



การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในกระบวนการกลึง เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L

โดยการออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนิน

A Study on factor affecting surface roughness in turning process of AISI 316L stainless steel by Shainin design of experiment method

ปริมประภา จุลลาบุตดี และ ชาญณรงค์ สายแก้ว*

Primprapa Junlabuddee and Charnnarong Saikaew*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand.

Received February 2014

Accepted May 2014

บทคัดย่อ

ความขรุขระของผิวงานเป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพผิวงานในอุตสาหกรรมการตัดเฉือนโลหะ การเลือกสภาวะในการตัดเฉือนที่เหมาะสมเป็นแนวทางหนึ่งที่ใช้ลดความขรุขระของผิวงาน การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อลดความขรุขระของผิวงานโดยการหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความขรุขระและหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลึงชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม การออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนินถูกใช้ศึกษาผลกระทบของปัจจัย 5 ปัจจัยและใช้หาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความขรุขระของผิวงาน นอกจากนี้ การวิเคราะห์รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์ใช้ในการตรวจสอบความแตกต่างของมีดกลึง ลักษณะเศษงานกลึง และลักษณะผิวชิ้นงานกลึงของสภาวะเดิมและสภาวะที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่า ความเร็วตัดและความลึกในการป้อนเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความขรุขระของผิวงานโดยเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีสภาวะที่เหมาะสมคือ ความเร็วตัด 150 เมตร/นาทีและความลึกในการป้อน 0.8 มิลลิเมตรเป็นสภาวะที่ทำให้สามารถลดความขรุขระของผิวงานลงได้

คำสำคัญ : กระบวนการกลึง เหล็กกล้าไร้สนิม ความขรุขระผิว สภาวะที่เหมาะสม วิธีไชนิน

Abstract

Surface roughness on machined part is a key performance index of surface quality for metal machining industry. Selecting an appropriate machining condition is a way to reduce surface roughness. This study aimed to reduce surface roughness by determining the significant factors affecting surface roughness and to obtain the optimal machining condition in turning operation of a stainless steel machine component. The Shainin design of experiment method was used to investigate the effect of five machining factors and to determine the optimal machining condition of the significant factors on surface roughness. Furthermore, analyses of scanning electron microscope and optical microscope images were used to investigate the differences of cutting tools, chips, and

* Corresponding author.

Email address: pj_toyo@hotmail.com (Junlabuddee, P.), charn_sa@kku.ac.th (Saikaew, C.)

doi: 10.14456/kkuenj.2015.6

surface quality of the machined parts between machining conditions under the existing machining condition and the optimal machining condition. The results showed that cutting speed and depth of cut were the significant factors affecting the average surface roughness with the optimal machining condition at the cutting speed of 150 m/min and the depth of cut of 0.8 mm used for reducing the surface roughness.

Keywords : Turning operation, Stainless steel, Surface roughness, Optimal machining condition, Shainin's method

1. บทนำ

เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเหล็กที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ในด้านการแปรรูปเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และอุปกรณ์ที่ใช้ในทางเคมี อุตสาหกรรมการผลิตอาหาร ยา สิ่งทอ ฯลฯ ซึ่งแต่ละอุตสาหกรรมจะใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกัน เหล็กกล้าไร้สนิมมีสมบัติทนการกัดกร่อน ดีเยี่ยม มีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่นดี ไม่เป็นสนิม ต้านทานการขัดถูแบบเปียกได้ดี [1] บริษัทกรณีศึกษาได้ทำการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ผลิตด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมหลายชนิด ชนิดที่ถูกค่าให้ความสำคัญในเรื่องคุณภาพด้านความขรุขระผิวและขนาดของชิ้นงาน คือ Pump PLF ซึ่งชิ้นงาน Pump PLF เป็นชิ้นส่วนประกอบสำคัญของเครื่องจักรกลในอุตสาหกรรมทางทะเล ที่บริษัทจากประเทศญี่ปุ่นเป็นผู้สั่งผลิต โดยเน้นคุณภาพด้านความขรุขระผิวและขนาดของชิ้นงานเป็นสำคัญ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชิ้นงาน Pump PLF

จากการศึกษาการกลึงขึ้นรูปชิ้นส่วนนี้ พบว่าสภาวะการตัดเฉือนที่บริษัทผู้ผลิตเครื่องมือตัดแนะนำไม่สามารถให้ผลการทำงานได้ตามที่แนะนำ การแก้ไขปัญหาล้วนขึ้นอยู่กับประสบการณ์และความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน ในการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมก่อนการปฏิบัติงานทุกครั้งทำให้การปฏิบัติงานล่าช้า มีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้นในกระบวนการสูง และสิ้นเปลืองเครื่องมือตัด นอกจากนี้

ค่าความขรุขระผิวที่ผลิตได้มีความผันแปรสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น

คุณภาพผิวและความเที่ยงตรงของชิ้นงานเป็นสิ่งที่สำคัญมากในอุตสาหกรรมการผลิตและการขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะ ซึ่งกระบวนการกลึงเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่สำคัญในการตัดขึ้นรูปชิ้นงานให้ได้คุณภาพตามรูปร่างขนาด และค่าความขรุขระของผิวงาน การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยการตัดเฉือนนั้นมีความจำเป็นอย่างมากในกระบวนการตัดเฉือนวัสดุ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง ขนาดชิ้นงานมีความเที่ยงตรง และยังทำให้อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิว และความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงาน ในกระบวนการกลึงขึ้นรูป ได้แก่ ความเร็วตัด ความลึกในการตัด อัตราป้อน อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น และประเภทของการเคลือบมิด เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้เป็นตัวกำหนดค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน และขนาดของชิ้นงาน

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า การหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน เช่น ค่าความขรุขระผิว และขนาดของชิ้นงาน เป็นต้น ในกระบวนการกลึงขึ้นรูปด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ นักวิจัยหลายคนได้เสนอแนวทางหลากหลายวิธีในการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานด้วยการศึกษาอิทธิพลของปัจจัย เช่น Kulkarni [2] ศึกษาปัจจัยในการตัดที่ดีที่สุดในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยไบต์เคลือบผิว PVD โดยใช้วิธีทางสถิติ Sahin and Motorcu [3] พัฒนาสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการกลึงเหล็ก AISI 1050 ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง Ciftci [4] ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิว ในการกลึงเหล็กกล้า

ไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316 โดยใช้เม็ดมีดซีเมนคาร์ไบด์เคลือบผิวแบบ CVD Azouzi [5] ทำการศึกษาการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว และค่าความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน ในงานกลึงโดยวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม อย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านี้มีความยุ่งยากซับซ้อนในการหาสภาวะที่เหมาะสม และต้องทำการทดลองจำนวนมาก ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการทดลองสูง ทำให้ยากต่อการนำไปใช้งานจริง ต่างจากวิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีไซนิน ซึ่งเป็นวิธีการที่มีจำนวนการทดลอง เวลาที่ใช้ ค่าใช้จ่าย และการหยุดกระบวนการผลิตเพื่อทำการทดลองน้อย อีกทั้งไม่มีความซับซ้อนและเข้าใจได้ง่าย [6, 8]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางการปรับปรุงคุณภาพและลดความขรุขระของผิวงานสำเร็จของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L ในกระบวนการกลึงขึ้นรูปด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ โดยศึกษาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมของระดับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดชิ้นงานสำเร็จรูปและผิวงานสำเร็จด้วยวิธีการออกแบบการทดลองด้วยไซนิน

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อลดความขรุขระของผิวงานสำเร็จในกระบวนการกลึง โดยศึกษาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมของระดับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผิวงานสำเร็จในกระบวนการกลึง

3. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และวัสดุ

(1) เครื่องจักร การปฏิบัติการกลึงขึ้นรูปชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเหล็กกล้าไร้สนิมในการวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องกลึงอัตโนมัติ CNC (แสดงดังรูปที่ 2) ยี่ห้อ Haas รุ่น SL 20 ปรับอัตราความเร็วรอบที่ใช้งานได้เท่ากับ 4,000 รอบ/นาที ขนาดมอเตอร์เพลาขับ 20 แรงม้า ที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเครื่องกลึงอัตโนมัติของบริษัทกรณีศึกษา



รูปที่ 2 เครื่องกลึงอัตโนมัติ CNC ยี่ห้อ Haas รุ่น SL20

(2) เครื่องมือวัดความขรุขระผิว ทำการวัดความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) ด้วยเครื่อง Mitutoyo Surf test SJ-210 เป็นเครื่องวัดความขรุขระชนิดเข็มลากผ่านผิวสำเร็จของชิ้นงาน ที่สอบเทียบด้วยแผ่นเทียบผิวมาตรฐาน Mitutoyo Ra 2.94 μm โดยกำหนดระยะ Cut-off length เท่ากับ 0.8 mm และค่า Sampling length เท่ากับ 4 mm (แสดงดังรูปที่ 3)

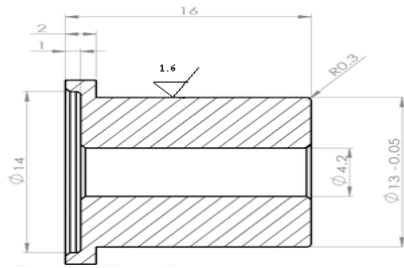


รูปที่ 3 เครื่องวัดค่าความขรุขระผิว ยี่ห้อ Mitutoyo Surf test SJ-210

(3) วัสดุชิ้นงานทดลอง วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L ค่าความแข็ง 80 HRB [7] ที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ของบริษัทกรณีศึกษา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.2 mm มีส่วนผสมดังตารางที่ 1 และมีรูปร่างดังรูปที่ 4 ที่ทำการออกแบบให้ใกล้เคียงกับลักษณะรูปร่างของชิ้นงานที่ทำการผลิตจริง โดยค่าความขรุขระผิวสุดท้ายของชิ้นงานหลังการตัดเฉือนต้องไม่เกิน 1.6 μm

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก AISI 316L

ส่วนผสมทางเคมี (wt%)							
C	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Si
0.03	2.0	17.0	12.0	2.0	0.045	0.03	0.75

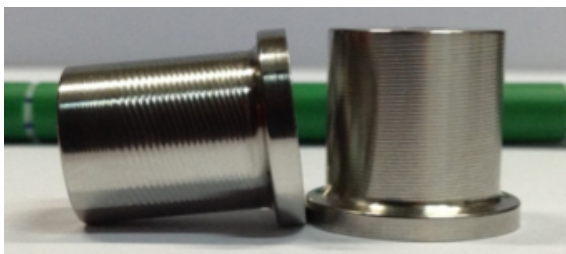


รูปที่ 4 แบบงานตัวอย่างชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

(4) เครื่องมือตัด ใช้ใบมีดคาร์ไบด์เคลือบชนิด TiAlN ผ่านการเคลือบผิวแบบ PVD วัสดุมีมุมมีด $r_e = 0.4$ mm ยี่ห้อ Kyocera ซึ่งบริษัทใช้ในการผลิต และใบมีดคาร์ไบด์เคลือบชนิด Micro columnar TiCN + Al_2O_3 + TiN ผ่านการเคลือบผิวแบบ CVD วัสดุมีมุมมีด $r_e = 0.4$ mm ยี่ห้อ Kyocera

3.2 วิธีการวิจัย

3.2.1 การกำหนดปัญหา เริ่มจากศึกษาปัญหาในด้านคุณภาพการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเหล็กกล้าไร้สนิม โดยการสอบถามข้อมูลวิศวกรที่มีส่วนเกี่ยวข้องของบริษัทกรณีศึกษา จากการสอบถามข้อมูลวิศวกรที่มีหน้าที่รับผิดชอบการกลึงขึ้นรูปชิ้นส่วนเครื่องจักรกลถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการ พบว่าสภาวะการตัดเฉือนที่บริษัทผู้ผลิตเครื่องมือตัดแนะนำมาไม่สามารถให้ผลการทำงานได้ตามที่แนะนำ การแก้ไขปัญหานี้ขึ้นอยู่กับประสบการณ์และความชำนาญของผู้ปฏิบัติงานในการหาสภาวะที่เหมาะสมก่อนการปฏิบัติงานทุกครั้ง ทำให้การปฏิบัติงานล่าช้า มีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้นในกระบวนการสูง และสิ้นเปลืองเครื่องมือตัด นอกจากนี้ ค่าความขรุขระผิวและขนาดของชิ้นงานที่ผลิตได้มีความผันแปรสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น



รูปที่ 5 ลักษณะของชิ้นงานเสีย

3.2.2 การกำหนดปัจจัย การรวบรวมปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตและคุณภาพของชิ้นงาน ซึ่งได้ศึกษาค้นคว้ามาจากการวิจัยหลายเรื่องและการสอบถามข้อมูลจากวิศวกรที่มีส่วนเกี่ยวข้องของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งมีทั้งหมดจำนวน 5 ปัจจัย (แสดงดังตารางที่ 2)

3.2.3 ออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง งานวิจัยนี้ทำการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ ซึ่งมีทั้งหมดจำนวน 5 ตัวแปร และทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนินโดยใช้วิธีการค้นหาตัวแปร (Variable Search) เพื่อหาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของวัสดุ ขั้นตอนของการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองตามหลักการค้นหาตัวแปรของไชนินมี 4 ขั้นตอน [8] ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: Ball park

ขั้นตอนที่ 2: Separation of important and unimportant factors

ขั้นตอนที่ 3: Capping run

ขั้นตอนที่ 4: Factorial analysis

3.2.4 หาสภาวะที่เหมาะสมของระดับปัจจัย ถ้าผลการวิเคราะห์จากวิธีไชนินได้ปัจจัยมากกว่า 1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผิวงานสำเร็จรูป สามารถใช้การออกแบบการทดลอง 2^k factorial design และการเปรียบเทียบพหุคูณในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของระดับปัจจัย [9]

3.2.5 ยืนยันผลการทดลอง ด้วยการกลึงแบบต่อเนื่องที่สภาวะที่เหมาะสมของระดับของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนินโดยใช้วิธีการค้นหาตัวแปร ผู้วิจัยขออธิบายขั้นตอนการออกแบบการทดลองนี้ได้ดังนี้

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไชนิน

จากการรวบรวมปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตและคุณภาพของชิ้นงาน ซึ่งได้ศึกษาค้นคว้ามาจากการวิจัยหลายเรื่องและการสอบถามข้อมูลจากวิศวกรที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งมีทั้งหมดจำนวน 5 ปัจจัยได้แก่ ความเร็วตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed) ความลึกในการป้อน (Depth of cut) อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (Coolant flow rate) และประเภทของการเคลือบเม็ดเม็ด (Coating type) การพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของผิวชิ้นงาน กับตัวแปรทั้ง 5 สามารถกระทำได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนินโดยใช้วิธีการค้นหาตัวแปร เพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผิวงานสำเร็จในกระบวนการกลึง

ขั้นตอนที่ 1 ของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีไชนินโดยใช้วิธีการค้นหาตัวแปรด้วยการกำหนดปัจจัยและค่าระดับของปัจจัย แสดงผลการทดลองในตารางที่ 3 ค่าอัตราส่วน $D/\bar{d}$ สามารถคำนวณได้จากผลการทดลองที่ 1-3 ซึ่งเป็นค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกลึงได้ผลดังนี้

$$\frac{D}{\bar{d}} = \frac{0.642 - 0.511}{[(0.706 - 0.623) + (0.518 - 0.443)]/2} = 1.65$$

ผลการคำนวณได้ค่าอัตราส่วน $D/\bar{d}$ มากกว่า 1.25 ซึ่งถือว่าขั้นตอนนี้ผ่าน และทำการทดลองต่อในขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 ขอบเขตควบคุมจากข้อมูล Green Y (ค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน) ของระดับทั้งสองสามารถคำนวณได้จากสมการ (1) และ (2) ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% ขอบเขตควบคุมบนและล่างของระดับใหม่ [Best Level (+)] สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$CL_B = Median_B \pm 2.776 \left(\frac{\bar{d}}{1.81} \right) \\ = 0.511 \pm 2.776(0.079/1.81) = 0.511 \pm 0.121$$

และขอบเขตควบคุมบนและล่างของระดับเดิม [Marginal Level (-)] สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$CL_M = Median_M \pm 2.776 \left(\frac{\bar{d}}{1.81} \right) \\ = 0.642 \pm 2.776(0.079/1.81) = 0.642 \pm 0.121$$

ค่าเส้นกลาง (Center line) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$CL = \frac{Median_B + Median_M}{2} = \frac{0.642 + 0.511}{2} = 0.576$$

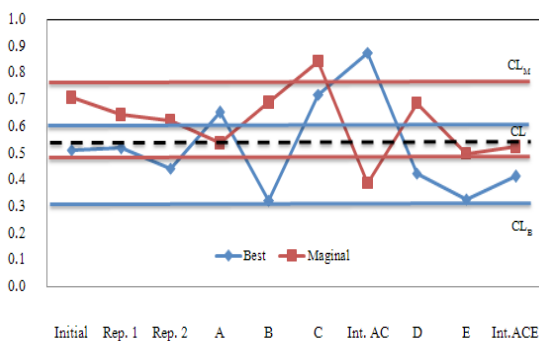
ตารางที่ 3 ปัจจัยและผลการทดลองระดับเดิมและระดับใหม่

ปัจจัย	ระดับเดิม [Marginal level (-)]	ระดับใหม่ [Best level (+)]	หน่วย
A	110	150	m/min
B	0.04	0.06	mm/rev
C	0.5	0.8	mm
D	100%	50%	-
E	TiAlN	TiCN + Al ₂ O ₃ + TiN	-
ผลการทดลองที่ 1	0.706	0.511	μm
ผลการทดลองที่ 2	0.642	0.518	μm
ผลการทดลองที่ 3	0.623	0.443	μm

การสลับเปลี่ยนระดับจากระดับ Best Level เป็น Marginal Level ของปัจจัยแรก ที่คิดว่ามีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานมากที่สุด โดยให้ปัจจัยที่เหลืออยู่ในระดับเดิม แล้วจึงทำการทดลองทุกปัจจัย และทำการทดสอบยืนยันผลของปัจจัยและอิทธิพลร่วมของขั้นตอนที่ 3 ด้วยการสลับเปลี่ยนระดับเหมือนขั้นตอนที่ 2 ผลการสลับเปลี่ยนระดับของปัจจัยอื่นๆ ของขั้นตอนที่ 2 และ 3 แสดงดังตารางที่ 4 และสามารถนำไปแสดงผลดังรูปที่ 7

ตารางที่ 4 ผลการสลับเปลี่ยนระดับของปัจจัยอื่นๆ ของขั้นตอนที่ 2 และ 3

#	Process variation	Ra	Control limit	Result
1	A (+) Others(-)	0.537	0.521-0.763	สำคัญ
2	A (-) Others(+)	0.652	0.390-0.632	
3	B (+) Others(-)	0.688	0.521-0.763	ไม่สำคัญ
4	B (-) Others(+)	0.323	0.390-0.632	
5	C (+) Others(-)	0.841	0.521-0.763	สำคัญ
6	C (-) Others(+)	0.718	0.390-0.632	
7	A (+) C (+) Others(-)	0.387	0.521-0.763	สำคัญ
8	A (-) C (-) Others(+)	0.846	0.390-0.632	
9	D (+) Others(-)	0.685	0.521-0.763	ไม่สำคัญ
10	D (-) Others(+)	0.423	0.390-0.632	
11	E (+) Others(-)	0.497	0.521-0.763	สำคัญ
12	E (-) Others(+)	0.326	0.390-0.632	
13	A (+) C (+) E (+) Others(-)	0.523	0.521-0.763	ไม่สำคัญ
14	A (-) C (-) E (-) Others(+)	0.413	0.390-0.632	



รูปที่ 7 ผลการสลับเปลี่ยนระดับของปัจจัยอื่นๆ ของขั้นตอนที่ 2 และ 3

จากรูปที่ 7 ผลการสลับเปลี่ยนระดับจากระดับ Best Level (+) เป็น Marginal Level (-) ของทุกปัจจัยพบว่า ปัจจัย A, B และ C ระดับทั้งสองของปัจจัยนี้แสดงผลมีแนวโน้มออกนอกขอบเขตควบคุม ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ปัจจัย A และ C เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปัจจัย B ระดับทั้งสองของปัจจัยนี้แสดงผลมีแนวโน้มอยู่ภายในขอบเขตควบคุม ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ปัจจัย B เป็นปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน จากนั้นทำการทดสอบยืนยันผลของปัจจัยและอิทธิพลร่วม ของ AC พบว่า ระดับทั้งสองของปัจจัยนี้แสดงผลมีแนวโน้มเลยผ่านเส้นกลาง (center line) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า อิทธิพลร่วม ของ AC เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้น ดำเนินการทดสอบปัจจัย D และ E พบว่า ปัจจัย D ไม่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน และปัจจัย E มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ แล้วทดสอบยืนยันผลของปัจจัยและอิทธิพลร่วมของ ACE พบว่า ระดับทั้งสองของปัจจัยนี้แสดงผลมีแนวโน้มอยู่ภายในขอบเขตควบคุม ซึ่งชี้ให้เห็นว่า อิทธิพลร่วมของ ACE ไม่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน และชี้ให้เห็นว่า ปัจจัย E ไม่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์หาค่าของตัวแปรสำคัญที่ทำให้ค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุด โดยการหาอิทธิพลหลัก (Main effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาพบว่า เหลือตัวแปรที่สำคัญเพียงสองปัจจัยคือ ปัจจัย A และปัจจัย C โดยนำค่าผลการทดลองกรอกลงตารางเมทริกซ์ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ปัจจัย

	A_B		A_M	
C_B	0.323	0.518	0.652	
	0.423	0.443	0.841	
	0.326	0.846		
	0.511			
	Median	0.443	Median	0.746
C_M	0.537		0.688	0.706
	0.718		0.387	0.642
			0.685	0.623
			0.497	
	Median	0.627	Median	0.642

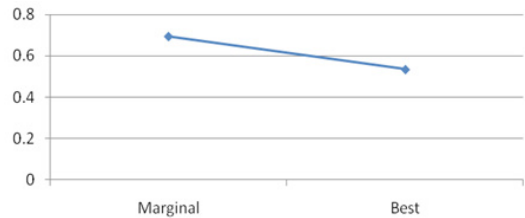
จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้คำนวณหาค่าอิทธิพลหลัก (Main effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ระหว่างปัจจัย A และ C ดังนี้

$$\text{Main Effect A} = \frac{[(0.746 + 0.642) - (0.443 + 0.627)]}{2} = 0.159$$

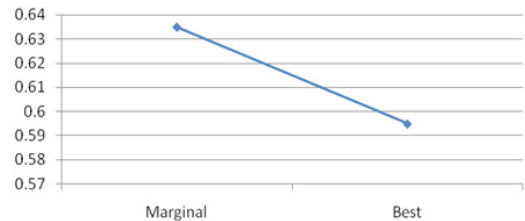
$$\text{Main Effect C} = \frac{[(0.627 + 0.642) - (0.443 + 0.746)]}{2} = 0.04$$

$$\text{AC Interaction} = \frac{[(0.443 + 0.642) - (0.746 + 0.627)]}{2} = 0.144$$

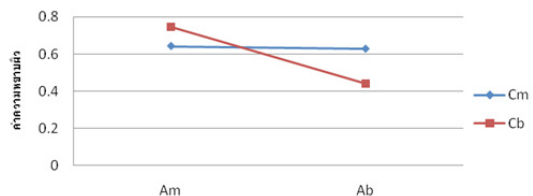
จากตารางวิเคราะห์ปัจจัยสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัย A มีความสำคัญมากที่สุด หรือเรียกว่า Red X เนื่องจากมีค่าจากการคำนวณสูงที่สุดเท่ากับ 0.159 ปัจจัยที่มีความสำคัญอันดับ 2 หรือเรียกว่า Pink X คือ การเกิดอิทธิพลร่วมกันระหว่างปัจจัย A และ C โดยมีผลลัพธ์จากการคำนวณเท่ากับ 0.144 และปัจจัยที่มีความสำคัญอันดับสุดท้าย หรือเรียกว่า Pale pink X คือ ปัจจัย C โดยมีผลลัพธ์จากการคำนวณเท่ากับ 0.04 รูปที่ 8-10 แสดงอิทธิพลของความเร็วตัด ความลึกในการตัด และปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วและความลึกในการตัดต่อค่าความขรุขระผิวตามลำดับ



รูปที่ 8 อิทธิพลของความเร็วตัดต่อค่าความขรุขระผิว



รูปที่ 9 อิทธิพลของความลึกในการตัดต่อค่าความขรุขระผิว



รูปที่ 10 อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วและความลึกในการตัดต่อค่าความขรุขระผิว

งานวิจัยหลายงานเช่นกันที่ให้ผลการวิเคราะห์แตกต่างกันออกไป อาทิเช่น Ciftci [4] ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิว ในการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 316 โดยใช้เม็ดมีดซีเมนคาร์ไบด์เคลือบผิวแบบ CVD โดยใช้เครื่อง Johnford TC CNC กลึงแบบไม่ใช้น้ำหล่อเย็น พบว่าความเร็วตัดมีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ Nalbant [10] ศึกษาปัจจัยในการกลึงที่ทำให้ได้ผิวงานดีที่สุด โดยศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ รัศมีงูมกมิด อัตราป้อน และความลึกในการตัด ซึ่งทำการทดลองด้วยเครื่อง Johnford T35 CNC ใช้มีดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วย TiN กลึงเหล็ก AISI 1030 พบว่า รัศมีงูมกมิดเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความขรุขระผิวมากที่สุด รองลงมาคืออัตราป้อน และความลึกในการตัด ตามลำดับ Davim [11] ศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุด

สำหรับผิวงานสำเร็จในกระบวนการกลึงด้วยการออกแบบการทดลองของทากูชิ พบว่าความเร็วตัดมีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานมากที่สุด รองลงมา คือ อัตราป้อน Mandal [12] สร้างสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวของเหล็ก AISI 4340 ที่ทำการตัดเฉือนด้วยเครื่องจักรความเร็วสูง โดยใช้มีด yttria stabilized zirconia toughened alumina และใช้ central composite design (CCD) ในการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ในการตัด จากสมการที่ได้จากการทดลองพบว่า ความเร็วตัด อัตราป้อน และความเร็วตัดยกกำลังสอง เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวมากที่สุด นอกจากนี้ทำให้ทราบว่าเครื่องมือตัดประเภทนี้สามารถใช้ความเร็วตัดสูงๆ จะให้ผิวงานสำเร็จที่ดี และใช้งานร่วมกับเครื่องจักรความเร็วสูงได้เป็นอย่างดี

จากการศึกษาการทดลองของนักวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผิวชิ้นงานในการกลึงนั้นมาจากหลายปัจจัยด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นความเร็วตัด อัตราป้อน ความลึกในการตัด วัสดุชิ้นงาน น้ำหล่อเย็น และลักษณะเฉพาะของเครื่องจักร เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ให้ผลการทดลองที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา และชี้ให้เห็นว่าอัตราป้อนไม่ได้เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผิวมากที่สุดเสมอไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง ที่กล่าวมาข้างต้นที่ผู้ทดลองจะเลือกมาพิจารณาในการทดลอง และผลของอัตราป้อนในงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการเลือกอัตราป้อนที่ใช้ในการทดลองน้อยกว่าค่าวัสดุมีดคม และอัตราป้อนที่เลือกในแต่ละระดับ มีระดับที่แตกต่างกันไม่มากหรือใกล้เคียงกันเกินไป จึงทำให้อัตราป้อนไม่มีผลกระทบต่อค่าความเรียบผิว

4.2 หาสมการที่เหมาะสมของระดับปัจจัย

จากการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญโดยรวมแล้วพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน คือ ความเร็วตัด (A) ความลึกในการตัด (C) และอิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วตัด (A) และความลึกในการตัด (C) ซึ่งแต่ละปัจจัยจะมีระดับของค่าสมการที่เหมาะสมของปัจจัยอยู่ที่ระดับ Best (+) แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบสมการเดิมและสมการที่เหมาะสม

ปัจจัย	สมการเดิม	สมการที่เหมาะสม
ความเร็วในการตัด (m/min)	110	150
อัตราป้อน (mm/rev)	0.04	0.06
ความลึกในการป้อน (mm)	0.5	0.8
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	100%	100%
ประเภทของสารเคลือบ	TiAlN	TiAlN

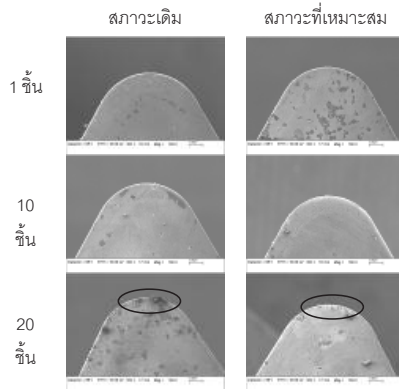
4.3 ยืนยันผลที่สมการที่เหมาะสมของระดับของปัจจัย

การยืนยันผลการทดลองสามารถกระทำได้ด้วย การทดลองกลึงชิ้นงานที่สมการเดิม และสมการที่เหมาะสมสมการละ 10 ชิ้น แล้วนำมาวัดค่าความขรุขระผิว ซึ่งแสดงดังตารางที่ 7 พบว่า ค่าเฉลี่ยความขรุขระผิวของสมการที่เหมาะสมมีค่าความขรุขระผิวน้อยกว่าสมการเดิม

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบผลการวัดค่าความขรุขระผิวของสมการเดิม กับสมการที่เหมาะสม

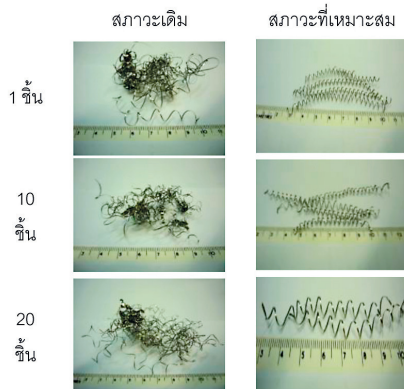
#	สมการเดิม	สมการที่เหมาะสม	#	สมการเดิม	สมการที่เหมาะสม
1	0.598	0.513	6	0.632	0.473
2	0.584	0.485	7	0.679	0.518
3	0.617	0.470	8	0.635	0.502
4	0.625	0.503	9	0.658	0.516
5	0.649	0.480	10	0.693	0.467
เฉลี่ย				0.637	0.493

นอกจากนี้แล้วในการทดลองเพื่อยืนยันผลยังตรวจสอบการสึกหรอของเครื่องมือตัดด้วยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะของการสึกหรอของเครื่องมือตัดเมื่อใช้งานผ่านไปตามระยะเวลาการใช้งานของสมการเดิม และสมการที่เหมาะสม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 11 พบว่า ที่สมการที่เหมาะสม มีดกลึงมีการสึกหรอเร็วกว่าสมการเดิมสืบเนื่องจากการใช้ความเร็วตัด และป้อนลึกมากขึ้น แต่ยังให้ค่าความขรุขระผิวน้อยกว่า

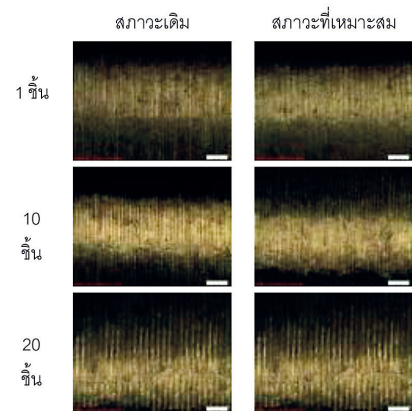


รูปที่ 11 คมตัดของมีดกลึงที่ผ่านการกลึงของสภาวะเดิมและสภาวะที่เหมาะสม

การเปรียบเทียบลักษณะเศษ (Chip) งานกลึงของสภาวะเดิมและสภาวะที่เหมาะสมด้วยกล้องจุลทรรศน์แสดงดังรูปที่ 12 เศษที่เกิดขึ้นที่สภาวะเดิมมีลักษณะหยิกหยอย (Tangle chips) ซึ่งเป็นแบบที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในการตัด เพราะเศษจะเสียดสีผิวหน้าชิ้นงานที่ตัดแล้วอีกครั้งหรือเกิดการพันยุ่งเหยิงกับมีดตัด เกิดอันตรายกับพนักงานที่ปฏิบัติงาน ผลผลิตของการทำงานไม่ดี จะทำให้ผิวชิ้นงานเสียหายและเศษโลหะจะไปรวมและเกาะติดอยู่ที่มุมของมีด [13] ในขณะที่เศษที่เกิดขึ้นที่สภาวะที่เหมาะสมมีลักษณะขด (Helical chips) ซึ่งเป็นแบบที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้ในการตัด ไม่เสียดสีผิวหน้าชิ้นงาน ไม่พันยุ่งเหยิงกับมีดตัด ผลผลิตของการทำงานไม่ทำให้ผิวชิ้นงานเสียหาย [14] รูปที่ 13 แสดงลักษณะผิวชิ้นงานกลึงของสภาวะเดิมและสภาวะที่เหมาะสมซึ่งพบว่า ที่สภาวะที่เหมาะสม ลักษณะของผิวชิ้นงานเรียบมีความขรุขระผิวน้อยกว่าสภาวะเดิม



รูปที่ 12 ลักษณะเศษงานกลึงของสภาวะเดิมและสภาวะที่เหมาะสม



รูปที่ 13 ลักษณะผิวชิ้นงานกลึงของสภาวะเดิมและสภาวะที่เหมาะสม

5. สรุป

ผลการวิเคราะห์การทดลองด้วยวิธีที่ใช้นั้นแสดงให้เห็นว่า ความเร็วตัด และความลึกในการป้อนตัด เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของชิ้นงาน ค่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ความเร็วตัด 150 เมตร/นาที ความลึกในการป้อนตัด 0.8 มิลลิเมตร ทำให้ได้ค่าความขรุขระผิวน้อยลง การยืนยันผลการทดลองกระทำโดยการทดลองกลึงชิ้นงานที่สภาวะเดิม และสภาวะที่เหมาะสมสภาวะละ 10 ชิ้น แล้วนำมาวัดค่าความขรุขระผิว และทำการเปรียบเทียบผล ที่สภาวะที่เหมาะสมทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาการสึกหรบของเครื่องมือตัด ด้วยการส่องด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด เมื่อใช้งานผ่านไปตามระยะเวลาที่แตกต่างกัน และส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อดูผิวของชิ้นงานที่ผ่านการกลึง และลักษณะเศษงานกลึง สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อปรับปรุงคุณภาพผิวชิ้นงานสำเร็จรูปในกระบวนการกลึงชิ้นส่วน Pump PLF ของโรงงานกรณีศึกษาได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนงบประมาณวิจัยโดย ทุนอุดหนุนและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์ ประจำภาคปลาย ปีการศึกษา 2556 มหาวิทยาลัย ขอนแก่น และขอขอบคุณวิศวกรบริษัทผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลแห่งหนึ่งในจังหวัดอุดรธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ในการทดลองในครั้งนี้ ตลอดจนให้ความรู้ในเรื่องลักษณะของเสียที่เกิดขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Asilturk I, Akkus H. Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. *Measurement* 2011;44:1697-704.
- [2] Kulkarni A, Joshi G, Sargade V. Design optimization of cutting parameters for turning of AISI 304 austenitic stainless steel using Taguchi method. *Indian J Eng & Mater Sciences* 2013;20:252-8.
- [3] Sahin Y, Motorcu A. Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool. *Int J Refractory Metal & Hard Mater* 2008;26:84-90.
- [4] Ciftci I. Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools. *Tribology Int* 2006;39:565-9.
- [5] Azouzi R, Guillot M. On-line prediction of surface finish and dimensional deviation in turning using neural network based sensor fusion. *Int J Mach Tools Manufact* 1992;37(9):1201-17.
- [6] Aksu B, Baynal K. Shainin and Taguchi methods and their comparison on an application. *International symposium on computing in science & engineering* 2010.
- [7] ASM hand book volume 1 the metals. 4th ed. ASM International, USA; 1998.
- [8] Bhote K. *World Class Quality: Using Design of Experiments to Make It Happen*. New York: Amacom; 2000.
- [9] Saikaew C. *Statistics and Design of Engineering Experiments*. 2nd ed. Faculty of Engineering Press, Khon Kaen University, Khon Kaen; 2012. (In Thai).
- [10] Nalbant M, Gokkaya H, Sur G. Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Mater & Design* 2007;28:1379-85.
- [11] Davim J. A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. *Journal of Material Processing Technology* 2001;116 :305-8.
- [12] Mandal N, Doloi B, Mondal B. Predictive modeling of surface roughness in high speed machining of AISI 4340 steel using yttria stabilized zirconia toughened alumina turning insert. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 2013;38:40-6.
- [13] Thongjitsitchroen S. *Advanced Manufacturing Engineering*. Chulalongkorn University Press, Bangkok; 2012. (In Thai).