.5119
32	1000	0.4	150	0.18	1.0	0.5310	2.6209	12.12	3.2555	17.6775
33	1000	0.4	250	0.18	0.5	0.5018	1.8774	8.636	2.4042	11.8017
34	1000	0.4	250	0.18	1.0	0.5612	2.751	13.664	2.6679	14.0433
35	1000	0.4	350	0.18	0.5	0.6148	2.5959	12.712	1.9602	9.3564
36	1000	0.4	350	0.18	1.0	0.6136	2.2826	11.084	2.2866	11.7639
37	1500	0.4	150	0.15	0.5	0.5265	1.8924	10.22	2.2078	11.8094
38	1500	0.4	150	0.15	1.0	0.5801	1.8781	10.88	2.4662	14.1549
39	1500	0.4	250	0.15	0.5	0.4724	1.5487	6.396	1.9444	10.1568
40	1500	0.4	250	0.15	1.0	0.5881	2.2921	11.6453	2.0585	11.4746
41	1500	0.4	350	0.15	0.5	0.5098	2.1482	10.068	1.6760	8.5618
42	1500	0.4	350	0.15	1.0	0.5881	1.8997	9.676	1.8347	10.0364
43	1500	0.4	150	0.18	0.5	0.5036	2.2421	10.336	2.8587	14.4377
44	1500	0.4	150	0.18	1.0	0.5343	2.4001	12.701	3.2465	17.6236
45	1500	0.4	250	0.18	0.5	0.5059	1.9204	8.624	2.3957	11.7555
46	1500	0.4	250	0.18	1.0	0.5167	2.4731	10.2166	2.7665	14.6162
47	1500	0.4	350	0.18	0.5	0.9470	2.9403	13.744	1.6216	7.5912
48	1500	0.4	350	0.18	1.0	0.8240	3.3159	17.852	2.0090	10.1996
49	2000	0.4	150	0.15	0.5	0.5378	2.2251	12.296	2.1874	11.6894
50	2000	0.4	150	0.15	1.0	0.5752	1.8839	10.616	2.4753	14.2126
51	2000	0.4	250	0.15	0.5	0.4712	2.1364	7.864	1.9465	10.1689
52	2000	0.4	250	0.15	1.0	0.5426	1.7082	9.268	2.1326	11.9310
53	2000	0.4	350	0.15	0.5	0.6321	2.3897	12.292	1.5251	7.7157
54	2000	0.4	350	0.15	1.0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
55	2000	0.4	150	0.18	0.5	0.4937	2.0345	10.076	2.8838	14.5771
56	2000	0.4	150	0.18	1.0	0.5290	2.4515	13.876	3.2608	17.7091
57	2000	0.4	250	0.18	0.5	0.8309	1.6758	7.196	1.9268	9.2459
58	2000	0.4	250	0.18	1.0	0.5271	2.0262	9.628	2.7426	14.4771
59	2000	0.4	350	0.18	0.5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
60	2000	0.4	350	0.18	1.0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

ประโยชน์ที่ได้จากการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะที่ตัดคือ คุณภาพผิวชิ้นงานที่ดีขึ้น
ช่วยให้อัตราการผลิตที่ดีขึ้นรวมถึงลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากการลดของเสียจากการบวกราคาตัด โดย
สมการการพยากรณ์ที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ประโยชน์และประยุกต์ใช้ในการตรวจติดตามและควบคุม
คุณภาพผิวชิ้นงาน เพื่อให้ได้กระบวนการตัดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น



บทที่ 9

การพัฒนาค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะกลึงที่มุมกายเศษโลหะต่างกัน

9.1 การตรวจติดตามด้วยอัตราส่วนแรงตัด

จากผลการทดลองเป็นที่สังเกตว่าแรงตัดมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะการตัด และแรงตัดนี้เองเป็นปัจจัยสำคัญต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน แรงตัดที่สนใจในงานวิจัยมี 2 ประเภทคือ แรงป้อนหรือแรงป้อนมีด (feed force) ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวโดยตรง ส่วนแรงตัดอีกประเภทคือ แรงตัดหลักซึ่งมีค่าแปรผันกับเงื่อนไขการตัด วัสดุชิ้นงานและปริมาณเศษโลหะหรือการสึกหรอของมีดตัด ด้วยเหตุนี้การประมาณค่าความขรุขระผิวจากแรงนั้นต้องทำการพิจารณาโดยตัดลอคอิทธิพลจากตัวแปรที่มีผลต่อแรงตัดจากสภาวะการตัดออกไป

นอกจากนี้ยังพบว่ามุมกายเศษของมีดตัดเป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่มีผล ต่อแรงตัดและผิวชิ้นงาน โดยตรงดังนั้นการพัฒนาค่าความขรุขระผิว จึงได้นำมุมกายเศษมาพิจารณาร่วมด้วย เพื่อให้สามารถประมาณค่าความขรุขระผิวได้แม่นยำมากขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะกำหนดสัญลักษณ์แรงป้อนด้วยสัญลักษณ์ F_y ส่วนแรงตัดหลักนั้นจะใช้สัญลักษณ์แทนคือ F_z ส่วนอัตราส่วนแรงตัดที่สนใจนั้นจะแสดงอยู่ในรูปของ $\left(\frac{F_y}{F_z}\right)$ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญหนึ่งซึ่งใช้ประมาณค่าความขรุขระผิวขณะตัดชิ้นงาน โดยคาดว่าอัตราส่วนแรงตัดนี้จะสามารถใช้พยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงานที่กำลังตัดได้แม้ว่าค่าสภาวะการตัดจะแปรเปลี่ยนไปก็ตาม

9.2 สมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัด

จากทฤษฎีพบว่าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานแสดงความสัมพันธ์ต่ออัตราป้อนและรัศมีงูมมีดในลักษณะของฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลมาใช้ในการพัฒนาสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัด โดยจัดให้ภายในสมการประกอบด้วยค่าอัตราส่วนแรงตัดและพารามิเตอร์อื่น ๆ จากเงื่อนไขการตัดที่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมุมกายเศษโลหะของมีดตัด โดยสามารถจัดรูปแบบของสมการออกมาได้ดังนี้

$$R_a = C_1 \cdot V^{a_1} \cdot f^{a_2} \cdot R_n^{a_3} \cdot D^{a_4} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{a_5} \cdot e^{a_6 \gamma} \quad (9.1)$$

$$R_z = C_2 \cdot V^{a_7} \cdot f^{a_8} \cdot R_n^{a_9} \cdot D^{a_{10}} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{a_{11}} \cdot e^{a_{12} \gamma} \quad (9.2)$$

โดยกำหนดให้ R_a คือ ความขรุขระเฉลี่ยของผิวชิ้นงานตัด ส่วน R_z คือ ความขรุขระผิวสูงสุดของผิวชิ้นงานตัด V คือ ความเร็วตัด f คือ อัตราป้อน R_n คือ ค่ารัศมีมุมกมิตัด D คือ ความลึกตัด $\left(\frac{F_y}{F_z}\right)$ คือ อัตราส่วนแรงตัด และ γ คือ มุมคาย เทมค่า $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, C_1$ และ C_2 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยพหุคูณ

สมการทั้งสองสมการข้างต้น (9.1) และ (9.2) ยังไม่เป็นสมการที่อยู่ในรูปแบบของสมการเส้นตรงจึงต้องทำการจัดรูปแบบของสมการให้เป็นแบบเส้นตรงพหุคูณโดยใช้ลอการิทึมมาใช้ในการแปลงรูปสมการได้ดังนี้

$$\ln R_a = \ln C_1 + a_1 \ln V + a_2 \ln f + a_3 \ln R_n + a_4 \ln D + a_5 \ln \left(\frac{F_y}{F_z} \right) + a_6 \gamma \quad (9.3)$$

$$\ln R_z = \ln C_2 + a_7 \ln V + a_8 \ln f + a_9 \ln R_n + a_{10} \ln D + a_{11} \ln \left(\frac{F_y}{F_z} \right) + a_{12} \gamma \quad (9.4)$$

จากการวิเคราะห์ด้วยการถดถอยพหุคูณ สมการข้างต้นสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการถดถอยพหุคูณได้ดังนี้

$$\hat{y}_1 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 \quad (9.5)$$

$$\hat{y}_2 = \beta_7 + \beta_8 x_1 + \beta_9 x_2 + \beta_{10} x_3 + \beta_{11} x_4 + \beta_{12} x_5 + \beta_{13} x_6 \quad (9.6)$$

โดยตัวแปร $\hat{y}_1$ และ $\hat{y}_2$ เป็นตัวแทนของค่า $\ln R_a$ และ $\ln R_z$ ส่วนตัวแปร x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 และ x_6 เป็นตัวแปรของการแปลงรูปลอการิทึม $\ln V, \ln f, \ln R_n, \ln D$ โดย β_0 และ β_7 เป็นค่าตัดแกน y แสดงค่า $\hat{y}_1$ และ $\hat{y}_2$ เมื่อตัวแปรในสมการถดถอยทั้งหมดมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนค่า $\beta_1, \beta_2, \beta_{10}, \beta_{11}$

$\beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8, \beta_9,$ และ β_{12} เป็นสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยพหุคูณ

ในขั้นสุดท้ายได้ทำการคำนวณขอบเขตการพยากรณ์ (Prediction Interval, PI) โดยตั้งระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เพื่อสร้างขอบเขตความเป็นไปได้ที่ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากการใช้งานจริงจะตกอยู่ในช่วงขอบเขตนั้น

9.3 ขั้นตอนการทดลองและเงื่อนไขการตัด

การจะตั้งสมการถดถอยที่ (9.5) และ (9.6) ได้นั้น จำเป็นต้องทำการทดลองและเก็บผลการตัดก่อน งานวิจัยในบทนี้ได้ทำการทดลองกับเครื่องกลึงซีเอ็นซี การทดลองนี้จะอยู่ภายใต้สถานการณ์ตัดแบบแห้ง โดยใช้มีดตัด 4 ชนิดเพื่อสร้างสมการต้นแบบจากมุมคายเศษที่ต่างกัน คือ มีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว TPMR 160304 HQ, TPMR 160308 HQ, TNMG 160404 HQ และ TNMG 160408 HQ โดยเคลือบผิวเกรด CVD ประกอบด้วย 3 ชั้นหลัก คือ TiN, α -Al₂O₃, TiCN เป็นเม็ดมีดตัดทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า มีมุมคายเศษโลหะเป็นบวกขนาด 11 องศา ซึ่งคุณสมบัติของมีดตัดแบบนี้ คือ แรงตัดจะน้อยเนื่องจากเศษโลหะสามารถไหลออกได้ดี จึงทำให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบสูง มีดตัดมุมคายบวกทั้งสองแตกต่างกันที่เม็ดมีดตัด TPMR 160304 HQ และ TPMR 160308 HQ จะมีขนาดรัศมีงูมูกมีดตัด คือ 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนมีดตัดลบมีมุมคาย -6 องศา และทั้งสอง TNMG 160404 HQ และ TNMG 160408 HQ จะมีขนาดรัศมีงูมูกมีดตัด คือ 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีดตัดลบทั้งสองชนิดนี้ จะมีคุณสมบัติคือ ใช้แรงตัดมากกว่าแบบบวกซึ่งจะทำให้ผิวงานมีความหยาบเหมาะสำหรับการตัดที่รวดเร็วและไม่ต้องการความละเอียดของผิวชิ้นงาน ในการทดลองมีการใช้มีดตัดแบบใหม่และค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 9.1 โดยได้ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เข้าที่ป้อนมีดกลึงซีเอ็นซีเพื่อวัดแรงตัด

ขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ยึดจับด้วยเครื่องกลึง ยันศูนย์กลางชิ้นงาน แล้วทำการปอกผิวนอก 1 มิลลิเมตร (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานลดลง 2 มิลลิเมตร) เพื่อให้ขนาดของชิ้นงานเท่ากัน
2. เมื่อขึ้นชิ้นงานเรียบร้อยแล้วจึงทำการเขียนโปรแกรมลงบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อตัดชิ้นงานให้ได้ปริมาตรตามที่ต้องการ
3. ทำการกลึงปอกผิวด้วยเงื่อนไขการตัดที่จะทำการทดลอง
4. วัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ปริมาตรเริ่มต้น (0 ลูกบาศก์เซนติเมตร) และ ทุก ๆ การตัดที่ปริมาตร 500, 1000, 1500, 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร
5. เมื่อกลึงชิ้นงานจนถึงปริมาตร 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตรหรือมีดตัดสึกหรองจนไม่สามารถใช้งานได้ก็จะทำการเปลี่ยนมีดตัดและทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดต่อไป
6. เขียนกราฟระหว่างปริมาตรการตัดกับผลตอบต่าง ๆ คือ ความสึกหรอของมีดตัด ความขรุขระผิวชิ้นงาน แรงในการตัด ที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ
7. จากกราฟที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรว่ามีผลต่อความขรุขระ ผิวชิ้นงานหรือไม่ เพื่อพิจารณาเลือกเป็นตัวแปรสำหรับใช้ในสมการวิธีวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

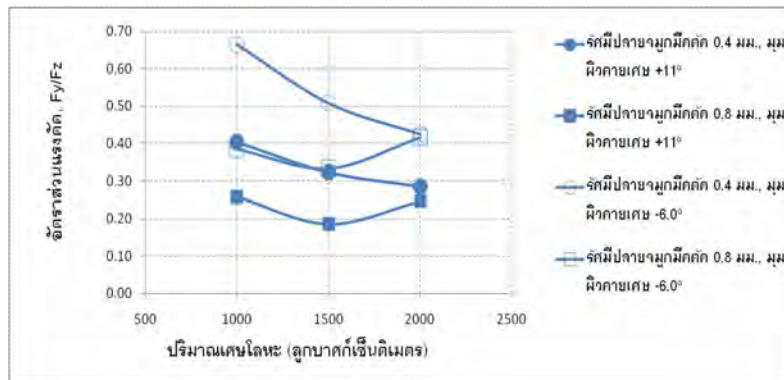
8. สร้างรูปแบบสมการการพยากรณ์ด้วยวิธีวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression) เพื่อใช้เป็นสมการต้นแบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน
9. เมื่อได้สมการต้นแบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน ทำการหาค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจากสมการ โดยการใส่ค่าของเงื่อนไขการตัดเข้าไป
10. นำค่าที่ได้จากสมการต้นแบบการพยากรณ์ความขรุขระผิวมาเปรียบเทียบกับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลอง
11. ส่วนต่างของค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการต้นแบบการพยากรณ์กับค่าที่ได้จากการทดลอง จะนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของสมการการพยากรณ์
12. สรุปผลเกี่ยวกับความสามารถของสมการต้นแบบการพยากรณ์และแนวทางปรับปรุง

ตารางที่ 9.1 ตารางแสดงเงื่อนไขตัดในการทดลองเพิ่มเติม

ชนิดของมีดตัด	คาร์ไบด์เคลือบผิว TNMG 160404 HQ, TNMG 160408 HQ
รัศมีงูมมีดตัด (มิลลิเมตร)	0.4, 0.8
อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)	0.15, 0.18
ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	150, 250
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.25, 0.5
ปริมาณเศษโลหะ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	0, 500, 1000, 2000

9.4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

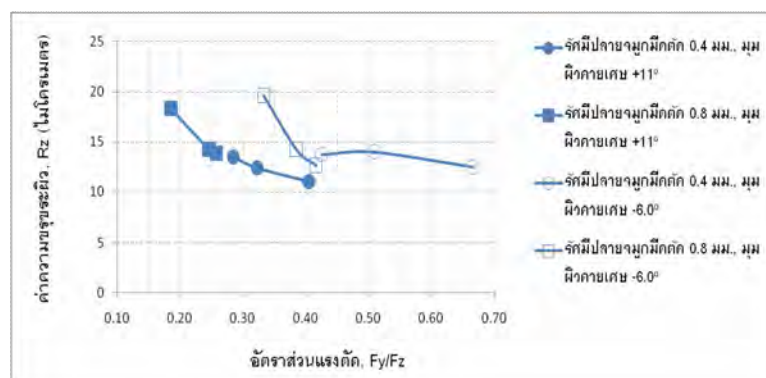
ในการพัฒนาเครื่องกลึงซีเอ็นซีให้ทำงานได้อย่างเครื่องจักรกลอัจฉริยะจำเป็นต้องมีการตรวจสอบและพัฒนาหาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับเงื่อนไขการตัดซึ่งความสัมพันธ์นี้เราจะได้ผลมาจากการทดลอง รูปที่ 9.1 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณเศษโลหะที่เพิ่มขึ้นกับอัตราส่วนแรงตัดที่ลดลง จากรูปแสดงว่า แรงตัดหลักมีค่าสูงขึ้นมากกว่าแรงป้อนขณะที่ปริมาณเศษโลหะหรือความลึกหรือของเครื่องมือตัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 9.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงตัด และปริมาณเศษโลหะ ที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงูมกมิตัด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร และความลึกตัด 0.25 มิลลิเมตร

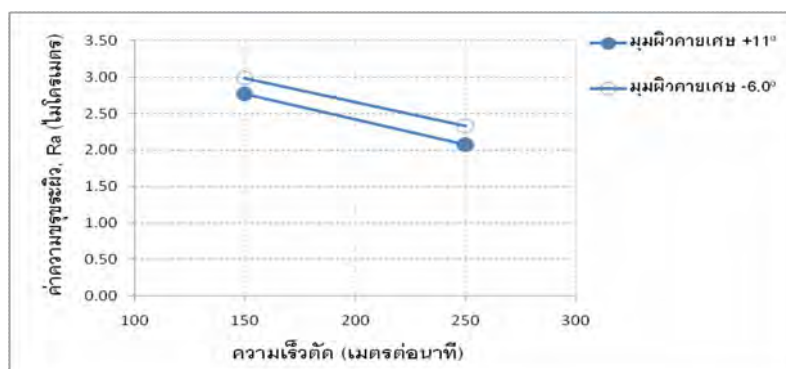
จากผลการทดลอง อัตราส่วนแรงตัดของผลการทดลองที่ใช้เครื่องมือตัดที่มีรัศมีงูมกมิตัดเท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร จะมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนแรงตัดที่ใช้กับเครื่องมือตัดรัศมีงูมกมิตัด 0.8 มิลลิเมตร ทั้งนี้เป็นเพราะว่าแรงป้อนมีขนาดมากกว่าแรงตัดหลักเมื่อรัศมีงูมกมิตัดมีขนาดเล็กลง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่ารัศมีงูมกมิตัดที่ใหญ่จะให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ดีกว่า

อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 9.1 จะเห็นว่าอัตราส่วนแรงตัดของมิตัดที่มีรัศมีงูมกมิตัด 0.8 มิลลิเมตรจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อตัดเหล็กไปเป็นปริมาณ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาณ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้งนี้เป็นเพราะรัศมีงูมกมิตัดมีค่าสูงขึ้นจากการสึกหรอทำให้ความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าที่ดีขึ้น เมื่อพิจารณาอัตราส่วนแรงตัดของมิตัดที่มีรัศมีงูมกมิตัด 0.4 มิลลิเมตร ในรูปที่ 9.2 จะพบว่าค่าอัตราส่วนของแรงตัดลดลงเมื่อปริมาณเศษโลหะเพิ่มขึ้นเนื่องจากมิตัดเกิดการสึกหรอ จึงทำให้แรงตัดหลักมีขนาดมากกว่าแรงป้อน จึงส่งผลให้ความขรุขระผิวชิ้นงานมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของแรงตัดมีค่าน้อยลงซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 9.2



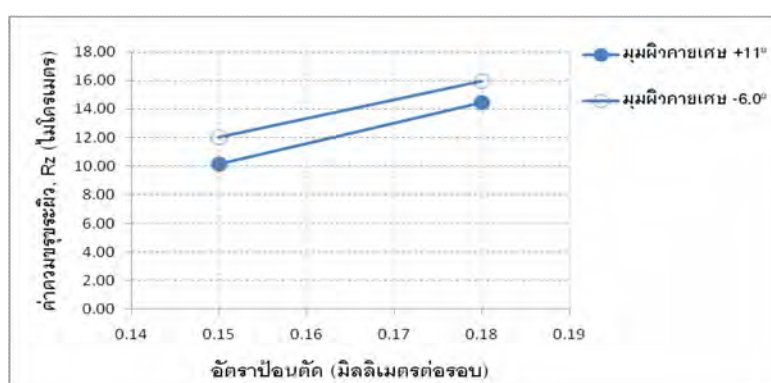
รูปที่ 9.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความค่าความขรุขระผิวสูงสุด, Rz และอัตราส่วนแรงตัด ที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงูมกมิตัด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร และความลึกตัด 0.25 มิลลิเมตร

ในรูปที่ 9.2 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนแรงตัดมีผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน ซึ่งจุดนี้สามารถนำมาใช้อ้างอิงเพื่อทำการประมาณค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานขณะตัดได้ สังเกตได้ว่ายิ่งค่าอัตราส่วนแรงตัดสูงขึ้น ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุดจะมีค่าน้อยลง นั่นแสดงว่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นขณะที่ปริมาณเศษโลหะและมิดดัดสึกหรอมากขึ้น



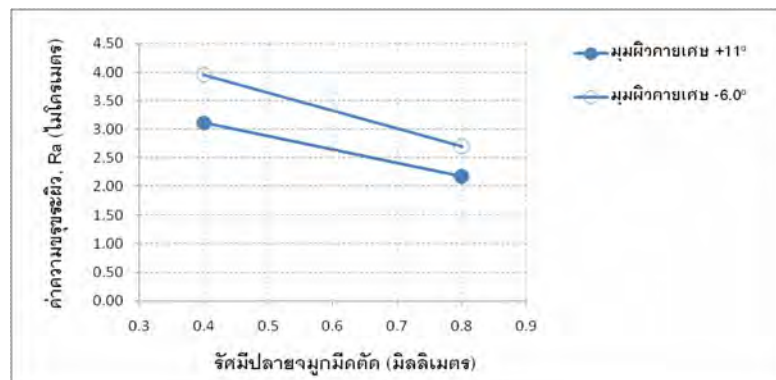
รูปที่ 9.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิว, Ra และความเร็วตัด ที่อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงมูกมิดดัด 0.4 มิลลิเมตร ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ปริมาณเศษโลหะ 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปที่ 9.3 ได้แสดงอิทธิพลของความเร็วตัดเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ความขรุขระผิวชิ้นงานจะลดลงเนื่องจากความเร็วตัดที่สูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิในการตัดสูงขึ้นด้วย อุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะทำให้วัสดุอ่อนนุ่มขึ้นและตัดได้ง่ายขึ้น ด้วยเหตุนี้เองพื้นผิวสำเร็จจึงออกมาเรียบมากขึ้นอัตราส่วนแรงตัดจึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วตัดสูงขึ้นจากวัสดุทำงานมีความอ่อนนุ่มขึ้น ในขณะเดียวกันผิวสำเร็จของชิ้นงานก็ดีขึ้นด้วยเมื่ออัตราส่วนแรงตัดลดลง



รูปที่ 9.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิว, Rz และอัตราป้อนตัด ที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที รัศมีปลายงมูกมิดดัด 0.4 มิลลิเมตร ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ปริมาณเศษโลหะ 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

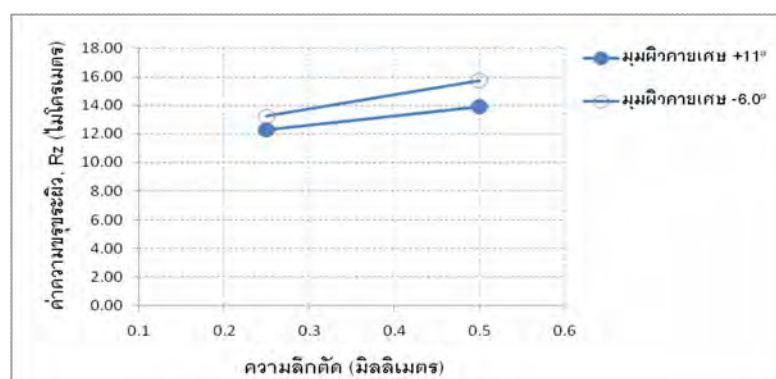
รูปที่ 9.4 แสดงค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นโดยแปรผันตามอัตราป้อนที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน สอดคล้องกับทฤษฎีความขรุขระผิวชิ้นงานที่ว่าอัตราการป้อนที่มากขึ้นจะทำให้เกิดรอยตัดจากการป้อนที่ผิวของชิ้นงานสูงขึ้น ทำให้ความขรุขระผิวแย่ลง อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ค่าความขรุขระผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราป้อนคือ อัตราป้อนที่เร็วขึ้นจะทำให้เกิดแรงตัดที่สูงขึ้น แรงตัดนี้เองเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสั่นของมีดตัดทำให้ผิวชิ้นงานออกมาแย่ลงเช่นกัน



รูปที่ 9.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิว, Ra และรัศมีงูมูกมีดตัด ที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ปริมาณเศษโลหะ 2000 ลูกบาศก์ เซนติเมตร

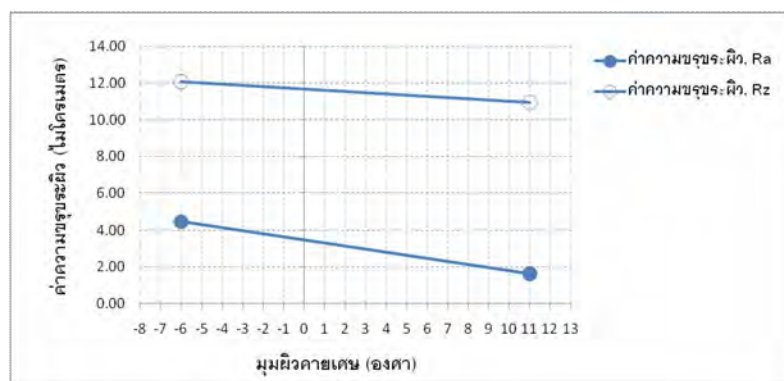
ส่วนรูปที่ 9.5 แสดงค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดที่เพิ่มขึ้นจากการทดลองที่ตอบสนองต่อค่ารัศมีงูมูกมีดที่เพิ่มขึ้น โดยสอดคล้องกับทฤษฎีความขรุขระผิวชิ้นงานที่ว่ารัศมีงูมูกมีดช่วยลดรอยบนผิวชิ้นงานจากการป้อนมีดตัด ทำให้ความขรุขระผิวลดลง อีกเหตุผลหนึ่งคือพื้นที่สัมผัสของรัศมีงูมูกมีดกับชิ้นงาน ช่วยลดความร้อนที่เกิดบริเวณขอบมีดตัดทำให้การสึกหรอของชิ้นงานเกิดช้าลง

อีกปัจจัยหนึ่งมีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานคือความลึกตัดดังรูปที่ 9.6 เห็นได้ว่าชิ้นงานจะมีความขรุขระผิวชิ้นงานที่ดีเมื่อใช้ค่าความลึกตัดเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร เพราะความลึกตัดที่มากขึ้นจะทำให้เกิดแรงตัดที่สูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามมาเป็นที่ทราบกันดีว่าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสามารถปรับให้ดีขึ้นได้โดยการลดค่าความลึกตัด



รูปที่ 9.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิว, R_z และความลึกตัด ที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อ นาที อัตราป้อนตัด 0.18 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงูมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร ปริมาณเศษโลหะ 2000 ลูกบาศก์ เซนติเมตร

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย มีแนวโน้มที่จะลดลงในขณะที่มุมตัดมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 9.7 เนื่องมาจากการลดลงของมุมตัดทำให้เศษกลึงระบายออกได้ง่ายขึ้น และช่วยลดการสึกหรอของใบมีดตัด ได้มากกว่า ใบมีดที่มีมุมตัดขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้ได้รับค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ดี



รูปที่ 9.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวเฉลี่ยและมุมตัด ที่มุมตัด -6, 11 ความเร็วตัด 250 เมตรต่อ นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีงูมูกมีดตัด 0.8 มิลลิเมตร ปริมาณเศษโลหะ 2000 ลูกบาศก์ เซนติเมตร

จากรูปที่ 9.1 ถึงรูปที่ 9.7 สามารถสรุปได้ว่าค่าความขรุขระผิวจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนต่ออัตราป้อน และความลึกตัด ในทางตรงกันข้ามค่าความขรุขระผิวจะมีค่าลดลงเป็นสัดส่วนต่อค่าความเร็วตัด ค่ารัศมีงูมูกมีด อัตราส่วนแรงตัด และมุมตัด

9.5 สมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน

จากการทดลองสามารถสร้างสมการความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) ได้ดังนี้

$$\hat{y}_1 = 3.98 - 0.122x_1 + 1.60x_2 - 0.519x_3 + 0.108x_4 - 0.296x_5 - 0.0187x_6 \quad (9.7)$$

$$\hat{y}_2 = 6.63 - 0.263x_1 + 1.59x_2 - 0.205x_3 + 0.163x_4 - 0.18x_5 - 0.00998x_6 \quad (9.8)$$

สมการที่ (9.7) และ (9.8) เป็นสมการที่ได้มาจากการแปลงรูปลอกการพิมพ์ต่อตัวแปรแต่ละตัว จากรูปสมการเอ็กโปเนนเชียลเดิมดังสมการที่ (9.9) และ (9.10)

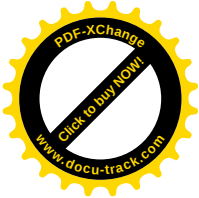
$$\hat{R}_a = 53.52 \cdot v^{-0.122} \cdot f^{1.60} \cdot R_n^{-0.519} \cdot D^{0.108} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z} \right)^{-0.296} \cdot e^{-0.0187\gamma} \quad (9.9)$$

$$\hat{R}_z = 757.48 \cdot v^{-0.263} \cdot f^{1.59} \cdot R_n^{-0.205} \cdot D^{0.163} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z} \right)^{-0.18} \cdot e^{-0.00998\gamma} \quad (9.10)$$

สมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดนี้ให้ค่าพยากรณ์ที่มีค่านัยสำคัญอย่างสูง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p-value = 0.000) ดังนั้นสมการนี้จึงสามารถใช้พยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้ เป็นอย่างดี โดยค่าสัมประสิทธิ์นั้นแสดงถึงค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่แปรผันต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าตัวแปรนั้น ๆ ซึ่งอาจจะเพิ่มหรือลดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานแล้วแต่สัญลักษณ์ที่เป็นบวกหรือลบ หน้าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร

ตารางที่ 9.2 ตารางเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวชิ้นงานระหว่างผลการการวัดและค่าที่ได้จากสมการพยากรณ์ วิธีการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) ของมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว TNMG 160408 HQ

Experiment no.	Chip Volume	Rn	V	f	D	γ	Force ratio Fy/Fz	Measured R (μm)		Predicted R (μm)	
	cm ³	mm	m/min	mm/rev	mm	degree	-	Ra	Rz	Ra	Rz
1	0	0.8	150	0.15	0.25	-6	0.4001	1.7255	7.5384	1.979	10.385
2	0	0.8	150	0.15	0.25	-6	0.3670	1.9226	9.8672	2.031	10.547
3	0	0.8	150	0.15	0.25	-6	0.3271	2.1996	11.0976	2.101	10.768
4	0	0.8	150	0.15	0.25	-6	0.3527	2.3189	13.8200	2.055	10.623
5	0	0.8	150	0.18	0.5	-6	0.4554	1.9406	9.6592	2.748	15.179
6	500	0.8	150	0.18	0.5	-6	0.4678	2.1011	10.0904	2.727	15.105
7	500	0.8	150	0.18	0.5	-6	0.4553	2.3651	13.4016	2.749	15.179
8	500	0.8	150	0.18	0.5	-6	0.4671	3.0915	13.2288	2.728	15.110
9	500	0.8	250	0.15	0.5	-6	0.5110	1.2952	5.9384	1.864	9.727
10	1000	0.8	250	0.15	0.5	-6	0.5095	2.0466	8.3336	1.866	9.732
11	1000	0.8	250	0.15	0.5	-6	0.4810	2.5242	10.2392	1.898	9.834
12	1000	0.8	250	0.15	0.5	-6	0.4775	2.5542	10.9976	1.902	9.847
13	1000	0.8	250	0.18	0.25	-6	0.3734	1.9252	7.6672	2.541	12.284
14	1000	0.8	250	0.18	0.25	-6	0.3333	3.1143	12.1504	2.628	12.538

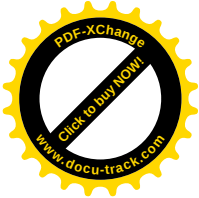


ตารางที่ 9.3 ตารางเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวชิ้นงานระหว่างผลการการวัดและค่าที่ได้จากสมการ
พยากรณ์ วิธีการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) ของมิดคัตคาร์ไบด์เคลือบผิว TNMG 160404 HQ

Experi ment no.	Chip Volume	Rn	V	f	D	γ	Force ratio Fy/Fz	Measured R (μm)		Predicted R (μm)	
	cm ³	mm	m/min	mm/rev	mm	degree	-	Ra	Rz	Ra	Rz
1	0	0.4	150	0.15	0.25	-6	0.4191	2.2768	9.7856	2.7977	11.8704
2	0	0.4	150	0.15	0.25	-6	0.4168	2.8965	11.6976	2.8023	11.8824
3	0	0.4	150	0.15	0.25	-6	0.4203	2.4498	11.6112	2.7953	11.8644
4	0	0.4	150	0.15	0.25	-6	0.4278	3.4699	13.8848	2.7808	11.8267
5	0	0.4	150	0.18	0.5	-6	0.5098	3.5404	14.8024	3.8091	17.1444
6	500	0.4	150	0.18	0.5	-6	0.5409	3.8867	19.2512	3.7430	16.9630
7	500	0.4	150	0.18	0.5	-6	0.5392	4.0336	20.4376	3.7465	16.9726
8	500	0.4	150	0.18	0.5	-6	0.5333	4.3425	20.0016	3.7588	17.0063
9	500	0.4	150	0.18	0.5	-6	0.6617	4.5231	15.6200	3.5261	16.3582
10	1000	0.4	250	0.15	0.5	-6	0.5111	2.4335	10.5928	2.6714	11.2120
11	1000	0.4	250	0.15	0.5	-6	0.5458	2.2261	9.5072	2.6200	11.0802
12	1000	0.4	250	0.15	0.5	-6	0.5635	2.3008	12.0032	2.5953	11.0166
13	1000	0.4	250	0.15	0.5	-6	0.8966	2.8031	12.8760	2.2620	10.1332
14	1000	0.4	250	0.15	0.5	-6	0.5313	2.3442	9.7704	2.6410	11.1341
15	1500	0.4	250	0.18	0.25	-6	0.3675	2.9360	11.1208	3.6587	14.2004
16	2000	0.4	250	0.18	0.25	-6	0.4044	3.5438	12.9160	3.5565	13.9578
17	2000	0.4	250	0.18	0.25	-6	0.4251	3.4376	13.4784	3.5043	13.8328
18	2000	0.4	250	0.18	0.25	-6	0.5078	3.4910	12.6008	3.3248	13.3975
19	2000	0.4	250	0.18	0.25	-6	0.6638	3.9812	15.6632	3.0712	12.7666

ตารางที่ 9.4 ตารางเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวชิ้นงานระหว่างผลการการวัดและค่าที่ได้จากสมการ
พยากรณ์ วิธีการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) ของมิดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว TPMR 160304 HQ

Experi ment no.	Chip Volume	Rn	V	f	D	γ	Force ratio Fy/Fz	Measured R (μm)		Predicted R (μm)	
	cm ³	mm	m/min	mm/rev	mm	degree	-	Ra	Rz	Ra	Rz
1	0	0.4	250	0.18	0.25	11	0.3684	2.4528	11.212	2.660	11.979
2	0	0.4	150	0.15	0.5	11	0.4686	2.2175	10.2184	2.123	10.993
3	0	0.4	250	0.15	0.5	11	0.6563	1.3752	8.8792	1.805	9.046
4	0	0.4	150	0.18	0.5	11	0.7222	2.3746	11.6864	2.500	13.590
5	0	0.4	250	0.18	0.5	11	0.6927	2.727	12.2112	2.378	11.971
6	500	0.4	150	0.15	0.5	11	0.4671	2.3295	13.4368	2.125	11.000
7	500	0.4	250	0.15	0.5	11	0.5027	1.3529	8.236	1.953	9.491
8	500	0.4	150	0.18	0.5	11	0.4241	2.2963	11.5584	2.927	14.957
9	500	0.4	250	0.18	0.5	11	0.4956	2.5011	12.5776	2.626	12.715
10	1000	0.4	250	0.18	0.25	11	0.4048	2.4823	11.008	2.587	11.778
11	1000	0.4	150	0.15	0.5	11	0.4511	1.9303	10.5824	2.147	11.069
12	1000	0.4	250	0.15	0.5	11	0.5365	1.9267	8.0352	1.916	9.380
13	1000	0.4	150	0.18	0.5	11	0.4439	2.4941	11.2568	2.888	14.834
14	1000	0.4	250	0.18	0.5	11	0.5092	2.5789	11.412	2.605	12.653
15	1500	0.4	250	0.18	0.25	11	0.3228	2.5565	12.3872	2.767	12.267
16	2000	0.4	250	0.18	0.25	11	0.2846	2.7734	13.4776	2.872	12.549
17	2000	0.4	150	0.15	0.5	11	0.4759	2.8036	17.1008	2.113	10.963
18	2000	0.4	250	0.15	0.5	11	0.5588	2.0715	10.4944	1.893	9.312
19	2000	0.4	150	0.18	0.5	11	0.4526	3.3533	17.6	2.871	14.782
20	2000	0.4	250	0.18	0.5	11	0.4973	3.0665	14.5864	2.624	12.707



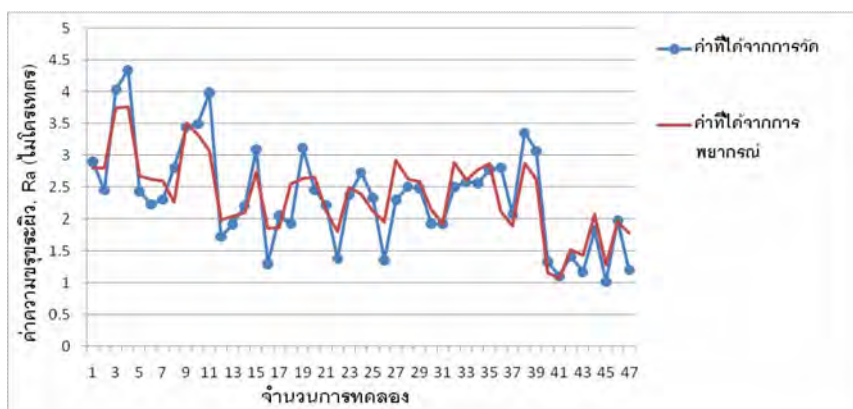
ตารางที่ 9.5 ตารางเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวชิ้นงานระหว่างผลการการวัดและค่าที่ได้จากสมการ

พยากรณ์ วิธีการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) ของมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว TPMR 160308 HQ

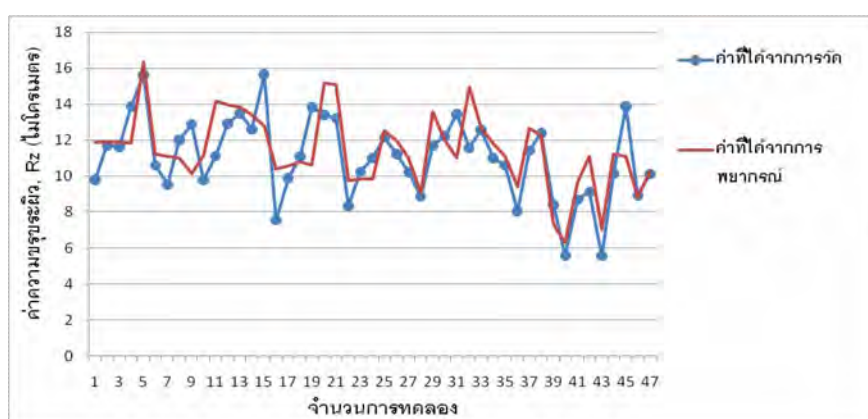
Experi ment no.	Chip Volume	Rn	V	f	D	γ	Force ratio Fy/Fz	Measured R (μ m)		Predicted R (μ m)	
	cm ³	mm	m/min	mm/rev	mm	degree	-	Ra	Rz	Ra	Rz
1	0	0.8	150	0.15	0.15	11	0.6923	1.3312	8.4	1.159	7.306
2	0	0.8	250	0.15	0.15	11	0.7174	1.1054	5.6064	1.077	6.347
3	0	0.8	150	0.18	0.15	11	0.7353	1.4182	8.68	1.524	9.658
4	0	0.8	250	0.18	0.15	11	0.74	1.1701	5.4824	1.429	8.434
5	0	0.8	250	0.18	0.25	11	0.2556	1.8269	9.1104	2.069	11.099
6	500	0.8	150	0.15	0.15	11	0.3483	2.6385	9.764	1.420	8.268
7	500	0.8	250	0.15	0.15	11	0.401	1.017	5.5808	1.280	7.047
8	500	0.8	150	0.18	0.15	11	0.318	1.9778	10.14	1.953	11.230
9	500	0.8	250	0.18	0.15	11	0.3505	1.2012	7.436	1.783	9.648
10	1000	0.8	250	0.18	0.25	11	0.2581	2.4025	13.8784	2.063	11.080
11	1000	0.8	150	0.15	0.15	11	0.2393	1.3362	8.9088	1.587	8.846
12	1000	0.8	250	0.15	0.15	11	0.2783	2.3113	11.8984	1.426	7.526
13	1000	0.8	150	0.18	0.15	11	0.2394	1.3506	7.2736	2.124	11.819
14	1000	0.8	250	0.18	0.15	11	0.25	2.2673	10.1144	1.971	10.253
15	1500	0.8	250	0.18	0.25	11	0.1852	2.9865	18.304	2.276	11.762
16	2000	0.8	150	0.15	0.15	11	0.3614	2.5872	14.924	1.405	8.213
17	2000	0.8	250	0.15	0.15	11	0.4	1.6357	10.9608	1.281	7.050
18	2000	0.8	150	0.18	0.15	11	0.3316	2.0861	14.5016	1.929	11.146
19	2000	0.8	250	0.18	0.15	11	0.3622	2.0341	13.4992	1.766	9.591
20	2000	0.8	250	0.18	0.25	11	0.2462	2.4028	14.232	2.092	11.174

9.6 ความแม่นยำของสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน

การทดสอบสมการการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากการตัด เพื่อทดสอบว่าสมการการพยากรณ์ที่น่าเสนอมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือหรือไม่ โดยการทดลองได้นำเอาผลการวัดค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย และความขรุขระผิวสูงสุด เปรียบเทียบกับค่าพยากรณ์ที่ได้จากสมการ โดยใช้เงื่อนไขการทดลองใหม่ในตารางที่ 9.1



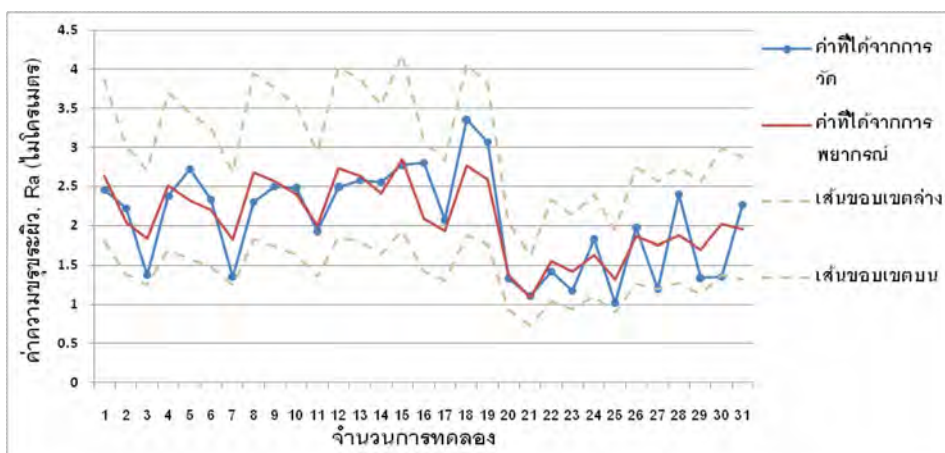
(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย



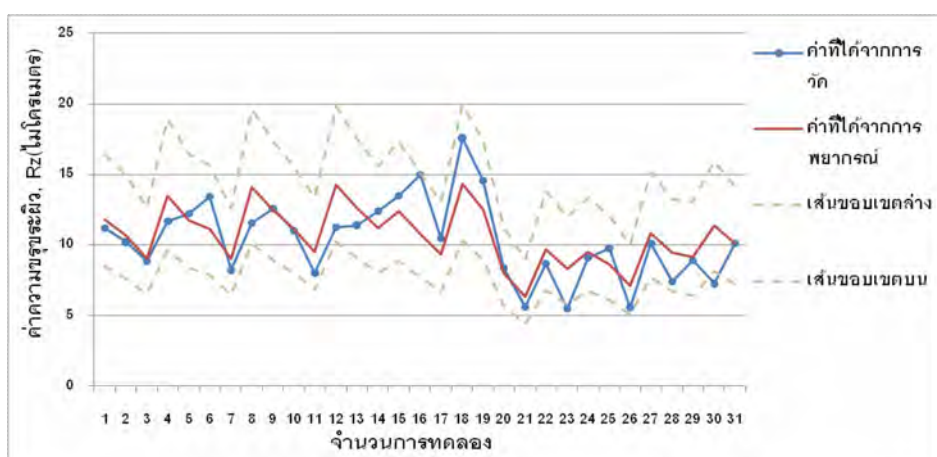
(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

รูปที่ 9.8 ผลการเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากการวัดจริงและจากการพยากรณ์

จากรูปที่ 9.8 พบว่า การพยากรณ์ด้วยสมการที่น่าเสนอมีความแม่นยำ ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวสูงสุด อยู่ที่ 88.01 และ 87.33 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากความแม่นยำดังกล่าวสรุปได้ว่าสมการที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้ในการช่วยพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในระหว่างการตัดได้ อย่างไรก็ตามที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์สามารถสร้างเส้นขอบเขตการพยากรณ์เพื่อตรวจสอบการกระจายของข้อมูลในแต่ละการทดลอง พบว่าค่าที่ได้จากการวัดยังอยู่ในเส้นขอบเขตดังกล่าว ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 9.9



(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย



(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

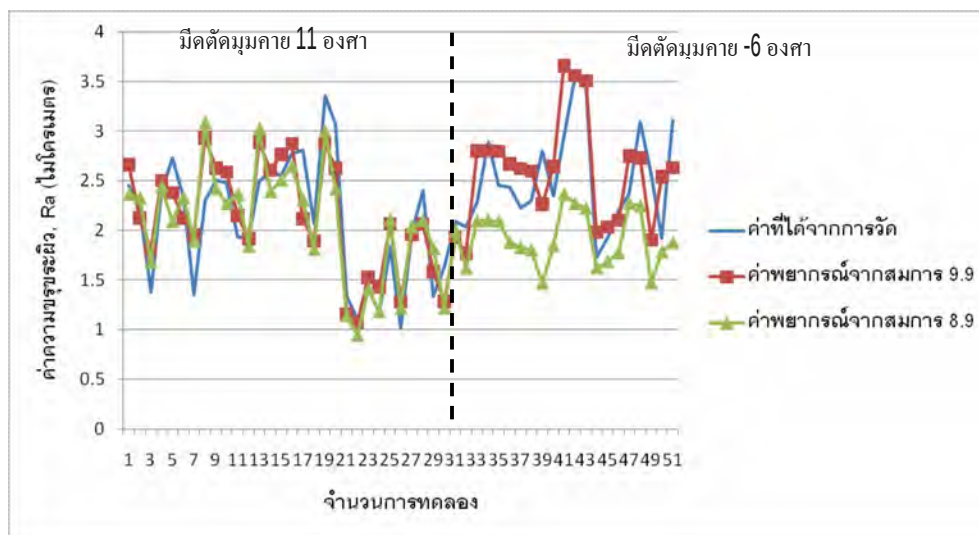
รูปที่ 9.9 การเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการวัดจริง ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการพยากรณ์
เส้นขอบเขตบน และเส้นขอบเขตล่าง

ในการนำสมการการพยากรณ์เพื่อไปใช้ในกระบวนการตัดจริง เส้นขอบเขตบนและเส้นขอบเขตล่างดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพผิวชิ้นงานได้ โดยอ้างอิงเส้นขอบเขตบนและเส้นขอบเขตล่างจากการพยากรณ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

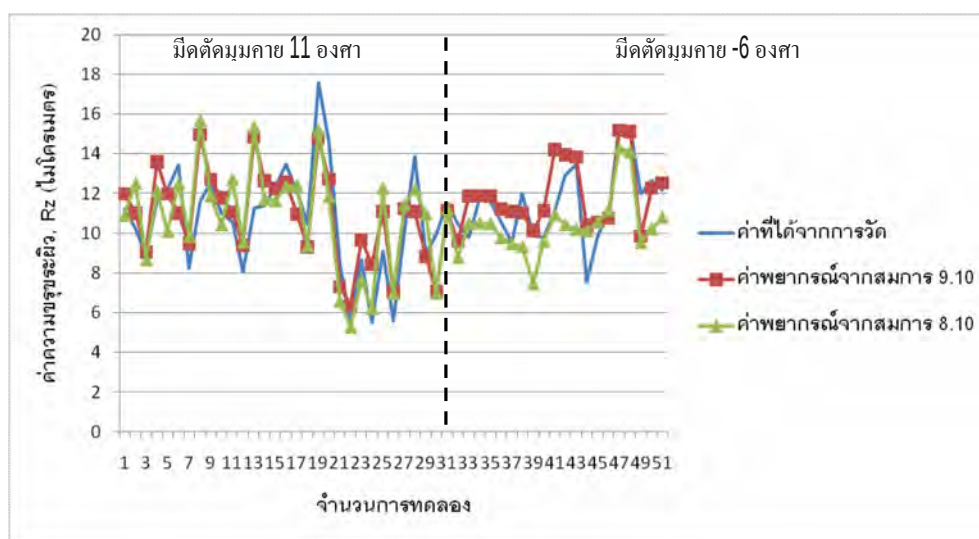
9.7 ผลเปรียบเทียบการพัฒนาความแม่นยำของสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน

ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบสมการการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน จากสมการที่ 8.9 และ 8.10 ที่ไม่ได้พิจารณาของผิวคลายเศษ ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวสูงสุดจากการตัดผิวชิ้นงานด้วยมิลดัด TPMR 160304 HQ, TPMR 160308 HQ, TNMG 160404 HQ และ TNMG 160408 HQ พบว่ามีความถูกต้องอยู่ที่ 83.04 และ 86.15 เปอร์เซนต์ตามลำดับ การพยากรณ์ด้วยสมการที่พัฒนาขึ้นด้วยการพิจารณาของผิวคลายเศษจากสมการที่ 9.9 และ 9.10 พบว่ามีความแม่นยำ ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวสูงสุด อยู่ที่ 88.01 และ 87.33

เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วการพิจารณาของผิวคลาเยสเข้ามามีส่วนช่วยให้การทำนายได้แม่นยำมากขึ้นในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวสูงสุด ดังได้สรุปไว้ในรูปที่ 9.10



(ก) ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย



(ข) ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

รูปที่ 9.10 การเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการพยากรณ์ ที่ไม่พิจารณาผิวคลาเยสและพิจารณาผิวคลาเยส

จากรูปที่ 9.10 ค่าการพยากรณ์เปรียบเทียบกันระหว่างสมการที่ไม่พิจารณาผิวคลาเยสในสมการที่ 8.9, 8.10 และสมการที่พิจารณาผิวคลาเยสร่วมในสมการที่ 9.9, 9.10 พบว่าการตัดด้วยมิตตัดที่มีมุมผิวคลาเยสที่มีค่ามุมเป็น 11 องศา มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ในขณะที่การตัดด้วยมิตตัดที่มีมุมผิวคลาเยส



เป็น -6 องศาแตกต่างกัน โดยการพยากรณ์การพิจารณาภูมิอากาศพิเศษในสมการที่ 9.9 และ 9.10 มีความถูกต้องเฉลี่ยที่มากกว่าการพยากรณ์การไม่พิจารณาภูมิอากาศพิเศษในสมการที่ 8.9 และ 8.10 ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าสมการพยากรณ์ขรุขระผิวชั้นงานโดยการพิจารณาภูมิอากาศพิเศษ ช่วยให้ความแม่นยำในการพยากรณ์ผิวชั้นงานจากมิติตัดที่มีภูมิอากาศพิเศษเป็นลบเพิ่มมากขึ้น

สมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชั้นงานในงานวิจัยถูกพัฒนาขึ้นจากข้อมูลที่ได้จากการตัดจริง ทำให้การพยากรณ์ความขรุขระผิวชั้นงานในขณะตัดมีความแม่นยำในการพยากรณ์ทั้งค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวสูงสุด ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้จริงไม่ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป

ประโยชน์ที่ได้จากการพยากรณ์ความขรุขระผิวชั้นงานในขณะตัดคือ คุณภาพผิวชั้นงานที่ดีขึ้น ช่วยให้อัตราการผลิตที่ดีขึ้นรวมไปถึงลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากการลดของเสียจากการบวกรัด โดยสมการการพยากรณ์ที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ประโยชน์และประยุกต์ใช้ในการตรวจติดตามและควบคุมคุณภาพผิวชั้นงาน เพื่อให้ได้กระบวนการตัดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น



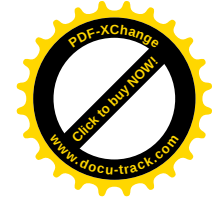
สรุปผลการวิจัย

จากข้อสมมติฐานแรงตัดที่สูงขึ้นในกระบวนการตัดส่งผลให้ผิวชิ้นงานตัดมีผิวชิ้นงานที่ด้อยคุณภาพ การตรวจติดตามในกระบวนการด้วยเซนเซอร์วัดแรงตัดทำให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าแรงตัดที่มีค่าสูงขึ้นส่งผลต่อคุณภาพผิวหรือมีความหมายอีกนัยว่าการตัดเป็นไปได้ยากจึงเกิดแรงตัดที่สูง

การทดลองตัดได้พยายามศึกษาถึงอิทธิพลของค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแรงตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด แรงตัดในกระบวนการ รวมไปถึงรูปทรงของมีดตัด

แรงตัดในกระบวนการทั้ง 3 แนวแกนได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์กับค่าความขรุขระผิวชิ้นงานตัด พบว่าแรงตัดสามารถใช้ในการตรวจติดตามความขรุขระผิวชิ้นงานได้แต่ยังคงเปลี่ยนแปลงต่อค่าพารามิเตอร์ในการตัดค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามจากการตรวจติดตามในกระบวนการพบว่าค่าอัตราส่วนแรงตัดระหว่างแรงป้อนตัดกับแรงตัดหลัก สามารถนำมาใช้ในการตรวจติดตามความขรุขระผิวของชิ้นงานตัด อีกทั้งยังช่วยลดผลการเปลี่ยนแปลงต่อค่าพารามิเตอร์ในการตัดได้ นอกจากนี้ยังพบว่ารัศมีปลายมีดตัดและมุมคายเศษของมีดตัดเป็นพารามิเตอร์ที่มีผล ต่อแรงตัดและผิวชิ้นงานโดยตรง การพัฒนาต้นแบบพยากรณ์ จึงได้นำรัศมีปลายมีดตัดและมุมคายเศษมาพิจารณาร่วมด้วย เพื่อให้สามารถประมาณค่าความขรุขระผิวได้แม่นยำมากขึ้น

ผลการทำนายค่าความขรุขระผิวในกระบวนการด้วยสมการต้นแบบที่พัฒนาขึ้นโดยพิจารณาความเร็วตัด อัตราป้อนตัด รัศมีปลายมีดตัด อัตราส่วนแรงตัดและมุมผิวคายเศษ มีความถูกต้องเฉลี่ยในการทำนายค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย, Ra และ ค่าความขรุขระผิวสูงสุด, Rz อยู่ที่ 86.65 เปอเซ็นต์และ 87.78 เปอเซ็นต์ตามลำดับ สมการการพยากรณ์ที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ประโยชน์และประยุกต์ใช้ในการตรวจติดตามและควบคุมคุณภาพผิวชิ้นงาน เพื่อให้ได้กระบวนการตัดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

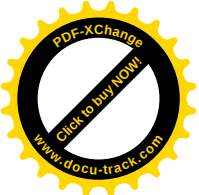


เอกสารอ้างอิง

- [1]. คู่มือเม็คมิดตัด KYOCERA
- [2]. Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid : Manufacturing Engineering and Technology, Fourth Edition Prentice Hall.
- [3]. ทวี เทศเจริญ : กรรมวิธีการผลิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4]. ชนรัตน์ เต๋อวัฒนา, มณฑล แสงประไพทิพย์ : กรรมวิธีการผลิต, ซีเอ็ด
- [5]. <http://www.carbidedepot.com/formulas-insert-shape.htm>
- [6]. ชลิตต์ มธุรสมนตรี และคณะ : กระบวนการผลิต (Manufacturing Processes), สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
- [7]. Technical Data Surface Roughness JIS B 0601 (1994) Excerpts from JIS B 0031 (1994).
- [8]. Mikel P. Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing, 2nd ed., USA: John Wiley&Sons, 2004.
- [9]. B. Fnides, H. Aouici, M. A. Yallese : Cutting forces and surface roughness in hard turning of hot work steel X38CrMoV5-1 using mixed ceramic, ISSN 1392 - 1207. *MECHANIKA*. 2008. Nr.2(70).
- [10]. Luke Huang, Joseph C. Chen : A Multiple Regression Model to Predict In-process Surface Roughness in Turning Operation Via Accelerometer, Journal of Industrial Technology, Volume 17, Number 2 - February 2001 to April 2001.
- [11]. E. Daniel Kirby, Zhe Zhang and Joseph C. Chen : Development of an Accelerometer-Based Surface Roughness Prediction System in Turning Operations Using Multiple Regression Techniques, Journal of Industrial Technology, Volume 20, Number 4 - September 2004 through December 2004.
- [12]. Tugrul O'zel*, Yigit Karpat : Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 467-479.
- [13]. Tugrul O'zel , Yigit Karpat , Lu'is Figueira , J. Paulo Davim : Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts, Journal of Materials Processing Technology 189 (2007) 192-198.
- [14]. Chang-Xue (Jack) Feng : An Experimental Study of the Impact of Turning Parameters on Surface Roughness, Paper No. 2036, Proceedings of the 2001 Industrial Engineering Research Conference.



- [15]. Chang-Xue (Jack) Feng และ Xian-Feng (David) Wang : Surface roughness predictive modeling: neural networks versus regression, IIE Transactions (2003) 35, 11-17.
- [16]. Somkiat T : Development of Intelligent Identification of Cutting States by Spectrum Analysis for CNC turning, Journal of Advanced Mechanical Design, System, and Manufacturing, Vol.2, No.3, 2008, 366-377.
- [17]. Moriwaki T, Somkiat T, and Shibasaka T : Development of intelligent monitoring and optimization of cutting process for CNC turning, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 9(5), June, 2006.
- [18]. Moriwaki T, Shibasaka T, and Somkiat T : Development of in-process tool wear monitoring system for CNC turning, International Journal of Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, 47(3), 2004; 933-938.
- [19]. Moriwaki T, Shibasaka T, and Somkiat T : Development of in-process chip-breaking detection system in turning, Memoirs of graduate school of science and technology, Kobe University, 2004; 22-A: 1-19.
- [20]. ปารเมศ ชูติมา: การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [21]. สมจิต วัฒนาศาญกุล: สถิติวิเคราะห์เบื้องต้น, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [22]. อนันต์ชัย เขื่อนธรรม: วิธีการทางสถิติและการวิเคราะห์ข้อมูล, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [23]. ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์: การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง, สำนักพิมพ์ท้อป
- [24]. Somkiat T : In-Process Investigation of Turning Process Applied with and without Cutting Fluid. Journal of Mechanical Engineering, Vol. 6, 2009. pp. 85-102.



ภาคผนวก
งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



MONITORING OF SURFACE ROUGHNESS IN CNC TURNING PROCESS

TANGJITSITCHAROEN, S[omkiat] & SENJUNTICHAJ, A[ngsumalin]

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 base on the experimentally obtain result by employing the exponential function with six factors of the cutting speed, the feed rate, the rank angle 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 accuracy of the in-process surface roughness model has been also presented to monitor and control the in-process predicted surface roughness. It is proved by the cutting tests that the propose 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.

Key words: turning, monitoring, prediction, surface roughness, cutting force ratio.

1. INTRODUCTION

Turning process is one of the most important processes which are widely used to produce the mechanical parts. However, the surface roughness cannot be measured while cutting at the same time as there are many factors affecting to the surface roughness of the machining parts. As the intelligent machines are expected to be realized in the future, the in-process monitoring and estimation of the surface roughness is hence proposed and developed in this research.

The effects of the cutting conditions are studied and investigated for the models (Cakir et al., 2009). The sensors and the methodologies have been developed to predict the surface roughness (Shiraishi, 1981). The feed force is most sensitive to the surface roughness while the main force is affected by the cutting conditions (Tlustý & Andrews, 1983). Hence, the main force and the feed force are adopted to estimate the surface roughness during the cutting.

The aim of this research is to propose a method of the in-process monitoring of cutting force ratio to estimate the in-process surface roughness. The in-process surface roughness model is developed under various cutting conditions by employing the exponential function with the aid of the multiple regression analysis and the use of the least square method.

2. IN-PROCESS PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS

2.1 In-Process Monitoring of Cutting Force

The method is proposed here to use the in-process monitoring to measure the in-process cutting forces during the process in order to predict the surface roughness under various cutting conditions.

The cutting forces are normalized and dimensionless by taking the the ratio of the corresponding time records of the feed force F_y to the main force F_z . The cutting force ratio $\left(\frac{F_y}{F_z}\right)$ is the important factor to estimate the in-process surface

roughness during the cutting (Ignatov et al, 2008). It is expected that the cutting force ratio can be used to predict the in-process surface roughness even though the cutting conditions are changed.

2.2 In-process surface roughness model

The exponential function is adopted here to develop the in-process surface roughness model. The relations of the arithmetic average surface roughness, the surface roughness, the cutting force ratio, and the cutting parameters are proposed here as:

$$R_a = C_1 \cdot V^{a_1} \cdot f^{a_2} \cdot R_n^{a_3} \cdot D^{a_4} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{a_5} \cdot e^{a_6 \gamma} \quad (1)$$

$$R_z = C_2 \cdot V^{a_7} \cdot f^{a_8} \cdot R_n^{a_9} \cdot D^{a_{10}} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{a_{11}} \cdot e^{a_{12} \gamma} \quad (2)$$

Where R_a is the arithmetic average surface roughness in μm , R_z is the surface roughness in μm , V is the cutting speed in m/min, f is the feed rate in mm/rev, R_n is the tool nose radius in mm, D is the depth of cut in mm $\left(\frac{F_y}{F_z}\right)$ is the cutting force ratio, γ is the rake angle in degree, $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}$ and C_1, C_2 are the regression coefficients of the models.

3. EXPERIMENTAL CUTTING CONDITIONS AND PROCEDURES

Series of the cutting experiments are conducted on a commercially available small CNC turning machine as shown in Fig. 1. The carbon steel (AISI 1045) is adopted in the cutting experiments and The major cutting conditions are summarized in Tab 1.

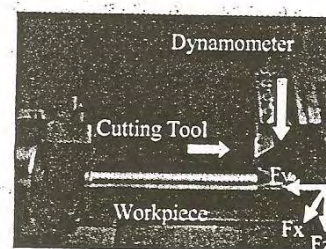


Fig. 1. Illustration of the experimental setup

Cutting tool	Coated carbide tool
Negative tool rake angle -6°	TNMG 160404 HQ TNMG 160408 HQ
Positive tool rake angle 11°	TPMR 160304 HQ TPMR 160308 HQ
Workpiece	AISI 1045 carbon steel
Cutting speed (m/min)	150, 250
Feed rate (mm/rev)	0.15, 0.18
Depth of cut (mm)	0.25, 0.5
Chip volume (cm ³)	0, 500, 1,000, 1,500, 2,000

Tab. 1. Major cutting conditions

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

4.1 Effects of cutting force ratios on surface roughness

The experimentally obtained relation of the surface roughness and the cutting force ratio is shown in Fig. 2. It can be stated that the greater the cutting force ratios, the less the R_a and R_z . It is interpreted that the surface roughness increases while the chip volume or the cutting time increases (Thamizhmanii et al, 2007). The relation between the surface roughness and the cutting force ratio shows the same trend even though the cutting conditions are different. It is understood that the cutting force ratio can be used to estimate the in-process surface roughness during the cutting.

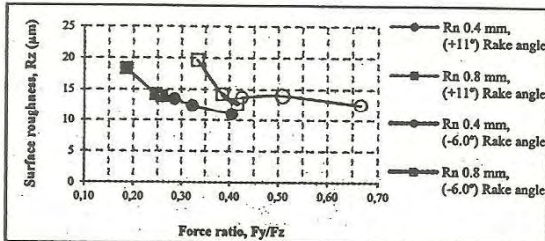


Fig. 2. Examples of experimentally obtained relations of surface roughness and cutting force ratio at V 250 m/min, f 0.18 mm/rev, D 0.25 mm

4.2 Surface roughness estimation

The experimentally obtained in-process surface roughness models are shown as below:

$$R_a = 53.52 \cdot v^{-0.122} \cdot f^{1.60} \cdot R_n^{-0.519} \cdot D^{0.108} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{-0.296} \cdot e^{-0.0187\gamma} \quad (3)$$

$$R_z = 757.48 \cdot v^{-0.263} \cdot f^{1.59} \cdot R_n^{-0.205} \cdot D^{0.163} \cdot \left(\frac{F_y}{F_z}\right)^{-0.18} \cdot e^{-0.00998\gamma} \quad (4)$$

The models are valid at a high significance (P -value = 0.000) at 95% confident level.

4.3 Surface roughness model accuracy

The new cutting tests are conducted in order to verify the accuracy of the in-process surface roughness model by utilizing the new cutting conditions.

Fig. 3 shows the experimentally measured surface roughness, the $\pm 10\%$ measured surface roughness, and the in-process predicted surface roughness obtained from the equations (3) and (4). The prediction accuracy of the R_a and R_z is about 84.92% and 87.39%, respectively. The values of the in-process predicted surface roughness are within the $\pm 10\%$ measured surface roughness. It indicates that the proposed in-process surface roughness model can be effectively used to monitor and predict the in-process surface roughness.

5. CONCLUSIONS

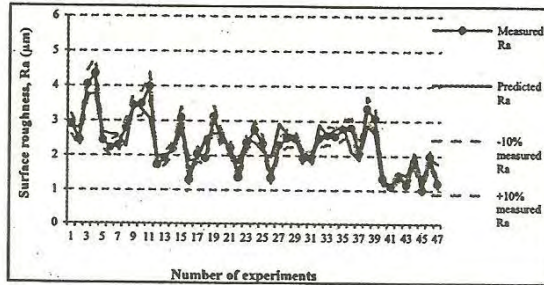
In order to realize the intelligent machine tools in the near future, the in-process monitoring is proposed to measure the cutting forces to predict the in-process surface roughness under various cutting conditions during the cutting.

A cutting force ratio is utilized to predict the in-process surface roughness regardless of the cutting conditions, which is the ratio of the corresponding time records of the feed force to the main force.

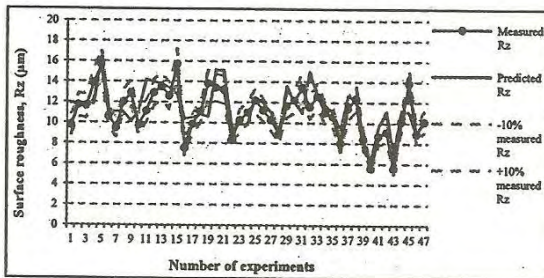
The relations of the surface roughness, the cutting speed, the feed rate, the tool nose radius, the depth of cut, the rake angle, and the cutting force ratio are investigated to develop the in-process surface roughness models. The exponential function is employed to represent the relation of the arithmetic average surface roughness, the cutting force ratio, and the cutting parameters. The multiple regression analysis has been utilized

to calculate the regression coefficients of the in-process prediction of surface roughness model by using the least square method.

It is proved by the cutting experiments that the in-process surface roughness can be predicted and obtained with the high accuracy by using the in-process surface roughness models proposed. However, another tool geometry should be studied and included in the models to obtain the higher prediction accuracy.



(a) R_a



(b) R_z

Fig. 3. Illustration of the measured surface roughness, the in-process predicted surface roughness, and the $\pm 10\%$ measured surface roughness

6. ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Thailand Research Fund (TRF) from March 2009 to March 2011.

7. REFERENCES

- Cakir, M. C.; Ensarioglu C. & Demirayak I. (2009). Mathematical models of surface roughness for evaluating the effects cutting parameters and coating materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 1, (January 2009), 102-109, ISSN: 0924-0136
- Ignatov, M.G.; Perminov, A.E. & Prokofev, Y.E. (2008). Influence of the vertical cutting force on the surface precision and roughness in opposed milling. *Russian Engineering Research*, 28,9, (September 2008) 864- 865, ISSN: 1068-798X
- Thamizhmanii, S.; Kamarudin, K.; Rahim, E. A.; Sagarudin, A. & Hassan S. (2007). Tool wear and surface roughness in turning AISI 8620 using coated ceramic tool. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. WCE 2007, pp 1157-1161, ISBN:978-988-98671-2-6, July 2007, London, U.K.
- Shiraishi, M. (1981). In-Process Measurement of Surface Roughness in Turning by Laser Beams. *Journal of Engineering for Industry*, 103, (January 1981) 203-209, ISSN: 0022-1817
- Thusty, J. & Andrews G.C. (1983). A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining. *CIRP Annals*, 32,2, (January 1983), 563-572, ISSN: 0007-8506

In-Process Monitoring and Prediction of Surface Roughness on CNC Turning by using Response Surface Analysis

Somkiat, T.,¹ Somchart, A.,² and Sirichan, T.³

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Phayathai Road, Pathumwan Bangkok 10330, THAILAND (Email:Somkiat.ta@chula.ac.th¹,Somchart_a@hotmail.com²,Sirichan.t@chula.ac.th³)

Abstract. This paper presents a model developed for the prediction of surface roughness based on in-process monitoring of turning of plain carbon steel (S45C) with the coated carbide tool under various cutting conditions. It uses a response surface analysis with the Box-Behnken design based on the experimental results. The in-process cutting force and cutting temperature are measured to analyze their relationship with the surface roughness and the cutting conditions. A tool dynamometer and an infrared pyrometer were employed and installed on the turret of CNC turning machine to measure the in-process cutting forces and cutting temperatures. Models of cutting force ratio and cutting temperature were developed based on the experimental data. The optimum cutting condition is determined referring to the minimum surface roughness of the response surface plot, which is obtained from the surface roughness model. The experimental results show that the cutting temperature increases with an increase in cutting speed. The higher cutting speed gives the better surface roughness. The feed rate is the most significant factor which affects the surface roughness, while a small depth of cut helps to improve the surface roughness. The effectiveness of the surface roughness prediction model has been proved by utilizing an analysis of variance (ANOVA) at 95% confidence level. The minimum surface roughness can be obtained with the optimum cutting conditions from the surface roughness model developed.

Keywords: CNC Turning, Box-Behnken design, Surface roughness, Infrared pyrometer, Cutting force

1. Introduction

Steels such as S45C are most popularly used for mechanical parts. Turning is one of the important cutting processes, which is used to cut these materials in order to obtain the required geometrical shapes.

However, surface roughness cannot be measured while cutting, and, the same time, there are many factors which affect the surface roughness of the machined parts.

It is known that the cutting conditions such as the feed rate, the cutting speed and the depth of cut affect the surface roughness [1]. It is desirable to know the relations of them and the surface roughness. Hence, these cutting

parameters are included in the model to predict the surface roughness.

It is already known that a force sensor is able to generate a signal corresponding to the surface roughness [2]. The feed force is most sensitive to the surface roughness while the main force is affected by the cutting conditions. The main force and the feed force are adopted to examine the surface roughness during the cutting. This involves normalizing and making the cutting forces dimensionless by taking the ratio of the corresponding time records of the feed force F_y to the main force F_z . The cutting force ratio (F_y/F_z) is the important factor to analyze the in-process surface roughness even though the cutting conditions are changed.

The aim of this research is to develop a model for the prediction of surface roughness based on experimental data by using the response surface analysis with the Box-Behnken design in order to determine the optimum cutting conditions to obtain the minimum surface roughness [3-5]. A model using the cutting force ratio and cutting temperature has been developed based on the experimental data in order to check the relations of the cutting conditions and the surface roughness.

2. In-process monitoring of cutting forces and cutting temperatures

The in-process monitoring of cutting forces is used to examine the effects of the cutting conditions on the surface roughness. The in-process cutting forces are monitored during the cutting by employing a dynamometer.

An infrared pyrometer is used to measure the in-process cutting temperature during the cutting. The in-process cutting temperature and cutting forces are then utilized to build a model relating the in-process cutting force, cutting temperature and surface roughness together with the cutting conditions.

3. Models of surface roughness, cutting force ratio and cutting temperature

The second-order response model is normally used when the response function is not known or nonlinear [3-5]. Hence, the functional relations between the responses, which are the surface roughness (R_a), the cutting force ratio (F_y/F_z), and the cutting temperature (T), in the turning process and the investigated independent variables, which are the cutting speed (v), the feed rate (f), and the depth of cut (d) can be represented by the following equations :

$$R_a = \beta_0 + \beta_1(v) + \beta_2(f) + \beta_3(d) + \beta_4(v^2) + \beta_5(f^2) + \beta_6(d^2) + \beta_7(vf) + \beta_8(vd) + \beta_9(fd) \quad (1.1)$$

$$T = \beta_{10} + \beta_{11}(v) + \beta_{12}(f) + \beta_{13}(d) + \beta_{14}(v^2) + \beta_{15}(f^2) + \beta_{16}(d^2) + \beta_{17}(vf) + \beta_{18}(vd) + \beta_{19}(fd) \quad (1.2)$$

$$F_y/F_z = \beta_{20} + \beta_{21}(v) + \beta_{22}(f) + \beta_{23}(d) + \beta_{24}(v^2) + \beta_{25}(f^2) + \beta_{26}(d^2) + \beta_{27}(vf) + \beta_{28}(vd) + \beta_{29}(fd) \quad (1.3)$$

The values of β coefficients used in these equations can be obtained by using the Box-Behnken technique. The analysis of variance (ANOVA) is utilized to prove the effect of the cutting parameters at 95% confident level.

4. Experimental cutting conditions and procedures

A series of cutting experiments were carried out in order to obtain the values of β coefficients in the equations (1.1) to (1.3). The cutting tests were conducted on a commercially available small CNC turning machine as shown in Figure 1. The tool dynamometer and the infrared pyrometer are shown installed on the turret of CNC turning machine in order to measure the in-process cutting force and the in-process cutting temperature, respectively.

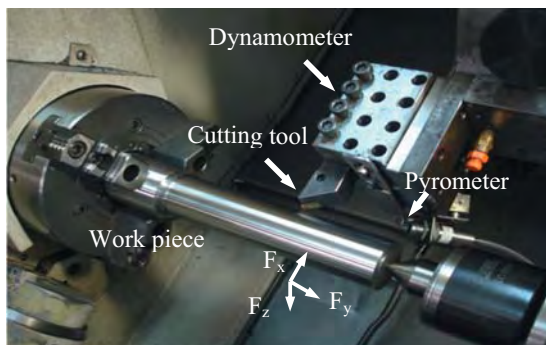


Fig. 1. Illustration of experimental setup

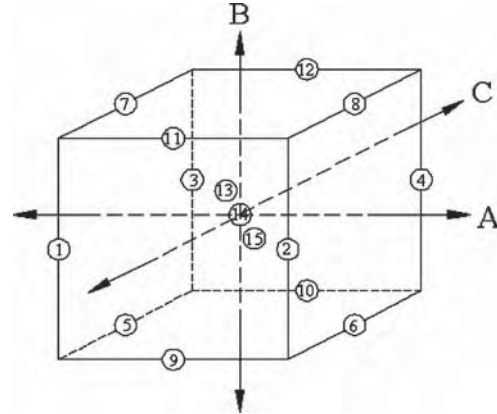


Fig. 2. Box-Behnken design for three variables

Plain carbon steel (S45C) was adopted in the cutting experiments and the cutting tool was coated carbide KC9110 [6].

The design of experiments (DOE) has an effect on the number of experiments required. Hence, the Box-Behnken design consisting of 15 experiments was used in the experiments for the three variables as shown in Figure 2. The Box-Behnken design provides three levels which are low, center, and high for each independent variable as shown in Table 1

Table 1 Levels of independent variables of the cutting condition parameters

Levels	Coding	Cutting speed, v (m/min)	Feed rate, f (mm/rev)	Depth of cut, d (mm)
Low	-1	150	0.15	0.50
Center	0	250	0.175	0.75
High	+1	350	0.20	1.00

5. Experimental results and discussion

5.1 Response Surface Analysis

According to the experimentally obtained results, the second-order response model representing the surface roughness (R_a) can be expressed by the following equation:

$$R_a = 10.304 - 0.013v - 147.417f + 8.036d - 0.000016v^2 + 525.4f^2 - 1.697d^2 + 0.1253vf + 0.0022vd - 33.056fd \quad (1.4)$$

By following in the same manner, the second-order response functions of the cutting temperature and the cutting force ratio can be expressed by the following equations:

$$T = -3.21875 + 0.2075v + 3640f + 278d - 0.000113v^2 - 7400f^2 - 174d^2 - 0.90vf + 0.18vd - 480fd \quad (1.5)$$

$$(F_y/F_z) = 3.371 - 0.00383v - 22.652f + 0.6935d + 0.000031v^2 + 47.27f^2 + 0.2498d^2 + 0.01199vf + 0.000166vd + 2.2616fd \quad (1.6)$$

Table 2 ANOVA table for the second-order response function of the surface roughness

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
Regression	9	11.0021	11.0021	26.13	0.001
Residual Error	5	0.2340	0.2340		
Lack of fit	3	0.2053	0.2053	4.77	0.178

The results of ANOVA for the second-order response function of the surface roughness is shown in Table 2. The P-value is less than 0.05, and hence the surface roughness model developed is quite adequate. It is understood that the cutting speed, the feed rate, and the depth of cut have the most significant effect on the surface roughness. Moreover, the lack of fit test is 0.178 which means that there is no lack of fit according to the significant level of 95%.

Figure 3 shows the response surface plot of the predicted surface roughness (R_a) as a function of the cutting speed and the feed rate at the depth of cut of 0.5 mm from equation (1.4). The figure clearly shows that the surface roughness increases mainly with an increase in the feed rate.

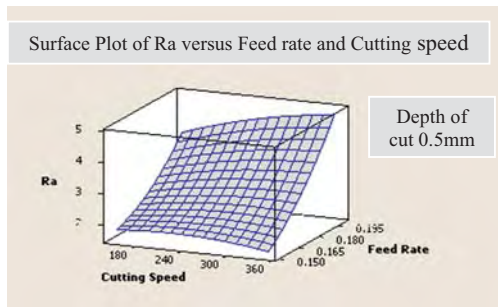


Fig. 3. Surface plot of predicted surface roughness versus cutting speed and feed rate at the depth of cut of 0.5 mm

A response optimization was performed to check the optimum cutting condition for the minimum surface roughness as shown in Figure 4. The surface roughness decreases while the cutting speed increases. The minimum surface roughness can be obtained at the high level of the cutting speed, and at the low levels of the feed rate and the depth of cut respectively. Referring to the minimum surface roughness, the experimentally obtained optimum cutting

condition is the cutting speed of 350 m/min at the feed rate of 0.15 mm/rev, and the depth of cut of 0.5 mm.

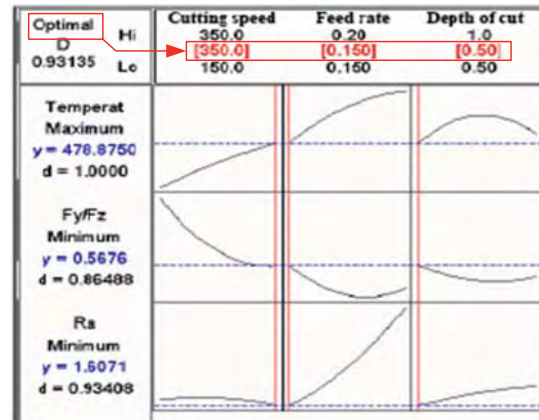


Fig. 4. The optimization chart for minimum surface roughness for cutting plain carbon steel by using a coated carbide tool

A better surface roughness is obtained when the cutting speed is high enough to avoid the built-up edge [2]. The other reason is the work material becomes softer and easy to cut due to the higher cutting temperature which leads to a low cutting force ratio at the greater cutting speed as shown in Figure 4.

An increase in the feed rate results in an increment of the surface roughness which corresponds to the theoretical surface roughness as shown in Figure 4.

The better surface finish is obtained at the small depth of cut of 0.5 mm as shown in Figure 4. The larger depth of cut causes the higher cutting force which results in the higher surface roughness. It is concluded that the surface roughness can be improved by cutting with the small depth of cut.

5.2 Verification of the models

Additional cutting tests were conducted in order to verify the optimum cutting condition and the models of the surface roughness prediction, the cutting force ratio and the cutting temperature.

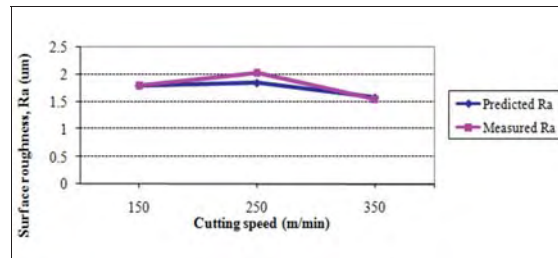


Fig. 5. Illustration of the measured R_a and the predicted R_a

Figure 5 shows that the experimentally measured surface roughness is close to the surface roughness predicted obtained from equation (1.4). It is concluded that the surface roughness model developed can be effectively used to predict the surface roughness under various cutting conditions.

Figure 6 shows the experimentally measured cutting temperature and the predicted temperature obtained from equation (1.5). It is implied that the experimentally obtained model of the cutting temperature can be used to estimate the in-process cutting temperature, cutting force and surface roughness even though the cutting conditions are changed.

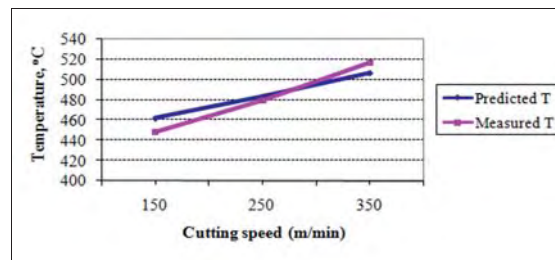


Fig. 6. Illustration of the measured T and the predicted T

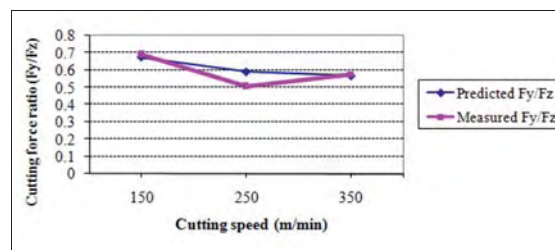


Fig. 7. Illustration of the measured F_y/F_z and the predicted F_y/F_z

The experimentally measured cutting force ratio is fitted to the predicted cutting force ratio as shown in Figure 7. It is seen that the cutting force ratio decreases while the cutting speed increases as the cutting speed directly affects the cutting temperature as shown in Figure 6.

According to Figures 5 to 7, the relations of surface roughness, the cutting temperature, and cutting force ratio show the same trend while the cutting speed increases. It can be stated that the cutting force ratio can be used to estimate the surface roughness during the cutting. The phenomena of the cutting force ratio and the surface roughness correspond with the cutting temperature.

6. Conclusions

In-process monitoring has been used to measure the cutting temperature and the cutting force by employing the infrared pyrometer and the tool dynamometer

respectively in order to examine and analyze their effect on the surface roughness under various cutting conditions during the cutting.

The resulting surface analysis with the Box-behnken design was utilized to develop a model to predict the surface roughness represented by the second-order response function. The experimentally obtained results clearly show that the feed rate is the most significant factor affecting the surface roughness, followed by the cutting speed. It has been proved that the surface roughness prediction model developed can be effectively used to predict the surface roughness with the 95% confidence level.

The relations of the surface roughness, the cutting temperature, and the cutting force ratio show the same trend. The effects of cutting conditions on the surface roughness can be well explained by the in-process cutting force and cutting temperature. It is concluded that the cutting force ratio can be used to predict the in-process surface roughness during the cutting. The in-process monitoring of cutting temperature is useful to analyze the in-process cutting force ratio and surface roughness.

The experimentally determined optimum cutting condition is a cutting speed of 350 m/min, at a feed rate of 0.15 mm/rev, and a depth of cut of 0.5 mm.

Acknowledgement

This work was supported by The Thailand Research Fund (TRF) from March 2009 to March 2011.

References

- [1] Somkiat T, (2009) In-process investigation of turning process applied with and without cutting fluid: *Journal of mechanical engineering*. 6: 85-102
- [2] Moriwaki T, Shibusaka T, 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
- [3] Box GEP, Behnken DW, (1960) Some new three level designs for the study of quantitative variables: *Technometrics*. 2(4): 455-475
- [4] Raviraj S, Raghuvir P, Srikanth SR, Vasanth K, (2008) Machinability study on discontinuously reinforced aluminium composites (DRACs) using response surface methodology and Taguchi's design of experiments under dry cutting condition: *Mj.Int.J.Sci.Tech.* 2(01): 227-239
- [5] Elmagrabi NH, Che Haron CH, Jaharah A, Ghani Gusri AI, Yasir MS, Yanur B, (2008) Dry machining of titanium alloys and its impact on the environment and tool life: *International Conference on Environmental Research and Technology*. 773-777
- [6] Kennametal Inc. (2004) Lathe tooling Catalog. A54-A55

Monitoring of Cutting Conditions with Dry Cutting on CNC Turning Machine

Somkiat Tangjitsitcharoen^a and Suthas Ratanakuakangwan

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

^aSomkiat.T@eng.chula.ac.th

Keywords: Turning; cutting force; dry cutting; tool wear; surface roughness

Abstract. This paper presents the additional work of the previous research in order to verify the previously obtained cutting condition by using the different cutting tool geometries. The effects of the cutting conditions with the dry cutting are monitored to obtain the proper cutting condition for the plain carbon steel with the coated carbide tool based on the consideration of the surface roughness and the tool life. The dynamometer is employed and installed on the turret of CNC turning machine to measure the in-process cutting forces. The in-process cutting forces are used to analyze the cutting temperature, the tool wear and the surface roughness. The experimentally obtained results show that the surface roughness and the tool wear can be well explained by the in-process cutting forces. Referring to the criteria, the experimentally obtained proper cutting condition is the same with the previous research except the rake angle and the tool nose radius.

Introduction

This research presents the additional work of the previous research of the author [1]. In order to reduce CO₂ emission and environmental hazard, there has been a continuing worldwide trend to use the dry cutting with the major benefits such as reducing the cost of machining operations and the disposal of cutting fluids [2-3]. However, the effectiveness of the dry cutting depends on the cutting conditions, such as the machining type, the workpiece material, the cutting tool material and the cutting tool geometry [4-6]. It is therefore desirable to know the effects of the cutting conditions with the dry cutting to improve the cutting performance [7-8].

Extensive research effects have been devoted so far to investigate the cutting performance of the modern cutting tools such as coated cermet and coated carbide tools in the dry cutting [9-10]. Hence, the aim of this research is to monitor and examine the cutting conditions with the dry cutting by using the different tool rake angles and tool nose radii to confirm the proper cutting condition obtained from the previous research for the plain carbon steel with the coated carbide tool in turning process.

In-Process Monitoring of Cutting Forces

The in-process monitoring of cutting forces is utilized to examine and analyze the cutting conditions with the different cutting tool geometries on CNC turning machine. The dynamometer is employed and installed on the turret of CNC turning machine in order to measure the in-process cutting forces. The in-process cutting forces are analyzed and interpreted for the in-process cutting temperature, the surface roughness, and the tool wear under various cutting conditions.

The proper cutting condition is determined based on the criteria of the surface roughness of the machined part, and the life of the cutting tool.

Effects of Cutting Conditions on Surface Roughness, Tool Wear, Cutting Force, and Cutting Temperature

It is known that the cutting conditions affect the surface roughness [1]. The better surface roughness is obtained when the cutting temperature is suitable. However, it is expected that the large feed rate causes the large cutting force which results in the poor surface roughness due to the vibration of the cutting tool during the cutting.

The tool life is also expected to be improved while cutting with the positive rake angle. Since the positive rake angle helps to increase the chip flowability, which aids to pull out the heat on the cutting tool. Hence, the rate of tool wear is low as a result of the low cutting force and the low surface roughness.

Experimental Equipment and Cutting Conditions

The major cutting conditions of the previous research [1] are adopted to verify and examine the obtained proper cutting condition with the new cutting tool geometries as shown in Table 1. The plain carbon steel (JIS:S45C) is used for the cutting tests. The dynamometer is installed on the turret of CNC turning machine to measure the in-process cutting forces as shown in Fig. 1. The uncertainty of the measuring equipment is shown in Table 2. Three repetitions of cutting tests are performed for each cutting condition. The average values of the cutting force, the tool wear and the surface roughness are calculated for each chip value.

The life of the cutting tool is predetermined as the limited flank wear (V_b) of 0.3 mm. The acceptable surface roughness (R_a) is less than $3.125 \mu\text{m}$ referring to JIS B0601 (1982).

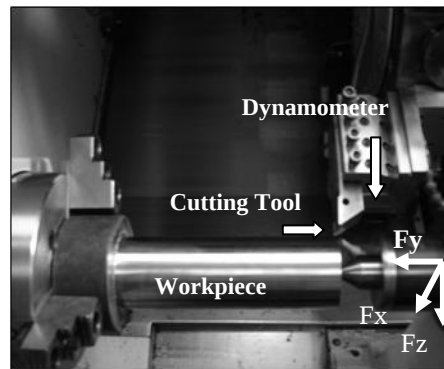


Fig. 1 Illustration of experimental setup

Table 1 Major cutting conditions

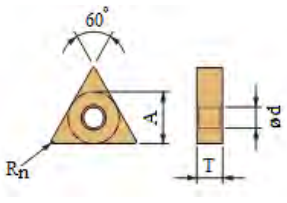
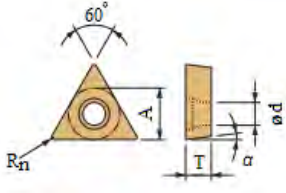
Cutting Conditions										
Cutting Speed [m/min]		150, 250								
Feed Rate [mm/rev]		0.15, 0.18								
Depth of Cut [mm]		0.5								
Volume of Chip [cm ³]		2000								
Coated Carbide Tool	Tool geometry									
		A	T	Ød	R _n	A	T	Ød	α	R _n
		9.525 mm	4.76 mm	3.18 mm		9.525 mm	4.76 mm	3.18 mm	11°	
	ANSI Number	TNMG160404HQ			0.4 mm	TPMR160304HQ				0.4 mm
		TNMG160408HQ			0.8 mm	TPMR160308HQ				0.8 mm

Table 2 Uncertainty of measuring equipment

Measurement		Model	Uncertainty [%]
Force sensor	F _x	Kistler 9121	1.00
	F _y		1.20
	F _z		2.20
Microscope	X-axis	MM 60/L3	2.00
	Y-axis		2.00
Surface Tester		TSK surfcom1400D	1.57

Experimental Results and Discussions

The effect of the tool nose radius on the tool wear, the cutting force, and the surface roughness is shown in Figs. 2 to 4. The low rate of tool wear appears while cutting with the large tool nose radius ($R_n = 0.8$ mm). It is interpreted that the large contact length between the tool edge and the workpiece helps to dissipate the heat on the cutting tool which results in the low rate of tool wear, the low cutting force and the low surface roughness [1, 11].

The in-process cutting forces decrease while cutting with the large tool nose radius as a result of the better surface finish obtained. It is understood that the in-process cutting forces can be used to predict the surface roughness during the cutting.

However, the cutting forces increase suddenly at the chip volume of 1500 cm^3 as shown in Fig. 3. It is understood that the tool wear becomes larger especially cutting with the small tool nose radius of 0.4 mm, which leads to the damage of the surface roughness as shown in Fig. 4.

The experimentally obtained results show that the relation between the tool wear and the surface roughness, the relation between the tool wear and the cutting force, and the relation between the cutting force and the surface roughness are correspondent with the same trend as shown in Figs. 2 to 4. The phenomena of the surface roughness and the tool wear can be well explained by the in-process cutting forces.

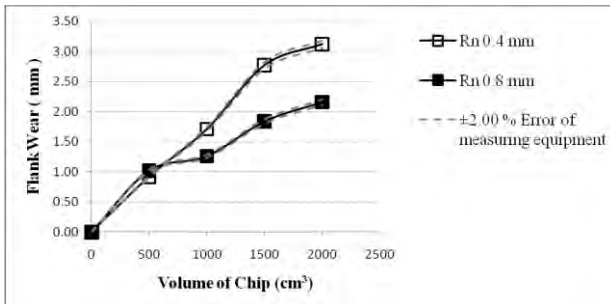


Fig. 2 Examples of experimentally obtained relation of flank wear and volume of chip with dry cutting by using negative rake angle at cutting speed 150 m/min, feed rate 0.15 mm/rev, depth of cut 0.5 mm

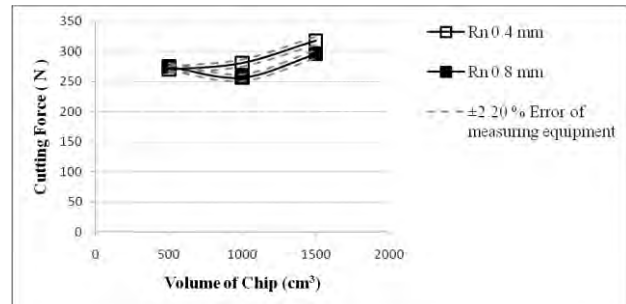


Fig. 3 Examples of experimentally obtained relation of cutting force and volume of chip with dry cutting by using negative rake angle at cutting speed 150 m/min, feed rate 0.15 mm/rev, depth of cut 0.5 mm

Fig. 5 shows that the better surface roughness (R_a) is obtained by using the negative rake angle with the tool nose radius of 0.8 mm at the cutting speed of 250 m/min, the feed rate of 0.15 mm/rev, and the depth of cut of 0.5 mm. It is implied that the work material becomes softer and easy to cut at the greater speed due to the suitable cutting temperature, which results in a degree of self-lubrication [12]. Hence, the quality of surface finish improves.

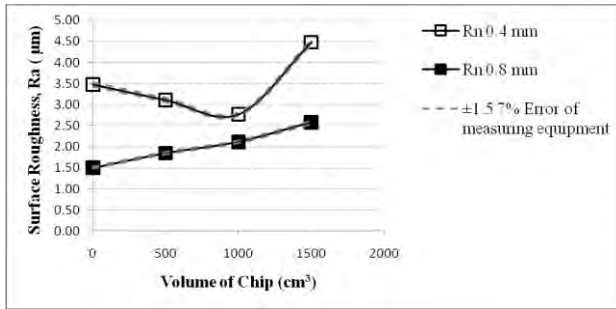


Fig. 4 Examples of experimentally obtained relation of surface roughness and volume of chip with dry cutting by using negative rake angle at cutting speed 150 m/min, feed rate 0.15 mm/rev, depth of cut 0.5 mm

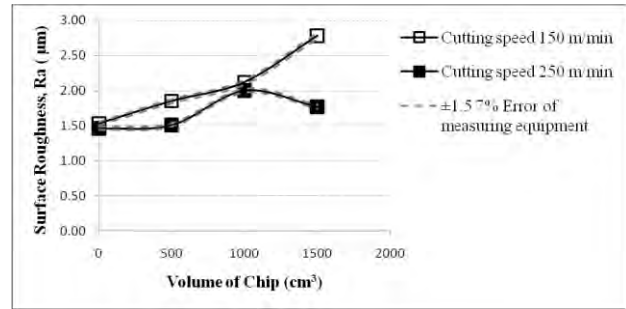


Fig. 5 Examples of experimentally obtained relation of surface roughness and volume of chip with dry cutting by using negative rake angle with tool nose radius 0.8 mm at feed rate 0.15 mm/rev, depth of cut 0.5 mm

However, the surface roughness decreases at the chip volume of 1500 cm³ and the cutting speed of 250 m/min. It is understood that the tool nose radius becomes larger when the cutting tool is worn, and consequently the theoretical surface roughness decreases [1]. Fig. 6 shows that the nose radius of the worn tool (R2) is larger than the one of the new tool (R1). The larger tool nose radius can help to reduce the feed marks on the machined surface as a result of the low surface roughness obtained.

As the chip volume increases up to 1000 cm³, the better surface roughness (Ra) is obtained at the small feed rate of 0.15 mm/rev as shown in Fig. 7. Since the surface roughness depends on the feed rate due to the theoretical surface roughness. The higher feed rate increases the larger feed marks left on the machined surface as a consequence, the higher surface roughness occurs as shown in Fig. 8.

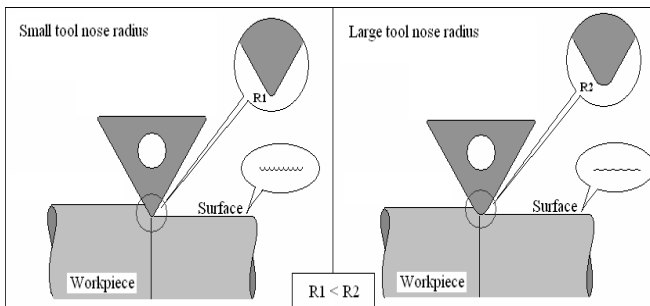


Fig. 6 Illustration of tool nose radii of new tool R1, and worn tool R2

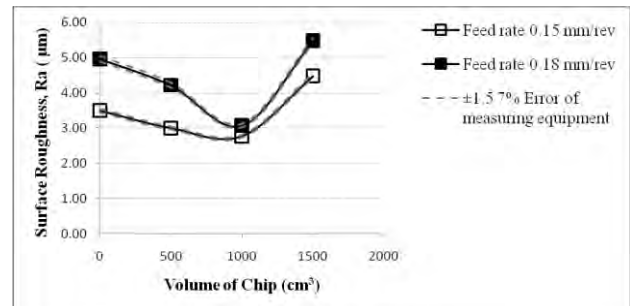


Fig. 7 Examples of experimentally obtained relation of surface roughness and volume of chip with dry cutting by using negative rake angle with tool nose radius 0.4 mm at cutting speed 150 m/min, depth of cut 0.5 mm

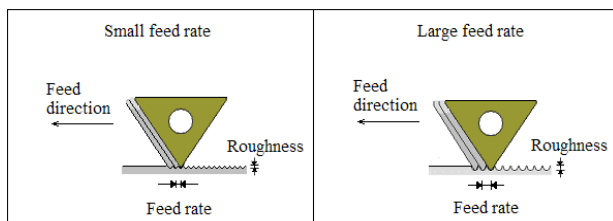


Fig. 8 Illustration of the feed marks on the machined surface

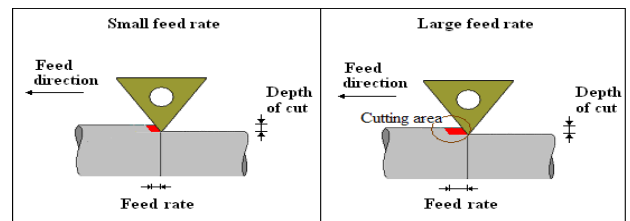


Fig. 9 Illustration of the feed rate and the cutting area

The other reason is that the large feed rate causes the large cutting area which affects the vibration of the cutting tool due to the large cutting force, which leads to the poor surface roughness as shown in Fig. 9.

However, the surface roughness increases far above the theoretical value for both feed rates at the chip volume of 1500 cm³ as shown in Fig. 7. It is understood that the higher cutting force increases due to the larger contact length between the tool nose radius and the workpiece, which damages the machined surface.

Fig. 10 shows that the higher feed rate gives the shorter tool life. It is understood that the higher cutting temperature occurs with the use of the higher feed rate. Hence the cutting tool is worn easier and the cutting force becomes larger, as a result of the poor surface finish obtained.

Fig. 11 shows the progress rates of tool wear with the different rake angles. The low rate of tool wear occurs with the positive rake angle. It is understood that the better surface finish is obtained. Since the positive rake angle helps to increase the chip flowability which reduces the cutting force and the heat on the cutting tool. Hence, the low cutting force and the low surface roughness are obtained. While the negative rake angle obstructs the chip flowability, which increases the tool wear rate, the cutting force, and the surface roughness.

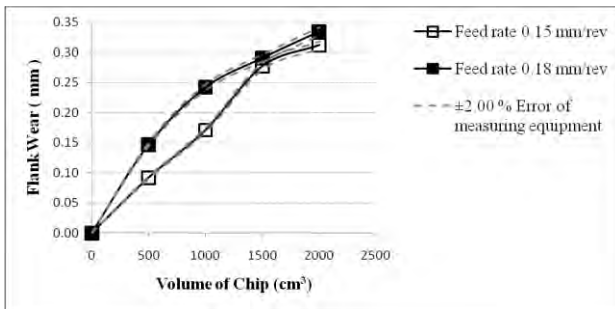


Fig. 10 Examples of experimentally obtained relation of flank wear and volume of chip with dry cutting by using negative rake angle with tool nose radius 0.4 mm at cutting speed 150 m/min, depth of cut 0.5 mm

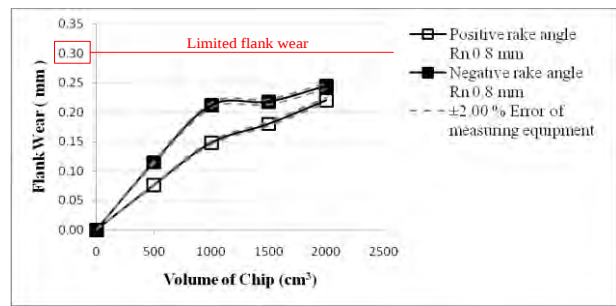


Fig. 11 Examples of experimentally obtained relation of surface roughness and volume of chip with dry cutting at cutting speed 250 m/min, feed rate 0.15 mm/rev, depth of cut 0.5 mm³

Table 3 compares the experimentally obtained tool lives under any cutting conditions with the dry cutting and the positive rake angle. The tool life can be prolonged by using the cutting speed of 250 m/min, which is the same result as the previous work [1]. The dry cutting leads to the practice of minimum quantity lubrication (MQL) with major benefits such as reducing the cost of cutting fluids and the disposal of cutting fluids.

Table 3 Comparison of the experimentally obtained tool lives at any cutting conditions

Cutting Conditions		Cutting Speed (m/min)		Tool Life
		150	250	
Depth of cut 0.5 mm	Feed Rate 0.15 mm/rev	$R_n 0.8 < R_n 0.4$	$R_n 0.4 < R_n 0.8$	
	Feed Rate 0.18 mm/rev	$R_n 0.4 < R_n 0.8$	$R_n 0.4 < R_n 0.8$	

Referring to the criteria of the acceptable surface roughness and the longest tool life, the proper cutting condition can be determined here based on the experimental data by using the positive rake angle with the tool nose radius of 0.8 mm, at the cutting speed of 250 m/min, the feed rate of 0.15 mm/rev, and the depth of cut of 0.5 mm.

According to the proper cutting condition obtained in this research, it is the same as the experimentally obtained result from the previous research except the rake angle and the tool nose radius.

Conclusions

In order to verify the obtained proper cutting condition with the dry cutting from the previous research, the in-process monitoring of cutting conditions with the new cutting tool geometries on CNC turning machine is proposed and utilized to investigate the cutting conditions. The dynamometer is employed to measure the in-process cutting forces during the cutting. The in-process cutting forces are monitored and interpreted for the in-process cutting temperature, the surface roughness, and the tool wear.

The effects of the cutting conditions, such as the cutting speed, the feed rate, the tool nose radius, and the rake angle, are examined and analyzed to obtain the proper cutting condition. The proper cutting condition is determined based on the criteria of the surface roughness and the tool life.

The experimentally obtained results show that the relation of the tool wear and the surface roughness can be well explained by the in-process cutting forces. The experimentally obtained proper cutting condition is the same with the previous work except the rake angle and the tool nose radius.

Acknowledgement

This work was performed and supported by The Thailand Research Fund (TRF).

References

- [1] S. Tangjitsitcharoen: Journal of Engineering Tribology, Vol. 223 (2009)
- [2] N. R. Dhar, M. Kamruzzaman and A. Mahiuddin: Journal of Materials Processing Technology, Vol. 172 (2006), p. 299-304
- [3] A.E. Diniz and R. Micaroni: International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42 (2002), p. 899-904
- [4] M. Ii, H. Eda, T. Imai, M. Nishimura, T. Kawasaki, J. Shimizu, T. Yamamoto and L. Zhou: Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology Vol. 24 (2000), p. 231-236
- [5] K.L. Gunter and J.W. Sutherland: Journal of Cleaner Production Vol. 7 (1999), p. 341-350
- [6] J. W. Sutherland, V. N. Kulur and N. C. King: Annals of the CIRP, Vol. 49/1 (2000), p. 61-64
- [7] M. Rahman, A. Senthil Kumar and M.U. Salam: International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42 (2002), p. 539-547
- [8] A.S. Varadarajan, P.K. Philip and B. Ramamoorthy: International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42 (2002), p. 193-200
- [9] M.Y. Noordin, V.C. Venkatesh and S. Sharif: Journal of Materials Processing Technology, Vol. 185 (2007), p. 83-90
- [10] J.A. Canteli, J.L. Cantero, N.C. Marin, B. Gómez, E. Gordo and M.H. Miguélez: of Materials Processing Technology, Vol. 21 (2010), p. 122-128
- [11] E.D. Anselmo and M. Ricardo: International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42 (2002), p. 899-904
- [12] T.H.C. Childs: Wear, Vol. 260 (2006), p. 310-318

IN-PROCESS PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS BY UTILIZING THE CUTTING FORCE RATIO

Somkiat Tangjitsitcharoen
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Bangkok, Thailand

KEYWORDS

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

ABSTRACT

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. All those parameters have their own characteristics to the arithmetic average surface roughness and the surface roughness, which is the ten-point average surface roughness. 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.

INTRODUCTION

Turning process is one of the most important processes which are widely used to produce the mechanical parts. One of the long-term concerns in the turning process is the surface roughness of the machined parts. However, the surface roughness cannot be measured while cutting at the same time as there are many factors affecting to the surface roughness of the machining parts. It is therefore required to know the surface roughness during the in-process cutting. The difficulty in controlling the surface roughness is that it is not possible to measure the surface roughness while machining.

Hence, it is therefore necessary to develop the in-process monitoring system to estimate the in-process surface roughness during the cutting. Hence, the in-process monitoring and estimation of the surface roughness is proposed and developed in this research.

Extensive research efforts have been devoted so far to develop the surface roughness models (Sahin and Motorcu, 2008). The effects of the cutting conditions are studied and investigated for the models (Davim, Gaitonde and Karnik,

2008; Cakir, Ensarioglu and Demirayak, 2009). The artificial neural network and design of experiment have been used in different ways to develop the surface roughness models with some sensor technologies by many researches (Feng and Wang, 2003; Choudhury and Bartarya, 2003). However, the preliminary experiments for specific cases of different conditions are always required to set up the database and train the system. The sensors and the methodologies have been developed to predict the surface roughness (Shiraishi, 1981; Nara, 1969). The sensors used in the in-process monitoring system, which request proper algorithms to process the outputs such as force sensor, are gradually spreading in the intelligent machines. It is already known that the force sensor is able to generate a signal corresponding to the in-process surface roughness (Lu, 2008; Lalwani, Mehta and Jain, 2008; Ignatov, Perminov and Prokof'ev, 2008). The feed force is most sensitive to the surface roughness while the main force is affected by the cutting conditions (Moriwaki, Shibasaka and Somkiat, 2004; Tlustý and Andrews, 1993; Lee, Kim and Lee, 1998). Hence, the main force and the feed force are adopted to estimate the surface roughness during the cutting.

However, the cutting forces may be affected by the cutting conditions. The cutting forces are therefore necessary to be generalized and non-scaled to estimate the in-process surface roughness regardless of the cutting conditions. The ratio of the cutting forces is proposed to estimate the surface roughness because it is not sensitive to the variation of the cutting conditions in its components. The proposed dimensionless cutting force ratio consists of the main cutting force F_z as the denominator and the feed force F_y as the numerator.

It is known that the cutting conditions affect the surface roughness such as the feed rate, the cutting speed, the depth of cut, and the tool nose radius. It is desirable to know the relation of them and the surface roughness. Hence, those cutting parameters will be also considered to estimate the surface roughness.

The aim of this research is to propose a method of the in-process monitoring of cutting force ratio to estimate the in-process surface roughness of the arithmetic average surface roughness which can be used in practice. The in-process surface roughness model is developed under various cutting conditions

by employing the exponential function with the aid of the multiple regression analysis and the use of the least square method.

IN-PROCESS PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS

Monitoring of Cutting Force Ratio

The method is proposed here to use the in-process monitoring to measure the in-process cutting forces during the process to predict the surface roughness under various cutting conditions.

However, the cutting forces vary when the cutting conditions are changed which affect the surface roughness. It is known that the feed force affects the surface roughness while the main force depends on the work materials, the cutting conditions as well as the chip volumes (Moriwaki, Shibasaka and Somkiat, 2004; Tlustý and Andrews, 1993; Choudhury and Kishore, 2000; Lee, Kim and Lee, 1998). Hence, it is necessary to generalize the cutting forces to estimate only the surface roughness without the effects of the combinations of the cutting conditions.

The cutting forces are normalized and dimensionless by taking the the ratio of the corresponding time records of the feed force F_y to the main force F_z . The cutting force ratio F_y/F_z is the important factor to estimate the in-process surface roughness during the cutting. It is expected that the cutting force ratio can be used to predict the in-process surface roughness even though the cutting conditions are changed.

Hence, the in-process surface roughness model is developed based on the experimentally obtained results by utilizing the in-process monitoring system of the cutting force ratio with the wide range of the cutting conditions.

Relations of Cutting Conditions, Cutting Forces and Surface Roughness

In case of turning process, the cutting conditions such as the feed rate, the cutting speed, the depth of cut, and the tool nose radius, affect the surface roughness (Somkiat, 2009).

Since the feed rate and the tool nose radius are generally adopted to be monitored, as they are directly related to the theoretical surface

roughness. The large tool nose radius gives the low theoretical surface roughness while the high feed rate increases the theoretical surface roughness.

The good quality of surface finish is expected to be obtained at small depth of cut. Since the surface roughness depends on the cutting force. The cutting force affects the vibration of cutting tool during the cutting which leads to the poor surface roughness.

Generally, the cutting force increases with an increase in the depth of cut and the feed rate. Hence, the larger cutting force appears, the higher surface roughness will occur.

A selected cutting speed may cause the suitably in-process cutting temperature, and hence the work material becomes soft and easy to cut. Consequently the quality of surface finish is good.

It is therefore required to know the relations of the feed rate, the tool nose radius, the cutting speed, the depth of cut, the cutting force, and the surface roughness. Hence, the above cutting parameters will be considered to estimate the in-process surface roughness.

In-Process Prediction of Surface Roughness Model

Basically, the theoretical surface roughness model is presented in the exponential function with the factors of the feed rate and the tool nose radius. Hence, the exponential function is adopted here to develop the in-process surface roughness model.

To estimate the in-process surface roughness during the cutting, the cutting force ratio and the cutting parameters are utilized in the model. Hence, the relations of the arithmetic average surface roughness, the surface roughness, the cutting force ratio, and the cutting parameters are proposed here as:

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

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

where R_a is the arithmetic average surface roughness in μm , R_z is the ten-point average of surface roughness in μm , V is the cutting speed

in m/min, f is the feed rate in mm/rev, R_n is the tool nose radius in mm, D is the depth of cut in mm, F_y/F_z is the cutting force ratio, $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, C_1$, and C_2 are the regression coefficients of the models.

A nonlinear form of Eqs. (1) and (2) are converted and presented into the following multiple-linear form by taking the logarithmic transformation:

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

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

Referring to the multiple regression analysis, Eqs. (3) and (4) can be simplified and rewritten as:

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

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

where y_1 and y_2 stand for the responses or estimated values for $\ln R_a$ and $\ln R_z$. In addition, x_1, x_2, x_3, x_4 , and x_5 are the logarithmic transformation of $\ln V, \ln f, \ln R_n, \ln D$, and $\ln(F_y/F_z)$, respectively. The values of β_0 and β_6 are the y -intercept which equal to the values of y_1 and y_2 when all the parameters x_1 to x_5 are zero. While the values of $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8, \beta_9, \beta_{10}$, and β_{11} are the regression coefficients.

The values of $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8, \beta_9, \beta_{10}$, and β_{11} in Eqs. (5) and (6) are obtained based on the actual cutting results by utilizing the multiple regression analysis with the use of the least square method.

Finally, the prediction interval (PI) of the in-process surface roughness model at 95% confident level is calculated and proposed to predict the distribution of individually predicted points in which the future predicted values of the in-process predicted surface roughness will fall. The 95% prediction interval lines give the highest advantage of monitoring and controlling the in-process surface roughness, which can be used with a wide range of cutting conditions.

EXPERIMENTAL CUTTING CONDITIONS AND PROCEDURES

Series of the cutting experiments were carried out to obtain the regression coefficients in Eqs. (5) and (6). The cutting tests are conducted on a

commercially available small CNC turning machine as shown in Figure 1. The dynamometer is employed and installed on the turret of CNC turning machine to measure the in-process cutting forces as shown in Figure 1.

The carbon steel (AISI 1045) is adopted in the cutting experiments and the cutting tool is coated carbide with the different tool nose radiuses of 0.4 and 0.8 mm. The major cutting conditions are summarized in Table 1. Three repetitions of cutting tests are performed for each cutting condition.

First, the following experimental procedures are adopted to obtain the relation of the surface roughness, the cutting force ratio, and the cutting parameters;

1. Start cutting with a new cutting tool at a constant cutting speed and a depth of cut and measure the cutting force.
2. Calculate the cutting force ratios at varied feed rates, and measure the surface roughness for the different chip volumes of 1,000, 1,500, and 2,000 cm^3 .
3. Repeat the procedures (1) to (2) three times under the same cutting conditions, and compute the average value of the cutting force ratios and the surface roughness, which is the ten-point average surface roughness for each chip volume.
4. Plot the relation of the arithmetic average surface roughness, the surface roughness, the cutting force ratios, and the cutting parameters.
5. Repeat the procedures (1) to (4) with another cutting tool for another cutting speeds and depths of cut.
6. Calculate the in-process surface roughness model and the prediction interval of the model at 95% confident level.

Second, to check the performance of the proposed method and verify the in-process surface roughness model, the following procedures are adopted to predict the in-process surface roughness during the actual cutting;

7. Repeat the new cutting tests with the new cutting conditions and measure the cutting force ratios when the surface roughness is to be monitored, and calculate the predicted surface roughness from the in-process surface roughness model obtained.
8. Calculate and check the accuracy of the in-process surface roughness model by comparing the experimentally measured

surface roughness with the predicted surface roughness obtained from the model.

9. Calculate the prediction interval of the in-process surface roughness model, and monitor the experimentally measured surface roughness and the predicted surface roughness obtained from the model.

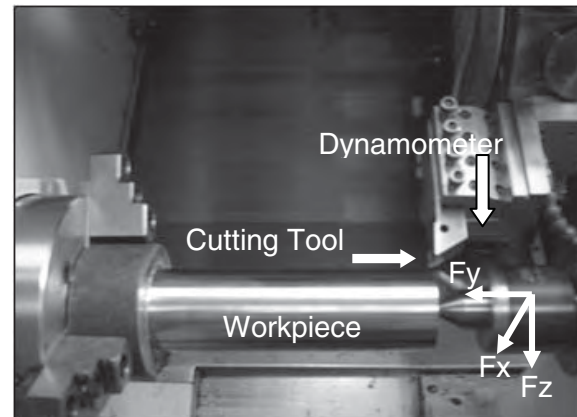


FIGURE 1. ILLUSTRATION OF EXPERIMENTAL SETUP.

TABLE 1. MAJOR CUTTING CONDITIONS

Cutting tool	Coated carbide tool
Tool geometry	TPMR 160304 HQ TPMR 160308 HQ
Workpiece	AISI 1045 Carbon steel
Cutting speed (m/min)	150, 250
Feed rate (mm/rev)	0.15, 0.18
Depth of cut (mm)	0.25, 0.5
Chip volume (cm^3)	1,000, 1,500, 2,000

EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS

Effects of Cutting Conditions and Cutting Force Ratios on Surface Roughness

To realize the intelligent machine tools, the relations of the cutting force ratios, the cutting conditions and the surface roughness are examined to develop the in-process surface roughness model. Figure 2 shows the experimentally obtained relation of the cutting force ratio and the chip volume. While the chip volume increases, the cutting force ratio tends to decrease. It means that an increase in the main force is larger than that in the feed force while the chip volume or the tool wear increases (Moriwaki, Shibasaka and Somkiat, 2004).

The experimentally obtained cutting force ratio of the tool nose radius of 0.4 mm is larger than that of the tool nose radius of 0.8 mm. It is understood that the feed force is larger than the main force while

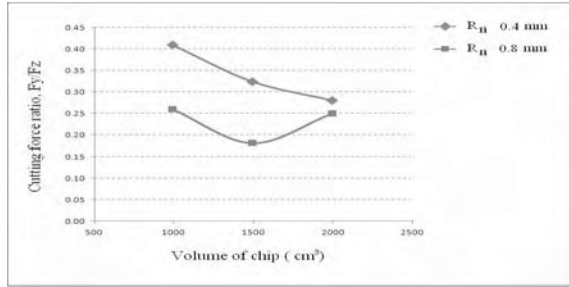


FIGURE 2. EXAMPLES OF EXPERIMENTALLY OBTAINED RELATION OF CUTTING FORCE RATIO AND CHIP VOLUME AT V 250 M/MIN, f 0.18 MM/REV, R_n 0.4 AND 0.8 MM, AND D 0.25 MM.

cutting with the small tool nose radius which corresponds to the theoretical surface roughness that the small tool nose radius causes the higher surface roughness.

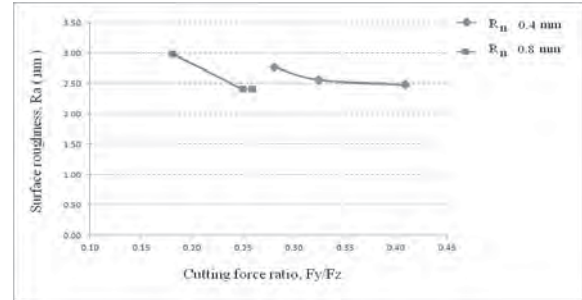
However, the cutting force ratio of the tool nose radius of 0.8 mm becomes larger again at the chip volume of 2000 cm³, which is almost the same as the cutting force ratio at the chip volume of 1000 cm³. It is understood that the tool nose radius becomes larger after the cutting tool is worn, and consequently the theoretical surface roughness decreases.

Hence, the above values of the surface roughness at chip volume of 1,000 and 2,000 cm³ are nearly the same as shown in Figure 3. It is implied that the cutting force ratio affects the surface roughness which can be used to analyze and estimate the in-process surface roughness.

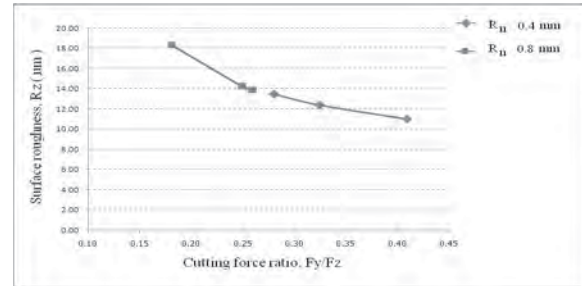
The experimentally obtained relation of the surface roughness and the cutting force ratio at the different chip volume of 1,000, 1,500, and 2,000 cm³ is shown in Figure 3. It can be stated that the greater the cutting force ratios, the less the R_a and R_z . It is interpreted that the surface roughness increases while the chip volume or the tool wear increases.

The relation between the surface roughness and the cutting force ratio shows the same trend even though the cutting conditions are different. It is understood that the cutting force ratio can be used to estimate the in-process surface roughness during the cutting.

The effect of cutting speed is shown in Figure 4. It is understood that the surface roughness decreases while the cutting speed increases.



(A) ARITHMETIC AVERAGE SURFACE ROUGHNESS, R_a



(B) TEN-POINT AVERAGE SURFACE ROUGHNESS, R_z

FIGURE 3. EXAMPLES OF EXPERIMENTALLY OBTAINED RELATIONS OF SURFACE ROUGHNESS AND CUTTING FORCE RATIO AT V 250 M/MIN, f 0.18 MM/REV, D 0.25 MM.

The higher cutting speed causes the high cutting temperature, and hence the work material becomes soft and easy to cut. Consequently the quality of surface finish is good.

The cutting forces tend to decrease while the cutting speed is higher due to the softening of work material. At the same time, the better surface finish is obtained as the cutting force decreases.

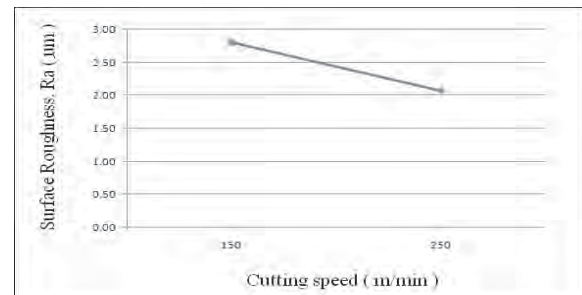


FIGURE 4. EXAMPLES OF EXPERIMENTALLY OBTAINED RELATIONS OF SURFACE ROUGHNESS AND CUTTING SPEED AT f 0.15 MM/REV, R_n 0.4 MM, D 0.5 MM, VOLUME OF CHIP 2000 CM³.

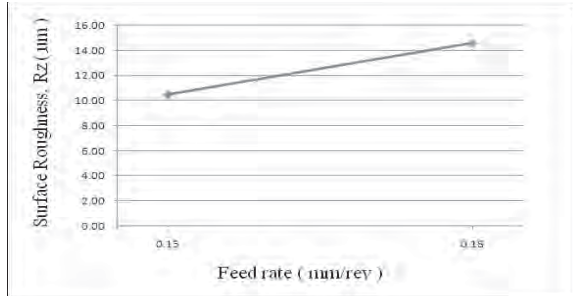


FIGURE 5. EXAMPLES OF EXPERIMENTALLY OBTAINED RELATIONS OF SURFACE ROUGHNESS AND FEED RATE AT V 250 M/MIN, R_n 0.4 MM, D 0.5 MM, VOLUME OF CHIP 2000 CM³.

An increase in feed rate results in the increment of the surface roughness which corresponds to the theoretical surface roughness as shown in Figure 5. It is known that the larger feed rate gives the high feed marks left on the machined surfaces after cutting which causes the higher surface roughness. The other reason is that an increase in the feed rate causes the large cutting force which results in the cutting tool vibration, as a consequence of the poor surface roughness obtained.

Figure 6 shows that the experimentally obtained ten-point average surface roughness decreases as the tool nose radius increases which corresponds to the theoretical surface roughness. Since the tool nose radius helps to reduce the feed marks on the machining surface, and consequently the surface roughness decreases.

The other reason is that the larger contact length between the tool nose radius and the workpiece helps dissipate the heat on the cutting edge (Somkiat, 2009) which leads to the low rate of tool wear, and as a result the low surface roughness appears as shown in Figure 6.

The better quality of surface finish is obtained at small depth of cut 0.25 mm as shown in Figure 7. Since the larger depth of cut gives the high cutting force which causes the higher surface roughness obtained. It is understood that the surface roughness can be improved by cutting with the small depth of cut

Referring to Figures 2 to 7, it is concluded that the surface roughness will increase proportionally to the feed rate and the depth of cut. In contradictory, the surface roughness is

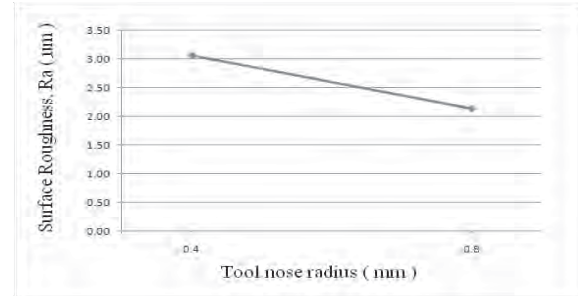


FIGURE 6. EXAMPLES OF EXPERIMENTALLY OBTAINED RELATION OF SURFACE ROUGHNESS AND TOOL NOSE RADIUS AT V 250 M/MIN, f 0.18 MM/REV, D 0.5 MM, VOLUME OF CHIP 2000 CM³.

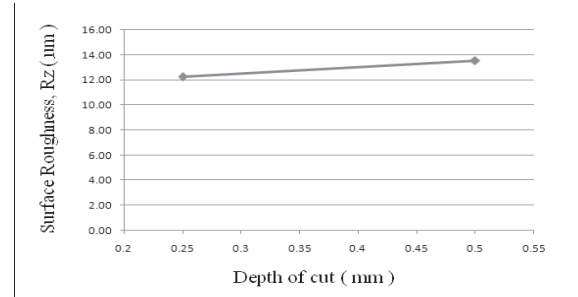


FIGURE 7. EXAMPLES OF EXPERIMENTALLY OBTAINED RELATION OF SURFACE ROUGHNESS AND DEPTH OF CUT AT V 250 M/MIN, f 0.18 MM/REV, R_n 0.8 MM, VOLUME OF CHIP 2000 CM³.

inversely proportional to the cutting speed, the tool nose radius and the cutting force ratio.

Surface Roughness Prediction

The experimentally obtained in-process surface roughness models by utilizing the least square method based on the experimentally obtained cutting data are:

$$\begin{aligned}\hat{y}_1 &= 4.50 - 0.342x_1 + 1.31x_2 - 0.397x_3 + 0.221x_4 - 0.439x_5 \quad (7) \\ \hat{y}_2 &= 6.17 - 0.398x_1 + 0.984x_2 - 0.085x_3 + 0.329x_4 - 0.484x_5 \quad (8)\end{aligned}$$

Equations (7) and (8) are substituted by the natural logarithm to each variable and transformed to the primitive exponential form as:

$$\begin{aligned}\hat{R}_a &= 89.9 \cdot (V)^{-0.342} \cdot (f)^{1.31} \cdot (R_n)^{-0.397} \cdot (D)^{0.221} \\ &\quad \cdot \left(\frac{F_y}{F_z} \right)^{-0.439}\end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}\hat{R}_z &= 478 \cdot (V)^{-0.398} \cdot (f)^{0.984} \cdot (R_n)^{-0.085} \cdot (D)^{0.329} \\ &\quad \cdot \left(\frac{F_y}{F_z} \right)^{-0.484}\end{aligned} \quad (10)$$

The experimentally obtained in-process prediction of surface roughness model is valid at a high significance ($P\text{-value} = 0.000$) at 95% confident level. Therefore, the proposed method is reliable and usable to predict the in-process surface roughness of the arithmetic average surface roughness by utilizing the in-process monitoring system of the cutting force ratio with the cutting conditions of the cutting speed, the feed rate, the tool nose radius, and the depth of cut as the important predictors.

According to Eqs. (9) and (10) stated above, the sensitivity of the logarithm transformation of the surface roughness to the cutting conditions is considered which are the cutting speed, the feed rate, the tool nose radius, the depth of cut, and the dimensionless cutting force ratio. The magnitude of the power of each parameter means to the responsibility of that parameter to the equations, while the sign of the power means to how it affects to the arithmetic average surface roughness and the ten-point average surface roughness. The most influence factor is the feed rate.

The arithmetic average surface roughness and the ten-point average surface roughness are increased with the increasing of the feed rate and the depth of cut, and the decreasing of the cutting speed, the tool nose radius and the cutting force ratio.

Surface Roughness Prediction Accuracy and Prediction Interval

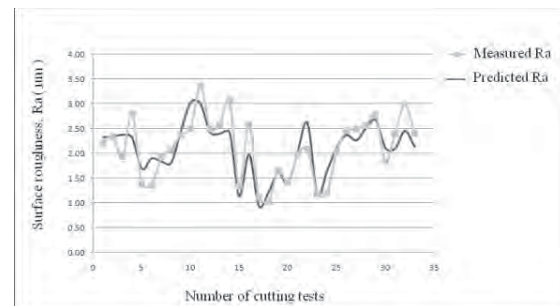
The new cutting tests are conducted to verify the accuracy of the in-process surface roughness model by utilizing the new cutting conditions as shown in Table 2.

Figure 8 shows the experimentally measured surface roughness of 33 cutting tests, and the in-process predicted surface roughness obtained from the equations (9) and (10). The prediction accuracy of the R_a and R_z is about 87.8% and 86.5%, respectively. It indicates that the proposed in-process surface roughness model can be effectively used to monitor and predict the in-process surface roughness.

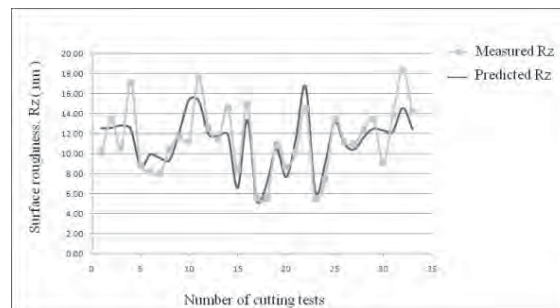
The 95% prediction intervals of the in-process surface roughness models with transformation of the R_a and R_z are computed to predict the distribution of the individually predicted values of the in-process predicted surface roughness. The upper line and the lower line of the prediction

TABLE 2. NEW CUTTING CONDITIONS.

Cutting tool	Coated carbide tool
Tool geometry	DNMG 1144FN KC9100
Workpiece	AISI 1045 Carbon steel
Cutting speed (m/min)	150, 250, 350
Feed rate (mm/rev)	0.15, 0.18
Depth of cut (mm)	0.5, 1
Chip volume (cm ³)	1,000, 1,500, 2,000



(A) R_a



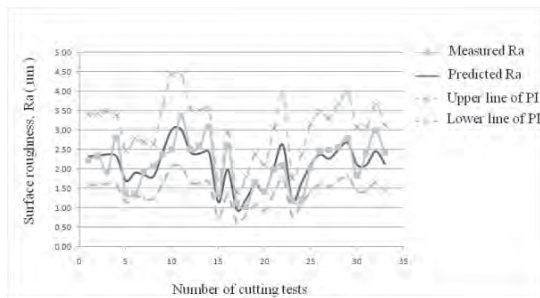
(B) R_z

FIGURE 8. ILLUSTRATION OF THE MEASURED SURFACE ROUGHNESS AND THE PREDICTED SURFACE ROUGHNESS.

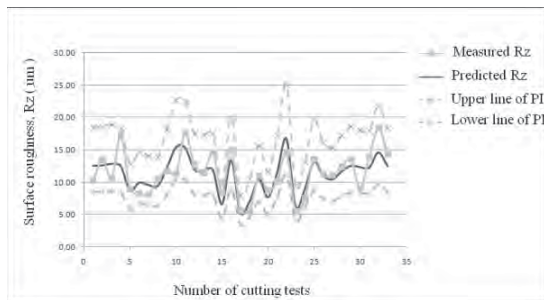
interval of the in-process predicted surface roughness at 95% confident level are shown in Figure 9.

Figure 9 shows that the experimentally measured arithmetic average surface roughness and the in-process predicted surface roughness obtained from Eqs. (9) and (10) are in the 95% prediction interval lines. It is understood that the prediction interval of the in-process surface roughness model can be used to monitor and control the in-process surface roughness during the cutting by referring to the 95% prediction interval lines.

Since the proposed model is developed from the actual cutting data with no any dummy level sets, it can be effectively used to predict the in-process surface roughness for any cutting conditions while the others cannot. It is implied



(A) R_a



(B) R_z

FIGURE 9. ILLUSTRATION OF THE MEASURED SURFACE ROUGHNESS, THE PREDICTED SURFACE ROUGHNESS, AND THE 95% PREDICTION INTERVAL OF THE PREDICTED SURFACE ROUGHNESS.

that the higher cutting performance and the better surface finish can be achieved which leads to the lower production cost and also, the higher production rate by reducing the product defects.

CONCLUSIONS

The in-process monitoring is proposed to measure the cutting forces to predict the in-process surface roughness under various cutting conditions during the cutting.

A cutting force ratio is proposed to predict the in-process surface roughness even though the cutting conditions are changed, which is the ratio of the corresponding time records of the feed force to the main force.

The relations of the surface roughness, the cutting speed, the feed rate, the tool nose radius, the depth of cut, and the cutting force ratio are investigated to develop the in-process surface roughness model. The exponential function is employed to represent the relation of the arithmetic average surface roughness, the surface roughness, which is the ten-point average surface roughness, the cutting force ratio, and the cutting parameters. The multiple

regression analysis has been utilized to calculate the regression coefficients of the in-process prediction of surface roughness model by using the least square method.

It is proved by the cutting experiments that the in-process surface roughness can be predicted and obtained with the high accuracy by using the in-process surface roughness model proposed.

The largest potential advantage of the method proposed here is that the 95% prediction interval of the in-process surface roughness model can be utilized to check and control the in-process surface roughness during the cutting referring to the upper and lower lines of the in-process predicted surface roughness at 95% confident level.

ACKNOWLEDGMENT

This research was performed and supported by The Thailand Research Fund (TRF).

REFERENCES

- Cakir M. C., C. Ensarioglu, and I. Demirayak (2009) "Mathematical models of surface roughness for evaluating the effects cutting parameters and coating materials." *Journal of materials processing technology*, Vol. 209, pp. 102-109
- Choudhury S.H. and G. Bartarya (2003) "Role of temperature and surface finish in predicting tool wear using neural network and design of experiments." *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 747-753
- Davim J. P., V.N. Gaitonde, and S.R. Karnik (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*, Vol. 205, pp. 16-23
- Feng C.X. and X.F. Wang (2003) "Surface roughness predictive modeling: neural networks versus regression." *IIE Transactions*, Vol. 35-1, pp. 11-27
- Ignatov M.G., A.E. Perminov, and E. Yu. Prokof'ev (2008) "Influence of the vertical cutting force on the surface precision and roughness in opposed milling." *Russian Engineering Research*, Vol. 28-9, pp. 864-865

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*, Vol. 206, pp. 167-179

Lee J.H., D.E. Kim, and S.J. Lee (1998) "Statistical analysis of cutting force ratios for flank-wear monitoring." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 74, pp. 104-114

Lu C. (2008) "Study on prediction of surface quality in machining process." *Journal of materials processing technology*, Vol. 205, pp. 439-450

Moriwaki T., T. Shibasaka, and T. Somkiat (2004) "Development of in-process tool wear monitoring system for CNC turning." *International Journal of Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 47-3, pp. 933-938

Nara J. (1969) "Two dimensional Representation of Surface Roughness." *Annals of the C.I.R.P.*, pp. 485-493

Sahin Y. and A.R. Motorcu (2008) "Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool." *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Vol. 26, pp. 84-90

Shiraishi M. (1981) "In-Process Measurement of Surface Roughness in Turning by Laser Beams." *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 103, pp. 203-209

Somkiat T. (2009) "In-Process Investigation of Turning Process Applied with and without Cutting Fluid." *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 6, pp. 85-102

Tlustý J. and G.C. Andrews (1983) "A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining." *CIRP Annals*, pp. 563-572