

การพยากรณ์ความชุกของโรคสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าในกระบวนการกลึงที่เย็นซึ่งด้วยวิธีการพื้นผิว  
ผลตอบสนอง

นางสาวศิริวัลย์ จันทร์ผ่อง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS FOR STEEL IN CNC TURNING BY  
RESPONSE SURFACE METHOD

Miss Siriwan Chanphong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพยากรณ์ความชุกของโรคสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าในกระบวนการกลึงที่เย็นขึ้นด้วยวิธีการพ่นผิวผลตบสนอง
โดย	นางสาวศิริวัลย์ จันทร์ผ่อง
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคิก)

ศิริวัลย์ จันทร์ผ่อง : การพยากรณ์ความขรุขระผิวสำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง . (PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS FOR STEEL IN CNC TURNING BY RESPONSE SURFACE METHOD) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสถิตเจริญ, 141 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวสำหรับชิ้นงานในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยเม็ดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อก -เบห์นเคน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยการตัดที่มีผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน แรงตัดและอุณหภูมิในการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุกมิด และเพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยสุดภายในช่วงความขรุขระผิวที่ยอมรับได้สำหรับชิ้นงานที่ใช้ในเครื่องจักรกล คือ ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) ไม่เกิน 3.125 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน JIS B0601(1982) โดยติดตั้งไดนาโมมิเตอร์สำหรับวัดแรงตัด และอินฟาเรดไพโรมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิขณะตัด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและเงื่อนไขการตัด อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้พัฒนาสมการของอัตราส่วนแรงตัดและอุณหภูมิตัดด้วย

จากผลการทดลองอัตราป้อนตัดและรัศมีจุกมิดมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวมากกว่า ความเร็วตัดและความลึกตัด โดยความขรุขระผิวที่ดีขึ้นเกิดจากอัตราป้อนตัดและความลึกตัดน้อยลง ขณะที่รัศมีจุกมิดและความเร็วตัดมากขึ้น สมการพยากรณ์ความขรุขระผิวที่ได้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือในการประมาณความขรุขระผิวด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% เงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุด ที่ให้ความขรุขระผิวน้อยสุด คือ ความเร็วตัดสูงสุด 340 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนต่ำสุด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ระยะลึกตัดต่ำสุด 0.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุกมิดสูงสุด 1.2 มิลลิเมตร

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2554.....

# # 5271453921 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : SURFACE ROUGHNESS / RESPONSE SURFACE METHOD / CUTTING FORCE / CUTTING TEMPERATURE

SIRIWAN CHANPHONG : PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS FOR STEEL IN CNC TURNING BY RESPONSE SURFACE METHOD. ADVISOR : ASSOC. PROF. SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, Ph.D., 141 pp.

The objectives of this research are 1) to develop the surface roughness prediction model in the turning process for the plain carbon steel with the coated carbide tool by utilizing the response surface analysis with the Box-Behnken design; 2) to investigate the effects of cutting parameters such as the cutting speed, the feed rate, the depth of cut and the tool nose radius on the surface roughness, the cutting force and the cutting temperature, and 3) to obtain the optimum cutting condition within the range of 3.125 micrometer Ra referring to JIS B0601(1982). The dynamometer and the infrared pyrometer are employed to measure the in-process cutting force and the in-process cutting temperature, respectively. The cutting force and the cutting temperature are measured to help analyze the relation between the surface roughness and the cutting conditions. However, the models of cutting force ratio and the cutting temperature are also proposed based on the experimental data.

The feed rate and the nose radius have more affected on the surface roughness as compared to the cutting speed and the depth of cut. The improvement of surface roughness is obtained from the decrement in the feed rate and the depth of cut, or an increment in the tool nose radius and the cutting speed. The developed surface roughness model can be effectively used to predict the surface roughness with the 95% confident interval. The optimum cutting condition referring to the minimum surface roughness is the cutting speed of 340 m/min at the feed rate of 0.15 mm/rev, the depth of cut of 0.2 mm and the tool nose radius of 1.2 mm.

Department : ...Industrial Engineering... Student's Signature .....

Field of Study : ...Industrial Engineering... Advisor's Signature .....

Academic Year : .....2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ต้องขอกราบขอบพระคุณ ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสถิตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งเสียสละเวลาคอยพร่ำสอน ให้แนวคิด คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดช่วงการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งตรวจแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่ จนกระทั่งสำเร็จออกมาเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และเนื่องด้วยงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ ท่านรองศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชูติมา ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร และ ท่านรองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกศรี กรรมการสอบ ที่กรุณาให้คำแนะนำที่มีคุณค่ายิ่งในการแก้ไขข้อบกพร่อง ช่วยให้อวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทุกอย่าง แก่ผู้วิจัย จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณพ่อแม่ และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา รวมทั้งขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่คอยช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 กระบวนการตัดเฉือน.....	7
2.2 กระบวนการกลึง.....	8
2.3 เงื่อนไขการตัด.....	9
2.4 เครื่องมือตัด.....	12
2.5 การวิเคราะห์กระบวนการตัดโลหะ.....	14
2.6 แรงในการตัด.....	15
2.7 รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงของการตัด.....	17
2.8 ความเค้นเฉือน.....	18
2.9 คุณหมุมิการตัด.....	18
2.10 ความขรุขระผิว.....	20
2.11 การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม.....	23

2.12 การออกแบบการทดลองแบบพินผิวผลตอบสนอง.....	25
2.13 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	27
2.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA).....	29
2.15 การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast fourier transform).....	32
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.2 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	45
3.4 การพัฒนาสมการพยากรณ์ความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด.....	47
3.5 การออกแบบการทดลองแบบ Box- Behnken Design.....	48
3.6 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	50
3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	58
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	60
4.1 ผลการทดลอง.....	60
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจากการทดลอง....	63
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	64
4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด.....	83
4.5 การวิเคราะห์เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม.....	86
4.6 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง.....	88
4.7 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวและแรงตัดในเชิงความถี่.....	95
4.8 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเศษโลหะและเงื่อนไขการตัด.....	100
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปราย และข้อเสนอแนะ.....	103
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	103
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	104
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย.....	105
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	105
รายการอ้างอิง.....	106



ภาคผนวก.....	110
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการทดลองสำหรับผลต่อต่างๆ.....	111
ภาคผนวก ข ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของการทดลอง สำหรับผลต่อต่างๆ.....	114
ภาคผนวก ค เศษโลหะเจือไนซการตต่างๆ .....	122
ภาคผนวก ง โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์โดเมนเวลาและโดเมนความถี่และผล การวิเคราะห์ข้อมูล.....	127
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	141

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบ็นเคน.....	28
ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	31
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกลของเหล็ก S45C.....	42
ตารางที่ 3.2 ขนาดเม็ดเม็ดที่ใช้ในการทดลอง.....	43
ตารางที่ 3.3 ระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	49
ตารางที่ 3.4 เมตริกซ์การออกแบบการทดลอง.....	49
ตารางที่ 3.5 รูปแบบการเก็บข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุด.....	52
ตารางที่ 3.6 รูปแบบการเก็บข้อมูลแรงตัด.....	54
ตารางที่ 3.7 รูปแบบการเก็บข้อมูลอุณหภูมิตัด.....	56
ตารางที่ 4.1 เมตริกซ์ของการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็นเคน 4 ปัจจัย และผลตอบสนอง.....	61
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของผลตอบระหว่าง Ra กับ Rz.....	63
ตารางที่ 4.3 ค่าประมาณพารามิเตอร์ของการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra).....	65
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra).....	67
ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแบบถดถอยสำหรับความขรุขระผิวเฉลี่ย...	68
ตารางที่ 4.6 ค่าประมาณพารามิเตอร์ของการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับอัตราส่วนแรงตัด(Fy/Fz).....	71
ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอัตราส่วนแรงตัด (Fy/Fz).....	74
ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแบบถดถอยสำหรับอัตราส่วนแรงตัด.....	74
ตารางที่ 4.9 ค่าประมาณพารามิเตอร์ของการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับอุณหภูมิตัด....	77
ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอุณหภูมิตัด.....	79
ตารางที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแบบถดถอยสำหรับอุณหภูมิตัด.....	80
ตารางที่ 4.12 เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม.....	87
ตารางที่ 4.13 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผล.....	91

## สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปแบบพื้นฐานของกระบวนการตัด.....	7
รูปที่ 2.2 ลักษณะงานที่สร้างขึ้นจากการกลึง.....	8
รูปที่ 2.3 ความเร็วตัดในการกลึง.....	10
รูปที่ 2.4 ลักษณะทางเรขาคณิตของการกลึงงานรูปทรงกระบอก.....	11
รูปที่ 2.5 รูปทรงเรขาคณิตของมีดตัด.....	13
รูปที่ 2.6 แบบจำลองของการตัด.....	14
รูปที่ 2.7 สภาวะความเค้นที่จุดต่างๆบนกราฟความเค้น - ความเครียด.....	14
รูปที่ 2.8 ระบบแรงบนคมตัดของการตัดฉาก.....	15
รูปที่ 2.9 ระบบแรงเสียดทาน.....	16
รูปที่ 2.10 ระบบของแรงเฉือน.....	16
รูปที่ 2.11 รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงและวิธีการสร้าง.....	17
รูปที่ 2.12 การกระจายความร้อนในบริเวณตัด.....	19
รูปที่ 2.13 สัดส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นขณะตัด.....	19
รูปที่ 2.14 ลักษณะของความเรียบผิวสำเร็จ.....	21
รูปที่ 2.15 การตัดด้วยมีดตัดที่มีรัศมีจุมุมมีดที่เป็นแบบเหลี่ยม.....	21
รูปที่ 2.16 การตัดด้วยมีดตัดที่มีรัศมีจุมุมมีดที่เป็นแบบมน.....	21
รูปที่ 2.17 Ra (Arithmetic mean surface roughness).....	23
รูปที่ 2.18 Rt Rz และ Rz1max.....	23
รูปที่ 2.19 RSm.....	23
รูปที่ 2.20 รูปแบบระบบการทดลองทั่วไป.....	25
รูปที่ 2.21 พื้นผิวผลตอบสนองแบบสามมิติ.....	26
รูปที่ 2.22 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนอง.....	27
รูปที่ 2.23 รูปแบบทางเรขาคณิตสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	28
รูปที่ 2.24 (a)ข้อมูลเทียบในโดเมนเวลา (b)ข้อมูลเทียบในโดเมนความถี่.....	32
รูปที่ 2.25 ข้อมูลที่ไม่มีรูปแบบแน่นอน.....	32
รูปที่ 3.1 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	42

รูปที่ หน้า

รูปที่ 3.2	เม็ดมีดที่ใช้ในการทดลอง.....	43
รูปที่ 3.3	เครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ใช้ในการทดลอง.....	43
รูปที่ 3.4	ไดนาโมมิเตอร์.....	44
รูปที่ 3.5	ชาร์จแอมพลิไฟเออร์.....	44
รูปที่ 3.6	ออสซิลโลสโคป.....	44
รูปที่ 3.7	อินฟาเรดไพโรมิเตอร์.....	45
รูปที่ 3.8	เครื่องวัดความขรุขระผิว.....	45
รูปที่ 3.9	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง.....	47
รูปที่ 3.10	การคำนวณแรงตัดสถิติ.....	51
รูปที่ 4.1	กราฟความสัมพันธ์ของค่า Ra กับ Rz.....	64
รูปที่ 4.2	Normal Probability Plot ของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย.....	69
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ยกับลำดับการทดลอง....	70
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตสำหรับค่าความ ขรุขระผิวเฉลี่ย.....	70
รูปที่ 4.5	Normal Probability Plot ของข้อมูลอัตราส่วนแรงตัด.....	75
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลอัตราส่วนแรงตัดกับลำดับการทดลอง.....	76
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตสำหรับค่าอัตราส่วน แรงตัด.....	76
รูปที่ 4.8	Normal Probability Plot ของข้อมูลอุณหภูมิตัด.....	81
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลอุณหภูมิตัดกับลำดับการทดลอง.....	82
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตสำหรับค่า อุณหภูมิตัด.....	82
รูปที่ 4.11	พื้นผิวผลตอบสำหรับความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด.....	83
รูปที่ 4.12	(a) มุมคมตัดด้านข้าง (b) มุมคมตัดด้านข้างเล็กเมื่อรัศมีจุมมีดใหญ่ (c) มุมคมตัดด้านข้างโตเมื่อรัศมีจุมมีดเล็ก.....	84
รูปที่ 4.13	เส้นโครงร่างสำหรับความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด.....	85
รูปที่ 4.14	(a) ค่าความขรุขระผิวจากการทดลองกับค่าความขรุขระผิวจากสมการ แบบจำลองที่อัตราป้อนตัดต่างๆ (b) ค่าความขรุขระผิวจากการทดลองกับค่า ความขรุขระผิวจากสมการแบบจำลองที่ความลึกตัดต่างๆ (c) ค่าความขรุขระ	

ผิวจากการทดลองกับค่าความขรุขระผิวจากสมการแบบจำลองที่ขนาดรัศมี จุ่มกมิตต่างๆ.....	92
รูปที่ 4.15 (a) อัตราส่วนแรงตัดจากการทดลองกับอัตราส่วนแรงตัดจากสมการแบบ จำลองที่อัตราป้อนตัดต่างๆ (b) อัตราส่วนแรงตัดจากการทดลองกับอัตราส่วน แรงตัดจากสมการแบบจำลองที่ความลึกตัดต่างๆ (c) อัตราส่วนแรงตัดจากการ ทดลองกับอัตราส่วนแรงตัดจากสมการแบบจำลองที่ขนาดรัศมีจุ่มกมิตต่างๆ ....	93
รูปที่ 4.16 (a) คุณหมุมิตัดจากการทดลองกับคุณหมุมิตัดจากสมการแบบจำลองที่อัตรา ป้อนตัดต่างๆ (b) คุณหมุมิตัดจากการทดลองกับคุณหมุมิตัดจากสมการแบบ จำลองที่ความลึกตัดต่างๆ (c) คุณหมุมิตัดจากการทดลองกับคุณหมุมิตัดจาก สมการแบบจำลองที่ขนาดรัศมีจุ่มกมิตต่างๆ .....	94
รูปที่ 4.17 ลักษณะความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นในระยะทาง 1.5 มิลลิเมตร.....	95
รูปที่ 4.18 การตัดชิ้นงานด้วยอัตราป้อนตัดที่ 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ.....	95
รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา.....	97
รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนเวลา.....	98
รูปที่ 4.21 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนความถี่.....	99
รูปที่ 4.22 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่.....	99
รูปที่ 4.23 เศษโลหะจากเงื่อนไขการตัด (a) 180_0.15_0.4_0.8 (b) 180_0.25_0.4_0.8...	100
รูปที่ 4.24 เศษโลหะจากเงื่อนไขการตัด (a) 260_0.15_0.2_0.8 (b) 260_0.15_0.6_0.8...	101
รูปที่ 4.25 เศษโลหะจากเงื่อนไขการตัด (a) 180_0.2_0.4_0.4 (b) 180_0.2_0.4_1.2.....	101
รูปที่ 4.26 เศษโลหะจากเงื่อนไขการตัด (a) 180_0.2_0.4_1.2 (b) 340_0.2_0.4_1.2.....	102

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สภาวะแวดล้อมของธุรกิจที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลา ทุกกิจการต่างดิ้นรนเพื่อเอาตัวรอดจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมการผลิตที่ต่อสู้กันด้วยต้นทุน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำให้ระบบการผลิตนั้นมีความสามารถในการแข่งขันได้ ดังนั้นแนวโน้มระบบการผลิตที่คาดหวังว่าจะมารองรับการเปลี่ยนแปลงนี้จะต้องเป็นระบบการผลิตที่สามารถตอบสนองความต้องการที่หลากหลายได้ มีลักษณะที่คล่องแคล่ว รวดเร็ว มีความเป็นอัจฉริยะ ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง เกิดการมีส่วนร่วมกันระหว่างผู้ซื้อและผู้ผลิต และมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หรืออาจเรียกระบบการผลิตนี้ว่าระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing Systems: IMS) ซึ่งสามารถทำงาน ควบคุม และตรวจสอบตัวเองได้ เครื่องจักรกลอัจฉริยะจึงมีบทบาทสำคัญเพื่อตอบสนองต่อระบบการผลิตอัจฉริยะนี้ ความเป็นอัจฉริยะในตัวเองนั้นอาศัยเทคโนโลยีเซนเซอร์และเทคโนโลยีการตรวจติดตาม เพื่อให้สามารถรับรู้สารสนเทศที่เกี่ยวกับสถานะของระบบและทำให้เกิดการปรับปรุงเพื่อให้เกิดกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดและควบคุมได้ ทั้งนี้ก็เพื่อให้ต้นทุนการผลิตต่ำสุด เพิ่มอัตราผลิตภาพ และลดของเสีย [1]

การผลิตชิ้นส่วนจักรกลต่างๆไม่ว่าจะเป็น เฟือง เพลา ข้อต่อส่งกำลัง หรืออุปกรณ์ทางกลต่างๆที่ใช้โลหะเป็นส่วนประกอบ มักใช้เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ซึ่งมีคุณสมบัติที่มีความแข็งแรงสูง ค่อนข้างเหนียว และทนทานต่อการเสียดสีได้ดี เป็นวัสดุดีในการผลิตชิ้นส่วนดังกล่าว และตัดขึ้นรูปโดยการกำจัดเนื้อโลหะที่ไม่ต้องการออกเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการ โดยกรรมวิธีการตัดขึ้นรูปนั้นมีหลายวิธี ซึ่งการกลึงก็เป็นกรรมวิธีหนึ่งที่สำคัญในการตัดขึ้นรูปชิ้นงานผิวสำเร็จเนื่องจากให้ความละเอียดและความแม่นยำสูง ในการผลิตชิ้นงานที่มีความสมมาตรรอบแกนหมุน [2] อย่างไรก็ตามการผลิตชิ้นส่วนดังกล่าวก็ล้วนต้องการให้ชิ้นส่วนนั้นมีคุณสมบัติในการรับแรง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และเป็นที่รู้กันดีว่าความขรุขระผิวมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติของชิ้นงาน เช่น พฤติกรรมการล้า ความต้านทานต่อการกัดกร่อน อายุความคืบ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน อัตราการสึกหรอ การสะท้อนแสง การถ่ายเทความร้อน ความหล่อลื่น และ ค่าการนำไฟฟ้า เป็นต้น [3,4,5,6] เช่นชิ้นงานที่มีความขรุขระผิวมากก็ย่อมส่งผลให้ชิ้นงานมีอัตราการกัดกร่อน การสึกหรอ รวมทั้งสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมากกว่าชิ้นงานที่มีความขรุขระผิวน้อยกว่า ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการรับแรงและอายุการใช้งานของ

ชิ้นงานนั้น ส่วนชิ้นงานที่เป็นงานละเอียดต้องการความแม่นยำสูงอย่างงานสวมประกอบ และยัง  
เป็นชิ้นงานที่มีขนาดเล็กระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรด้วยแล้ว ความขรุขระผิวก็ยังมีผลกระทบ  
อย่างมาก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความขรุขระผิวเป็นตัววัดที่สำคัญตัวหนึ่งในการวัดคุณภาพผิวชิ้นงาน

ความขรุขระผิวเกิดจากปัจจัยในการตัดหลายอย่างซึ่งสามารถจำแนกได้ 4 อย่างหลัก คือ  
ปัจจัยจากเงื่อนไขการตัด เช่น อัตราป้อนตัด ความเร็วตัด ระยะป้อนลึก ปัจจัยของมีดตัด เช่น เนื้อ  
วัสดุของมีด รัศมีจุมมีด รูปร่างของมีด ปัจจัยของชิ้นงาน เช่น เนื้อวัสดุ ขนาดชิ้นงาน และปัจจัยที่  
เกิดขึ้นจากธรรมชาติของการตัด เช่น ความสั่นสะเทือน การเกิดรูปร่างของเศษโลหะ เป็นต้น  
[7,8,9] แต่ละปัจจัยจะส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวที่ต่างกันไป เช่น ถ้าอัตราป้อนตัดมากจะส่งผลให้  
ความขรุขระผิวมาก ขณะที่อัตราป้อนตัดน้อยจะให้คุณภาพผิวที่ดีกว่าแต่ใช้เวลาในการตัด  
มากกว่า ในทำนองเดียวกันมีดตัดที่มีรัศมีจุมมีดที่น้อยจะส่งผลให้ความขรุขระผิวแยกว่ารัศมีจุมมีด  
มีดที่มากกว่า แต่การใช้รัศมีจุมมีดมากเกินไปก็ทำให้เกิดแซตเตอร์ซึ่งส่งผลให้ความขรุขระผิวมาก  
ได้เช่นกัน [2,10] เหล่านี้เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้โดยตรง ส่วนพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นภายใน  
กระบวนการ อย่างเช่น แรงตัด ความสั่นสะเทือน อุณหภูมิ เสียง เป็นพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นจริงใน  
กระบวนการตัด แต่อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการที่สามารถวัดได้ด้วย  
เทคโนโลยีเซนเซอร์ สามารถให้สารสนเทศที่เกี่ยวกับสถานะของกระบวนการได้ถึงทุกขณะตัด  
ดังนั้นจึงเป็นประโยชน์ในการใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการตัดที่มีต่อความขรุขระผิว  
ของชิ้นงานในขณะตัด แรงตัดซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการสามารถวัดได้ด้วย  
เครื่องวัดไดนาโมมิเตอร์ และที่สำคัญมีความสัมพันธ์กับความขรุขระผิวของชิ้นงาน โดยความ  
ขรุขระผิวที่ดีคาดว่าจะเกิดจากเมื่อแรงตัดน้อยและอุณหภูมิเหมาะสม แรงตัดน้อยลงเมื่อตัดเนื้อ  
วัสดุของชิ้นงานที่อ่อนนุ่ม ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิตัดที่สูงอย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตามความขรุขระผิว  
มากคาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อแรงตัดที่มาก และอุณหภูมิไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดความสั่นสะเทือน ซึ่ง  
ความสั่นสะเทือนที่มากก็จะส่งผลให้ความขรุขระผิวมากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามแรงป้อนตัด  
( $F_y$ ) มีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวมากที่สุด และแรงตัดหลัก ( $F_z$ ) ได้รับอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัด  
[11] ดังนั้นแรงตัดจำเป็นต้องทำให้สามารถใช้ได้ทั่วไปไม่ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนไปโดยการทำให้  
เป็นอัตราส่วน ส่วนอุณหภูมิตัดเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความร้อนที่เกิดขึ้นบนหน้าสัมผัสระหว่าง  
มีดตัดและชิ้นงานขณะตัด สามารถวัดได้ด้วยเครื่องวัดอินฟราเรดไพโรมิเตอร์ อุณหภูมิที่สูงจะช่วย  
ให้เนื้อโลหะอ่อนนุ่มขึ้น ทำให้ตัดง่ายขึ้น เนื่องจากใช้แรงน้อย จึงทำให้ได้ความขรุขระผิวที่ดี [10]  
ด้วยความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถนำแรงตัดและอุณหภูมิตัดเป็นพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์

ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดต่างๆที่มีต่อความขรุขระผิวของชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันไป

เป้าหมายหลักอย่างหนึ่งของกระบวนการผลิตทั้งหลายก็คือ การผลิตให้ได้อัตราผลิตภาพมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เช่นเดียวกับกระบวนการตัดขึ้นรูปโลหะ การกำจัดเนื้อโลหะที่ไม่ต้องการออกจะส่งผลต่ออุณหภูมิตัด หากเพิ่มความเร็วตัดในการกำจัดเนื้อโลหะเร็วขึ้น ก็จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นตาม อย่างไรก็ตามอุณหภูมิมีผลต่อการสึกหรอของมีดตัด และการสึกหรอของมีดตัดนี้เองจะส่งผลให้คุณภาพผิวชิ้นงานไม่เป็นไปตามข้อกำหนด ด้วยเหตุนี้กลับทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นและอัตราผลิตภาพลดลง[12,13,14] ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วจึงใช้สารหล่อเย็นในแก้ปัญหาข้างต้น เพื่อลดอัตราการสึกหรอเนื่องจากความร้อนและความเสียดทานในบริเวณที่มีดและชิ้นงานสัมผัสกัน ซึ่งจะช่วยให้อายุการใช้งานของมีดให้นานขึ้นและลดผลกระทบที่มีต่อความขรุขระผิว อย่างไรก็ตามการใช้สารหล่อเย็นก็ไม่ใช่ว่าดีที่สุดที่สุด เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นสำหรับสารหล่อเย็น การบำรุงรักษาระบบหล่อเย็น และการบำบัดสารหล่อเย็น ยิ่งไปกว่านั้นสารหล่อเย็นยังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของผู้ปฏิบัติการอีกด้วย ด้วยเหตุนี้การกำจัดเนื้อโลหะที่ไม่ต้องการออกโดยไม่ใช้สารหล่อเย็นหรือการตัดแบบแห้ง โดยใช้เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุด นอกจากนี้ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย [10,15]

อย่างไรก็ตามการกำหนดเงื่อนไขการตัดในปัจจุบันยังเป็นการอิงจากประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติการ หรืออ้างอิงจากคู่มือ [16] ซึ่งในสภาพการตัดที่เกิดขึ้นจริงมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย และแตกต่างกันไปดังนั้นวิธีการเลือกเงื่อนไขการตัดที่เป็นอยู่ก็อาจจะยังไม่ได้ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ในทำนองเดียวกันกับทฤษฎีความขรุขระผิวเฉลี่ย ( $R_a$ ) ในสมการที่ 1.1-1 หรือความขรุขระผิวสูงสุด ( $R_z$ ) ในสมการที่ 1.1-2 เป็นการคำนวณตามหลักรูปทรงเรขาคณิตเท่านั้น ซึ่งพิจารณาแค่สองตัวแปร คือ อัตราป้อน ( $f$ ) และรัศมีงูมมีด ( $r_c$ ) ยังไม่รวมอิทธิพลอื่นๆที่เกิดขึ้นจากการตัดจริงเช่น ความสั่นสะเทือนของมีด และการเกิดรูปร่างของเศษโลหะ ซึ่งมีผลให้ความแม่นยำน้อยไม่เพียงพอในการประมาณความขรุขระผิว [17,18]

$$R_a = \frac{f^2}{32r_c} \quad (1.1-1)$$

$$R_z = \frac{f^2}{8r_c} \quad (1.1-2)$$

ดังนั้นจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้เลือกปัจจัยการตัดที่คาดว่าจะส่งผลต่อความขรุขระผิวมาพิจารณาแตกต่างกันเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลที่มีต่อความขรุขระผิว และนำไปพัฒนาแบบจำลองใน



การประมาณความขรุขระผิว จากงานวิจัยข้างต้นสามารถจำแนกลักษณะการศึกษาได้สองประเภทคือ งานวิจัยที่ศึกษาเฉพาะปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ เช่น ความเร็วตัด อัตราการป้อน ความลึกตัด รัศมีงูมมิต มุมในการตัด ความแข็งของเนื้อวัสดุชิ้นงาน เป็นต้น [5,16,17,18,19,20,21,22] และงานวิจัยที่ศึกษาทั้งปัจจัยที่สามารถควบคุมได้และพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ เช่น แรงตัด อุณหภูมิ ความสั่นสะเทือน เป็นต้น [3,10,14,23,24,25] มาช่วยในการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามการพิจารณาพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการด้วยสามารถอธิบายลักษณะการเกิดความขรุขระผิวได้ดีกว่า ซึ่งจากงานวิจัยของสมชาติ [23] ได้มีการพัฒนาสมการแบบจำลองการพยากรณ์ความขรุขระผิวโดยใช้เซนเซอร์แรงและอุณหภูมิร่วมในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดและความขรุขระผิว อย่างไรก็ตามในการพิจารณาปัจจัยการตัดนั้นมีการพิจารณาแค่สามตัวแปร คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัด จะเห็นได้ว่ายังขาดปัจจัยที่สำคัญอีกอย่าง คือ รัศมีงูมมิต ซึ่งปรากฏตามทฤษฎีความขรุขระผิว จึงควรต้องได้รับการพิจารณา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกปัจจัยในการตัดสี่อย่าง คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีงูมมิต เพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีต่อความขรุขระผิว แรงตัด และอุณหภูมิตัด และนำมาพัฒนาสมการแบบจำลอง เพื่อใช้ในการหาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยสุด

ในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ความขรุขระผิวมีหลากหลายวิธีการ เช่น พัฒนาจากทฤษฎีการตัด พัฒนาจากการสังเกตการทดลอง พัฒนาจากการออกแบบการทดลอง และพัฒนาจากแนวทางของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence; AI) [7] วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface method) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้การออกแบบการทดลองในการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยนำเข้าที่มีต่อผลตอบ พร้อมทั้งพัฒนาแบบจำลองและหาระดับของปัจจัยนำเข้าที่ให้ผลตอบที่ดีที่สุด อีกทั้งยังให้ความแม่นยำอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และเป็นที่ทราบกันดีว่าทฤษฎีความขรุขระผิวนั้นมีลักษณะความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการออกแบบการทดลองด้วยระดับปัจจัยอย่างน้อยสามระดับจึงถูกพิจารณาซึ่งก็มีหลายแบบ เช่น บ็อก - เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) แฟคทอเรียลที่มีระดับของปัจจัยสามระดับ ( $3^k$  Factorial design) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการออกแบบการทดลองแบบบ็อก - เบห์นเคน ถูกเลือกประยุกต์ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากให้จำนวนการทดลองที่น้อยกว่า และมั่นใจได้ว่าดำเนินการทดลองอยู่ในช่วงที่ปลอดภัย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อก - เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ในการสร้างสมการแบบจำลองที่แสดง

ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการตัดสี่อย่าง คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมี จมูกมีด กับความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด สำหรับช่วยวิเคราะห์ความขรุขระผิว โดยกำหนดให้ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) ต้องไม่เกิน 3.125 ไมโครเมตร หรือความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) ต้องไม่เกิน 12.5 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน JIS B0601(1982) และงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ เซนเซอร์แรงและเซนเซอร์อุณหภูมิ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัด ต่างๆที่มีต่อความขรุขระผิวของชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันไป และหาเงื่อนไขการ ตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยสุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาสมการแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัด กับความ ขรุขระผิว แรงตัด และอุณหภูมิตัด สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ความขรุขระผิว
2. เพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยสุดสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน S45C กับมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว ภายในช่วงค่าที่ทำการทดลอง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. กระบวนการกลึงปอกโดยเป็นการตัดแบบแห้ง ( Dry Cutting) บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี ยี่ห้อ Mazak รุ่น NEXUS 200MY/MSY
2. วัสดุชิ้นงานในการกลึงเป็น เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เริ่มต้นที่ 70 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร
3. เม็ดมีดตัดที่ใช้เป็นแบบคาร์ไบด์เคลือบผิว (Coated Carbide) เบอร์ KC9110
4. ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง คือ
  - ความเร็วตัด : 180 240 และ 340 เมตรต่อนาที
  - อัตราป้อนตัด : 0.15 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ
  - ความลึกตัด : 0.2 0.4 และ 0.6 มิลลิเมตร
  - รัศมีจมูกมีด : 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร
5. เซนเซอร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้
6. เซนเซอร์วัดแรง (3-Component Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9121
7. เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared Thermometer) ยี่ห้อ Raytek รุ่น RAYFA2BCF13
8. ตัวชี้วัดผลลัพธ์วัดจาก ความขรุขระผิวชิ้นงาน แรงตัด และอุณหภูมิตัด

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สมการแบบจำลองที่แสดง
  - ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดกับความขรุขระผิว
  - ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดกับแรงตัด
  - ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดกับอุณหภูมิตัด
 สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ความขรุขระผิว
2. เงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยที่สุดสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน S45C กับมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว ภายในช่วงค่าที่ทำการทดลอง

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มอัตราผลิตภาพของกระบวนการกลึง เพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และลดของเสีย
2. เพิ่มประสิทธิภาพเครื่องกลึงซีเอ็นซี เพื่อรองรับระบบการผลิตอัจฉริยะในอนาคต
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการตรวจติดตามความขรุขระผิวในขณะตัด

#### 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

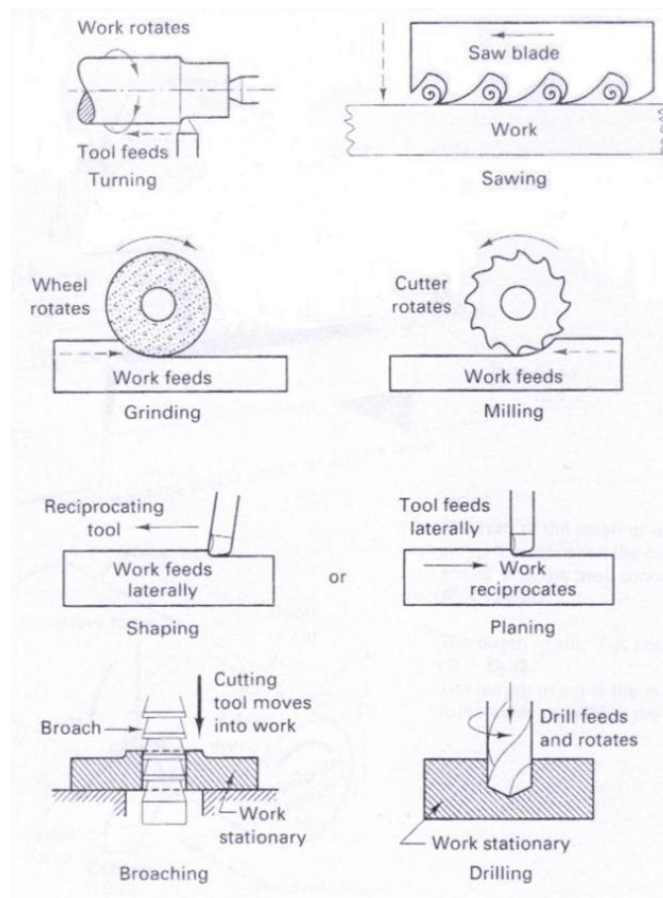
1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งศึกษาปัจจัยในกระบวนการกลึงที่คาดว่าจะมีผลต่อผิวชิ้นงาน
2. ศึกษาเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง วิธีการติดตั้งอุปกรณ์ การเก็บข้อมูลสำหรับแรงตัดและอุณหภูมิตัด รวมถึงการใช้งานพื้นฐานสำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซี
3. กำหนดช่วงค่าแต่ละปัจจัยและออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคน
4. ทำการทดลองตามแผนการทดลอง
5. วัดแรงตัด อุณหภูมิตัด และความขรุขระผิวของชิ้นงาน
6. วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง เพื่อหาสมการแบบจำลองและหาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยที่สุด
7. ทดสอบสมการแบบจำลองพหุนามกำลังสอง เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของสมการแบบจำลองในการประมาณความขรุขระผิว
8. สรุปผลการดำเนินการวิจัยและข้อเสนอแนะ
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการตัดเฉือน (Machining Process) [26]

กระบวนการตัดเฉือน (Machining Process) หมายถึงกระบวนการผลิตที่ใช้เครื่องมือตัดหรือมีดตัด (Cutting tool) ในการกำจัดเนื้อวัสดุส่วนเกินออกจากชิ้นงานวัตถุดิบให้เหลือส่วนที่มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ เป็นกรรมวิธีในการผลิตชิ้นงานที่สำคัญที่สุดวิธีหนึ่ง ซึ่งมีประวัติย้อนหลังไปถึงยุคก่อนประวัติศาสตร์ เช่น มีด หรือขวานที่ทำจากหิน ก็ถือกำเนิดจากกรรมวิธีนี้เช่นกัน ซึ่งถ้าชิ้นงานเป็นโลหะแล้ว กระบวนการนั้นมักจะถูกรับเรียกว่ากระบวนการตัดโลหะ หรือกระบวนการกำจัดโลหะ (Metal removal Process) หมายถึง กรรมวิธีการผลิตที่กำจัดเอาเนื้อโลหะส่วนที่ไม่ต้องการออกจากชิ้นงานวัตถุดิบให้เหลือส่วนที่ต้องการใช้งาน โดยใช้เครื่องมือตัดและเครื่องมือกล (Machine tool)

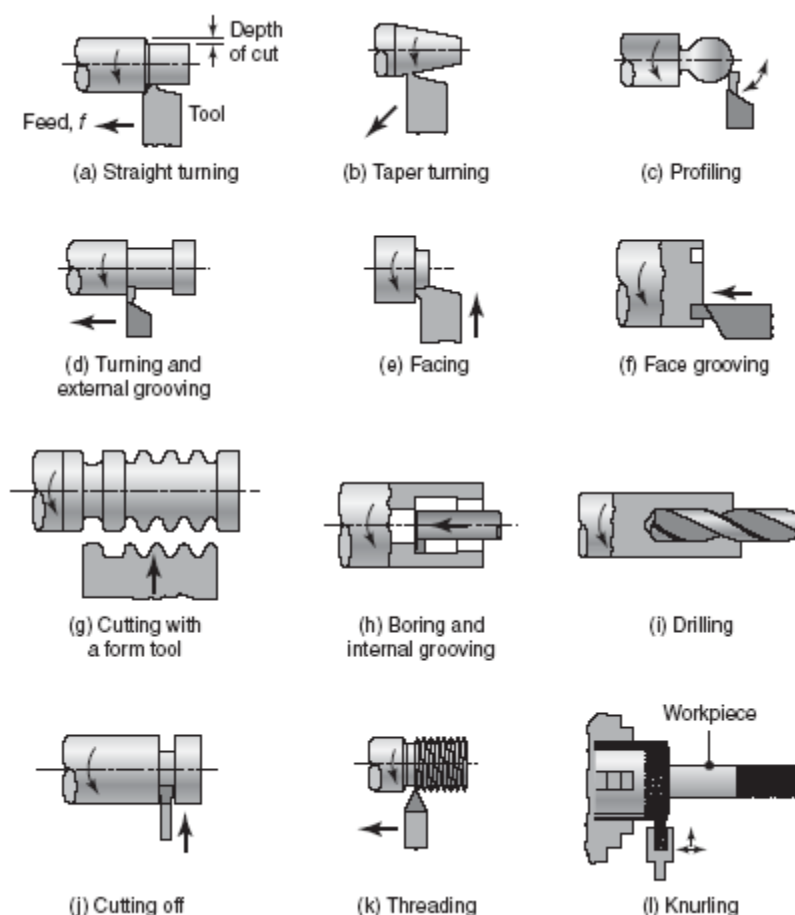


รูปที่ 2.1 รูปแบบพื้นฐานของกระบวนการตัด [27]

โดยกระบวนการตัดจะประกอบไปด้วย 3 กระบวนการหลักๆ คือ การกลึง การเจาะ และ การกัด ดังรูปที่ 2.1 ส่วนกระบวนการตัดอื่นๆ นั้นประกอบไปด้วยการไส (Shaping) การไสยาว (Planing) การแทงขึ้นรูป (Broaching) และการเลื่อย (Sawing) รวมถึงกระบวนการที่ใช้ผงขัด (Abrasive) ในการกัดเนื้อวัสดุออก เช่น การเจียรระไน (Grinding)

## 2.2 กระบวนการกลึง (Turning) [26]

การกลึงเป็นกระบวนการสร้างผิวหน้าใหม่ด้วยการกำจัดเนื้อวัสดุที่ไม่ต้องการออกจากพื้นผิวของชิ้นงานทรงกระบอก (Cylindrical shape) ที่กำลังหมุนอยู่โดยใช้เครื่องมือตัดที่มีคมตัดเดี่ยว (Single cutting edge) เคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน การกลึงมีสองลักษณะใหญ่ๆ คือ การกลึงปาดหน้า เป็นการตัดโลหะโดยให้มีดตัดชิ้นงานไปตามแนวขวาง (Across the work) และการกลึงปอก เป็นการตัดโลหะโดยให้มีดตัดเคลื่อนที่ตัดชิ้นงานไปตามแนวขนานกับแนวแกนของชิ้นงาน โดยหลักการของการกลึงสามารถดัดแปลงให้ผลิตชิ้นงานได้มากมายดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะงานที่สร้างขึ้นจากการกลึง [28]

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการของการกลึงปอก คือ อัตราป้อนตัด (Feed Rate) ความเร็วตัด (Cutting Speed) ความลึกตัด (Depth of Cut) มีดกลึง (Cutting Tool) และชิ้นงานที่ต้องการทำการตัดเฉือน (Workpiece)

ความเร็วตัด (Cutting Speed) คือ ความเร็วชั้นผิวที่ต้องการกำจัดออกจากชิ้นงาน เคลื่อนที่ผ่านขอบคมตัดของใบมีดกลึง (Cutting edge) มีหน่วยเป็น เมตรต่อนาที (m/min) หรือ ฟุตต่อนาที (ft/min)

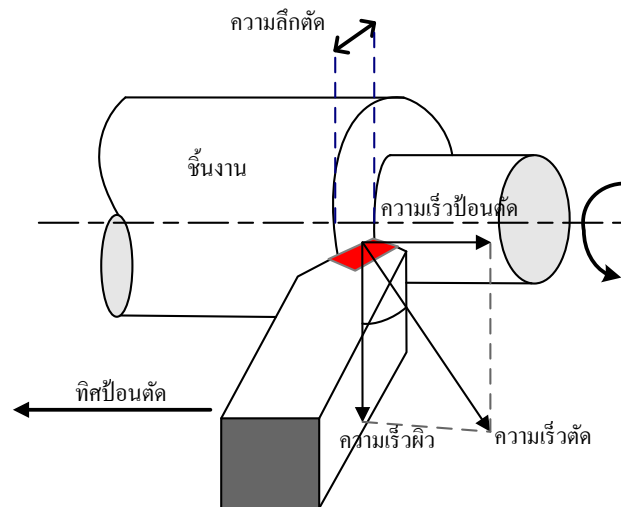
อัตราการป้อน (Feed Rate) คือ อัตราเร็วของการเดินมีดไปในทิศทางตามแกนการหมุนของชิ้นงาน กล่าวคือระยะทางที่ใบมีดกลึงเคลื่อนที่ไปได้ต่อการหมุนของชิ้นงานหนึ่งรอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อรอบ (mm/r) หรือนิ้วต่อรอบ (in/r)

ความลึกตัด (Depth of cut) คือ ระยะกินลึก คือ ความหนาของชั้นผิวชิ้นงานที่ต้องการจะกำจัดออก วัดในแนวรัศมีและตั้งฉากกับแกนการหมุนของชิ้นงาน โดยทั่วไปมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm) หรือนิ้ว (in)

ผลที่จะเกิดขึ้นตามมาก็คือ ขนาดของชิ้นงาน (Workpiece Dimension) ความละเอียดของผิวชิ้นงาน (Surface Roughness) เศษกลึง (Chip) การสึกหรอของมีดกลึง (Tool Wear)

## 2.3 เงื่อนไขการตัด (Cutting Conditions) [26]

ในกระบวนการตัดเฉือนอาศัยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (Relative movement) ระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงานอันประกอบด้วย Primary motion เรียกว่า ความเร็วตัด (Cutting speed,  $v$ ), Secondary motion เรียกว่า อัตราป้อนตัด (Feed rate,  $f$ ) และขนาดการตัดเรียกว่า ความลึกตัด (Depth of cut,  $d$ ) ทั้งสามองค์ประกอบนี้ถูกเรียกว่า เงื่อนไขการตัด (Cutting Conditions) เมื่อพิจารณาความเร็วสัมพัทธ์ที่คมตัดของมีดกลึงในรูปที่ 2.3 พบว่าความเร็วตัดซึ่งหมายถึง ความเร็วของเนื้อวัสดุที่เคลื่อนที่เข้าหาคมตัด (Cutting edge) เกิดจากผลรวมของความเร็วที่เกิดขึ้นจากการหมุนรอบแกนของชิ้นงานและความเร็วที่เกิดจากการป้อน ดังนั้นความเร็วตัดจึงเป็นผลรวมทางเวกเตอร์ของความเร็วที่เกิดจากการหมุนและความเร็วที่เกิดจากการป้อน



รูปที่ 2.3 ความเร็วตัดในการกลึง

$$V_c = \frac{V}{\cos \theta} \quad (2.3-1)$$

โดยที่  $V_c$  = ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

$V$  = ความเร็วผิว (เมตร/นาที)

$\theta$  = มุมระหว่างความเร็วตัดและความเร็วผิวของชิ้นงาน (องศา)

แต่ความเร็วที่เกิดจากการป้อนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วผิวชิ้นงาน ดังนั้นจึงให้ค่า  $\cos \theta \rightarrow 1$  จึงสามารถประมาณได้ว่า

$$V_c = V \quad (2.3-2)$$

และความสัมพันธ์ของความเร็วตัดและความเร็วรอบ (Spindle speed) แสดงได้ดังนี้

$$V = \frac{\pi D N_w}{1000} \quad (2.3-3)$$

โดยที่  $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

$N_w$  = ความเร็วรอบของชิ้นงาน (รอบ/นาที)

สำหรับอัตราการป้อนตัดในกระบวนการกลึงซึ่งหมายถึงการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเมื่อชิ้นงานหมุนครบหนึ่งรอบ จากรูปที่ 2.4 เมื่อกำหนดให้มีดกลึงมีมุมข้างคมตัด (Side cutting edge

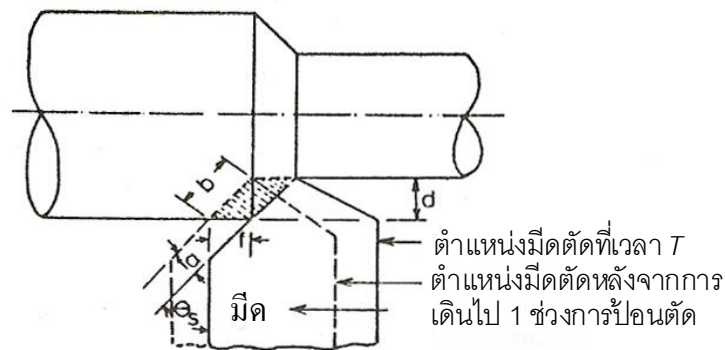
angle) เท่ากับ  $\theta_s$  และกำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราการป้อนตัด  $f$  สามารถคำนวณความหนาของเศษวัสดุก่อนตัด  $f_a$  และความกว้างของการตัด  $b$  หาได้จาก

$$f_a = f \cos \theta_s \quad (2.3-4)$$

$$b = \frac{d}{\cos \theta_s} \quad (2.3-5)$$

โดยที่  $f$  = อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)

$d$  = ความลึกในการตัด (มิลลิเมตร)



รูปที่ 2.4 ลักษณะทางเรขาคณิตของการกลึงงานรูปทรงกระบอก

ความเร็วป้อน (Feed speed) หมายถึงความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดในกรณีของการกลึงสามารถคำนวณได้จาก

$$V_f = fN_w \quad (2.3-6)$$

โดยที่  $V_f$  = ความเร็วป้อน (มิลลิเมตร/นาที)

อัตราการกำจัดโลหะ (Metal removal rate) หมายถึง ปริมาตรของวัสดุที่สามารถตัดได้ต่อหน่วย เวลาสามารถคำนวณได้จาก

$$Z_w = 1000fdV \quad (2.3-7)$$

โดยที่  $Z_w$  = อัตราการกำจัดโลหะ (มิลลิเมตร<sup>3</sup>/นาที)

เวลาในการตัด (Cutting time) เวลาที่ต้องใช้เพื่อเคลื่อนเครื่องมือนอกจากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งสุดท้ายของการตัด สามารถคำนวณได้จาก



$$T_m = \frac{L}{V_f} \quad (2.3-8)$$

โดยที่  $T_m$  = เวลาในการตัด (นาที)

$L$  = ความยาวของส่วนที่ต้องการกลึง (มิลลิเมตร)

กรรมวิธีการตัดเฉือนจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ตามวัตถุประสงค์และภาวะการตัด ได้แก่ การตัดหยาบ (Roughing cuts) และการตัดละเอียด (Finishing cuts) การตัดหยาบใช้ในการกำจัดเนื้อวัสดุปริมาณมากออกจากชิ้นงานให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้ได้ชิ้นงานใกล้เคียงกับชิ้นงานสำเร็จ ส่วนการตัดละเอียดจะใช้ในการทำชิ้นงานให้มีขนาด (Dimension) พิกัดเผื่อ (Tolerance) และผิวสำเร็จ (Surface finish) ที่ถูกต้องแม่นยำและเป็นไปตามต้องการ

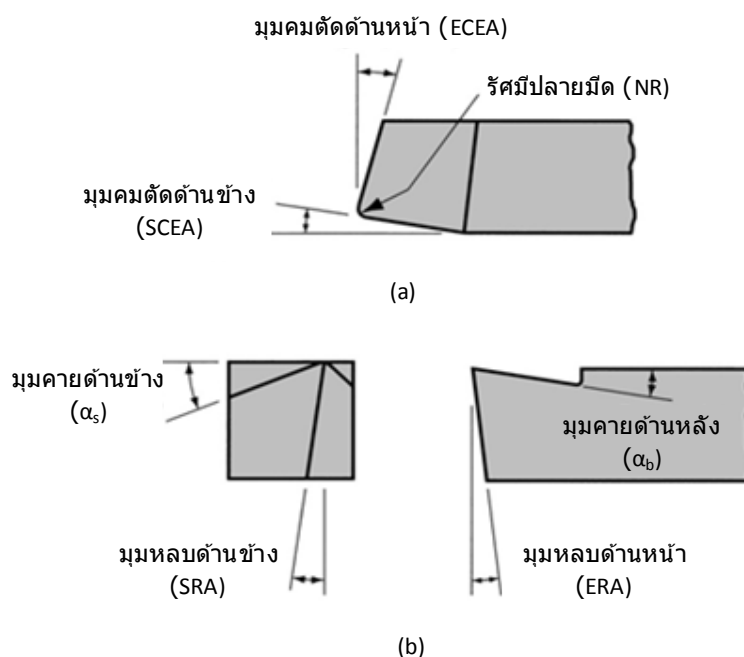
ในกระบวนการตัดเฉือนทั่วไปจะมีการตัดหยาบหนึ่งครั้งหรือมากกว่านั้นและตามด้วยการตัดละเอียดอีกหนึ่งหรือสองครั้ง การตัดหยาบนั้นจะใช้ระยะป้อน และความลึกการตัดสูง โดยปกติค่าการป้อนจะเป็น 0.015-0.050 in/rev. (0.4-1.25 mm/rev.) และความลึกของการตัดเป็น 0.100-0.750 in (2.5-20 mm) ส่วนการตัดละเอียดนั้นจะใช้ค่าการป้อนและความลึกของการตัดต่ำ ได้แก่ ค่าการป้อนที่ 0.005-0.015 in/rev. (0.125-0.4 mm/rev.) และความลึกของการตัดที่ 0.030-0.075 in (0.75-2.0 mm)

## 2.4 เครื่องมือตัด (The Cutting Tool) [26]

เครื่องมือตัดที่ใช้ในการตัดเฉือนชิ้นงานให้เป็นรูปร่างต่างๆมีทั้งหนึ่งคมตัดและหลายคมตัด แต่สำหรับในกระบวนการกลึงจะเป็นคมตัดเดียว โดยเครื่องมือตัดจะต้องมีความแข็งสูงกว่าวัสดุชิ้นงาน จึงจะเกิดการตัดได้ แต่ความแข็งเพียงอย่างเดียวยังไม่เพียงพอ ยังต้องมีคุณสมบัติที่จำเป็นต้องพิจารณา ได้แก่ ความสามารถในการต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง ความมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ความต้านทานต่อการขีดสี และความเหนียวที่เพียงพอในการต้านทานต่อการแตกร้าวได้ อย่างไรก็ตามปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติข้างต้นซึ่งต้องคำนึงถึงคือ วัสดุที่ใช้ทำมีดตัด (Tool materials) และรูปทรงเรขาคณิตของมีดตัด (Tool Geometry)

โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่ใช้ทำมีดตัดมีหลายประเภทได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมปานกลาง เหล็กกล้าอบสูง โคบอลต์หล่อผสม คาร์ไบด์เคลือบผิว เซรามิก คิวบิกโบรอนไนไตรด์ เพชร เป็นต้น โดยวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดที่ต่างกันจะมีการรวมกันของคุณสมบัติในแต่ละด้านในระดับที่แตกต่างกัน เพื่อให้เหมาะสมกับประเภทและลักษณะงานนั้นๆ

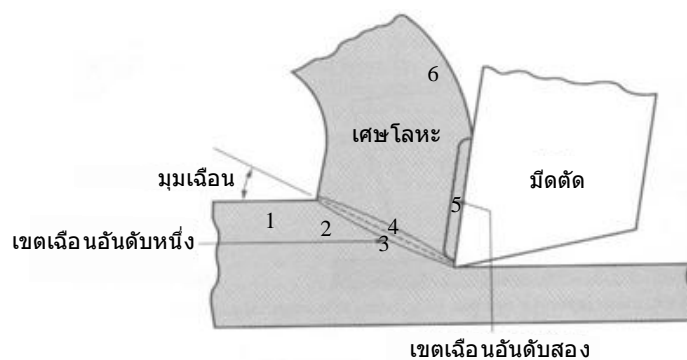
สำหรับรูปทรงเรขาคณิตของมีดตัดมีการกำหนดสัญลักษณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งในแต่ละส่วนมีความสำคัญต่างกันไป โดยผิวหน้ามีดตัดมีอยู่ 2 ส่วนที่ควรพิจารณา ได้แก่ ผิวคาย (Rake face) และผิวหลบ (Flank face) โดยผิวคายเป็นผิวหน้ามีดตัดบริเวณที่ระบายหรือคายเศษตัดออกจากชิ้นงาน ส่วนผิวหลบคือ ผิวหน้ามีดตัดบริเวณที่ทำให้เกิดช่องว่าง (Clearance) ระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานที่เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งช่องว่างนี้จะป้องกันผิวงานจากการขัดถูกับมีดตัดอันจะเป็นผลให้คุณภาพของผิวงานเสียไป โดยผิวคายของมีดตัดจะถูกกำหนดด้วยมุม 2 มุม คือมุมคายด้านหลัง (Back rake angle,  $\alpha_b$ ) และมุมคายด้านข้าง (Side rake angle,  $\alpha_s$ ) ซึ่งเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของเศษโลหะบนผิวคาย ส่วนบนผิวหลบจะประกอบด้วยมุมหลบด้านหน้า (End relief angle, ERA) และมุมหลบด้านข้าง (Side relief angle, SRA) ที่เป็นตัวกำหนดระยะห่างระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานที่ตัดแล้ว ในขณะที่คมตัดของมีดตัดที่มีคมตัดเดียวจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือมุมของคมตัดด้านข้าง (Side cutting edge angle, SCEA) ซึ่งจะช่วยลดแรงกระแทกขณะมีดเข้าไปยังชิ้นงาน และมุมของคมตัดด้านหน้า (End cutting edge angle, ECEA) ที่ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างมีดตัดกับชิ้นงาน และส่วนสุดท้าย รัศมีปลายมีด (Nose Radius, NR) ซึ่งส่งผลต่อพื้นผิวของชิ้นงาน โดยยิ่งรัศมีปลายมีดเล็ก พื้นผิวของชิ้นงานก็จะยิ่งขรุขระ แต่อย่างไรก็ตาม รัศมีปลายมีดที่ใหญ่ก็อาจทำให้เกิดเซตเตอร์ขึ้นได้ ดังนั้นการเลือกวัสดุที่ใช้ทำมีดตัด รวมถึงการออกแบบรูปร่างและขนาดของมีดตัด ถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของงานตัด



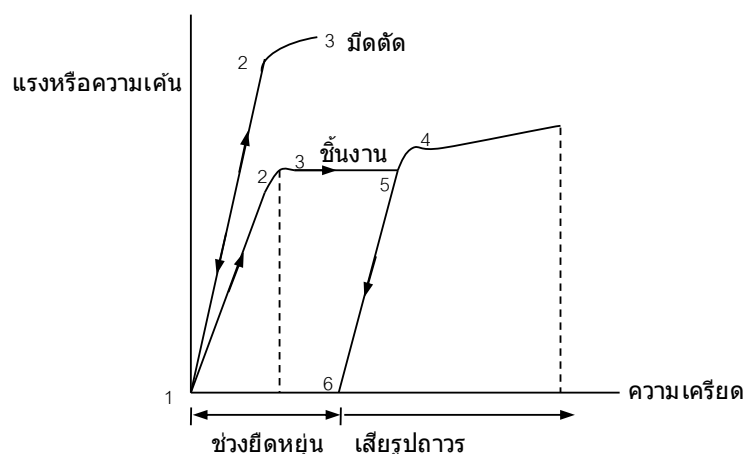
รูปที่ 2.5 รูปทรงเรขาคณิตของมีดตัด

## 2.5 การวิเคราะห์กระบวนการตัดโลหะ

การตัดวัสดุชิ้นงานจะรับแรงกระทำจากเครื่องมือตัดผ่านทางคมตัด ซึ่งจะมีผลให้ชิ้นงานเกิดความเค้นขึ้นในหลายลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จุดที่ 1 เป็นบริเวณที่วัสดุอยู่ในสภาวะไม่มีความเค้นเมื่อเคลื่อนที่มาถึงจุดที่ 2 จึงรับความเค้นจากแรงตัด ความเค้นจึงเพิ่มสูงขึ้นจากการแปรรูปยืดหยุ่น (Elastic deformation region) จนเข้าไปถึงเขตการแปรรูปถาวร (Plastic deformation region) เมื่อมาถึงจุดที่ 3 ความเค้นจะเพิ่มสูงขึ้นจนเกิดการแปรรูปอย่างถาวร ซึ่งจะถือว่าเป็นเศษวัสดุเมื่อเคลื่อนที่ถึงจุดที่ 4 ซึ่งในจุดนี้เศษวัสดุจะมีความแข็งมากกว่าชิ้นงาน เนื่องจากเกิด Work hardening ที่จุดที่ 5 ถือว่าเศษวัสดุเคลื่อนที่พ้นเขตการแปรรูปออกมาแล้ว ความเค้นเริ่มลดลงและเมื่อมาถึงจุดที่ 6 เศษโลหะจะไม่มี ความเค้นจากคมตัด สภาวะความเค้นที่จุดต่างๆสามารถกำหนดลงในกราฟความเค้น - ความเครียด ได้ดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 แบบจำลองของการตัด

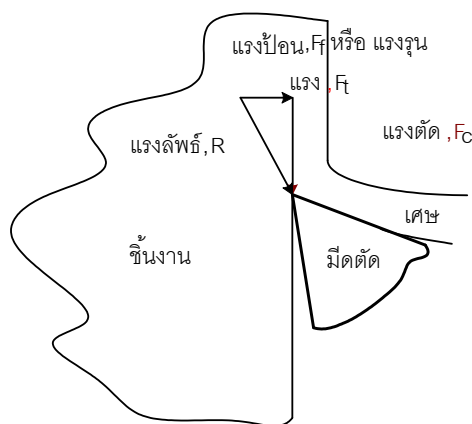


รูปที่ 2.7 สภาวะความเค้นที่จุดต่างๆบนกราฟความเค้น - ความเครียด

## 2.6 แรงในการตัด

### 2.6.1 แรงบนคมตัด

แรงบนคมตัดหมายถึง แรงที่กระทำที่คมตัดของเครื่องมือตัดขณะเกิดการตัด ในเบื้องต้นนี้จะใช้แบบจำลองของการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) ในการวิเคราะห์เนื่องจากทำให้ระบบของแรงบนคมตัดมีเพียง 2 มิติเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ จากรูปที่ 2.8 พบว่าแรงลัพธ์ (Resultant force) สามารถแยกออกเป็น 2 องค์ประกอบย่อย คือ แรงในทิศขนานกับทิศของความเร็วตัด เรียกว่า แรงตัด (Cutting force) และแรงในทิศขนานกับทิศของการป้อน เรียกว่าแรงป้อน (Feed force) ซึ่งแรงตัด และแรงป้อนนี้สามารถวัดได้โดยใช้อุปกรณ์วัดแรงตัด ทำให้สามารถคำนวณแรงลัพธ์ได้จากสมการที่ 2.6-1



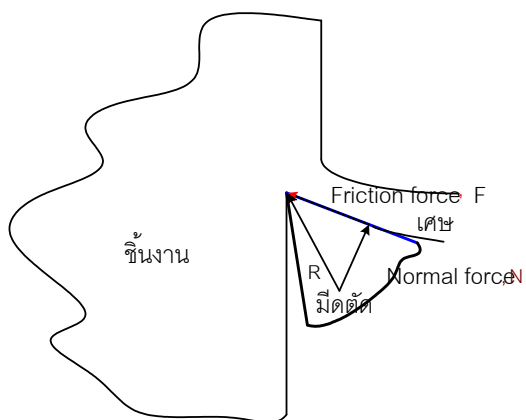
รูปที่ 2.8 ระบบแรงบนคมตัดของการตัดฉาก

$$R = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} \quad (2.6-1)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{F_f}{F_c} \quad (2.6-2)$$

### 2.6.2 แรงเสียดทาน

การที่เศษวัสดุเคลื่อนที่ผ่านผิวคายเศษวัสดุของเครื่องมือตัด ทำให้เกิดแรงขึ้นอีกระบบหนึ่งดังในรูปที่ 2.9 คือ แรงเสียดทาน (Friction force) และแรงกดบนผิวคายเศษวัสดุ (Normal force on force) สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างเศษวัสดุและผิวคายเศษวัสดุเมื่อกำหนดให้  $\beta$  คือ มุมเสียดทาน (Friction angle) ได้จาก



รูปที่ 2.9 ระบบแรงเสียดทาน

$$\mu = \frac{F}{N} = \tan\beta \quad (2.6-3)$$

โดยที่  $\mu$  = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

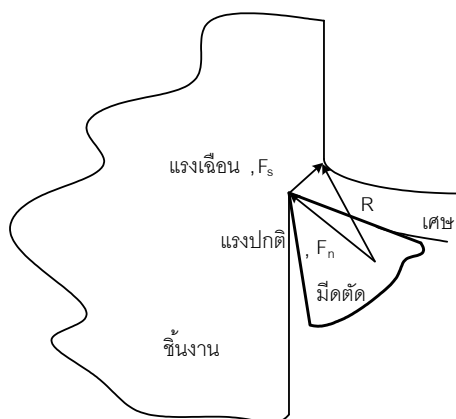
$F$  = แรงเสียดทาน (นิวตัน)

$N$  = แรงกดบนผิวคายเศษวัสดุ (นิวตัน)

$\beta$  = มุมเสียดทาน (องศา)

### 2.6.3 แรงเฉือน

แรงเฉือน หมายถึง แรงที่กระทำบนระนาบเฉือน เป็นแรงที่ทำให้วัสดุชิ้นงานเกิดจากการแปรรูปกลายเป็นเศษวัสดุ แสดงในรูปที่ 2.10 โดยกำหนดให้  $F_s$  คือ แรงเฉือน (Shear force)



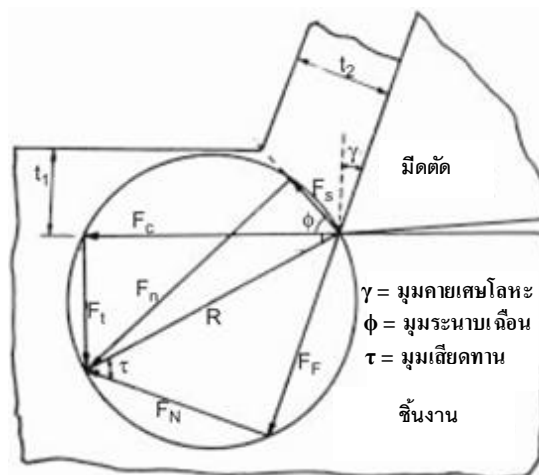
รูปที่ 2.10 ระบบของแรงเฉือน

และ  $F_N$  คือ แรงกดบนระนาบเฉือน (Normal force on shear plane) พบว่า

$$R = \sqrt{F_s^2 + F_N^2} \quad (2.6-4)$$

## 2.7 รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงของการตัด

การใช้รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงเป็นวิธีทางกราฟที่ใช้แรงแทนการคำนวณได้ อย่างสะดวก และถูกต้อง ดังในรูปที่ 2.11 โดยการกำหนดเวกเตอร์ของแรงตัดและแรงป้อน จะได้ผลลัพธ์โดยการบวกเวกเตอร์ทั้งสอง (ขั้นตอนที่ 1) ใช้แรง ลัพธ์เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางสร้างวงกลม จากนั้นลากเส้นต่อจากผิวคายเศษวัสดุตัดกับวงกลม จะได้แรงเสียดทานและแรงกดผิวคายเศษวัสดุ (ขั้นตอนที่ 2) คำนวณมุมระนาบเฉือน  $\phi$  จากนั้นกำหนดมุมนี้ลงในรูป จากจุดตัดของมุมนี้กับวงกลม จะได้แรงเฉือนและแรงกดบนระนาบเฉือน (ขั้นตอนที่ 3) สามารถวัดขนาดของแรงได้จากรูปที่สร้างขึ้นเทียบกับมาตราส่วนที่กำหนดเอาไว้



รูปที่ 2.11 รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงและวิธีการสร้าง

จากรูปที่ 2.11 การใช้แผนภาพของแรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการตัดโลหะ (Force diagram) นั้นจะสามารถคำนวณค่าของแรง  $F_N$ ,  $F_s$  และ  $F_n$  ได้โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงตรีโกณมิติของแรงที่สามารถวัดได้ ( $F_c$ ,  $F_t$ ) ซึ่งจะได้ค่าของแรงต่าง ๆ ดังสมการที่ 2.7-1 ถึง 2.7-4

$$F = F_c \sin \mu + F_t \cos \alpha \quad (2.7-1)$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (2.7-2)$$

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \quad (2.7-3)$$

$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \quad (2.7-4)$$

## 2.8 ความเค้นเฉือน

ในการตัดความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนระนาบเฉือนจะเท่ากับความแข็งแรงทางเฉือน สำหรับการตัดในขณะนั้น กรณีนี้ต้องทำความเข้าใจว่าความแข็งแรงทางเฉือนของการตัด อาจไม่เท่ากับความแข็งแรงทางเฉือนที่ได้จากการทดลองวัดคุณสมบัติทางกล เนื่องจากการตัดเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนมากกว่าการเฉือนในทางกลศาสตร์ รวมถึงอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ความเค้นเฉือนสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 2.8-1

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \quad (2.8-1)$$

สามารถคำนวณพื้นที่ระนาบเฉือนได้จาก  $A_s = fd / \sin \phi$  ดังนั้นเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 2.8-1 จะได้

$$\tau = \frac{F_s \sin \phi}{fd} \quad (2.8-2)$$

แต่จากการที่อุปกรณ์วัดแรงจะวัดแรงตัดและแรงป้อนได้โดยสะดวก ดังนั้นจากรูปที่ 2.11 สามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$F_s = F_c \cos \phi - F_f \sin \phi \quad (2.8-3)$$

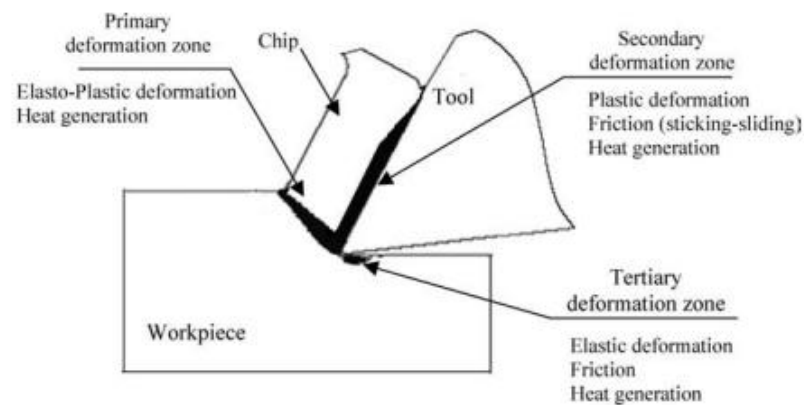
แทนค่าลงในสมการ 2.8-2 จะได้

$$\tau = \frac{F_c \cos \phi \sin \phi - F_f \sin^2 \phi}{fd} \quad (2.8-4)$$

## 2.9 อุณหภูมิการตัด (Cutting Temperature)

ในกระบวนการตัดพลังงานทั้งหมดที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนในบริเวณการตัด เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก และการเสียดสี ดังนั้นในการตัดสามารถจำแนกแหล่งที่ทำให้เกิดความร้อนได้เป็น 3 แหล่งดังแสดงในรูปที่ 2.12 คือ

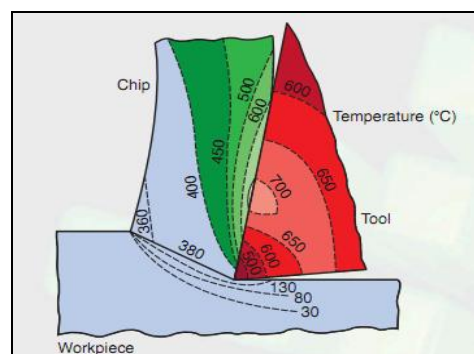
- การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกเนื่องจากการเฉือนในบริเวณเฉือนหลัก (Primary shear zone)
- การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกเนื่องจากการเฉือนและความเสียดทานบนผิวค้ำของมีดตัด (Cutting face)
- การเสียดสีระหว่างชิ้นงานและมีดตัดบนผิวหอบ (Tool flank)



รูปที่ 2.12 การกระจายความร้อนในบริเวณตัด [29]

อย่างไรก็ตาม ความร้อนที่เกิดขึ้นได้แก่กระจายไปใน 3 แหล่ง คือ เศษโลหะ ชิ้นงาน และมีดตัด โดยความร้อนที่แผ่กระจายไปในแต่ละแหล่งแตกต่างกันไปดังแสดงในรูปที่ 2.13 คือ

- ความร้อนส่วนใหญ่ประมาณ 60-80% จะแผ่กระจายสู่เศษโลหะ
- ความร้อนประมาณ 10-20% แผ่กระจายสู่ชิ้นงาน
- ความร้อนอีกประมาณ 10% แผ่กระจายสู่มีดตัด



รูปที่ 2.13 สัดส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นขณะตัด [28]



## 2.10 ความขรุขระผิว (Surface roughness) [26]

การผลิตชิ้นงานให้ได้ลักษณะและขนาดตามที่ต้องการด้วยกระบวนการตัดเป็นการเอาเนื้อของชิ้นงานที่เกินจากที่ต้องการออกในรูปแบบของเศษโลหะ ( chip) ผิวชิ้นงานที่ได้จะผ่านขั้นตอนของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกและการแผ่กระจายของรอยแตก (Plastic deformation and Crack Propagation) ชิ้นงานจะได้รับแรงเค้นและความร้อนจากมีดตัดที่มีลักษณะของคมตัด (Cutting edge) แตกต่างกันไป คมตัดแต่ละชนิดจะทำให้เกิดรอยบนผิวชิ้นงาน มีดตัด และเครื่องมือตัด (Material, Cutting tool, Machine tool) รวมทั้งเกิดการสั่นสะเทือนด้วย จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้ผิวชิ้นงานเกิดความเสียหายในระดับหนึ่ง ความขรุขระผิวและความสมบูรณ์ของชิ้นงาน (Surface finish and Surface integrity) จะแสดงได้จากระดับความเสียหายที่ได้กล่าวไปข้างต้น

### 2.10.1 ลักษณะความเรียบผิวสำเร็จ (SURFACE FINISH)

ลักษณะของความเรียบผิวสำเร็จในรูปที่ 2.14 จะเป็นการแสดงในลักษณะของคุณสมบัติที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

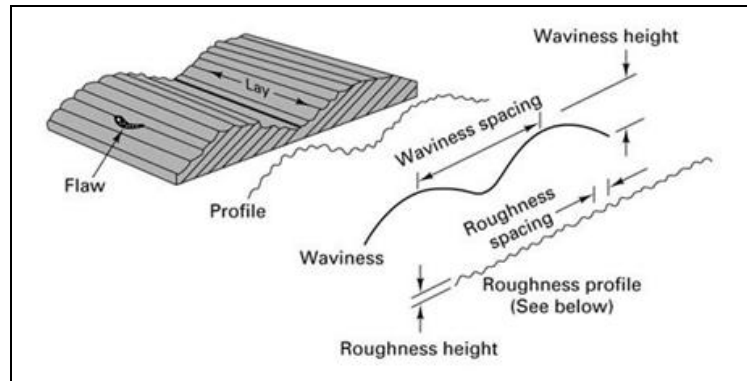
ความเรียบผิว หรือความขรุขระ Roughness: จะประกอบไปด้วยช่องว่างขนาดเล็กและละเอียดที่ซิดกันหลายช่อง สาเหตุหลักเกิดจากรอยที่เหลือไว้จากการตัด ความสูงเฉลี่ยหรือความลึกเฉลี่ยบนชิ้นงานซึ่งแสดงถึงความขรุขระผิวถูกวัดจากการกำหนดช่วงความยาวหนึ่งๆที่เรียกว่า “คัตออฟเล็ง: Cut off length” หรือ “ลอสเนสแซมเปิ้ลเล็ง : Roughness sampling length” สำหรับการหาความขรุขระของผิวชิ้นงาน

คลื่น Waviness: ประกอบไปด้วยรอยขรุขระบนชิ้นงานซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า roughness sampling length (ประมาณ 1 ไมครอน) สาเหตุเกิดจากการสั่นหรือมีรอยตำหนิบนชิ้นงานที่เกิดจากรับภาระในการตัดและอุณหภูมิในการตัดมากเกินไป

ราบ Lay: เป็นรอยตำหนิที่เป็นทิศทางยาว มักจะขึ้นในทิศทางของชิ้นงานมีดตัด รวมทั้งการเคลื่อนที่ระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือตัด

ตำหนิผิวหน้า Surface Flaw: เป็นรอยตำหนิที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม สาเหตุเกิดมาจาก รอยตำหนิที่มีมาแต่แรกแล้ว เช่นรอยร้าว ฟองอากาศ

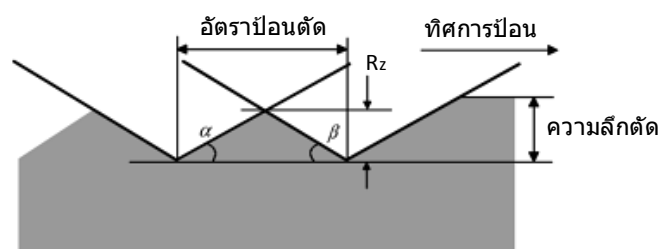
ผิวหน้าสำเร็จ Surface finish: มีความสำคัญต่อการสวมประกอบและการจัดวางของชิ้นงาน การสวมประกอบและการจัดวางต่างๆเกิดขึ้นได้ก็ต้องอาศัยการทาสีหรือทำตำหนิเข้าช่วย บางทีก็ใช้เป็นลักษณะก้ำหรือของไหลไหลผ่าน บางทีก็ใช้สายตาดูโดยอาศัยความมั่นใจของชิ้นงาน บางทีก็ใช้แสงที่มีคุณสมบัติการสะท้อนได้สูง



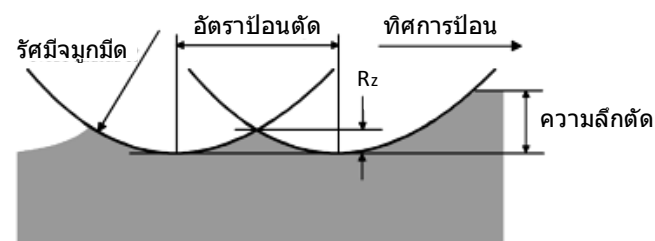
รูปที่ 2.14 ลักษณะของความเรียบผิวสำเร็จ [27]

### 2.10.2 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวตามหลักการรูปทรงเรขาคณิต [30]

ในการกำจัดเนื้อวัสดุที่ไม่ต้องการออกมาในรูปของเศษโลหะโดยใช้เครื่องมือตัดที่มีคมตัดเดียวหรือหลายคมตัดก็ตาม สามารถพิจารณาได้ตามหลักการรูปทรงเรขาคณิต (Geometry) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และ 2.16 ความขรุขระผิวเป็นผลมาจากเครื่องมือตัดและชิ้นงานที่มีการเคลื่อนที่กันอย่างสัมพันธ์ ดังนั้นในทางทฤษฎีหากความลึกตัดมากเพียงพอ ความขรุขระผิวจะเป็นฟังก์ชันของอัตราป้อนตัดและรูปทรงเรขาคณิตของมีดตัด จากรูปที่ 2.15 เป็นการตัดด้วยมีดตัดที่มีรัศมีจุมุมมีดที่เป็นแบบเหลี่ยม (Straight-nosed tool) และรูปที่ 2.16 เป็นการตัดด้วยมีดตัดที่มีรัศมีจุมุมมีดที่เป็นแบบมน (Round-nosed tool)



รูปที่ 2.15 การตัดด้วยมีดตัดที่มีรัศมีจุมุมมีดที่เป็นแบบเหลี่ยม



รูปที่ 2.16 การตัดด้วยมีดตัดที่มีรัศมีจุมุมมีดที่เป็นแบบมน

การตัดในรูปที่ 2.15 ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) สามารถพิจารณาได้ดังสมการ 2.10-1

$$R_z = \frac{f}{\cot\alpha + \cot\beta} \quad (2.10-1)$$

โดยที่  $f$  คือ อัตราป้อนตัด  $\alpha$  คือ มุมคมตัดหลัก และ  $\beta$  คือ มุมคมตัดรอง ส่วนการตัดด้วย รัศมีจุมกมิตแบบมนในรูปที่ 2.16 โดยที่  $r_\epsilon$  คือ รัศมีจุมกมิต ความขรุขระผิวสูงสุดสามารถพิจารณาได้ดังสมการ 2.10-3 และความขรุขระผิวเฉลี่ย ( $R_a$ ) สามารถพิจารณาได้ดังสมการ 2.10-4

$$R_z = r_\epsilon - \left( r_\epsilon^2 - \frac{f^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.10-2)$$

$$R_z \approx \frac{f^2}{8r_\epsilon} \quad (2.10-3)$$

และ

$$R_a \approx \frac{f^2}{32r_\epsilon} \quad (2.10-4)$$

สมการความขรุขระผิวที่ได้สามารถประมาณความขรุขระผิวได้โดยอยู่บนสมมติฐานที่ว่า ไม่พิจารณาผลที่เกิดจากการตัดจริง เช่น การหลอมติดของโลหะบนมีดตัด (Built-up edge) แซตเตอร์ รวมทั้งความไม่แม่นยำของเครื่องจักร เป็นต้น ซึ่งสมการข้างต้นไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

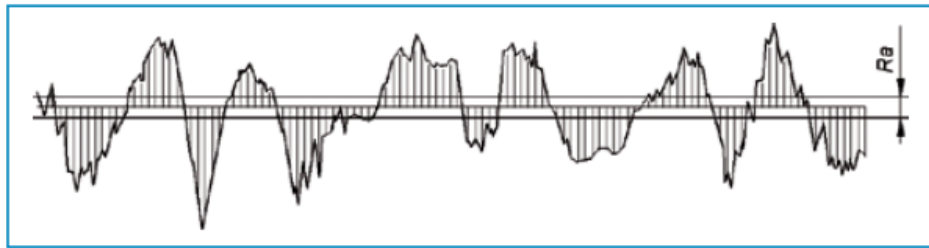
### 2.10.3 พารามิเตอร์ของความขรุขระผิว (Roughness Parameter)

พารามิเตอร์สำหรับการบ่งบอกถึงคุณภาพของผิวงานนั้นๆ มีพารามิเตอร์หลายอย่างที่ใช้กันตามมาตรฐาน DIN EN ISO 4287:1998 ตัวอย่างเช่น

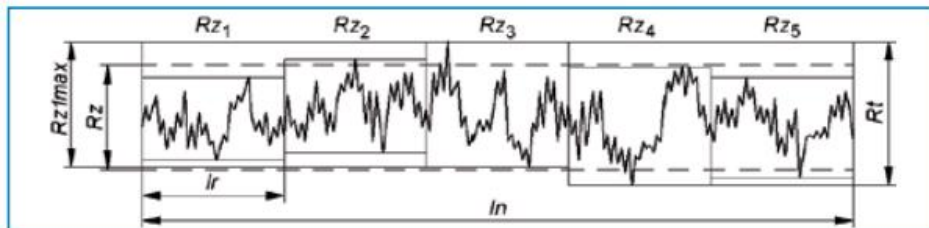
- $R_a$  (Arithmetic mean surface roughness) คือ ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการรวมพื้นที่ยอดคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลางกับพื้นที่ใต้อคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวในการวัด (ln) ดังรูปที่ 2.17
- $R_z$  (Surface roughness depth) คือ ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการวัดทดสอบเป็นช่วงเท่าๆกัน 5 ช่วง โดยแต่ละช่วงเป็นการรวมความสูงที่มากที่สุดของจุดสูงสุด (highest profile peak) กับความลึกที่มากที่สุดของจุดต่ำสุด (lowest profile valley) หรือ  $R_z$

(Maximum height of the roughness profile) ในช่วงระยะ  $l_r$  แล้วนำค่าที่ได้มารวมกันหารด้วย 5 ดังรูปที่ 2.18

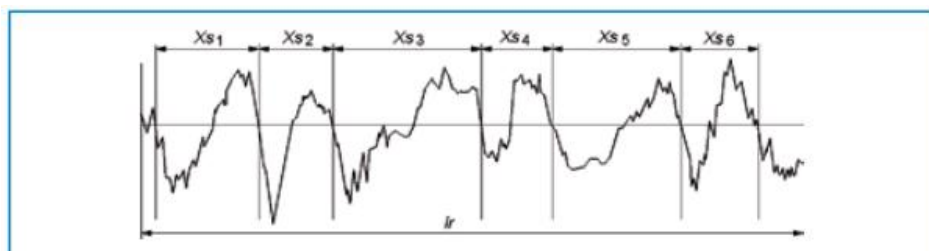
- $Rz_{1max}$  (Maximum surface roughness) คือ ค่าความขรุขระผิวที่ได้จาก  $Rz_i$  ที่มากที่สุด ดังรูปที่ 2.18
- $Rt$  (Total height of the roughness profile) คือ ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการรวมค่าที่มากที่สุดของ  $Z_p$  และ  $Z_v$  ดังรูปที่ 2.18
- $RSm$  (Average groove width) คือ ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากค่าเฉลี่ยของความกว้างแต่ละ  $Xs_i$  ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.17  $Ra$  (Arithmetic mean surface roughness)



รูปที่ 2.18  $Rt$   $Rz$  และ  $Rz_{1max}$



รูปที่ 2.19  $RSm$

## 2.11 การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม [31]

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลอง เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการ

วิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติ ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญคือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ โดยศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกัน เนื่องจาก วิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้

หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ เพลกเคชัน (Replication) แรนดอมไมเซชัน (Randomization) และ บล็อกกิง (Blocking)

**เพลกเคชัน** หมายถึง การทดลองซ้ำ เพลกเคชัน มีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ

ประการแรกเพลกเคชันทำให้สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ โดยตัวประมาณค่าความผิดพลาดนี้กลายเป็นหน่วยของการวัดชั้นพื้นฐานสำหรับการใช้ในการพิจารณาว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่

ประการที่สองถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเพลกเคชันสามารถช่วยหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้นี้

**แรนดอมไมเซชัน** เป็นพื้นฐานหลักสำหรับวิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ การออกแบบการทดลองแรนดอมไมเซชัน หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริง การทำแรนดอมไมซ์การทดลองจะทำให้สามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

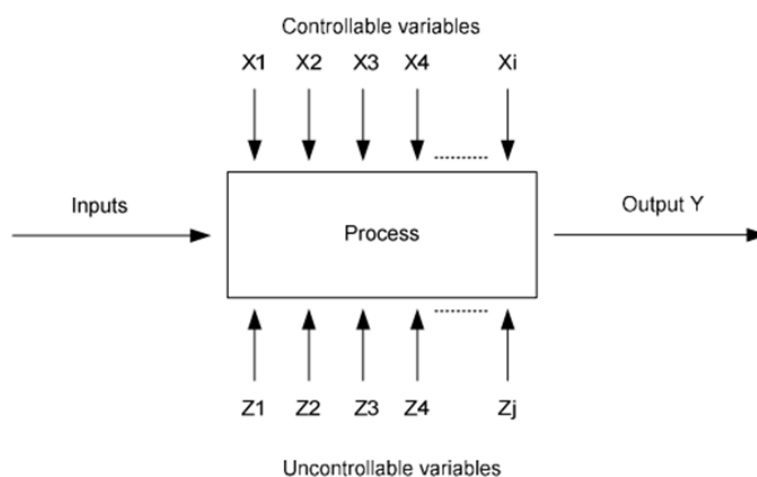
**บล็อกกิง** เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะเป็นหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิง

ระบบการทดลองโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ อินพุต (Input) กระบวนการ (Process) และเอาต์พุต (Output) โดยอินพุตประกอบด้วย 4M คือ คนงาน (Man) เครื่องจักร (Machine) วิธีการ (Method) และวัตถุดิบ (Material) กระบวนการ คือ การรวมเอา อินพุตมาแปรรูปเป็นเอาต์พุต โดยตัวแปรกระบวนการจำแนกได้ 2 ประเภทคือ ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Factor) และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) ดังแสดงในรูปที่ 2.20

วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. หาตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อค่าตอบสนอง  $y$

2. กำหนดค่าของ  $x$  ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $y$  เพื่อให้ค่า  $y$  อยู่ในค่าที่ต้องการ
3. กำหนดค่าของ  $x$  ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $y$  เพื่อให้ค่า  $y$  มีค่าน้อย
4. กำหนดค่าของ  $x$  ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง  $y$  เพื่อให้ค่า  $y$  ให้ผลตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด



รูป 2.20 รูปแบบระบบการทดลองทั่วไป [31]

## 2.12 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design) [31]

วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการใช้เทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติในการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรผลตอบที่เราสนใจ โดยเป็นปัญหาที่มีตัวแปรอิสระหลายตัวแปร และการสร้างแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบและตัวแปรอิสระ รวมทั้งมีวัตถุประสงค์ในการหาค่าที่ดีที่สุดของ ผลตอบ นั้นด้วย ตัวอย่างเช่น สมมุติว่าวิศวกรเคมีคนหนึ่งต้องการที่จะหาระดับของ อุณหภูมิ ( $X_1$ ) และความดัน ( $X_2$ ) ที่จะทำให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิและความดัน กล่าวคือ

$$y = f(X_1, X_2) + \epsilon \quad (2.12-1)$$

โดยที่  $\epsilon$  คือค่าความผิดพลาดของตัวแปรผลตอบ  $y$  ที่เป็นผลมาจากทดลอง ถ้ากำหนดให้  $E(y) = f(X_1, X_2) = f(X_1, X_2)$  ดังนั้น สมการของพื้นผิวผลตอบสามารถเขียนได้ คือ

$$\eta = f(X_1, X_2) \quad (2.12-2)$$

ซึ่งสมการที่ 2.12-2 เรียกว่า พื้นผิวผลตอบ (Response Surface)

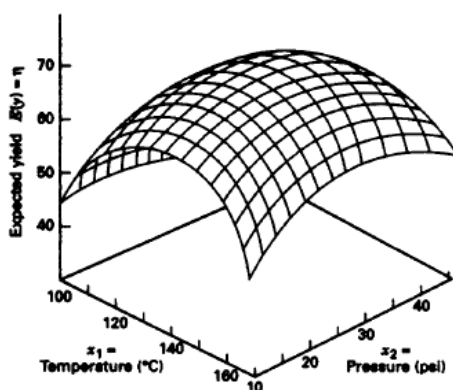
จากสมการพื้นผิวผลตอบสามารถแสดงในรูปแบบของกราฟฟิคดังแสดงใน รูปที่ 2.21 โดยที่  $\eta$  จะถูกพล็อตกับระดับของ  $X_1$  และ  $X_2$  เพื่อช่วยให้สามารถมองรูปร่างของพื้นผิวตอบได้ดียิ่งขึ้น หรือสามารถแสดงได้ในอีกรูปแบบหนึ่งคือ เส้นโครงร่าง (Control Plot) ของพื้นผิวตอบดังแสดงใน รูปที่ 2.22 ในการสร้างเส้นโครงร่างนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ  $X_1$  และ  $X_2$  เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบส่วนมาก หากไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรผลตอบ และตัวแปรอิสระ ในขั้นตอนแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง  $y$  และเซตของตัวแปรอิสระ และโดยปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ก็คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon \quad (2.12-3)$$

แต่หากระบบนั้นมี ส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้อง ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น จะถูกเลือกใช้ เช่น พหุนามกำลังสอง

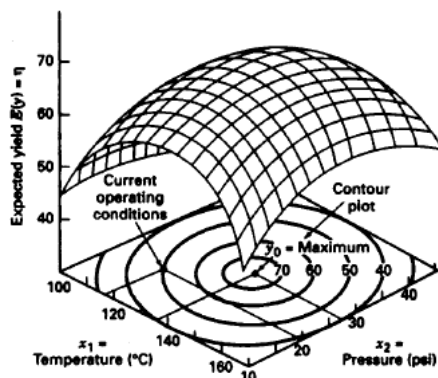
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (2.12-4)$$



รูปที่ 2.21 พื้นผิวผลตอบสองแบบสามมิติ [31]

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมากจะใช้แบบจำลองหนึ่งในสองแบบที่กล่าวมานี้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองพหุนามที่กล่าวมานี้จะไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิว

ทั้งหมดของตัวแปรอิสระ แต่หากพื้นผิวที่สนใจนั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กแล้ว แบบจำลองเหล่านี้จะใช้งานได้ดีพอสมควร



รูปที่ 2.22 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนอง [31]

วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระ ต่างๆของแบบจำลองแบบพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิว ผลตอบจะเกิดขึ้นเฉพาะกับพื้นผิวที่สร้างขึ้น มาเท่านั้น ดังนั้นหากพื้นผิวที่สร้างสามารถประมาณ ฟังก์ชันตัวแปรผลตอบ ได้เป็นอย่างดี แล้ว การวิเคราะห์ผลตอบที่ได้ก็จะให้ผลเหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริง การออกแบบสำหรับการสร้างพื้นผิวดตอบ นี้เรียกว่าการออกแบบพื้นผิวดตอบ (Response Surface Design)

### 2.13 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) [31]

การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับ สำหรับฟิตพื้นผิว ผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล  $2^k$  กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบ ลักษณะนี้ มีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

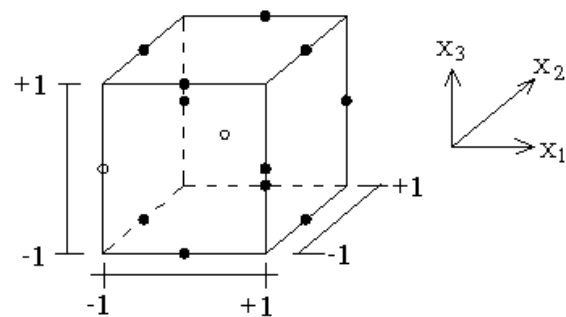
จากตารางที่ 2.1 แสดงการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัว รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบแสดงในรูปที่ 2.23 โดยการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี  $\sqrt{2}$  นอกจากนั้นการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนไม่ได้รวมเอาจุดใดๆที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การออกแบบลักษณะ นี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของ



ปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination ) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลอง เนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ

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

ตารางที่ 2.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน [31]



รูปที่ 2.23 รูปแบบทางเรขาคณิตสำหรับแผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน [31]

## 2.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) [31]

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการจำแนกความแปรปรวนออกเป็นส่วนๆตามแหล่งที่ทำให้เกิดความแปรปรวน โดยใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองเป็นตัวประมาณความแปรปรวน และเปรียบเทียบค่ากำลังสองเฉลี่ยที่เกี่ยวข้องกับค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาด เพื่อทราบถึงความแปรผันมาจากความผิดพลาดแบบสุ่มหรือมาจากปัจจัยใดที่ทำให้เกิดความแปรผัน แล้วทำการทดสอบสมมติฐาน และสรุปผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว (Single factor analysis of variance) สามารถเขียนแบบจำลองสถิติเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 2.14-1

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ijk} \quad (2.14-1)$$

โดยที่  $y_{ij}$  คือ ค่าสังเกตที่  $i$   $\mu$  คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกันทุกระดับ  $\tau_i$  คือ ค่าพารามิเตอร์สำหรับระดับที่  $i$  และ  $\varepsilon_{ij}$  คือ องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ปัจจัย สามารถเขียนแบบจำลองสถิติเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 2.14-2

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2.14-2)$$

โดยที่  $y_{ijk}$  คือ ค่าสังเกตที่เกิดจากปัจจัย A ที่ระดับ  $i$  และปัจจัย B ที่ระดับ  $j$  สำหรับ replicate ที่  $k$   $\mu$  คือ ผลเฉลี่ยทั้งหมด  $\tau_i$  คือ ผลที่เกิดจากระดับที่  $i$  ของปัจจัย A  $\beta_j$  คือ ผลที่เกิดจากระดับที่  $j$  ของปัจจัย B และ  $\varepsilon_{ijk}$  คือ องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ปัจจัยและมีอันตรกิริยา สามารถเขียนแบบจำลองสถิติเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 2.14-3

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.14-3)$$

โดยที่  $(\tau\beta)_{ij}$  คือ ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง  $\tau_i$  และ  $\beta_j$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะทดสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อการตัดสินใจ สำหรับ การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ปัจจัยและมีอันตรกิริยา คือ ปัจจัย A และปัจจัย B จะต้องทำการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ 3 อย่าง คือ

1. การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย A คือ

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

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

2. การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเท่ากันของผลที่เกิดจากปัจจัย B คือ

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

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

3. การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอันตรกิริยาที่เกิดระหว่างปัจจัย A และ B คือ

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

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

กำลังสองเฉลี่ยสามารถหาได้จากสมการที่ 2.14-4

$$MS = \frac{SS}{df} \quad (2.14-4)$$

โดยที่ SS คือ ผลรวมกำลังสอง df (Degree of freedom) คือ ระดับขั้นความเสรี และผลรวมกำลังสองของแต่ละเทอมสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \quad (2.14-5)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2.14-6)$$

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2.14-7)$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2.14-8)$$

$$SS_{Subtotals} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2.14-9)$$

$$SS_{AB} = SS_{Subtotals} - SS_A - SS_B \quad (2.14-10)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad (2.14-11)$$

การทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา สามารถหาได้จากการหารค่ากำลังสองเฉลี่ยที่เกี่ยวข้องกับค่า  $MS_E$  ดังนั้นอัตราส่วนของกำลังสองเฉลี่ยที่เกิดจาก  $MS_A / MS_E$ ,  $MS_B / MS_E$  และ  $MS_{AB} / MS_E$  จะมีการกระจายแบบ F ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีของตัวตั้งเป็น  $a-1$ ,  $b-1$  และ  $(a-1)(b-1)$  ตามลำดับ และมีระดับขั้นความเสรีของตัวหารคือ  $ab(n-1)$  โดยค่าวิกฤติ (Critical Region) คือปลายทางด้านบนของการกระจายแบบ F ดังนั้นวิธีการทดสอบจะทำโดยอาศัยตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source of Variation	Degree of freedom	Sum of square	Mean square	F-Statistic
Factor A	a-1	SS <sub>A</sub>	MS <sub>A</sub>	F <sub>A</sub> = MS <sub>A</sub> /MS <sub>E</sub>
Factor B	b-1	SS <sub>B</sub>	MS <sub>B</sub>	F <sub>B</sub> = MS <sub>B</sub> /MS <sub>E</sub>
Interaction	(a-1)(b-1)	SS <sub>AB</sub>	MS <sub>AB</sub>	F <sub>AB</sub> = MS <sub>AB</sub> /MS <sub>E</sub>
Error	ab(n-1)	SS <sub>E</sub>	MS <sub>E</sub>	
Total	abn-1	SS <sub>T</sub>		

เปรียบเทียบค่า F ที่คำนวณได้กับค่า  $F_{\alpha, a, b}$  จากตารางการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบ F โดยที่  $\alpha$  คือ ระดับนัยสำคัญ a คือ ระดับขั้นความเสรีของปัจจัย b คือ ระดับขั้นความเสรีของความผิดพลาดแบบสุ่ม ถ้า  $F > F_{\alpha, a, b}$  ยอมรับอิทธิพลของปัจจัย และถ้า  $F \leq F_{\alpha, a, b}$  ปฏิเสธอิทธิพลของปัจจัย

#### 2.14.2 การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model adequacy checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model adequacy checking) จะต้องทำการทบทวนครั้งก่อนการสรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยตรวจสอบว่าข้อมูลของผลการทดลองมีคุณสมบัติครบทั้ง 3 อย่างตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง คือ  $NID(0, \sigma^2)$  จึงสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้อย่างสมบูรณ์ โดยทำการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับส่วนตกค้าง (Residual) คือ การแจกแจงแบบปกติ ความเป็นอิสระ และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัย 1 ปัจจัย สามารถเขียนตัวแบบสถิติได้ดังนี้

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ijk} \quad (2.14-12)$$

โดยที่  $y_{ij}$  คือ ค่าสังเกตที่  $ij$   $\mu$  คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกันทุกระดับ  $\tau_i$  คือ ค่าพารามิเตอร์สำหรับระดับที่  $i$  และ  $\varepsilon_{ijk}$  คือ องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม โดยส่วนตกค้างสามารถคำนวณได้

จาก

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad (2.14-13)$$

โดยที่  $\hat{y}_{ij}$  คือ ค่าประมาณของค่าสังเกต  $y_{ij}$  ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\hat{y}_{ij} = \hat{\mu} + \hat{\tau}_i \quad (2.14-14)$$

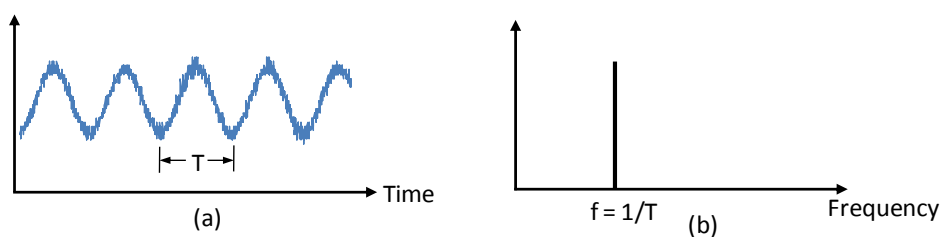
$$= \bar{y}_i + (\bar{y}_i - \bar{y}_i) \quad (2.14-15)$$

$$= \bar{y}_i \quad (2.14-16)$$

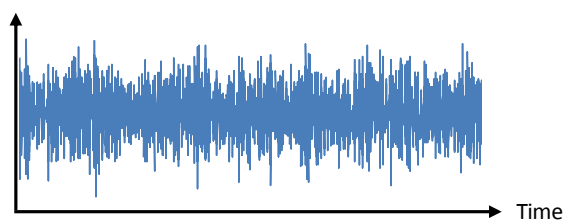
## 2.15 การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast fourier transform) [32]

ข้อมูลโดยทั่วไปที่อยู่ในโดเมนเวลา (Time domain) สามารถแสดงในโดเมนความถี่ (Frequency domain) ได้โดยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว เช่น ข้อมูลของความขรุขระผิวเมื่อนำมาพล็อตเทียบกับเวลาจะได้รูปแบบของข้อมูลที่อยู่ในลักษณะของคลื่นไซน์ (Sine wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.24(a) จะเห็นได้ว่าข้อมูลความขรุขระผิวนี้จะเกิดการแกว่งขึ้นลงเป็นรูปแบบซ้ำๆ โดยรูปแบบที่แกว่งขึ้นลงครบหนึ่งรอบใช้เวลา  $T$  ซึ่งเรียกว่าคาบ คาบมีความสัมพันธ์กับความถี่คือ  $f = 1/T$  คือจำนวนของคาบคลื่นใน 1 วินาที ข้อมูลดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ในเชิงความถี่ดังในรูปที่ 2.24(b) อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงส่วนใหญ่ข้อมูลที่เก็บมานั้นมักไม่ได้มีรูปแบบที่สามารถคำนวณได้ง่าย ซึ่งข้อมูลที่เก็บมามีสัญญาณรบกวน (Noise) ปะปนมาด้วยเสมอ ดังเช่นรูปที่ 2.25 ดังนั้นวิธีการที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบทางความถี่ของข้อมูลที่ซับซ้อนออกมาได้ คือ การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว โดยมีฟังก์ชัน  $F(t)$  ดังสมการที่ 2.15-1

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2\pi jf t} dt \quad (2.15-1)$$



รูปที่ 2.24 (a) ข้อมูลเทียบในโดเมนเวลา (b) ข้อมูลเทียบในโดเมนความถี่



รูปที่ 2.25 ข้อมูลที่ไม่มีรูปแบบแน่นอน

## 2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ilhan and Mehmet [5]

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโมเดลสำหรับการพยากรณ์ความขรุขระผิว ในกระบวนการกลึงเหล็ก AISI 1040 ด้วยมีดตัดคาร์ไบด์ โดยประยุกต์ใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม และการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ กับปัจจัยการตัดสามอย่าง คือ ความเร็วตัด ( $v$ ) อัตราป้อนตัด ( $f$ ) และความลึกตัด ( $a$ ) ซึ่งการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณจะได้สมการแบบจำลองอันดับสอง ดังต่อไปนี้

$$R_a = 0.130 + 0.00088v + 3.54f - 0.011a + 0.000005v^2 + 14.4f^2 + 0.0174a^2 + 0.00848vf + 0.000059va - 0.194fa$$

จากผลการทดลองอัตราป้อนตัดมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวมากที่สุด รองลงมา คือ ความลึกตัด และความเร็วตัด อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของทั้งสองวิธี วิธีโครงข่ายประสาทเทียมให้ความแม่นยำดีกว่าการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ

Vishal, Suresh, Rakesh and Sharma (2008) [6]

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการตัดที่มีผลต่อความขรุขระผิว และแรงตัดทั้งสามแนวแกน และพัฒนาโมเดลสำหรับการประมาณความขรุขระผิว และแรงตัดทั้งสามแนวแกน ในกระบวนการกลึงงานแข็งด้วยมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว โดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) กับปัจจัยการตัดสี่อย่าง คือ มุมเข้าตัด (Approaching angle) ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัด

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามุมเข้าตัดและอัตราป้อนตัดมีอิทธิพลต่อ  $F_c$  (Cutting force) และ  $F_f$  (Feed force) ในทิศทางเดียวกัน คือหากมุมเข้าตัดมากแรงทั้งสองแนวแกนข้างต้นก็จะมากด้วย แต่จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับ  $F_p$  (Passive force) และ  $R_a$  ในขณะที่ความเร็วตัดมีอิทธิพลต่อ  $F_p$  และ  $F_f$  ในทิศทางเดียวกัน แต่จะมีทิศทางตรงข้ามกับ  $F_c$  และ  $R_a$  ส่วนความลึกตัดมีอิทธิพลต่อ  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_p$  ในทิศทางเดียวกัน แต่มีทิศทางตรงข้ามกับ  $R_a$

Somkiat (2010) [10]

งานวิจัยนี้ศึกษาหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมที่สุดจากการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นใน 3 รูปแบบ คือ การตัดแบบแห้ง การตัดแบบเปียก และการตัดแบบใช้สเปรย์สารหล่อเย็น สำหรับการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน JIS:S45C ด้วยมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว โดยพิจารณา จากความขรุขระผิวของชิ้นงาน อายุมีดตัด และปริมาณการใช้สารหล่อเย็น และมีการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เพื่อใช้วัด

แรงตัดที่เกิดขึ้นขณะตัด ในการทดลองได้กำหนดพารามิเตอร์ในการตัดดังนี้ คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกการตัด และศึกษาแรงตัดซึ่งเป็นพารามิเตอร์ภายในกระบวนการตัด เพื่อใช้ในวิเคราะห์และอธิบายความสัมพันธ์ต่ออุณหภูมิตัด ความขรุขระผิวของชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของมีด และลักษณะการเกิดเศษโลหะ ภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันไปสำหรับการตัดที่ประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นทั้ง 3 รูปแบบ

จากการวิเคราะห์พบว่าสภาวะการตัดที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจาก ความขรุขระผิวของชิ้นงาน อายุมีดตัด และปริมาณการใช้สารหล่อเย็น คือการตัดแบบแห้ง ด้วยความเร็วตัดที่ 250 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร

#### ปิยะ ศิริธรรมปิติ (2550) [14]

งานวิจัยนี้ทำการหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C กับมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว โดยการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยในการตัดต่างๆดังนี้ 1) ความเร็วตัด 2) อัตราป้อนตัด 3) ความลึกการตัด 4) วิธีการหล่อเย็น (การตัดแบบเปียก การใช้สเปรย์ของสารหล่อเย็น และการตัดแบบแห้ง) ที่มีผลต่อความสามารถในการตัด ซึ่งหมายถึงความขรุขระผิวชิ้นงาน ความสึกหรอของมีดตัด แรงในการตัด ซึ่งจากการทดลองพบว่าปัจจัยต่างมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการตัดดังนี้

1. ความเร็วการตัดที่เหมาะสมทำให้ อุณหภูมิในการตัดที่เกิดขึ้น พอเหมาะ จึงทำให้แรงตัดที่เกิดขึ้นต่ำ
2. อัตราป้อนตัดต่ำ ทำให้ระยะป้อนตัดแคบ และพื้นที่การตัดต่ำ ทำให้ความขรุขระผิวต่ำ
3. ความลึกการตัดต่ำ ทำให้พื้นที่การตัดส่งผลให้แรงตัดที่เกิดขึ้นต่ำ ใช้แรงในการตัดต่ำ
4. วิธีการหล่อเย็นที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการตัด ข้อ 1 ถึง ข้อ 3

โดยการตัดแบบแห้งมักจะให้ผลที่ดีกว่าเสมอ ยกเว้นการตัดด้วยความเร็วสูงมาก ควรจะใช้สารหล่อเย็นช่วย ไม่ว่าจะเป็นแบบเปียก หรือแบบสเปรย์หล่อเย็นที่ความดันต่างๆ

นอกจากความสามารถในการตัดแล้ว ต้นทุนในการตัด และมลพิษจากขณะตัดที่เกิดขึ้นจากการทดลองได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่ให้ความสามารถในการตัดที่ดี เกิดมลพิษขณะตัดต่ำ และต้นทุนการตัดต่ำ โดยพบว่าเงื่อนไขการตัดแบบแห้ง ที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร ให้ความสามารถในการตัดดีที่สุด ก่อให้เกิดมลพิษขณะตัดต่ำที่สุด และต้นทุนต่ำที่สุด คิดเป็น 31.26 % ของการตัดที่ให้ต้นทุนสูงที่สุด และคิดเป็น 53.52% ของการตัดแบบเปียก

Nalbant, Gokkaya and Sur (2007) [15]

งานวิจัยนี้หาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความเรียบผิวสำเร็จของชิ้นงานน้อยสุด ในกระบวนการกลึงเหล็ก AISI 1030 ด้วยมีดตัดเคลือบไทเทเนียม โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบทากูชิกับปัจจัยการตัดสามอย่าง คือ รัศมีจมูกมีด อัตราป้อนตัด และความลึกตัด ผลการทดลองเปิดเผยว่าการใช้รัศมีจมูกมีดขนาดใหญ่ที่ 1.2 mm อัตราป้อนน้อยตัดที่ 0.15 mm/rev และความลึกตัดน้อยที่ 0.5 mm จะให้ความเรียบผิวที่ดีที่สุด

Mahdavinejad and Sharifi (2009) [16]

งานวิจัยนี้แสดงการประมาณความขรุขระผิวในกระบวนการกลึงแบบแห้งด้วย Adaptive neural fuzzy intelligent system โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ในการตัดสี่อย่าง คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจมูกมีด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความขรุขระผิวที่ได้จากการประมาณด้วย Adaptive neural fuzzy intelligent system มีความผิดพลาดน้อยกว่าการคำนวณจากทฤษฎี และผลการทดลองยังเปิดเผยว่าการเพิ่มความเร็วตัดช่วยให้ความขรุขระผิวดีขึ้น ขณะที่การเพิ่มอัตราป้อนจะทำให้ความขรุขระผิวแย่ลง

Paulo (2001) [17]

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดที่มีต่อความเรียบผิวสำเร็จของชิ้นงานในกระบวนการกลึง โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ (Taguchi) และหาแบบจำลองในรูปแบบของสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression model) ของความเรียบผิวที่แสดงในเทอมของค่าพารามิเตอร์ในการตัด คือ ความเร็วตัด อัตราการป้อน ความลึกตัด โดยได้สมการแบบจำลองดังต่อไปนี้

$$R_a = 3.179 + 9.826f - 0.009v - 0.922d$$

$$R_t = 25.547 + 41.633f - 0.067v - 5.946d$$

จากนั้นทำการเปรียบเทียบความผิดพลาดในการประมาณความขรุขระผิวระหว่างสมการแบบจำลองที่คำนวณจากการทดลองกับสมการตามทฤษฎี ผลปรากฏว่าสมการแบบจำลองที่ได้จากการทดลองสามารถประมาณความขรุขระผิวของชิ้นงานด้วยความผิดพลาดไม่เกิน 10% ขณะที่สมการตามทฤษฎีให้ค่าความผิดพลาดอย่างน้อย 16%



Choudhury and El-Baradie (1997) [18]

งานวิจัยนี้แสดงการพัฒนาสมการแบบจำลองในการพยากรณ์ความขรุขระผิวของเหล็ก EN 24T (290 BHN) ในกระบวนการกลึงแบบแห้งด้วยมีดคาร์ไบด์ไม่เคลือบผิว โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลในการพิจารณาพารามิเตอร์การตัดสามอย่าง คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัด ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาสมการแบบจำลองอันดับหนึ่ง และสมการแบบจำลองอันดับสอง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสมการแบบจำลองอันดับหนึ่งยังไม่เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความขรุขระผิว แต่สำหรับสมการแบบจำลองอันดับสองมีความเหมาะสมในการพยากรณ์ความขรุขระผิว อย่างไรก็ตามผลการทดลองเปิดเผยว่าพจน์อัตราป้อนตัดไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญจึงตัดออก ดังนั้นจึงได้สมการแบบจำลองสำหรับพยากรณ์ความขรุขระผิว ดังนี้

$$\hat{y} = 0.905 - 0.094x_1 + 0.604x_2 + 0.064x_3 + 0.102x_1^2 + 0.042x_2^2 + 0.071x_3^2$$

โดย  $\hat{y}$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  และ  $x_3$  คือ ความขรุขระผิว ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัด ตามลำดับ โดยที่อัตราป้อนตัดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อความขรุขระผิว และการลดความเร็วตัดช่วยให้ความขรุขระผิวดีขึ้น

Dilbag and Venkateswara (2007) [19]

งานวิจัยนี้พัฒนาสมการแบบจำลองในการพยากรณ์ความขรุขระผิวในกระบวนการกลึง Bearing steel (AISI 52100) ด้วยมีดตัดเซรามิกผสม (SNGA) โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล  $3^3$  ในการพิจารณาพารามิเตอร์การตัดสี่อย่าง คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด มุมคาย และรัศมีจุกมีด ซึ่งพัฒนาทั้งสมการแบบจำลองอันดับหนึ่ง และสมการแบบจำลองอันดับสอง ดังต่อไปนี้

$$R_a = 51.8535(v)^{-0.1929} (f)^{1.5872} (\alpha)^{0.0645} (r)^{-0.5894}$$

$$y_2 = 0.7834 + 0.0159x_1 + 1.1444x_2 - 0.0247x_3 - 0.6020x_4 + 0.0490x_1x_2 + 0.1007x_1x_3 + 0.0937x_1x_4 - 0.0393x_2x_3 - 0.1146x_2x_4 - 0.0096x_3x_4 + 0.1749x_1^2 + 0.1662x_2^2 - 0.1597x_3^2 - 0.3946x_4^2$$

โดย  $y_2$ ,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  และ  $x_4$  คือ ความขรุขระผิว ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด มุมคาย และรัศมีจุกมีด ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสมการแบบจำลองอันดับหนึ่งก็ให้ความแม่นยำที่เพียงพอและเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ความขรุขระผิวแล้ว ส่วนสมการแบบจำลองอันดับสองให้ความแม่นยำในการพยากรณ์ความขรุขระผิวมากกว่าสมการแบบจำลองอันดับหนึ่ง และผลการ

ทดลองเปิดเผยว่าอัตราป้อนตัดมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวมากที่สุด รองลงมาคือ รัศมีงูมกมิต ความเร็วตัด และมุมคายตามลำดับ

Yusuf and Riza (2004) [20]

งานวิจัยนี้พัฒนาสมการแบบจำลองในการพยากรณ์ความขรุขระผิวในกระบวนการกลึงเหล็ก AISI 1040 ด้วยมีดตัดเซรามิกส์เคลือบ PVD โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) ที่แสดงในเทอมของปัจจัยการตัดสามอย่าง คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัด ซึ่งได้มีการพัฒนาทั้งสมการแบบจำลองอันดับหนึ่ง และสมการแบบจำลองอันดับสอง ดังต่อไปนี้

$$\hat{y} = 0.241 - 0.00218x_1 + 0.195x_2 - 0.0045x_3 + 0.0169x_1^2 - 0.0010x_2^2 + 0.0032x_3^2 + 0.0026x_1x_2 + 0.0077x_1x_3 + 0.0101x_2x_3$$

$$R_a = 540 \cdot v^{-0.0464} \cdot f^{0.192} \cdot d^{-0.0249}$$

โดยที่  $\hat{y}$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  และ  $x_3$  คือ ความขรุขระผิว ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัดตามลำดับ จากสมการแบบจำลองอันดับสองแสดงให้เห็นว่าอัตราป้อนตัดมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวมากที่สุด โดยการเพิ่มอัตราป้อนตัดจะส่งผลให้ความขรุขระผิวมากขึ้น แต่ความขรุขระผิวจะดีขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วตัดและความลึกตัด และอันตรกิริยาระหว่างแต่ละปัจจัยการตัดไม่นัยสำคัญ ส่วนสมการแบบจำลองอันดับหนึ่งแสดงให้เห็นเช่นเดียวกันว่าอัตราป้อนตัดมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวมากที่สุด รองลงมาคือ ความเร็วตัด และความลึกตัด ตามลำดับ และในทำนองเดียวกันความขรุขระผิวดีขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วตัดและความลึกตัด อย่างไรก็ตามจากการทดสอบ ANOVA สำหรับสมการแบบจำลองอันดับหนึ่งความเร็วตัดและความลึกตัดไม่นัยสำคัญต่อความขรุขระผิว

Saeed, Zare, Chavoshi, Mehdi, and Tajdari (2010) [21]

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการตัดสองอย่าง คือ ความแข็งของเนื้อวัสดุชิ้นงาน (H) และความเร็วจาน (N) ที่มีต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน และพัฒนาโมเดลสำหรับการพยากรณ์ความขรุขระผิว ในกระบวนการกลึงเหล็ก AISI 4140 ด้วยมีดตัด CBN โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณจะได้สมการแบบจำลองอันดับสาม ดังต่อไปนี้

$$R_a = -15.4 + 0.754H + 0.00512N - 0.000201HN - 0.0112H^2 + 0.000002NH^2 + 0.000050H^3$$

จากผลการทดลองความแข็งของเนื้อวัสดุชิ้นงานมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิว โดยการเพิ่มความแข็งไปจนกระทั่ง 55 HRC จะส่งผลให้ความขรุขระผิวดีขึ้น แต่หากเพิ่มไปมากกว่านี้จะทำให้ความขรุขระผิวแย่ลง ดังนั้นความแข็งของชิ้นงานที่ 55 HRC จะให้ความขรุขระผิวที่ดีที่สุดที่ความเร็วรอบต่างๆกัน ส่วนความเร็วรอบที่ 2,500-3,000 rpm มีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวไม่มาก อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของทั้งสองวิธี วิธีโครงข่ายประสาทเทียมให้ความแม่นยำดีกว่าการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ

### สมชาติ อารยพิทยา (2552) [22]

งานวิจัยนี้ทำการสืบหาเงื่อนไขการตัดโลหะที่เหมาะสมของเหล็กกล้าคาร์บอน S45C กับมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว จากโดยศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดที่มีผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน แรงตัด และอุณหภูมิในการตัด โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองด้วย การออกแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคน ในการหารูปแบบสมการแบบจำลองของความขรุขระผิวชิ้นงาน ที่แสดงในเทอมของค่าพารามิเตอร์ในการตัด คือ ความเร็วตัด อัตราการป้อน และความลึกในการตัด และหาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยสุด และพยากรณ์ความขรุขระผิว สัดส่วนแรงตัดและอุณหภูมิในการตัด โดยแรงตัดและอุณหภูมิในการตัดถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจติดตามในกระบวนการตัด สมการแบบจำลองที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

$$R_a = 10.3042 - 0.0129570v - 147.417f + 8.03630d - 0.0000158954v^2 + 525.4f^2 - 1.69720d^2 + 0.125340(vf) + 0.00217600(vd) - 33.0560(fd)$$

$$\left(\frac{F_y}{F_z}\right) = 3.371 - 0.00383v - 22.652f + 0.6935d + 0.000031v^2 + 47.27f^2 + 0.2498d^2 + 0.01199(vf) + 0.000166(vd) + 2.2616(fd)$$

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

จากผลการทดลองด้วยความเชื่อมั่นที่ระดับ 95% พบว่าอัตราป้อนตัดและความเร็วตัดมีผลต่อผลตอบทั้ง 3 ตัว และอัตราการป้อนตัดส่งผลต่อความขรุขระผิวมากที่สุด ส่วนความลึกตัดไม่มีผลต่อผลตอบทั้ง 3 ตัว อย่างไรก็ตามเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุด คือ ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร

Somkiat (2010) [23]

งานวิจัยนี้พัฒนาสมการแบบจำลองสำหรับพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดของกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1045 ด้วยมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว โดยใช้แรงตัดเป็นพารามิเตอร์ตรวจติดตามภายในกระบวนการ และพัฒนาสมการแบบจำลองของความขรุขระผิวชิ้นงานด้วยรูปแบบฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลในที่แสดงในทอมของค่าพารามิเตอร์ในการตัด คือ ความเร็วตัด ( $v$ ) อัตราป้อนตัด ( $f$ ) ความลึกตัด ( $d$ ) รัศมีจุมุมมีด ( $r_E$ ) และสัดส่วนแรงตัด ( $F_y/F_z$ ) โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) ในการคำนวณสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังของแต่ละตัวแปรด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least square method) จะได้สมการแบบจำลองดังต่อไปนี้

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

รวมทั้งพัฒนาช่วงการพยากรณ์ของสมการแบบจำลองของความขรุขระผิวชิ้นงานด้วยระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เพื่อใช้ในการตรวจติดตามและควบคุมในการประมาณความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัด อย่างไรก็ตามอัตราป้อนตัดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวมากที่สุด และความลึกตัดมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวน้อยที่สุด โดยความขรุขระผิวของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราป้อนตัด และความลึกตัด ในขณะที่ความเร็วตัด รัศมีจุมุมมีด และสัดส่วนแรงตัดลดลง

Jeffrey, Thiele, Shreyes, and Melkote (1999) [24]

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปทรงเรขาคณิตของคมตัดบนมีดตัด และความแข็งของเนื้อวัสดุชิ้นงาน ที่มีต่อความขรุขระผิว และแรงตัด ในกระบวนการกลึงเหล็ก AISI 52100 ด้วยมีดตัด CBN (Cubic boron nitride) โดยใช้ ANOVA ในการบ่งบอกถึงความมีนัยสำคัญของแต่ละพารามิเตอร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าคมตัดใหญ่จะส่งผลให้ความขรุขระผิวมากกว่าคมตัดเล็ก เนื่องจากแรงไถ (Plough force) มากกว่าแรงเฉือน (Shear force) และอัตราการสึกหรอระหว่างรูปทรงเรขาคณิตของคมตัดและความแข็งของเนื้อวัสดุชิ้นงานมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ ยิ่งไปกว่านั้นคมตัดใหญ่ส่งผลให้แรงตัดในแนวแกน แนวรัศมี และแนวเส้นสัมผัสมากกว่าคมตัดเล็ก และยังแสดงให้เห็นอีกว่าความแข็งของเนื้อวัสดุชิ้นงานมีอิทธิพลต่อแรงตัดในแนวแกน และแนวรัศมี อย่างมีนัยสำคัญ

Tuncay and Hasan (2007) [33]

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบความแม่นยำที่ได้จากวิธีการในการพยากรณ์ความชุกของผิวของชิ้นส่วนแม่พิมพ์ระหว่างวิธีพื้นผิวผลตอบสนองกับวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ในกระบวนการกัดอลูมิเนียม (7075-T6) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟกทอเรียล (Full factorial design) กับปัจจัยการตัดห้าอย่าง คือ อัตราป้อนตัด ความเร็วตัด ความลึกตัดในแนวแกน ความลึกตัดในแนวรัศมี และค่าความเผื่อในการตัด

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าวิธีพื้นผิวผลตอบสนองให้ความผิดพลาดประมาณ 2.05% ขณะที่วิธีโครงข่ายประสาทเทียมให้ความผิดพลาดเพียง 1.48% ซึ่งถือว่าแตกต่างกันไม่มาก แต่อย่างไรก็ตามวิธีโครงข่ายประสาทเทียมใช้จำนวนการคิดคำนวณมากกว่าวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง ซึ่งมีเพียงขั้นตอนเดียว หรืออาจกล่าวได้ว่าวิธีโครงข่ายประสาทเทียมใช้หน่วยประมวลผลกลาง นานกว่าวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง และอาจนำมาซึ่งต้นทุนที่สูงกว่า

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้นำเสนอแนวทางในการดำเนินการวิจัยเพื่อพัฒนาสมการแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัด กับความขรุขระผิว แรงตัด และอุณหภูมิตัด และสืบหาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยสุดสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน S45C กับมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิวโดยจะกล่าวถึงการกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ระดับของปัจจัย เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย การติดตั้งอุปกรณ์ และการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการทดลอง ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล และการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 3.1 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวในกระบวนการกลึงมีหลายอย่าง โดยสามารถจำแนกได้ 4 อย่าง คือ ปัจจัยจากมีดตัด ปัจจัยจากชิ้นงาน ปัจจัยจากเงื่อนไขการตัด และปัจจัยที่เกิดจากธรรมชาติของการตัด อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยดังกล่าว ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมูกมีด ส่งผลต่อความขรุขระผิว ดังนั้นปัจจัยการตัดข้างต้นจะถูกพิจารณาเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ที่มีต่อความขรุขระผิว ในงานวิจัยนี้ โดยให้ปัจจัยอื่นๆเป็นปัจจัยคงที่ที่สามารถควบคุมได้

##### 3.1.2 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

การกำหนดระดับของปัจจัย (Level) จะกำหนดเป็นค่าคงที่ โดยอาศัยข้อมูลเชิงเทคนิคของบริษัทผู้ผลิตมีดตัดที่แนะนำจากคู่มือการใช้งานมีดตัด ดังนี้

- ความเร็วตัดเลือกใช้ที่ระดับ 180 260 และ 340 เมตรต่อนาที
- อัตราป้อนตัดเลือกใช้ที่ระดับ 0.15 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ
- ความลึกในการตัดเลือกใช้ที่ระดับ 0.2 0.4 และ 0.6 มิลลิเมตร
- รัศมีจุมูกมีดเลือกใช้ที่ระดับ 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร

### 3.2 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วัสดุชิ้นงาน (Workpiece material) เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน S45C มีลักษณะทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร โดยมีคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกลของเหล็ก S45C

JIS	S45C			
AISI	1045			
DIN	Ck45			
ส่วนประกอบทางเคมี				
C	Mn	Si	P	S
0.42 - 0.48	0.60 - 0.90	0.15 - 0.35	≤ 0.030	≤ 0.035
คุณสมบัติทางกล				
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7700 - 8030			
Young's Modulus (GPa)	190 - 210			
Tensile Strength (MPa)	569 (Standard)			
	686 (Quenching, Tempering)			
Yield Strength (MPa)	343 (Standard)			
	490 (Quenching, Tempering)			
Poisson's ratio	0.27 - 0.30			
Brinell Hardness (HB)	160 - 220 (Annealed)			

### 3.2.2 เม็ดมีด (Insert) แบบคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไทเทเนียม Kennametal รุ่น

DNMG150604FN KC9110 DNMG150608FN KC9110 และ DNMG150612FN KC9110

(รัศมีจุกมีด 0.4 0.8 และ 1.2 มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.2 เม็ดมีดที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 ขนาดเม็ดมีดที่ใช้ในการทดลอง

DN..		Dimensions										DNMG-FN
		D		L10		S		RE		D1		
ANSI catalog number	ISO catalog number	inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm	
DNMG441FN	DNMG150604FN	1/2	12,70	.61	15,50	1/4	6,35	1/64	0,4	.203	5,16	
DNMG442FN	DNMG150608FN	1/2	12,70	.61	15,50	1/4	6,35	1/32	0,8	.203	5,16	
DNMG443FN	DNMG150612FN	1/2	12,70	.61	15,50	1/4	6,35	3/64	1,2	.203	5,16	

### 3.2.3 เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC turning machine) ยี่ห้อ Mazak รุ่น Quick Turn

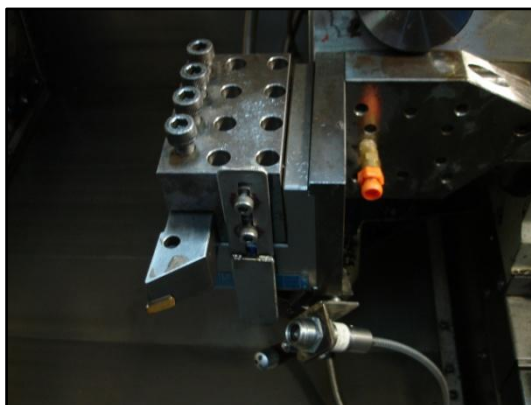
Nexus200MY



รูปที่ 3.3 เครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ใช้ในการทดลอง



3.2.4 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ยี่ห้อ Kister รุ่น 9720 สำหรับวัดแรงตัด ชาร์จแอมพลิไฟเออร์ (Charge Amplifier) ยี่ห้อ Kister สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด

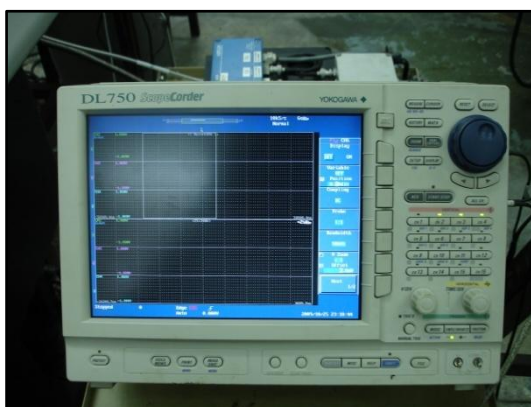


รูปที่ 3.4 ไดนาโมมิเตอร์



รูปที่ 3.5 ชาร์จแอมพลิไฟเออร์

3.2.5 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL750 ใช้สำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรง ตัดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัด



### รูปที่ 3.6 ออสซิลโลสโคป

3.2.6 อินฟราเรดไพโรมิเตอร์ (Infrared pyrometer) ยี่ห้อ RAYTEK รุ่น RAYFA2BCF13 ใช้วัดอุณหภูมิตัดแบบไม่สัมผัส



รูปที่ 3.7 อินฟราเรดไพโรมิเตอร์

3.2.7 เครื่องวัดความขรุขระผิว (Roughness tester) ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-400 ใช้วัดค่าความขรุขระผิวของ ชิ้นงาน



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดความขรุขระผิว

## 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.3.1 การติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง (Dynamometer) และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Infrared Pyrometer)

3.3.1.1 การติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง

- ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง (Dynamometer) เข้ากับชุดป้อมมีด (Turret) ของเครื่องกลึง

- เชื่อมต่อสายเซนเซอร์วัดแรงตัดเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier) เพื่อทำการขยายสัญญาณ จากนั้นต่อเครื่องขยายสัญญาณเข้ากับเครื่องออสซิลิโดสโคป (Oscilloscopes)
- ติดตั้งเม็ดมีดเข้ากับด้ามมีดแล้วนำไปจับยึดเข้ากับชุดจับยึดที่ออกแบบมาเพื่อติดตั้งกับเซนเซอร์วัดแรงตัด
- การปรับตั้งค่าเครื่องออสซิลิโดสโคป

Low-Pass Filter : 50 KHz

Sampling Rate : 10 Ks/s

Record Length : 1M

### 3.3.1.2 การติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

- ทำการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ (Pyrometer) ยึดด้วยหนีตงเหล็กเหลี่ยมเข้ากับชุดจับยึดของไดนาโมมิเตอร์ที่ได้ติดตั้งอยู่ก่อนหน้านี้
- ทำการการปรับตั้งระยะโฟกัสของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิให้ได้ค่าระยะ 102 มิลลิเมตรกับมีดตัด
- ต่อเชื่อมสายสัญญาณเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์

### 3.3.2 การเตรียมชิ้นงาน (Workpiece) นำเหล็กท่อน (Ingot) ซึ่งเริ่มต้นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร (โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานจะลดลงเรื่อยๆ

เท่ากับสองเท่าของความลึกตัดของเงื่อนไขการตัดนั้นๆ) และ ยาว 300 มิลลิเมตร ยึดจับด้วยปากจับ (Chuck) ยันศูนย์กลางชิ้นงาน (ชิ้นงานต้องผ่านการปอกผิวนอกที่มีความแข็งกว่าปกติก่อน)

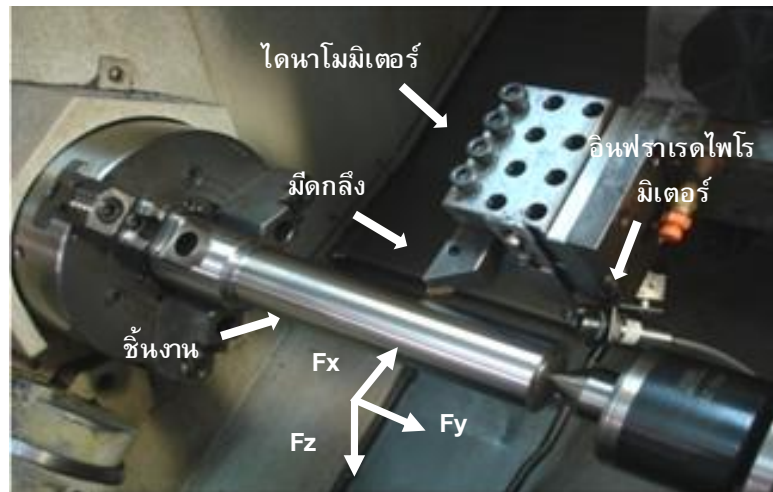
### 3.3.3 ติดตั้งเม็ดมีดเข้ากับด้ามมีด และติดตั้งด้ามมีดพร้อมเม็ดมีดบนไดนาโมมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9

### 3.3.4 เมื่อขึ้นชิ้นงานเรียบร้อยแล้วจึงทำการเขียนโปรแกรมลงบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อตัดชิ้นงานตามต้องการ

### 3.3.5 ทำการกลึงปอกผิวด้วยเงื่อนไขการตัดในตารางที่ 3.4 โดยแต่ละเงื่อนไขจะทำการกลึงปอกด้วยความยาว 250 มิลลิเมตร และทำการเปลี่ยนเม็ดมีดใหม่ทุกครั้งก่อนการทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดถัดไป

### 3.3.6 ทำการวัดความขรุขระผิวของชิ้นงาน แรงตัด และอุณหภูมิตัดที่เกิดขึ้น โดยปรับตั้งค่า Cut of length ของเครื่องวัดความขรุขระผิวเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร

### 3.3.7 บันทึกผลการทดลองในตารางที่ 3.5-3.7



รูปที่ 3.9 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง

### 3.4 การพัฒนาสมการพยากรณ์ความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด

การพัฒนาสมการแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด ในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface method) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้การออกแบบการทดลองในการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรผลตอบ พร้อมทั้งสามารถพัฒนาสมการแบบจำลองและหาระดับของตัวแปรอิสระที่ให้ผลตอบที่เหมาะสม อีกทั้งยังให้ความแม่นยำอยู่ในระดับที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวนั้นไม่เป็นแบบเชิงเส้น (Non-linear) ดังนั้นการออกแบบการทดลองที่มีระดับปัจจัยอย่างน้อยสามระดับสามารถพิจารณาด้วยวิธีการออกแบบการทดลองได้หลายแบบ เช่น บ็อก-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) แฟคทอเรียลที่มีระดับของปัจจัยสามระดับ ( $3^k$  Factorial design) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน ถูกประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนาสมการพยากรณ์ความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด ในงานวิจัยนี้โดยการวิเคราะห์การถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากจำนวนการทดลองที่น้อยกว่า และมั่นใจได้ว่าผลการทดลองอยู่ในช่วงที่ใช้งาน

เนื่องจากความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวนั้นไม่เป็นแบบเชิงเส้น (Non-linear) ดังนั้นสมการพหุนามกำลังสองดังสมการที่ 3.4-1 จึงถูกเลือกมาใช้ในการพัฒนาสมการการพยากรณ์ความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (3.4-1)$$

โดยที่  $\beta_0$   $\beta_i$   $\beta_{ii}$  และ  $\beta_{ij}$  คือค่าสัมประสิทธิ์  $X_i$  คือตัวแปรอิสระ

ดังนั้นฟังก์ชันระหว่างตัวแปรผลตอบแทน คือ ความขรุขระผิวเฉลี่ย ( $R_a$ ) อัตราส่วนแรงตัด ( $F_y/F_z$ ) และอุณหภูมิตัด ( $T$ ) กับตัวแปรอิสระที่ถูกเข้ารหัสซึ่งประกอบไปด้วย ความเร็วตัด ( $X_1$ ) อัตราป้อนตัด ( $X_2$ ) ความลึกตัด ( $X_3$ ) และรัศมีจุมูกมีด ( $X_4$ ) สามารถสร้างได้ดังนี้

$$R_a = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_1^2 + \beta_6 X_2^2 + \beta_7 X_3^2 + \beta_8 X_4^2 + \beta_9 X_1 X_2 + \beta_{10} X_1 X_3 + \beta_{11} X_1 X_4 + \beta_{12} X_2 X_3 + \beta_{13} X_2 X_4 + \beta_{14} X_3 X_4 \quad (3.4-2)$$

$$\frac{F_y}{F_z} = \beta_{15} + \beta_{16} X_1 + \beta_{17} X_2 + \beta_{18} X_3 + \beta_{19} X_4 + \beta_{20} X_1^2 + \beta_{21} X_2^2 + \beta_{22} X_3^2 + \beta_{23} X_4^2 + \beta_{24} X_1 X_2 + \beta_{25} X_1 X_3 + \beta_{26} X_1 X_4 + \beta_{27} X_2 X_3 + \beta_{28} X_2 X_4 + \beta_{29} X_3 X_4 \quad (3.4-3)$$

$$T = \beta_{30} + \beta_{31} X_1 + \beta_{32} X_2 + \beta_{33} X_3 + \beta_{34} X_4 + \beta_{35} X_1^2 + \beta_{36} X_2^2 + \beta_{37} X_3^2 + \beta_{38} X_4^2 + \beta_{39} X_1 X_2 + \beta_{40} X_1 X_3 + \beta_{41} X_1 X_4 + \beta_{42} X_2 X_3 + \beta_{43} X_2 X_4 + \beta_{44} X_3 X_4 \quad (3.4-4)$$

การหาสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์ในสมการที่ 3.4-2 ถึง 3.4-4 สามารถประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน (Box Behnken) ด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ใช้สำหรับทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด ต่อปัจจัยในการตัดที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

### 3.5 การออกแบบการทดลองแบบ Box- Behnken Design

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab มาช่วยในการออกแบบการทดลอง เพื่อใช้สร้างตารางการออกแบบ (Design Matrix) โดยในการออกแบบกำหนดให้ลำดับการทดลองมีการสุ่ม (Randomization) เพื่อให้ผลการทดลองไม่เป็นลำดับและมีความเป็นอิสระ (Independent) ต่อกัน ในงานวิจัยนี้กำหนดปัจจัยในการทดลองทั้งสิ้น 4 ปัจจัย คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมูกมีด โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ คือ ต่ำ กลาง สูง หรือ -1 0 และ 1 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3.3 ดังนั้นการออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคนจึงให้การทดลองเป็นจำนวน 27 การทดลอง (Run) สำหรับ 1 เพลทเคต ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	หน่วย	ระดับ			ตัวแปร เข้ารหัส
		ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)	
ความเร็วตัด (v)	(เมตร/นาที)	180	260	340	$X_1$
อัตราป้อนตัด (f)	(มิลลิเมตร/รอบ)	0.15	0.2	0.25	$X_2$
ความลึกตัด (d)	(มิลลิเมตร)	0.2	0.4	0.6	$X_3$
รัศมีจมูกมีด ( $r_c$ )	(มิลลิเมตร)	0.4	0.8	1.2	$X_4$

ตารางที่ 3.4 เมตริกซ์การออกแบบการทดลอง

Std Order	Run Order	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
22	1	0	+1	0	-1
23	2	0	-1	0	+1
14	3	0	+1	-1	0
21	4	0	-1	0	-1
7	5	0	0	-1	+1
1	6	-1	-1	0	0
6	7	0	0	+1	-1
27	8	0	0	0	0
11	9	-1	0	0	+1
2	10	+1	-1	0	0
18	11	+1	0	-1	0
13	12	0	-1	-1	0
8	13	0	0	+1	+1
16	14	0	+1	+1	0
4	15	+1	+1	0	0
3	16	-1	+1	0	0

15	17	0	-1	+1	0
17	18	-1	0	-1	0
Std Order	Run Order	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
25	19	0	0	0	0
12	20	+1	0	0	+1
20	21	+1	0	+1	0
19	22	-1	0	+1	0
24	23	0	+1	0	+1
26	24	0	0	0	0
5	25	0	0	-1	-1
10	26	+1	0	0	-1
9	27	-1	0	0	-1

### 3.6 การเก็บรวบรวมข้อมูล

#### 3.6.1 ความขรุขระผิว

เมื่อทำการกลึงชิ้นงานตามเงื่อนไขการตัดในตารางเมตริกซ์การออกแบบการทดลองด้วยลำดับการทดลองแบบสุ่ม จากนั้นนำชิ้นงานมาวัดความขรุขระผิวด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิว การเก็บข้อมูลสำหรับความขรุขระผิวจะเก็บ 2 อย่าง คือ ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) โดยทำการวัดและเก็บข้อมูลจำนวน 3 ครั้ง แต่ครั้งของการวัดจะมีการสุ่มตำแหน่งในการวัดที่แตกต่างกัน เช่น ตอนต้น ตอนกลาง ตอนท้ายของชิ้นงาน เป็นต้น หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ทั้งสามครั้งมาหาค่าเฉลี่ย ดังตารางที่ 3.5 และใช้ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนของความขรุขระผิวสำหรับเงื่อนไขการตัดนั้นๆ

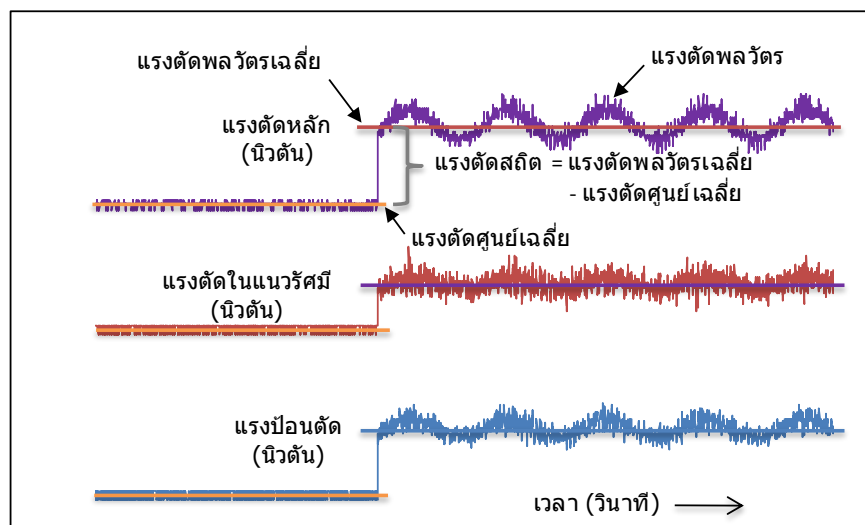
#### 3.6.2 แรงตัด

แรงตัดที่เกิดจากการตัดในเบื้องต้นจะอยู่ในรูปของสัญญาณแรงตัดซึ่งเป็นแบบอนาล็อก ดังรูปที่ 3.10 ดังนั้นในการเก็บค่าของแรงตัดเพื่อใช้ในการพัฒนาสมการแบบจำลองจะต้องทำให้ อยู่ในรูปแบบของดิจิทัล โดยการสุ่มข้อมูลจากสัญญาณแรงตัด ซึ่งจากการปรับตั้งค่า Sampling rate เท่ากับ 10 Ks/s และทำการเก็บข้อมูลสำหรับแรงตัดมา 2 วินาที ดังนั้นสัญญาณแรงตัดจะถูก

ผู้เก็บข้อมูลมาทั้งสิ้นจำนวน 20,000 ค่าในแรงตัดแต่ละแกน ซึ่งประกอบด้วยแรงตัดในแนวรัศมี (Radial Force,  $F_x$ ) แรงป้อนตัด (Feed Force,  $F_y$ ) และแรงตัดหลัก (Main Force,  $F_z$ ) อย่างไรก็ตามแรงตัดที่เก็บมาได้ก็ยังอยู่ในหน่วยของโวลต์ (V) จะต้องทำการแปลงให้เป็นหน่วยของนิวตัน (N) โดยมีสูตรการแปลงดังนี้

- แรงตัดในแนวรัศมี ( $F_x$  (N)) =  $V_x$  (Volt) x 600 (N/Volt)
- แรงป้อนตัด ( $F_y$  (N)) =  $V_y$  (Volt) x 600 (N/Volt)
- แรงตัดหลัก ( $F_z$  (N)) =  $V_z$  (Volt) x 1,200 (N/Volt)

จากรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าการทดลองจะมีแรงตัดศูนย์เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง เมื่อมีการตัดเกิดขึ้นจะเกิดแรงตัดพลวัต (Dynamic force) ซึ่งในแรงตัดนี้จะมีการรวมแรงตัดศูนย์เข้าไปด้วย ดังนั้นแรงตัดที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นแรงตัดสถิต (Static force) ซึ่งได้จากการหาค่าเฉลี่ยของแรงตัดพลวัตและค่าเฉลี่ยแรงตัดศูนย์มาลบกัน



รูปที่ 3.10 การคำนวณแรงตัดสถิต

### 3.6.3 คุณหมุมิตต์

ข้อมูลของคุณหมุมิตต์ที่เก็บได้ทั้งหมดจะนำมาหาค่าเฉลี่ย และใช้ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนของคุณหมุมิตต์ของเงื่อนไขการตัดนั้นๆ ดังตารางที่ 3.7



ตารางที่ 3.5 รูปแบบการเก็บข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุด

Std Order	Run Order	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Nose radius	Ra ( $\mu\text{m}$ )				Rz ( $\mu\text{m}$ )			
						1	2	3	Avg	1	2	3	Avg
22	1	0	+1	0	-1								
23	2	0	-1	0	+1								
14	3	0	+1	-1	0								
21	4	0	-1	0	-1								
7	5	0	0	-1	+1								
1	6	-1	-1	0	0								
6	7	0	0	+1	-1								
27	8	0	0	0	0								
11	9	-1	0	0	+1								
2	10	+1	-1	0	0								
18	11	+1	0	-1	0								
13	12	0	-1	-1	0								
8	13	0	0	+1	+1								
16	14	0	+1	+1	0								

ตารางที่ 3.5 รูปแบบการเก็บข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุด (ต่อ)

Std Order	Run Order	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Nose radius	Ra ( $\mu\text{m}$ )				Rz ( $\mu\text{m}$ )			
						1	2	3	Avg	1	2	3	Avg
4	15	+1	+1	0	0								
3	16	-1	+1	0	0								
15	17	0	-1	+1	0								
17	18	-1	0	-1	0								
25	19	0	0	0	0								
12	20	+1	0	0	+1								
20	21	+1	0	+1	0								
19	22	-1	0	+1	0								
24	23	0	+1	0	+1								
26	24	0	0	0	0								
5	25	0	0	-1	-1								
10	26	+1	0	0	-1								
9	27	-1	0	0	-1								

ตารางที่ 3.6 รูปแบบการเก็บข้อมูลแรงตัด

Std Order	Run Order	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Nose radius	Static force		
						Fx	Fy	Fz
22	1	0	+1	0	-1			
23	2	0	-1	0	+1			
14	3	0	+1	-1	0			
21	4	0	-1	0	-1			
7	5	0	0	-1	+1			
1	6	-1	-1	0	0			
6	7	0	0	+1	-1			
27	8	0	0	0	0			
11	9	-1	0	0	+1			
2	10	+1	-1	0	0			
18	11	+1	0	-1	0			
13	12	0	-1	-1	0			
8	13	0	0	+1	+1			
16	14	0	+1	+1	0			

ตารางที่ 3.6 รูปแบบการเก็บข้อมูลแรงตัด (ต่อ)

Std Order	Run Order	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Nose radius	Static force		
						Fx	Fy	Fz
4	15	+1	+1	0	0			
3	16	-1	+1	0	0			
15	17	0	-1	+1	0			
17	18	-1	0	-1	0			
25	19	0	0	0	0			
12	20	+1	0	0	+1			
20	21	+1	0	+1	0			
19	22	-1	0	+1	0			
24	23	0	+1	0	+1			
26	24	0	0	0	0			
5	25	0	0	-1	-1			
10	26	+1	0	0	-1			
9	27	-1	0	0	-1			

หมายเหตุ : Static force คือ แรงตัดสถิต Fx (N) คือ แรงตัดในแนวรัศมี Fy (N) คือ แรงป้อนตัด Fz (N) คือ แรงตัดหลัก

ตารางที่ 3.7 รูปแบบการเก็บข้อมูลอุณหภูมิตัด

Std Order	Run Order	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Nose radius	Temperature (°C)
22	1	0	+1	0	-1	
23	2	0	-1	0	+1	
14	3	0	+1	-1	0	
21	4	0	-1	0	-1	
7	5	0	0	-1	+1	
1	6	-1	-1	0	0	
6	7	0	0	+1	-1	
27	8	0	0	0	0	
11	9	-1	0	0	+1	
2	10	+1	-1	0	0	
18	11	+1	0	-1	0	
13	12	0	-1	-1	0	
8	13	0	0	+1	+1	
16	14	0	+1	+1	0	
4	15	+1	+1	0	0	

ตารางที่ 3.7 รูปแบบการเก็บข้อมูลอุณหภูมิตัด (ต่อ)

Std Order	Run Order	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Nose radius	Temperature (°C)
3	16	-1	+1	0	0	
15	17	0	-1	+1	0	
17	18	-1	0	-1	0	
25	19	0	0	0	0	
12	20	+1	0	0	+1	
20	21	+1	0	+1	0	
19	22	-1	0	+1	0	
24	23	0	+1	0	+1	
26	24	0	0	0	0	
5	25	0	0	-1	-1	
10	26	+1	0	0	-1	
9	27	-1	0	0	-1	

หมายเหตุ : Temperature คือ อุณหภูมิตัด มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส (°C)

### 3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

#### 3.7.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลจากด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคน สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab เนื่องจากสามารถตอบสนองต่อการวิเคราะห์ข้อมูลได้เป็นอย่างดี และเป็นที่ยอมรับใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยต่างๆ

#### 3.7.2 การวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง เป็นการวิเคราะห์ข้อมูล ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) โดยพิจารณาจากตัวสถิติทดสอบสำหรับปัจจัยนั้นๆกับตัวสถิติทดสอบด้วยระดับนัยสำคัญที่ยอมรับได้ หากค่าสถิติทดสอบสำหรับปัจจัยนั้นๆมากกว่าค่าสถิติทดสอบด้วยระดับนัยสำคัญที่ยอมรับได้ แสดงว่าสมมติฐานหลักถูกปฏิเสธ หรืออีกวิธีหนึ่งซึ่งง่ายกว่าและเป็นที่ยอมรับใช้โดยทั่วไป คือ การใช้ค่า P-Value ซึ่งเป็นระดับนัยสำคัญที่น้อยที่สุดที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก โดยการเปรียบเทียบค่า P-Value กับระดับนัยสำคัญหรือ  $\alpha$  ถ้าหากค่า P-Value น้อยกว่า  $\alpha$  แสดงว่าสมมติฐานหลักถูกปฏิเสธ ซึ่งหมายความว่าปัจจัยตัวนั้นมีผลต่อตัวแปรผลตอบ โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

#### 3.7.3 การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model adequacy checking)

ก่อนทำการสรุปผลการวิเคราะห์จะต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model adequacy checking) โดยตรวจสอบว่าข้อมูลของผลการทดลองมีคุณสมบัติครบทั้ง 3 อย่างตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง คือ  $NID(0, \sigma^2)$  จึงสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้อย่างสมบูรณ์ โดยทำการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับส่วนตกค้าง (Residual) คือ การแจกแจงแบบปกติ ความเป็นอิสระ และควมมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

##### 3.7.3.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality)

ในการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normal distribution assumption) นั้นจะพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของตัวแปรผลตอบว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยนำส่วนตกค้างมาสร้าง Normal Probability Plot และพิจารณาการกระจายตัวโดยการกระจายตัวควรเป็นตามแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงถือว่าเป็นการกระจายตัวแบบปกติ

### 3.7.3.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ นั้นจะตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ของตัวแปรผลตอบว่ามีความเกี่ยวพันกันหรือไม่ โดยการพล็อตส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล (Observation order) ค่าส่วนตกค้างไม่ควรมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ จึงถือว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ

### 3.7.3.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance stability)

การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนเป็น การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายของส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถุกฟิต (Fitted Value) ซึ่งการกระจายไม่ควรมีลักษณะที่เป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด จะถือว่ามีความเสถียรภาพของความแปรปรวน



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากทำการทดลองตามเมตริกซ์การออกแบบการทดลอง ผลการทดลองที่เก็บรวบรวมมาเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรผลตอบสนอง ประกอบด้วยตัวแปรอิสระหรือปัจจัยการตัด คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมมิต ส่วนตัวแปรผลตอบสนอง คือ ความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด ในส่วนของการวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับการพัฒนาสมการแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด รวมทั้งหาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุด จะประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจากการทดลอง การวิเคราะห์ผลตอบความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย การวิเคราะห์ผลตอบอัตราส่วนแรงตัด การวิเคราะห์ผลตอบอุณหภูมิตัด การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด การวิเคราะห์หาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม และการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง รวมทั้งได้ทำการวิเคราะห์ความขรุขระผิวและแรงตัด พลวัตในเชิงความถี่ และการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างเศษโลหะและเงื่อนไขการตัด อีกด้วย

#### 4.1 ผลการทดลอง

เมื่อการทดลองดำเนินไปตามแผนการทดลองจนสมบูรณ์ ข้อมูลดิบของตัวแปรผลตอบทั้งหมดจากการทดลองถูกเก็บรวบรวมตามตารางที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 แสดงในภาคผนวก ก ดังนั้นข้อมูลดิบดังกล่าวถูกแปลงให้เป็นข้อมูลสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ผล โดยค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย ( $R_a$ ) และค่าความขรุขระผิวสูงสุด ( $R_z$ ) อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย แรงตัดในแต่ละแกน คือ แรงตัดในแนวรัศมี ( $F_x$ ) แรงป้อนตัด ( $F_y$ ) และแรงตัดหลัก ( $F_z$ ) ได้จากการลบกันของค่าเฉลี่ยของแรงตัดพลวัตและค่าเฉลี่ยสัญญาณรบกวน และ  $F_y/F_z$  เป็นการหารกันระหว่างแรงป้อนตัด ( $F_y$ ) และแรงตัดหลัก ( $F_z$ ) ส่วนอุณหภูมิตัด ( $T$ ) เกิดจากการเฉลี่ยข้อมูลดิบของอุณหภูมิทั้งหมด โดยข้อมูลตัวแปรผลตอบสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ผลทั้งหมดถูกรวมไว้ในตารางเดียวกันดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เมทริกซ์ของการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็นเกิน 4 ปัจจัย และผลตอบสนอง

Std Order	Run Order	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Nose radius	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fy/Fz	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
22	1	0	+1	0	-1	4.7473	20.1770	124.81	77.25	199.44	0.387322	414.76
23	2	0	-1	0	+1	0.8893	3.9933	158.61	50.61	168.04	0.301179	429.44
14	3	0	+1	-1	0	2.7087	10.9777	102.70	40.70	109.21	0.372687	414.25
21	4	0	-1	0	-1	2.2747	9.5513	96.12	67.28	132.17	0.509068	409.81
7	5	0	0	-1	+1	1.0167	5.6510	121.81	35.76	123.52	0.289543	427.21
1	6	-1	-1	0	0	1.0457	5.8823	138.30	68.13	149.21	0.456601	414.54
6	7	0	0	+1	-1	3.2790	13.8447	123.60	132.27	267.31	0.494817	423.56
27	8	0	0	0	0	1.7747	8.2977	134.96	68.74	175.24	0.392271	419.03
11	9	-1	0	0	+1	1.2687	6.2600	193.00	73.67	213.66	0.344793	433.49
2	10	+1	-1	0	0	0.9790	5.2037	117.16	60.23	145.42	0.414166	428.54
18	11	+1	0	-1	0	1.8027	7.7293	93.75	30.18	94.30	0.320052	408.87
13	12	0	-1	-1	0	1.0413	4.8460	94.00	35.20	82.26	0.427937	414.24
8	13	0	0	+1	+1	1.0513	5.4073	220.53	110.88	291.12	0.380888	441.71
16	14	0	+1	+1	0	2.7333	11.1603	185.59	125.13	294.50	0.424892	423.93
4	15	+1	+1	0	0	2.5020	11.2020	146.85	72.38	202.09	0.358152	430.92

ตารางที่ 4.1 เมทริกซ์ของการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็นเกิน 4 ปัจจัย และผลตอบสนอง (ต่อ)

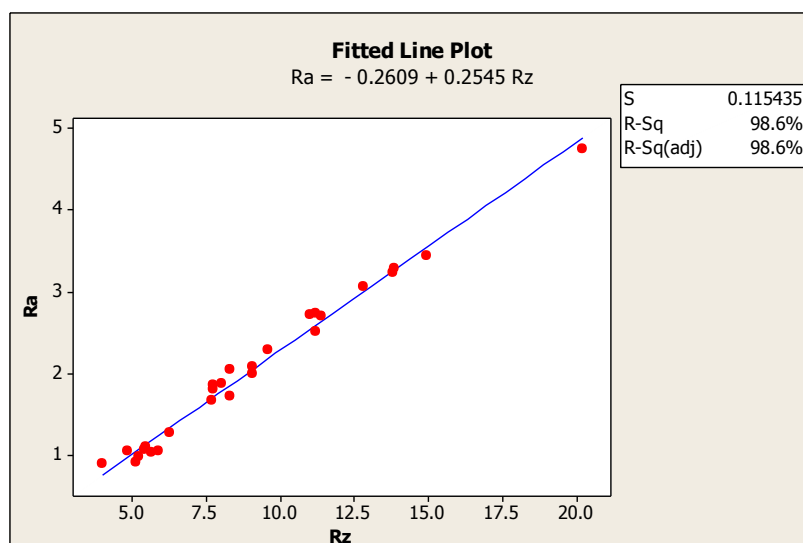
Std Order	Run Order	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Nose radius	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fy/Fz	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
3	16	-1	+1	0	0	2.6943	11.3897	147.45	80.16	206.30	0.388553	412.23
15	17	0	-1	+1	0	1.0857	5.4600	148.10	102.42	211.05	0.485274	420.48
17	18	-1	0	-1	0	2.0467	8.2717	94.21	40.90	99.55	0.410838	401.96
25	19	0	0	0	0	1.9133	9.0700	143.34	69.30	179.37	0.386367	418.19
12	20	+1	0	0	+1	0.9070	5.1317	162.57	60.07	189.74	0.316598	448.17
20	21	+1	0	+1	0	1.8633	8.0040	171.04	111.43	251.34	0.443353	433.38
19	22	-1	0	+1	0	2.0670	9.0477	173.22	116.33	267.38	0.435076	410.74
24	23	0	+1	0	+1	1.6663	7.6947	174.79	62.28	227.78	0.273424	435.42
26	24	0	0	0	0	1.8473	7.7170	135.51	66.31	176.87	0.374886	420.55
5	25	0	0	-1	-1	3.2317	13.7867	92.28	40.79	98.25	0.415165	406.86
10	26	+1	0	0	-1	3.0540	12.8193	112.05	72.04	167.80	0.429342	416.52
9	27	-1	0	0	-1	3.4317	14.9343	121.06	86.13	189.07	0.455522	407.03

#### 4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

เนื่องจากตัวแปรผลตอบสำหรับค่าความขรุขระผิวมีอยู่ด้วยกัน 2 ค่า คือความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) ดังตารางที่ 4.2 ดังนั้นเพื่อวิเคราะห์ว่าผลตอบทั้งสองมีความสัมพันธ์กันหรือไม่ โดยสามารถวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ของผลตอบได้จากค่า R-Sq ถ้าค่า R-Sq มีค่าสูงแสดงว่าค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุดมีความสัมพันธ์กัน สามารถวิเคราะห์ค่าตัวแปรผลตอบตัวใดตัวหนึ่งก็ได้ เนื่องจากตัวแปรผลตอบอีกตัวก็จะให้ผลการวิเคราะห์ไปในทิศทางเดียวกัน แต่ถ้าค่า R-Sq มีค่าต่ำแสดงว่าค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุดไม่มีความสัมพันธ์กันจะต้องทำการวิเคราะห์ผลตอบทั้งสอง

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของผลตอบระหว่าง Ra กับ Rz

No.	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	No.	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )
1	4.7473	20.1770	15	2.5020	11.2020
2	0.8893	3.9933	16	2.6943	11.3897
3	2.7087	10.9777	17	1.0857	5.4600
4	2.2747	9.5513	18	2.0467	8.2717
5	1.0167	5.6510	19	1.9133	9.0700
6	1.0457	5.8823	20	0.9070	5.1317
7	3.2790	13.8447	21	1.8633	8.0040
8	1.7747	8.2977	22	2.0670	9.0477
9	1.2687	6.2600	23	1.6663	7.6947
10	0.9790	5.2037	24	1.8473	7.7170
11	1.8027	7.7293	25	3.2317	13.7867
12	1.0413	4.8460	26	3.0540	12.8193
13	1.0513	5.4073	27	3.4317	14.9343
14	2.7333	11.1603			



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Ra กับ Rz

จากรูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) โดยค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 98.6% นั้นหมายความว่าทั้งความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุดมีความสัมพันธ์กันอย่างสูง กล่าวคือความขรุขระผิวเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลงโน้มไปอย่างไรความขรุขระผิวสูงสุดก็จะเป็นไปในแนวโน้มเดียวกับความขรุขระผิวเฉลี่ย หรือในทำนองเดียวกันไม่ว่าความขรุขระผิวสูงสุดจะเปลี่ยนไปอย่างไรความขรุขระผิวเฉลี่ยก็จะเป็นไปในแนวทางเดียวกัน ดังนั้นสามารถใช้ค่าตัวแปรผลตอบตัวใดตัวหนึ่งในการวิเคราะห์ก็ได้ ซึ่งจะให้ผลในทิศทางเดียวกัน โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) เป็นตัวแทนของความขรุขระผิวมาวิเคราะห์ต่อ

#### 4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะทำการแจกแจงเป็นหัวข้อตามตัวแปรผลตอบดัง ต่อไปนี้

##### 4.3.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)

จากผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.1 สามารถนำมาประมาณพื้นผิวผลตอบสนองสำหรับความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) โดยใช้ตัวแบบความสัมพันธ์อันดับสอง (Second-Order Model) ดังสมการที่ 4.3-1

$$\begin{aligned}
 R_a = & \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_1^2 + \beta_6 X_2^2 + \beta_7 X_3^2 + \beta_8 X_4^2 + \beta_9 X_1 X_2 \\
 & + \beta_{10} X_1 X_3 + \beta_{11} X_1 X_4 + \beta_{12} X_2 X_3 + \beta_{13} X_2 X_4 + \beta_{14} X_3 X_4
 \end{aligned}
 \tag{4.3-1}$$

โดยที่  $\beta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  และ  $X_4$  คือ ตัวแปรอิสระที่ถูกเข้ารหัสประกอบไปด้วยความเร็วตัด ( $X_1$ ) อัตราป้อนตัด ( $X_2$ ) ความลึกตัด ( $X_3$ ) และรัศมีจมูกมีด ( $X_4$ )

เมื่อนำตัวแปรอิสระ คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจมูกมีด ซึ่งอยู่ในรูปของตัวแปรที่ถูกเข้ารหัส (Coded variable) มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) จะได้ค่าประมาณสัมประสิทธิ์สำหรับพารามิเตอร์ของแบบจำลองการถดถอยดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าประมาณพารามิเตอร์ของการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับความขรุขระผิวเฉลี่ย

The analysis was done using coded units.				
Estimated Regression Coefficients for Ra				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.84512	0.07579	24.344	0.000
Cutting speed	-0.12050	0.03790	-3.180	0.008
Feed rate	0.81136	0.03790	21.410	0.000
Depth of cut	0.01933	0.03790	0.510	0.619
Nose radius	-1.10158	0.03790	-29.068	0.000
Cutting speed*Cutting speed	-0.02262	0.05684	-0.398	0.698
Feed rate*Feed rate	0.06559	0.05684	1.154	0.271
Depth of cut*Depth of cut	0.01056	0.05684	0.186	0.856
Nose radius*Nose radius	0.37184	0.05684	6.541	0.000
Cutting speed*Feed rate	-0.03142	0.06564	-0.479	0.641
Cutting speed*Depth of cut	0.01007	0.06564	0.153	0.881
Cutting speed*Nose radius	0.00400	0.06564	0.061	0.952
Feed rate*Depth of cut	-0.00494	0.06564	-0.075	0.941
Feed rate*Nose radius	-0.42392	0.06564	-6.458	0.000
Depth of cut*Nose radius	-0.00317	0.06564	-0.048	0.962

S = 0.131277 PRESS = 1.15743  
R-Sq = 99.16% R-Sq(pred) = 95.27% R-Sq(adj) = 98.17%

จากตารางที่ 4.3 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์การถดถอยจะได้สมการแบบจำลองสำหรับพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ย คือ

$$\begin{aligned}
 R_a = & 1.84512 - 0.12050X_1 + 0.81136X_2 + 0.01933X_3 - 1.10158X_4 - 0.02262X_1^2 \\
 & + 0.06559X_2^2 + 0.01056X_3^2 + 0.37184X_4^2 - 0.03142X_1X_2 + 0.01007X_1X_3 \\
 & + 0.00400X_1X_4 - 0.00494X_2X_3 - 0.42392X_2X_4 - 0.00317X_3X_4
 \end{aligned} \quad (4.3-2)$$

จากตารางที่ 4.3 ได้แสดงค่าสถิติ t ที่ใช้ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยรายตัว พบว่าค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น (Linear coefficient) คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และรัศมีจมูกมีด ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นโค้ง (Quadratic coefficient) คือ Nose radius\*Nose radius และค่าสัมประ

สิทธิ์ของอัตรากระทำ (Interaction coefficient) คือ Feed rate\*Nose radius เท่านั้นที่ต่างจากศูนย์ อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ( $P < 0.05$ ) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9916 นั่นคือความแปรปรวนที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการมีเพียง 0.84% เท่านั้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีบางปัจจัยที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความขรุขระผิว เช่น ความลึกตัด แต่ก็ไม่ได้ตัดออกจากสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวเนื่องจากปัจจัยเหล่านี้ก็ยังคงส่งผลต่ออุณหภูมิตัดและแรงตัด ซึ่งเป็นกลไกที่จะมีผลต่อความขรุขระผิวด้วยเช่นกัน รวมทั้งการตัดออกปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลให้ความแม่นยำในการพยากรณ์ลดลง

จากสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ 4.3-2 สังเกตได้ว่าแต่ละพารามิเตอร์มีค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือค่าสัมประสิทธิ์สามารถบ่งบอกได้ทั้งขนาดและทิศทางในการส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยสำหรับพารามิเตอร์นั้นๆ โดยสัมประสิทธิ์ที่มีค่าบวกจะมีผลให้พารามิเตอร์นั้นส่งผลต่อความขรุขระผิวเฉลี่ยในลักษณะแปรผันตรง แต่ถ้าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์นั้นมีค่าลบก็จะส่งผลต่อความขรุขระผิวเฉลี่ยในลักษณะแปรผกผัน ส่วนค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์จะบ่งบอกถึงขนาดที่จะส่งผลต่อความขรุขระผิวเฉลี่ย ถ้ามีค่ามากก็จะส่งผลมากต่อค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย ซึ่งก็จะเป็นไปในทำนองเดียวกับการทดสอบทางสถิติว่าพารามิเตอร์นั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนพารามิเตอร์ที่มีค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์ไม่มาก นั้นหมายความว่าส่งผลต่อความขรุขระผิวเฉลี่ยน้อยหรืออาจไม่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญในการทดสอบทางสถิติ ซึ่งจากสมการจะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วตัดมีค่าเป็นลบ สามารถตีความหมายได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วตัดขึ้นความขรุขระผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากที่ความเร็วตัดสูงมีผลให้อุณหภูมิตัดสูง ทำให้ใช้แรงในการตัดน้อยลง จากผลของเนื้อวัสดุอ่อนนุ่มจึงตัดง่ายขึ้น มีผลให้ความขรุขระผิวเฉลี่ยลดลง แต่ขณะที่สัมประสิทธิ์ของอัตราป้อนตัดมีค่าเป็นบวก นั่นคือเมื่ออัตราป้อนตัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีความขรุขระผิวเฉลี่ย ( $Ra = f^2/32r_e$ ) ส่วนความลึกตัด ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก ซึ่งเข้าใจได้ว่าเมื่อเพิ่มความลึกตัดมากขึ้นมีผลให้ความขรุขระผิวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นั่นเป็นไปได้ว่าความลึกตัดที่เพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่หน้าสัมผัสระหว่างเนื้อวัสดุชิ้นงานและมิดมีมากขึ้น จึงทำให้เกิดการสั่นสะเทือนมากขึ้นตามไปด้วยมีผลให้ความขรุขระผิวเฉลี่ย และสัมประสิทธิ์ของรัศมีจุมุกมีค่าเป็นลบ คือ เมื่อรัศมีจุมุกมีขนาดมากขึ้นส่งผลให้ความขรุขระผิวเฉลี่ยลดลง ซึ่งก็เป็นไปตามทฤษฎีความขรุขระผิวเฉลี่ยด้วยเช่นกัน และจากค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์จะเห็นได้ว่ารัศมีจุมุกมีค่าส่งผลต่อความขรุขระผิวเฉลี่ยมากที่สุด รองลงมาคือ อัตราป้อนตัด อัตราการกระทำระหว่างอัตรา

ป้อนตัดและรัศมีจุกมิด กำลังสองของรัศมีจุกมิด และความเร็วตัด ตามลำดับ นอกจากนั้นไม่มีผลต่อความขรุขระผิวเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ หรือมีผลน้อยมาก

เมื่อได้สมการที่ใช้ประมาณพื้นผิวผลตอบสนองด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย จะต้องมีการทดสอบสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสมการมีค่าเป็นศูนย์หรือไม่ โดยมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \text{All } \beta_i = 0$$

$$H_1 : \text{At least one } \beta_i \neq 0$$

และใช้สถิติทดสอบ คือ  $F = \text{MSR}/\text{MSE}$

จากตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ค่าสถิติ  $F$  เท่ากับ 100.58 ซึ่งมีความมากกว่า  $F_{0.05,14,12}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.64 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสมการไม่เท่ากับศูนย์ ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ( $P < 0.05$ )

2. ตรวจสอบว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \text{ตัวแบบมีความเหมาะสมกับข้อมูล}$$

$$H_1 : \text{ตัวแบบไม่เหมาะสมกับข้อมูล}$$

และใช้สถิติทดสอบ คือ  $F = \text{MS}_{\text{LOF}}/\text{MS}_{\text{PE}}$

จากตารางที่ 4.4 ได้ค่าสถิติ  $F$  เท่ากับ 4.10 ซึ่งน้อยกว่าค่า  $F_{0.05,10,2}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 19.40 นั่นคือไม่สามารถปฏิเสธ  $H_0$  ได้ ดังนั้นที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สามารถสรุปได้ว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูล

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับความขรุขระผิวเฉลี่ย ( $R_a$ )

Analysis of Variance for $R_a$						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	24.2679	24.2679	1.73342	100.58	0.000
Linear	4	22.6403	22.6403	5.66008	328.43	0.000
Square	4	0.9043	0.9043	0.22607	13.12	0.000
Interaction	6	0.7234	0.7234	0.12056	7.00	0.002
Residual Error	12	0.2068	0.2068	0.01723		
Lack-of-Fit	10	0.1972	0.1972	0.01972	4.10	0.212
Pure Error	2	0.0096	0.0096	0.00481		
Total	26	24.4747				

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการที่ 4.3-2 ดังตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยกำลังสองมีค่า  $P$ -Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่าความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุกมิดมีความสัมพันธ์กับความขรุขระผิวอย่าง



มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% อีกทั้ง Lack of fit มีค่า P-Value เท่ากับ 0.212 ซึ่งมากกว่า 0.05 นั้นหมายถึงว่าสมการที่ได้มีความแม่นยำเพียงพอในการพยากรณ์ความขรุขระผิว

อย่างไรก็ตามในสมการที่ 4.3-2 ในการพยากรณ์ความขรุขระผิวเฉลี่ยจะต้องใช้ตัวแปรอิสระที่ถูกเข้ารหัสในการคำนวณ ดังนั้นเพื่อให้สามารถแทนค่าตัวแปรอิสระแบบปกติที่เป็นตัวแปรตามธรรมชาติ (Natural variable) สมการที่ 4.3-2 สามารถแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปรอิสระกลับมาได้ดังตารางที่ 4.5 ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 4.3-3

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแบบถอดรหัสสำหรับความขรุขระผิวเฉลี่ย

Estimated Regression Coefficients for Ra using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	-0.264458
Cutting speed	0.00155016
Feed rate	24.9288
Depth of cut	-0.147691
Nose radius	-2.24985
Cutting speed*Cutting speed	-3.53364E-06
Feed rate*Feed rate	26.2372
Depth of cut*Depth of cut	0.263889
Nose radius*Nose radius	2.32399
Cutting speed*Feed rate	-0.00785417
Cutting speed*Depth of cut	0.000629687
Cutting speed*Nose radius	0.000125000
Feed rate*Depth of cut	-0.494167
Feed rate*Nose radius	-21.1958
Depth of cut*Nose radius	-0.0395833

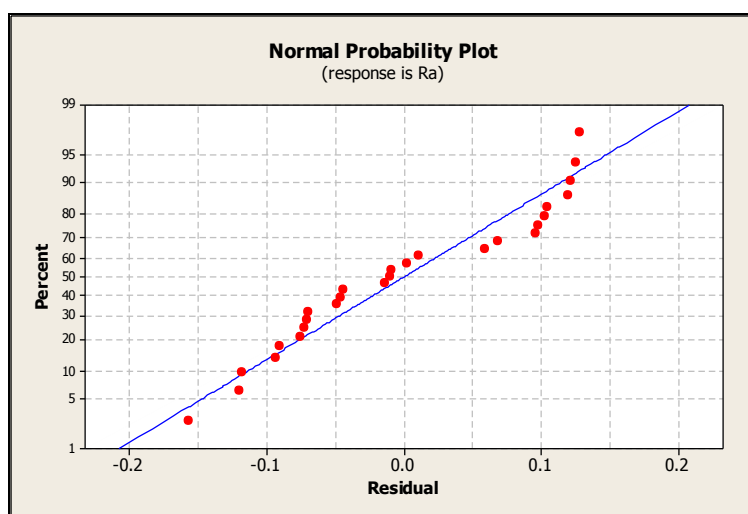
$$\begin{aligned}
 R_a = & -0.26446 + 0.00155v + 24.9288f - 0.14769d - 2.24985r_e - 0.000003v^2 + 26.2372f^2 \\
 & + 0.26389d^2 + 2.32399r_e^2 - 0.00785vf + 0.00063vd + 0.00013vr_e - 0.49417fd \\
 & - 21.1958fr_e - 0.03958dr_e
 \end{aligned}
 \tag{4.3-3}$$

#### 4.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสำหรับความขรุขระผิวเฉลี่ย

ก่อนทำการสรุปผลการวิเคราะห์จะต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model adequacy checking) โดยตรวจสอบว่าข้อมูลของผลการทดลองมีคุณสมบัติครบทั้ง 3 อย่างตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง คือ  $NID(0, \sigma^2)$  จึงสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้อย่างสมบูรณ์ โดยทำการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับส่วนตกค้าง (Residual) คือ การแจกแจงแบบปกติ ความเป็นอิสระ และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

#### 4.3.2.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality)

ในการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normal distribution assumption) นั้นจะพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของตัวแปรผลตอบว่า มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยนำส่วนตกค้างมาสร้าง Normal Probability Plot แสดงดังรูปที่ 4.2 และพิจารณาการกระจายตัวโดยการกระจายตัวควรเป็นตามแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงถือว่าเป็นการกระจายตัวแบบปกติ

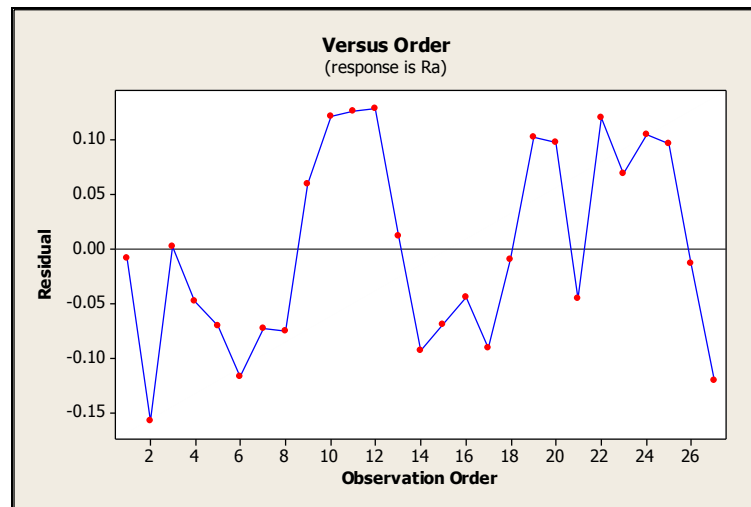


รูปที่ 4.2 Normal Probability Plot ของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย

จากผลการทดสอบพบว่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงไม่บิดเบี้ยว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

#### 4.3.2.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ นั้นจะตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ของตัวแปรผลตอบว่ามีความเกี่ยวพันกันหรือไม่ โดยการพล็อตส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล (Observation order) ดังแสดงในรูปที่ 4.3

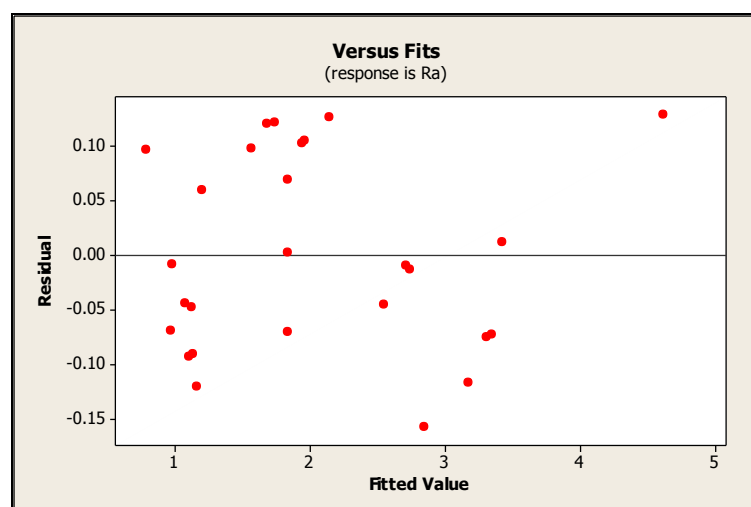


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ยกับลำดับการทดลอง

จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ไม่พบว่ามีค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของมีความเป็นอิสระ

#### 4.3.2.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance stability)

การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนเป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของการกระจายของส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งก็คือค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยการกระจายไม่ควรจะมีลักษณะที่เป็นแนวโน้มหรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกวยปากเปิด จะถือว่ามีเสถียรภาพของความแปรปรวน



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตสำหรับค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย

จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตนี้ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมี เสถียรภาพของความแปรปรวน

#### 4.3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองของอัตราส่วนแรงตัด $F_y/F_z$

จากผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.1 สามารถนำมาประมาณพื้นผิวผลตอบสนองสำหรับอัตราส่วนแรงตัด ( $F_y/F_z$ ) โดยใช้ตัวแบบความสัมพันธ์อันดับสอง (Second-Order Model) ดังสมการที่ 4.3-4

$$\frac{F_y}{F_z} = \beta_{15} + \beta_{16}X_1 + \beta_{17}X_2 + \beta_{18}X_3 + \beta_{19}X_4 + \beta_{20}X_1^2 + \beta_{21}X_2^2 + \beta_{22}X_3^2 + \beta_{23}X_4^2 + \beta_{24}X_1X_2 + \beta_{25}X_1X_3 + \beta_{26}X_1X_4 + \beta_{27}X_2X_3 + \beta_{28}X_2X_4 + \beta_{29}X_3X_4 \quad (4.3-4)$$

โดยที่  $\beta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์  $X_1$   $X_2$   $X_3$  และ  $X_4$  คือ ตัวแปรอิสระที่ถูกเข้ารหัสประกอบไปด้วย ความเร็วตัด ( $X_1$ ) อัตราป้อนตัด ( $X_2$ ) ความลึกตัด ( $X_3$ ) และรัศมีจมูกมีด ( $X_4$ )

ตารางที่ 4.6 ค่าประมาณพารามิเตอร์ของการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับอัตราส่วนแรงตัด

The analysis was done using coded units.				
Estimated Regression Coefficients for $F_y/F_z$				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.384508	0.010940	35.147	0.000
Cutting speed	-0.017477	0.005470	-3.195	0.008
Feed rate	-0.032433	0.005470	-5.929	0.000
Depth of cut	0.035673	0.005470	6.522	0.000
Nose radius	-0.065401	0.005470	-11.956	0.000
Cutting speed*Cutting speed	0.007075	0.008205	0.862	0.405
Feed rate*Feed rate	0.010351	0.008205	1.262	0.231
Depth of cut*Depth of cut	0.023010	0.008205	2.804	0.016
Nose radius*Nose radius	-0.014848	0.008205	-1.810	0.095
Cutting speed*Feed rate	0.003009	0.009474	0.318	0.756
Cutting speed*Depth of cut	0.024766	0.009474	2.614	0.023
Cutting speed*Nose radius	-0.000503	0.009474	-0.053	0.958
Feed rate*Depth of cut	-0.001283	0.009474	-0.135	0.895
Feed rate*Nose radius	0.023498	0.009474	2.480	0.029
Depth of cut*Nose radius	0.002923	0.009474	0.309	0.763
S = 0.0189487 PRESS = 0.0242692				
R-Sq = 95.62% R-Sq(pred) = 75.32% R-Sq(adj) = 90.50%				

เมื่อนำตัวแปรอิสระ คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจมูกมีด ซึ่งอยู่ในรูปของตัวแปรที่ถูกเข้ารหัส (Coded variable) มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย

(Regression analysis) จะได้ค่าประมาณสัมประสิทธิ์สำหรับพารามิเตอร์ของแบบจำลองการถดถอยดังแสดงในตารางที่ 4.6

จากตารางที่ 4.6 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์การถดถอยจะได้สมการแบบจำลองสำหรับพยากรณ์อัตราส่วนแรงตัด คือ

$$\begin{aligned} \frac{F_y}{F_z} = & 0.384508 - 0.017477X_1 - 0.032433X_2 + 0.035673X_3 - 0.065401X_4 + 0.007075X_1^2 \\ & + 0.010351X_2^2 + 0.023010X_3^2 - 0.014848X_4^2 + 0.003009X_1X_2 + 0.024766X_1X_3 \\ & - 0.000503X_1X_4 - 0.001283X_2X_3 + 0.023498X_2X_4 + 0.002923X_3X_4 \end{aligned} \quad (4.3-5)$$

จากตารางที่ 4.6 ได้แสดงค่าสถิติ t ที่ใช้ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยรายตัว พบว่าค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น (Linear coefficient) คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมกมีด ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นโค้ง (Quadratic coefficient) คือ Depth of cut\*Depth of cut และค่าสัมประสิทธิ์ของอัตรากิริยา (Interaction coefficient) คือ Cutting speed\*Depth of cut และ Feed rate\*Nose radius เท่านั้นที่ต่างจากศูนย์อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ( $P < 0.05$ ) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9562 นั่นคือความแปรปรวนที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการมีเพียง 4.38% เท่านั้น

อย่างไรก็ตามจากสมการพยากรณ์อัตราส่วนแรงตัดที่ 4.3-5 สังเกตได้ว่าแต่ละพารามิเตอร์มีค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือค่าสัมประสิทธิ์สามารถบ่งบอกได้ทั้งขนาดและทิศทางในการส่งผลต่อค่าอัตราส่วนแรงตัดสำหรับพารามิเตอร์นั้นๆ โดยสัมประสิทธิ์ที่มีค่าบวกจะมีผลให้พารามิเตอร์นั้นส่งผลต่ออัตราส่วนแรงตัดในลักษณะแปรผันตรง แต่ถ้าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์นั้นมีค่าลบก็จะส่งผลต่ออัตราส่วนแรงตัดในลักษณะแปรผกผัน ส่วนค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์จะบ่งบอกถึงขนาดที่จะส่งผลต่ออัตราส่วนแรงตัด ถ้ามีค่ามากก็จะส่งผลมากต่อค่าอัตราส่วนแรงตัด ซึ่งก็จะเป็นไปในทำนองเดียวกับการทดสอบทางสถิติว่าพารามิเตอร์นั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนพารามิเตอร์ที่มีค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์ไม่มาก นั้นหมายความว่าส่งผลต่ออัตราส่วนแรงตัดน้อยหรืออาจไม่ส่งผลต่อ อัตราส่วนแรงตัด อย่างมีนัยสำคัญในการทดสอบทางสถิติ ซึ่งจากสมการจะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วตัดมีค่าเป็นลบ สามารถตีความหมายได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วตัดขึ้นอัตราส่วนแรงตัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเร็วตัดเป็นเหตุให้อุณหภูมิตัดสูงขึ้นส่งผลให้วัสดุชิ้นงานอ่อนนุ่มขึ้นง่ายต่อการตัด อัตราส่วนแรงตัดจึงลดลง ขณะเดียวกันสัมประสิทธิ์ของอัตราป้อนตัดก็มีค่าเป็นลบ นั่นคือเมื่ออัตราป้อนตัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนแรงตัดลดลง เข้าใจได้ว่าแรงตัดหลัก ( $F_z$ ) ได้รับอิทธิพลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ

แรงป้อนตัด ( $F_y$ ) ดังจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนแรงตัดลดลง ส่วนความลึกตัดซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก ซึ่งเข้าใจได้ว่าเมื่อเพิ่มความลึกตัดมากขึ้นมีผลให้อัตราส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยมีสาเหตุจากพื้นที่หน้าสัมผัสระหว่างมีดและเนื้อวัสดุชิ้นงานมากขึ้น และสัมประสิทธิ์ของรัศมีจุมูกมีดมีค่าเป็นลบ คือ เมื่อรัศมีจุมูกมีดมีขนาดมากขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนแรงตัดลดลง อันเนื่องมาจากการเพิ่มรัศมีจุมูกมีดช่วยให้มุมคมตัดด้านข้างลดลง ซึ่งมีผลให้แรงป้อนตัดลดลง จึงมีผลให้อัตราส่วนแรงตัดลดลง และจากค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์จะเห็นได้ว่ารัศมีจุมูกมีดส่งผลต่ออัตราส่วนแรงตัดมากที่สุด รองลงมาคือ ความลึกตัด อัตราป้อนตัด อัตราการียาระหว่างความเร็วตัดและความลึกตัด อัตราการียาระหว่างอัตราป้อนตัดและรัศมีจุมูกมีด และกำลังสองของความลึกตัดตามลำดับ นอกจากนั้นไม่มีผลต่ออัตราส่วนแรงตัดอย่างมีนัยสำคัญ หรือมีผลน้อยมาก

เมื่อได้สมการที่ใช้ประมาณพื้นผิวผลตอบสนองด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย จะต้องมีการทดสอบสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสมการมีค่าเป็นศูนย์หรือไม่ โดยมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \text{All } \beta_i = 0$$

$$H_1 : \text{At least one } \beta_i \neq 0$$

และใช้สถิติทดสอบ คือ  $F = \text{MSR}/\text{MSE}$

จากตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ค่าสถิติ  $F$  เท่ากับ 18.70 ซึ่งมีค่ามากกว่า  $F_{0.05,14,12}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.64 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสมการไม่เท่ากับศูนย์ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ( $P < 0.05$ )

2. ตรวจสอบว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \text{ตัวแบบมีความเหมาะสมกับข้อมูล}$$

$$H_1 : \text{ตัวแบบไม่ความเหมาะสมกับข้อมูล}$$

และใช้สถิติทดสอบ คือ  $F = \text{MS}_{\text{LOF}}/\text{MS}_{\text{PE}}$

จากตารางที่ 4.7 ได้ค่าสถิติ  $F$  เท่ากับ 5.31 ซึ่งน้อยกว่าค่า  $F_{0.05,10,2}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 19.40 นั่นคือไม่สามารถปฏิเสธ  $H_0$  ได้ ดังนั้นที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สามารถสรุปได้ว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูล

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนแรงตัดที่ได้จากสมการที่ 4.3-5 ดังตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยกำลังสองมีค่า  $P$ -Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่าความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมูกมีดมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนแรงตัด

อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% อีกทั้ง Lack of fit มีค่า P-Value เท่ากับ 0.169 ซึ่งมากกว่า 0.05 นั้นหมายถึงว่าสมการที่ได้มีความแม่นยำเพียงพอในการพยากรณ์อัตราส่วนแรงตัด

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอัตราส่วนแรงตัด (Fy/Fz)

Analysis of Variance for Fy/Fz						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	0.094010	0.094010	0.006715	18.70	0.000
Linear	4	0.082886	0.082886	0.020722	57.71	0.000
Square	4	0.006384	0.006384	0.001596	4.44	0.020
Interaction	6	0.004740	0.004740	0.000790	2.20	0.115
Residual Error	12	0.004309	0.004309	0.000359		
Lack-of-Fit	10	0.004152	0.004152	0.000415	5.31	0.169
Pure Error	2	0.000156	0.000156	0.000078		
Total	26	0.098319				

อย่างไรก็ตามในสมการที่ 4.3-5 ในการพยากรณ์อัตราส่วนแรงตัดจะต้องใช้ตัวแปรอิสระที่ถูกเข้ารหัสในการคำนวณ ดังนั้นเพื่อให้สามารถแทนค่าตัวแปรอิสระแบบปกติที่เป็นตัวแปรตามธรรมชาติ (Natural variable) สมการที่ 4.3-5 สามารถแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปรอิสระกลับมาได้ดังตารางที่ 4.8 ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 4.3-6

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแบบถอดรหัสสำหรับอัตราส่วนแรงตัด

Estimated Regression Coefficients for Fy/Fz using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	1.28971
Cutting speed	-0.00155028
Feed rate	-3.38900
Depth of cut	-0.687835
Nose radius	-0.260525
Cutting speed*Cutting speed	1.10547E-06
Feed rate*Feed rate	4.14050
Depth of cut*Depth of cut	0.575238
Nose radius*Nose radius	-0.0928005
Cutting speed*Feed rate	0.000752136
Cutting speed*Depth of cut	0.00154785
Cutting speed*Nose radius	-1.57322E-05
Feed rate*Depth of cut	-0.128319
Feed rate*Nose radius	1.17489
Depth of cut*Nose radius	0.0365419

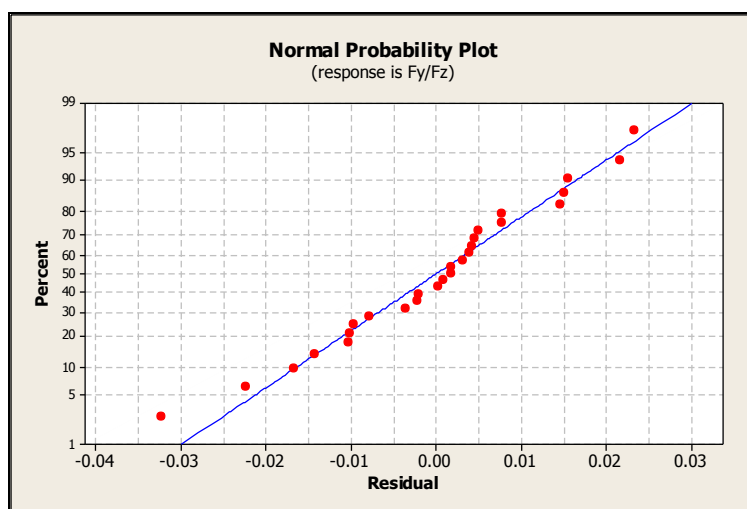
$$\begin{aligned}
 \frac{F_y}{F_z} = & 1.28971 - 0.00155v - 3.389f - 0.68784d - 0.260534r_e + 0.000001v^2 + 4.1405f^2 \\
 & + 0.57524d^2 - 0.0928r_e^2 + 0.00075vf + 0.00155vd - 0.00002vr_e - 0.12832fd \\
 & + 1.17489fr_e + 0.03654dr_e
 \end{aligned}
 \tag{4.3-6}$$

#### 4.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอัตราส่วนแรงตัด (Fy/Fz)

ก่อนทำการสรุปผลการวิเคราะห์จะต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model adequacy checking) โดยตรวจสอบว่าข้อมูลของผลการทดลองมีคุณสมบัติครบทั้ง 3 อย่างตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง คือ  $NID(0, \sigma^2)$  จึงสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้อย่างสมบูรณ์ โดยทำการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับส่วนตกค้าง (Residual) คือ การแจกแจงแบบปกติ ความเป็นอิสระ และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

##### 4.3.4.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality)

ในการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normal distribution assumption) นั้นจะพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของตัวแปรผลตอบว่า มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยนำส่วนตกค้างมาสร้าง Normal Probability Plot แสดงดังรูปที่ 4.5 และพิจารณาการกระจายตัวโดยการกระจายตัวควรเป็นตามแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงถือว่าเป็นการกระจายตัวแบบปกติ



รูปที่ 4.5 Normal Probability Plot ของข้อมูลอัตราส่วนแรงตัด

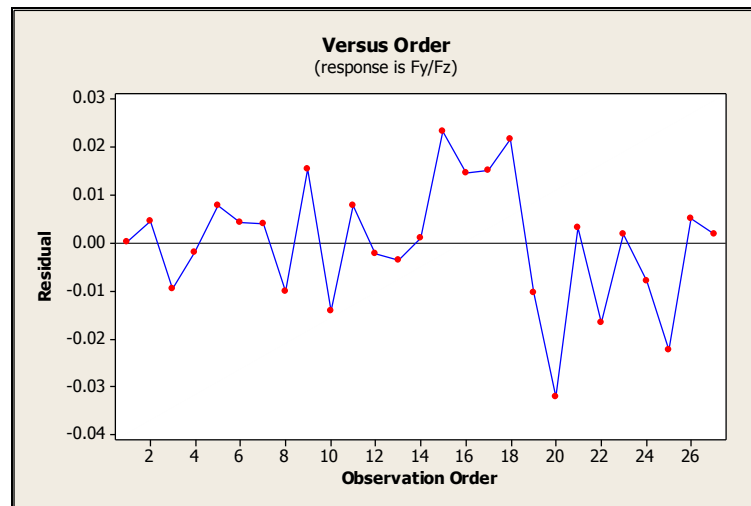
จากผลการทดสอบพบว่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงไม่บิดเบี้ยว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

##### 4.3.4.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ นั้นจะตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ของตัวแปรผลตอบว่ามีความเกี่ยวพันกันหรือไม่ โดยการพล็อตส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล (Observation order) ดังแสดงในรูปที่ 4.6



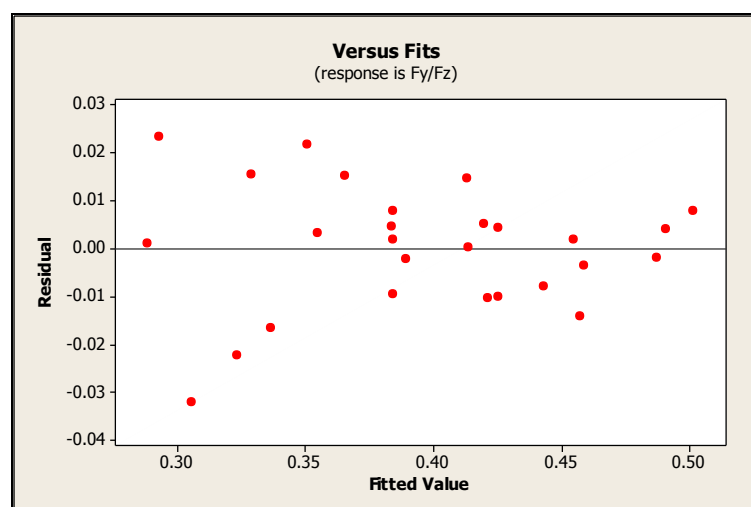
จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของมีความเป็นอิสระ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลอัตราส่วนแรงตัดกับลำดับการทดลอง

#### 4.3.4.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance stability)

การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนเป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของการกระจายของส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งก็คือค่าอัตราส่วนแรงตัด ( $Fy/Fz$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยการกระจายไม่ควรมีลักษณะที่เป็นแนวโน้มหรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกวยปากเปิด จะถือว่ามีเสถียรภาพของความแปรปรวน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตสำหรับค่าอัตราส่วนแรงตัด

จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตนี้ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

#### 4.3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองของอุณหภูมิตัด

จากผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.1 สามารถนำมาประมาณพื้นผิวผลตอบสนองสำหรับอุณหภูมิตัด โดยใช้ตัวแบบความสัมพันธ์อันดับสอง (Second-Order Model) ดังสมการที่ 4.3-7

$$T = \beta_{30} + \beta_{31}X_1 + \beta_{32}X_2 + \beta_{33}X_3 + \beta_{34}X_4 + \beta_{35}X_1^2 + \beta_{36}X_2^2 + \beta_{37}X_3^2 + \beta_{38}X_4^2 + \beta_{39}X_1X_2 + \beta_{40}X_1X_3 + \beta_{41}X_1X_4 + \beta_{42}X_2X_3 + \beta_{43}X_2X_4 + \beta_{44}X_3X_4 \quad (4.3-7)$$

โดยที่  $\beta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์  $X_1$   $X_2$   $X_3$  และ  $X_4$  คือ ตัวแปรอิสระที่ถูกเข้ารหัสประกอบไปด้วย ความเร็วตัด ( $X_1$ ) อัตราป้อนตัด ( $X_2$ ) ความลึกตัด ( $X_3$ ) และรัศมีจมูกมีด ( $X_4$ )

เมื่อนำตัวแปรอิสระ คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจมูกมีด ซึ่งอยู่ในรูปของตัวแปรที่ถูกเข้ารหัส (Coded variable) มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) จะได้ค่าประมาณสัมประสิทธิ์สำหรับพารามิเตอร์ของแบบจำลองการถดถอยดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าประมาณพารามิเตอร์ของการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับอุณหภูมิตัด

The analysis was done using coded units.				
Estimated Regression Coefficients for Temp				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	419.259	2.644	158.563	0.000
Cutting speed	7.200	1.322	5.446	0.000
Feed rate	1.204	1.322	0.911	0.380
Depth of cut	6.702	1.322	5.069	0.000
Nose radius	11.408	1.322	8.629	0.000
Cutting speed*Cutting speed	0.000	1.983	0.000	1.000
Feed rate*Feed rate	0.273	1.983	0.138	0.893
Depth of cut*Depth of cut	-2.400	1.983	-1.210	0.249
Nose radius*Nose radius	5.949	1.983	3.000	0.011
Cutting speed*Feed rate	1.172	2.290	0.512	0.618
Cutting speed*Depth of cut	3.930	2.290	1.716	0.112
Cutting speed*Nose radius	1.300	2.290	0.568	0.581
Feed rate*Depth of cut	0.860	2.290	0.376	0.714
Feed rate*Nose radius	0.257	2.290	0.112	0.913
Depth of cut*Nose radius	-0.548	2.290	-0.239	0.815

S = 4.57975    PRESS = 1439.74  
R-Sq = 92.56%    R-Sq(pred) = 57.41%    R-Sq(adj) = 83.87%

จากตารางที่ 4.9 ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์การถดถอยจะ  
ได้สมการแบบจำลองสำหรับพยากรณ์อุณหภูมิตัด คือ

$$T = 419.259 + 7.200X_1 + 1.204X_2 + 6.702X_3 + 11.408X_4 + 0.000X_1^2 + 0.273X_2^2 - 2.400X_3^2 + 5.949X_4^2 + 1.172X_1X_2 + 3.930X_1X_3 + 1.300X_1X_4 + 0.860X_2X_3 + 0.257X_2X_4 - 0.548X_3X_4 \quad (4.3-8)$$

จากตารางที่ 4.9 ได้แสดงค่าสถิติ t ที่ใช้ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยรายตัว พบว่า  
ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น (Linear coefficient) คือ ความเร็วตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมูกมิด และค่า  
สัมประสิทธิ์เชิงเส้นโค้ง (Quadratic coefficient) คือ Nose radius\*Nose radius เท่านั้นที่ต่างจาก  
ศูนย์อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (P < 0.05) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การ  
ตัดสินใจ (R-Sq) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9256 นั่นคือความแปรปรวนที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ  
มีเพียง 7.44% เท่านั้น

อย่างไรก็ตามจากสมการพยากรณ์อุณหภูมิตัดที่ 4.3-8 สังเกตได้ว่าแต่ละพารามิเตอร์มีค่า  
สัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือค่าสัมประสิทธิ์สามารถบ่งบอกได้ทั้งขนาดและทิศทางในการ  
ส่งผลต่อค่าอุณหภูมิตัดสำหรับพารามิเตอร์นั้นๆ โดยสัมประสิทธิ์ที่มีค่าบวกจะมีผลให้พารามิเตอร์  
นั้นส่งผลต่ออุณหภูมิตัดในลักษณะแปรผันตรง แต่ถ้าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์นั้นมีค่าลบก็จะ  
ส่งผลต่ออุณหภูมิตัดในลักษณะแปรผกผัน ส่วนค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์จะบ่งบอกถึงขนาดที่จะ  
ส่งผลต่ออุณหภูมิตัด ถ้ามีค่ามากก็จะส่งผลมากต่อค่าอุณหภูมิตัด ซึ่งก็จะเป็นไปในทำนอง  
เดียวกับการทดสอบทางสถิติว่าพารามิเตอร์นั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนพารามิเตอร์ที่มีค่า  
สัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์ไม่มาก นั้นหมายความว่าส่งผลต่ออุณหภูมิตัดน้อยหรืออาจไม่ส่งผลต่อ  
อุณหภูมิตัดอย่างมีนัยสำคัญในการทดสอบทางสถิติ ซึ่งจากสมการจะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์ของทั้ง  
ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมูกมิดมีค่าเป็นบวก นั้นความหมายได้ว่าเมื่อ  
เพิ่มพารามิเตอร์เหล่านี้ขึ้นมีผลให้อุณหภูมิตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่ม  
ความเร็วตัดเป็นเหตุให้เกิดการเสียดสีระหว่างมีดตัดและเนื้อวัสดุชิ้นงานมากขึ้น มีผลให้อุณหภูมิ  
ตัดสูง การเพิ่มอัตราป้อนตัดและความลึกตัดทำให้พื้นที่การตัดมากขึ้น ทำให้เมื่อเกิดขบวนการแปร  
รูปจึงมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมามาก ส่วนอุณหภูมิสูงขึ้นที่รัศมีจุมูกมิดมากขึ้น  
เนื่องจากรัศมีจุมูกมิดมากทำให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง เป็นสาเหตุให้ความร้อนมีการระบาย  
ออกมาช้ากว่ารัศมีจุมูกมิดน้อยซึ่งมักเกิดเศษโลหะแบบแตกหักจึงเกิดการสะสมของความร้อน มี  
ผลให้อุณหภูมิสูงขึ้น และจากค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์จะเห็นได้ว่ารัศมีจุมูกมิดส่งผลต่อ

อุณหภูมิที่ต่ำที่สุด รองลงมาคือ ความเร็วตัด ความลึกตัด และกำลังสองของรัศมีจุ่มกมิดตามลำดับ นอกจากนั้นไม่มีผลต่ออุณหภูมิตัดอย่างมีนัยสำคัญ หรือมีผลน้อยมาก

เมื่อได้สมการที่ใช้ประมาณพื้นผิวผลตอบสนองด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย จะต้องมีการทดสอบสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสมการมีค่าเป็นศูนย์หรือไม่ โดยมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \text{All } \beta_i = 0$$

$$H_1 : \text{At least one } \beta_i \neq 0$$

และใช้สถิติทดสอบ คือ  $F = MSR/MSE$

จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ค่าสถิติ F เท่ากับ 10.66 ซึ่งมีค่ามากกว่า  $F_{0.05,14,12}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.64 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสมการไม่เท่ากับศูนย์ ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ( $P < 0.05$ )

2. ตรวจสอบว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \text{ตัวแบบมีความเหมาะสมกับข้อมูล}$$

$$H_1 : \text{ตัวแบบไม่ความเหมาะสมกับข้อมูล}$$

และใช้สถิติทดสอบ คือ  $F = MS_{LOF}/MS_{PE}$

จากตารางที่ 4.10 ได้ค่าสถิติ F เท่ากับ 17.49 ซึ่งน้อยกว่าค่า  $F_{0.05,10,2}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 19.40 นั่นคือไม่สามารถปฏิเสธ  $H_0$  ได้ ดังนั้นที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สามารถสรุปได้ว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูล

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอุณหภูมิตัด

Analysis of Variance for Temp						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	3129.11	3129.11	223.508	10.66	0.000
Linear	4	2740.31	2740.31	685.077	32.66	0.000
Square	4	310.34	310.34	77.585	3.70	0.035
Interaction	6	78.46	78.46	13.077	0.62	0.709
Residual Error	12	251.69	251.69	20.974		
Lack-of-Fit	10	248.84	248.84	24.884	17.49	0.055
Pure Error	2	2.85	2.85	1.423		
Total	26	3380.80				

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิตัดที่ได้จากสมการที่ 4.3-8 ดังตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยกำลังสองมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า

ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจมูกมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิตัดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% อีกทั้ง Lack of fit มีค่า P-Value เท่ากับ 0.055 ซึ่งมากกว่า 0.05 นั้นหมายถึงว่าสมการที่ได้มีความแม่นยำเพียงพอในการพยากรณ์อุณหภูมิตัด

อย่างไรก็ตามในสมการที่ 4.3-8 ในการพยากรณ์อุณหภูมิตัดจะต้องใช้ตัวแปรอิสระที่ถูกเข้ารหัสในการคำนวณ ดังนั้นเพื่อให้สามารถแทนค่าตัวแปรอิสระแบบปกติที่เป็นตัวแปรตามธรรมชาติ (Natural variable) สมการที่ 4.3-8 สามารถแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปรอิสระกลับมาได้ดังตารางที่ 4.11 ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 4.3-9

ตารางที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแบบถอดรหัสสำหรับอุณหภูมิตัด

Estimated Regression Coefficients for Temp using data in uncoded units	
Term	Coef
Constant	429.368
Cutting speed	-0.0993683
Feed rate	-140.532
Depth of cut	5.92532
Nose radius	-41.3560
Cutting speed*Cutting speed	2.04205E-08
Feed rate*Feed rate	109.397
Depth of cut*Depth of cut	-60.0023
Nose radius*Nose radius	37.1823
Cutting speed*Feed rate	0.293049
Cutting speed*Depth of cut	0.245640
Cutting speed*Nose radius	0.0406131
Feed rate*Depth of cut	86.0064
Feed rate*Nose radius	12.8333
Depth of cut*Nose radius	-6.85145

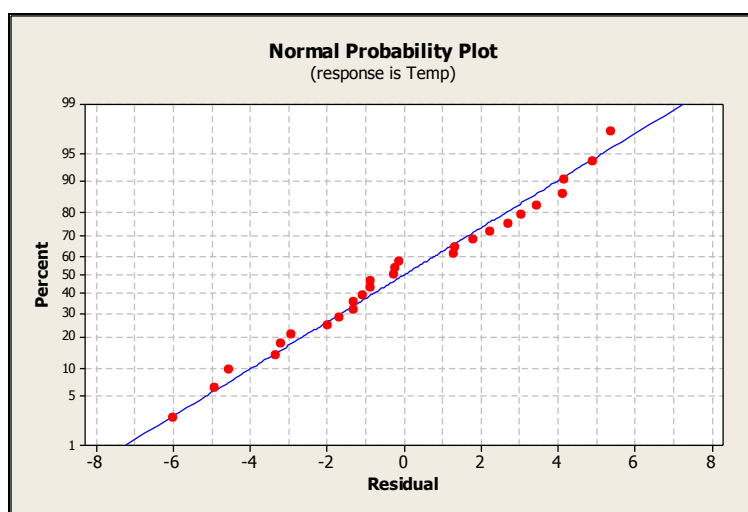
$$\begin{aligned}
 T = & 429.368 - 0.09937v - 140.532f + 5.92532d - 41.356r_c + 0.00000002v^2 + 109.397f^2 \\
 & - 60.0023d^2 + 37.1823r_c^2 + 0.29305vf + 0.24564vd + 0.04061vr_c + 86.0064fd \\
 & - 12.8333fr_c - 6.85145dr_c
 \end{aligned}
 \tag{4.3-9}$$

#### 4.3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสำหรับอุณหภูมิตัด

ก่อนทำการสรุปผลการวิเคราะห์จะต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model adequacy checking) โดยตรวจสอบว่าข้อมูลของผลการทดลองมีคุณสมบัติครบทั้ง 3 อย่างตามเงื่อนไขการออกแบบการทดลอง คือ  $NID(0, \sigma^2)$  จึงสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้อย่างสมบูรณ์ โดยทำการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับส่วนตกค้าง (Residual) คือ การแจกแจงแบบปกติ ความเป็นอิสระ และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

#### 4.3.6.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality)

ในการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normal distribution assumption) นั้นจะพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของตัวแปรผลตอบว่า มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยนำส่วนตกค้างมาสร้าง Normal Probability Plot แสดงดังรูปที่ 4.8 และพิจารณาการกระจายตัวโดยการกระจายตัวควรเป็นตามแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงถือว่าเป็นการกระจายตัวแบบปกติ

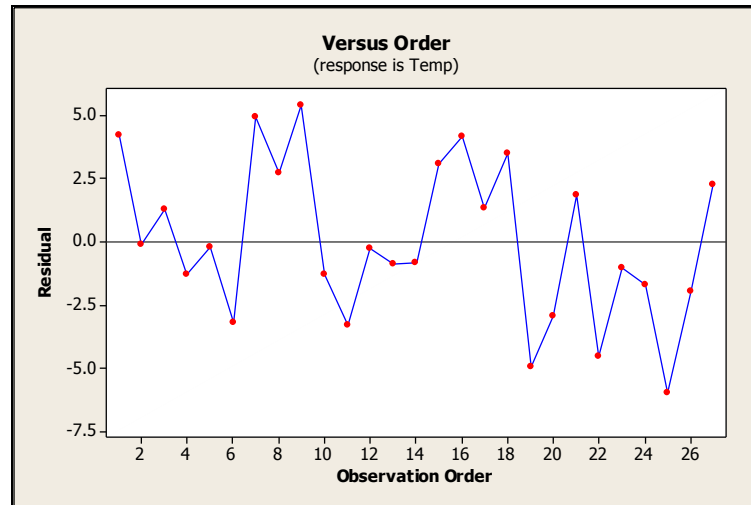


รูปที่ 4.8 Normal Probability Plot ของข้อมูลอุณหภูมิตัด

จากผลการทดสอบพบว่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงไม่บิดเบี้ยว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

#### 4.3.6.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ นั้นจะตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ของตัวแปรผลตอบว่ามีความเกี่ยวพันกันหรือไม่ โดยการพล็อตส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล (Observation order) ดังแสดงในรูปที่ 4.9

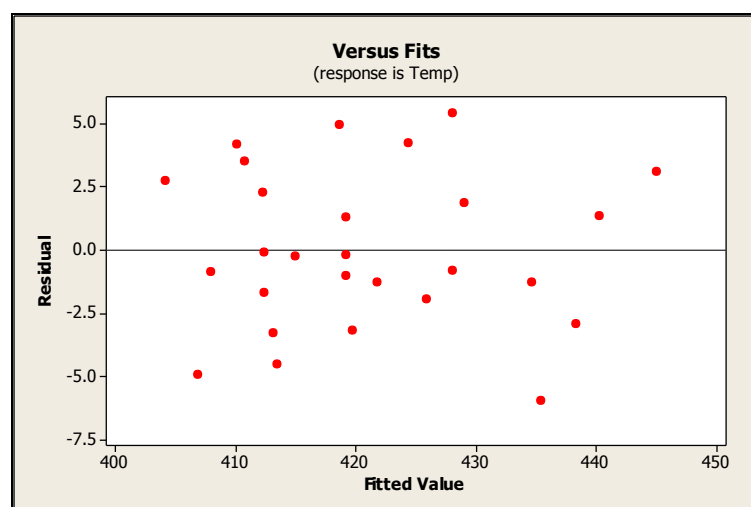


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลอุณหภูมิติดกับลำดับการทดลอง

จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของมีความเป็นอิสระ

#### 4.3.6.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance stability)

การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนเป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของการกระจายของส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งก็คือค่าอุณหภูมิติด (T) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยการกระจายไม่ควรมีลักษณะที่เป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด จะถือว่ามีเสถียรภาพของความแปรปรวน

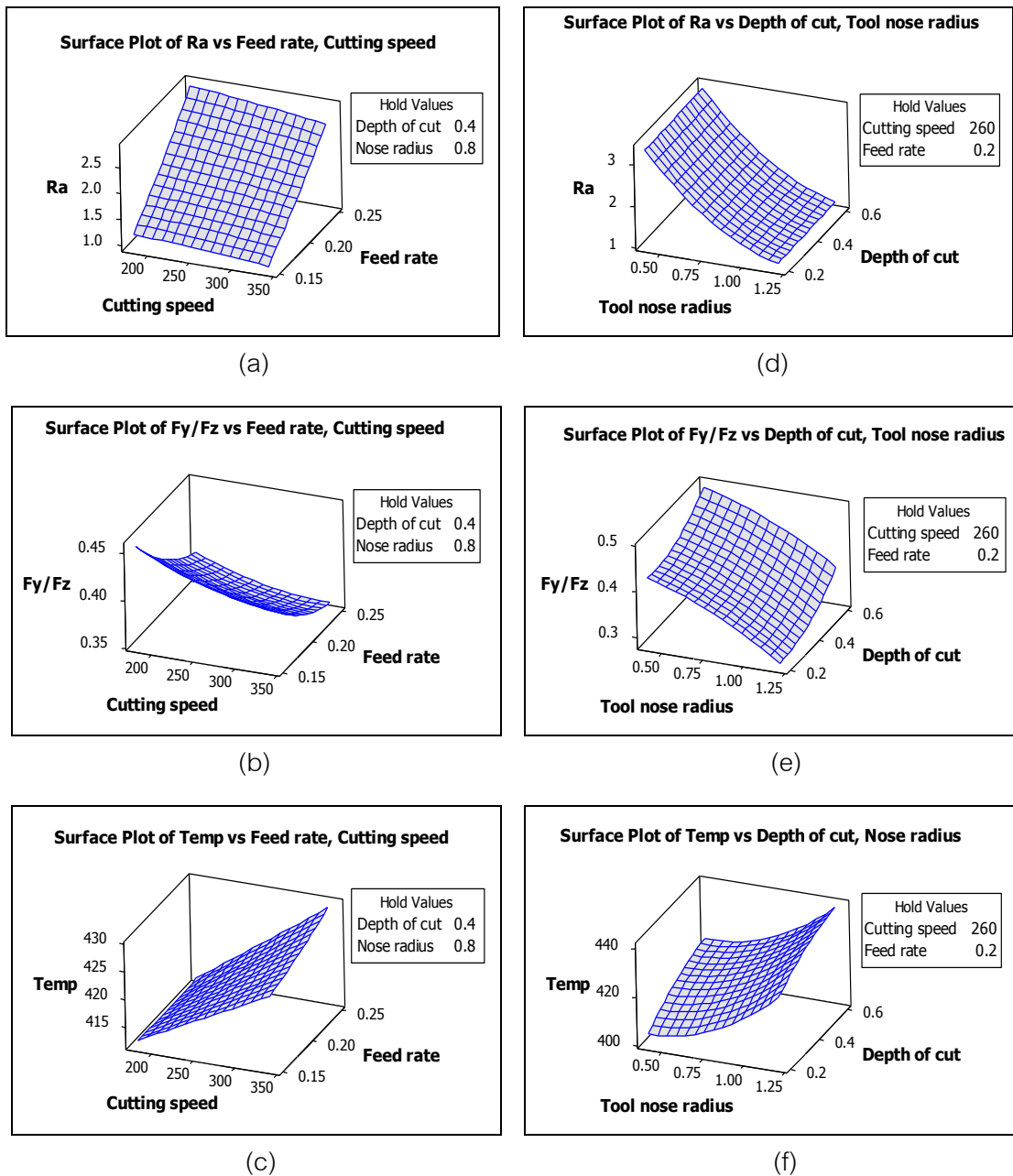


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตสำหรับค่าอุณหภูมิติด

จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพินนี้ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

#### 4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด

จากสมการที่ 4.3-3 4.3-6 และ 4.3-9 สามารถแสดงได้ในลักษณะของพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface) ในรูปที่ 4.11 และเส้นโครงร่าง (Contour plot) ในรูปที่ 4.12



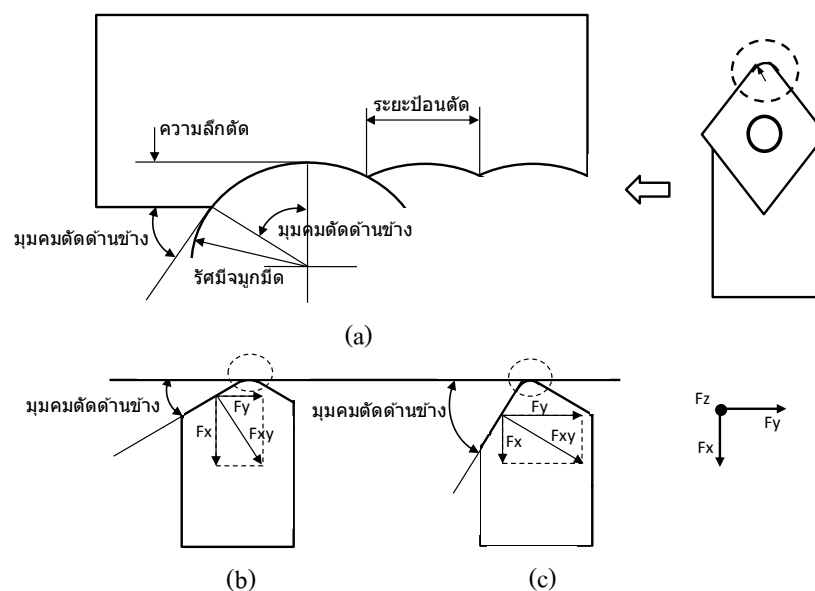
รูปที่ 4.11 พื้นผิวผลตอบสำหรับความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด



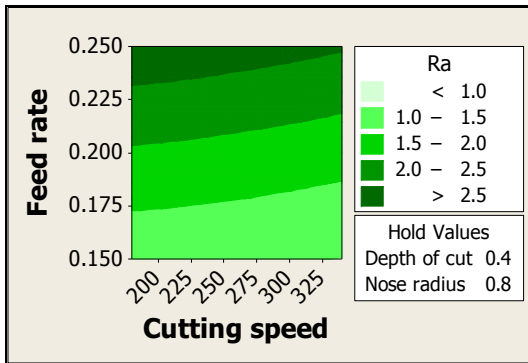
รูปที่ 4.11 แสดงพื้นผิวผลตอบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด ( $F_y/F_z$ ) และอุณหภูมิตัด พื้นผิวผลตอบในรูปที่ 4.11(a)-4.11(c) แสดงตัวแปรผลตอบที่อยู่ในฟังก์ชันของความเร็วตัดและอัตราป้อนตัด โดยคงค่าความลึกตัดและรัศมีจุมกมิตไว้ที่ระดับกลาง เช่นเดียวกันกับพื้นผิวผลตอบในรูปที่ 4.11(d)-4.11(f) ที่แสดงตัวแปรผลตอบซึ่งอยู่ในฟังก์ชันของความลึกตัดและรัศมีจุมกมิต โดยคงค่าความเร็วตัดและอัตราป้อนตัดไว้ที่ระดับกลาง โดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรผลตอบทั้งหมดข้างต้นแสดงแนวโน้มเดียวกันกับที่แสดงในสมการที่ 4.3-3 4.3-6 และ 4.3-9 ตามลำดับ

ความขรุขระผิวน้อยลงเมื่ออัตราป้อนตัดลดลง หรือรัศมีจุมกมิตเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีความขรุขระผิว ( $Ra = f^2/32r_c$ ) ขณะที่ความเร็วตัดและความลึกตัดมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราป้อนตัดและรัศมีจุมกมิต

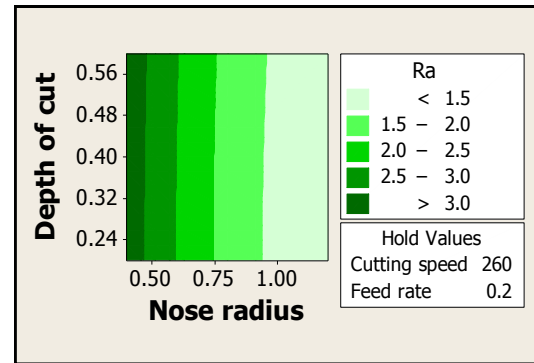
การเพิ่มความเร็วตัดมีผลให้อุณหภูมิตัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้เนื้อวัสดุชิ้นงานอ่อนนุ่มขึ้นทำให้ตัดง่ายขึ้น นั่นหมายถึงอัตราส่วนแรงตัดน้อยลง อย่างไรก็ตามอัตราส่วนแรงตัดลดลงในขณะที่อัตราป้อนตัดมากขึ้น ซึ่งตีความได้ว่าแรงตัดหลัก ( $F_z$ ) ได้รับอิทธิพลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแรงป้อนตัด ( $F_y$ ) ดังจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนแรงตัดลดลง ขณะที่รัศมีจุมกมิตเพิ่มขึ้นช่วยให้มุมคมตัดด้านข้างลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.12(b) ซึ่งมีผลให้แรงป้อนตัดลดลง ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดจึงลดลง [34] อัตราส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกตัดเพิ่มขึ้นมีสาเหตุจากพื้นที่หน้าสัมผัสระหว่างมีดและเนื้อวัสดุชิ้นงานมากขึ้น [10]



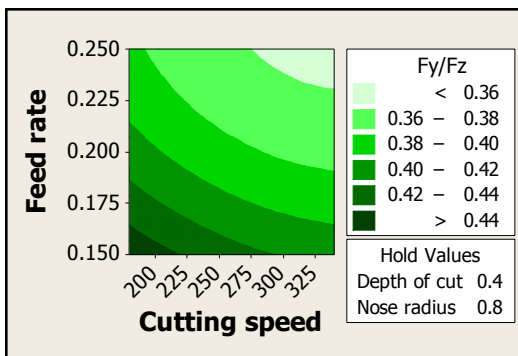
รูปที่ 4.12 (a) มุมคมตัดด้านข้าง (b) มุมคมตัดด้านข้างเล็กเมื่อรัศมีจุมกมิตใหญ่ (c) มุมคมตัดด้านข้างโตเมื่อรัศมีจุมกมิตเล็ก



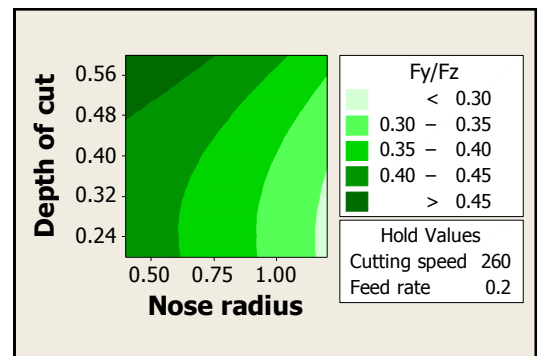
(a)



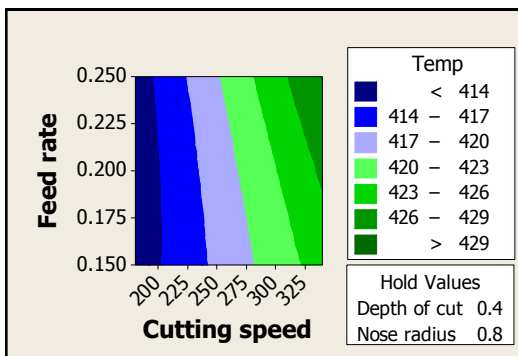
(d)



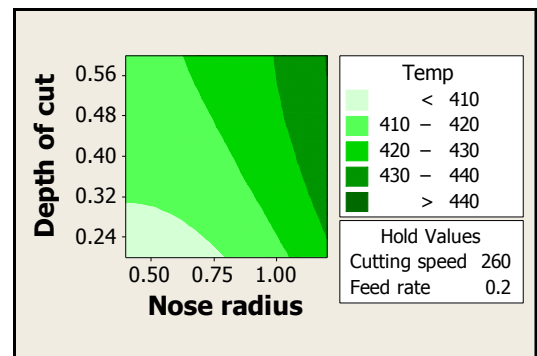
(b)



(e)



(c)



(f)

รูปที่ 4.13 เส้นโครงร่างสำหรับความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด

เส้นโครงร่างใน รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด ( $F_y/F_z$ ) และอุณหภูมิตัด เส้นโครงร่างในรูป 4.13(a)-(c) แสดงตัวแปรผลตอบที่อยู่ในฟังก์ชันของความเร็วตัดและอัตราป้อนตัด โดยคงค่าความลึกตัดและรัศมีจมูกมีดไว้ที่ระดับกลาง เช่นเดียวกับเส้นโครงร่างในรูปที่ 4.13(d)-(f) ที่แสดงตัวแปรผลตอบซึ่งอยู่ในฟังก์ชันของความลึกตัดและรัศมีจมูกมีด โดยคงค่าความเร็วตัดและอัตราป้อนตัดไว้ที่ระดับกลาง โดย

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรผลตอบทั้งหมดข้างต้นแสดงแนวโน้มเดียวกันกับสมการที่ 4.3-3 4.3-6 และ 4.3-9 ตามลำดับ และพื้นผิวผลตอบในรูปที่ 4.11

โดยการลดอัตราป้อนตัดมีผลให้ ความขรุขระผิวน้อยลง และเมื่อ รัศมีจุมูกมีดเพิ่มขึ้น ก็ส่งผลให้ความขรุขระผิวลดลงเช่นกัน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีความขรุขระผิว ( $Ra = f_2/32r_c$ ) ขณะที่ความเร็วตัดและความลึกตัดมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราป้อนตัดและรัศมีจุมูกมีด

ความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้นมีผลให้อุณหภูมิตัดเพิ่มขึ้น ทำให้เนื้อวัสดุชิ้นงานอ่อนนุ่ม และง่ายในการตัด ส่งผลให้อัตราส่วนแรงตัดน้อยลง อย่างไรก็ตามอัตราส่วนแรงตัดลดลงในขณะที่อัตราป้อนตัดมากขึ้น เข้าใจได้ว่าแรงตัดหลัก ( $F_z$ ) ได้รับอิทธิพลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแรงป้อนตัด ( $F_y$ ) อัตราส่วนแรงตัดลดลง จึงลดลงดังรูปที่ 4.13(b) ขณะที่รัศมีจุมูกมีดเพิ่มขึ้นช่วยให้มุมคมตัดด้านข้างลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.12(b) ซึ่งมีผลให้แรงป้อนตัดลดลง ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดจึงลดลง แต่หากรัศมีจุมูกมีดเล็กดังรูปที่ 4.12(c) มุมคมตัดด้านข้างจะโตขึ้นและส่งผลให้แรงป้อนตัดมากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดก็จะเพิ่มขึ้น

อัตราส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกตัดเพิ่มขึ้นมีสาเหตุจากพื้นที่หน้าสัมผัสระหว่างมีดและเนื้อวัสดุชิ้นงานมากขึ้น ซึ่งเป็นไปในแนวโน้มเดียวกับพื้นผิวผลตอบในรูปที่ 4.11

#### 4.5 การวิเคราะห์เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม

ในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาที่ค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุดเป็นหลัก โดยไม่ได้คำนึงถึงต้นทุนการผลิต ด้วยการใช่วิธีการ Optimization ฟังก์ชัน Response optimization ของโปรแกรม Minitab โดยในการพิจารณาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมนี้ก็จะพิจารณาผลลัพธ์ของตัวแปรตอบสนองของอัตราส่วนแรงตัด ( $F_y/F_z$ ) และผลลัพธ์ของตัวแปรตอบสนองของ อุณหภูมิ (T) ประกอบไปด้วย

ตารางที่ 4.12 เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม

Optimum	ความเร็วตัด	อัตราป้อนตัด	ความลึกตัด	รัศมีจุมกมิต
Hi	340.0	0.20	0.60	1.20
Cur	[340.0]	[0.150]	[0.20]	[1.20]
Lo	180.0	0.150	0.20	0.40

ความขรุขระผิว Minimum $y = 0.6652$ $d = 0.96450$				
Fy/Fz Minimum $y = 0.2680$ $d = 0.94207$				
อุณหภูมิตัด Maximum $y = 431.132$ $d = 1.0000$				

การหาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยสุดแสดงตารางเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมในตารางที่ 4.12 พบว่าความขรุขระผิวน้อยสุด เกิดขึ้นเมื่อความเร็วตัดและรัศมีจุมกมิตอยู่ในระดับสูง แต่อัตราป้อนตัดและความลึกตัดอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งให้ความขรุขระผิวน้อยสุดอยู่ที่ประมาณ 0.6652 ไมโครเมตร ด้วยระดับปัจจัยความเร็วตัดสูงสุด 340 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนต่ำสุด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ระยะลึกตัดต่ำสุด 0.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุมกมิตสูงสุด 1.2 มิลลิเมตร โดยมีระดับความพึงพอใจ (Desirable) อยู่ที่ 96.45%

จากตารางที่ 4.12 ความขรุขระผิวน้อยสุดเกิดขึ้นที่ความเร็วตัดสูง เนื่องจากการตัดด้วยความเร็วตัดที่สูงเป็นสาเหตุให้อุณหภูมิตัดสูง ส่งผลให้เนื้อวัสดุชิ้นงานอ่อนนุ่มง่ายต่อการตัด ผลที่ตามมาคือใช้แรงในการตัดน้อย และสอดคล้องตามรูปที่ 4.11

ความขรุขระผิวดีขึ้นเมื่ออัตราป้อนตัดสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีความขรุขระผิว อุณหภูมิตัดมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนอัตราส่วนแรงตัดมีแนวโน้มลดลง เข้าใจได้ว่า แรงตัดหลัก (Fz) ได้รับอิทธิพลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแรงป้อนตัด (Fy)

ความขรุขระผิวน้อยลงเมื่อรัศมีจุมกมิตมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีความขรุขระผิว ด้วยเช่นกัน อุณหภูมิสูงขึ้น แต่อัตราส่วนแรงตัดลดลง เนื่องจากรัศมีจุมกมิตที่เพิ่มขึ้น ช่วยให้มุมคมตัดด้านข้างลดลง ซึ่งมีผลให้แรงป้อนตัดลดลง อัตราส่วนแรงตัดจึงลดลงตามไปด้วย

ความขรุขระผิวแย่งเมื่อ ความลึกตัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความลึกตัดทำให้พื้นที่หน้าสัมผัสระหว่างมีดและเนื้อวัสดุชิ้นงานมากขึ้น เป็นสาเหตุให้อัตราส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้น ความสิ้นเปลืองจึงมากขึ้นตามไปด้วย ผลที่ตามมาคือ ความขรุขระผิวแย่ง

ดังนั้นความขรุขระผิวที่ดีจะสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อความเร็วตัดสูงเพียงพอเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการหลอมติดของโลหะที่มีดตัด (Build up edge) [35] หรือเหตุผลอื่นคือเนื้อวัสดุของชิ้นงานอ่อนนุ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิตัดสูงขึ้นทำให้ตัดง่ายขึ้น ส่งผลให้อัตราส่วนแรงตัดน้อยลง การเพิ่มอัตราป้อนตัดส่งผลให้ความขรุขระผิวมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีความขรุขระผิว ขณะที่การเพิ่มขึ้นของรัศมีจุมกมีดทำให้ความขรุขระผิวลดลง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีความขรุขระผิวด้วยเช่นกัน ความขรุขระผิวที่ดีที่สุดจะได้รับเมื่อความลึกตัดเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร เนื่องจากยิ่งความลึกตัดมากจะทำให้แรงตัดมากขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลให้ความขรุขระผิวมากขึ้น ดังนั้นสรุปได้ว่าความขรุขระผิวที่ดีกว่าจะได้รับเมื่อความลึกตัดน้อย

#### 4.6 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

แผนการทดลองใหม่ถูกกำหนดเพื่อใช้ทดสอบสมการพยากรณ์ความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด โดยกำหนดให้อยู่ภายใต้ขอบเขตของแต่ละปัจจัยการตัด ดังแสดงในตารางที่ 4.13

จากรูปที่ 4.14(a) ถึง 4.14(c) แสดงค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลองกับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการแบบจำลองที่ขนาดอัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมกมีดต่างๆ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการที่ 4.3-3 กับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกัน นั่นหมายความว่าสมการแบบจำลองสำหรับการพยากรณ์ความขรุขระผิวนั้นสามารถใช้ในการประมาณความขรุขระผิวได้เป็นอย่างดีภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันไป

จากรูปที่ 4.15(a) ถึง 4.15(c) แสดงอัตราส่วนแรงตัดที่ได้จากการทดลองกับอัตราส่วนแรงตัดที่ได้จากสมการแบบจำลองที่ขนาดอัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมกมีดต่างๆ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนแรงตัดที่ได้จากสมการที่ 4.3-6 กับอัตราส่วนแรงตัดที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกัน นั่นหมายความว่าสมการแบบจำลองสำหรับการพยากรณ์อัตราส่วนแรงตัดนั้นสามารถใช้ในการประมาณอัตราส่วนแรงตัดได้เป็นอย่างดี ภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันไป

จากรูปที่ 4.16(a) ถึง 4.16(c) แสดงอุณหภูมิตัดที่ได้จากการทดลองกับ อุณหภูมิตัดที่ได้จากสมการแบบจำลองที่ขนาดอัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมกมีดต่างๆ ตามลำดับ จะ

เห็นได้ว่าอุณหภูมิตัดที่ได้จากสมการที่ 4.3-9 กับอุณหภูมิตัดที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกัน นั้นหมายความว่าสมการแบบจำลองสำหรับการพยากรณ์ อุณหภูมิตัด นั้นสามารถใช้ในการประมาณอุณหภูมิตัดได้เป็นอย่างดีภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันไป

จากรูปที่ 4.14-4.16 แสดงให้เห็นว่าทั้งความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัด มีความสัมพันธ์กัน โดยความขรุขระผิวดีขึ้นเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิตัดเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิตัดเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนแรงตัดสูงขึ้นและง่ายในการตัด อัตราส่วนแรงตัดจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับพื้นผิวผลตอบที่ได้ในรูปที่ 4.11 เส้นโครงร่างในรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.12

เมื่อเพิ่มอัตราป้อนตัดทำให้ความขรุขระผิวลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.14(a) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีความขรุขระผิว ( $Ra = f^2/32r_e$ ) อุณหภูมิตัดมีแนวโน้มสูงขึ้นดังรูปที่ 4.16(a) ส่วนอัตราส่วนแรงตัดมีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 4.15(a) เข้าใจได้ว่า แรงตัดหลัก ( $F_z$ ) ได้รับอิทธิพลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแรงป้อนตัด ( $F_y$ )

ความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกตัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความลึกตัดมากทำให้พื้นหน้าสัมผัสระหว่างมีดและเนื้อวัสดุชิ้นงานมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนมากขึ้นซึ่งมีผลต่อความขรุขระผิวที่แย่งดังแสดงในรูปที่ 4.14(b) และ 4.15(b)

การเพิ่มรัศมีจุมูกมีดมีผลให้ความขรุขระผิวลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.14(c) ซึ่งก็สอดคล้องกับทฤษฎีความขรุขระผิวด้วยเช่นกัน ขณะที่รัศมีจุมูกมีดเพิ่มขึ้น อัตราส่วนแรงตัดในรูปที่ 4.15(c) มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากรัศมีจุมูกมีดที่โตกว่าจะทำให้มุมคมตัดด้านข้าง เล็กกว่ารัศมีจุมูกมีดเล็ก ซึ่งมีผลให้แรงป้อนตัดน้อยกว่า ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดจึงน้อยกว่า อีกทั้งที่รัศมีจุมูกมีดโตกว่าจะทำให้อุณหภูมิตัดสูงกว่าดังแสดงในรูปที่ 4.16(c) นี่ก็จะเป็นอีกเหตุผลที่ช่วยให้เนื้อวัสดุอ่อนนุ่มขึ้น อัตราส่วนแรงตัดที่ใช้ก็ยิ่งน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกันกับ พื้นผิวผลตอบที่ได้ในรูปที่ 4.11 เส้นโครงร่างในรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.12

ความสัมพันธ์ทั้งสามอย่าง คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวกับความเร็วตัด ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัดกับความเร็วตัด และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับความเร็วตัด แสดงแนวโน้มในทิศทางเดียวกันขณะที่ความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าความลึกตัดและอัตราป้อนตัดจะแตกต่างกันไป นั้นหมายความว่าสัดส่วนแรงตัดสามารถใช้ในการประมาณความขรุขระผิวได้ เนื่องจากทั้งอัตราส่วนแรงตัด อุณหภูมิตัด และความขรุขระผิวมีความสัมพันธ์กัน

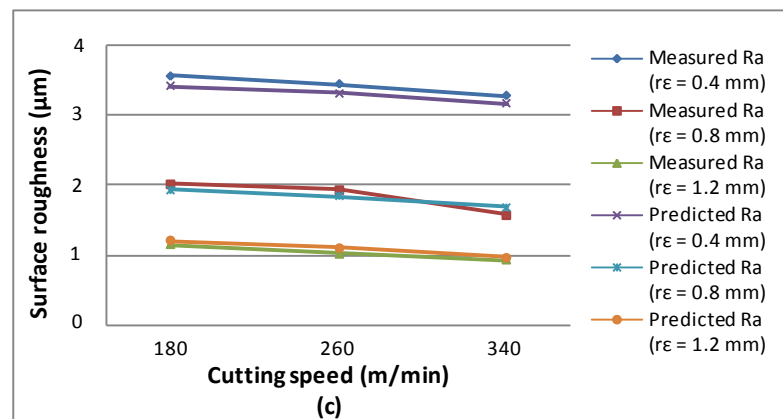
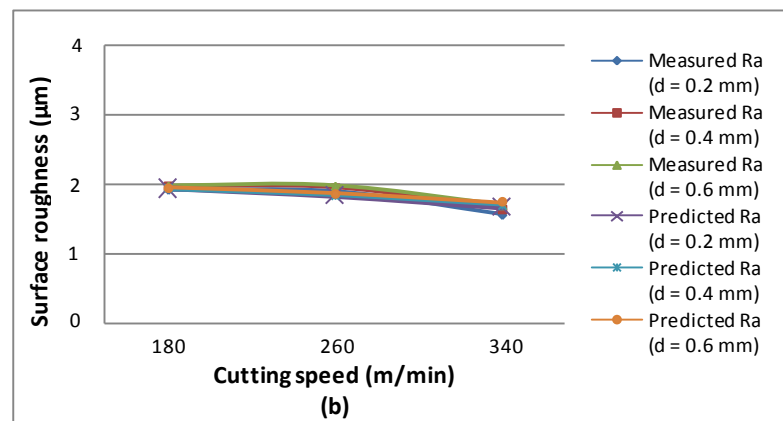
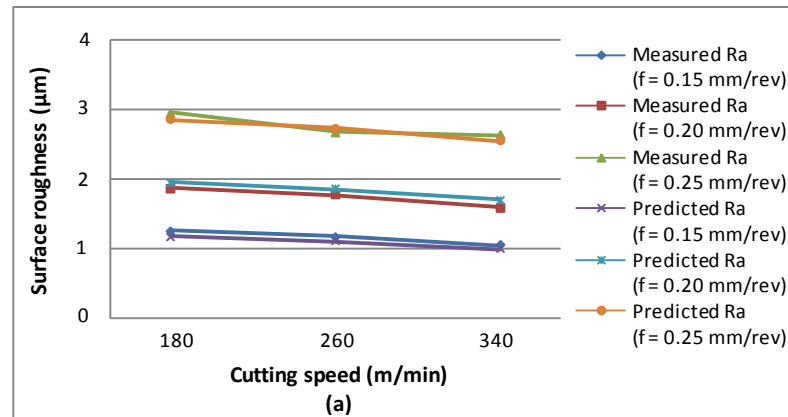
ตารางที่ 4.13 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผล

No.	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Nose radius	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Fy (N)	Fz (N)	Fy/Fz	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	180	0.15	0.4	0.8	1.2573	69.88	153.42	0.46	409.45
2	180	0.2	0.4	0.8	1.8661	73.15	189.41	0.39	407.92
3	180	0.25	0.4	0.8	2.9549	82.24	219.82	0.37	414.83
4	260	0.15	0.4	0.8	1.1737	63.62	153.87	0.41	422.04
5	260	0.2	0.4	0.8	1.7644	65.58	168.34	0.39	423.27
6	260	0.25	0.4	0.8	2.6782	67.62	192.79	0.35	425.81
7	340	0.15	0.4	0.8	1.0494	55.29	139.45	0.40	430.13
8	340	0.2	0.4	0.8	1.585	62.17	168.12	0.37	428.59
9	340	0.25	0.4	0.8	2.633	71.84	208.92	0.34	433.68
10	180	0.2	0.2	0.8	1.9245	46.22	109.82	0.42	404.47
11	180	0.2	0.4	0.8	1.9807	72.98	180.14	0.41	415.58
12	180	0.2	0.6	0.8	1.9927	125.45	275.84	0.45	413.07
13	260	0.2	0.2	0.8	1.938	34.51	89.98	0.38	408.11
14	260	0.2	0.4	0.8	1.9655	67.52	172.68	0.39	422.96

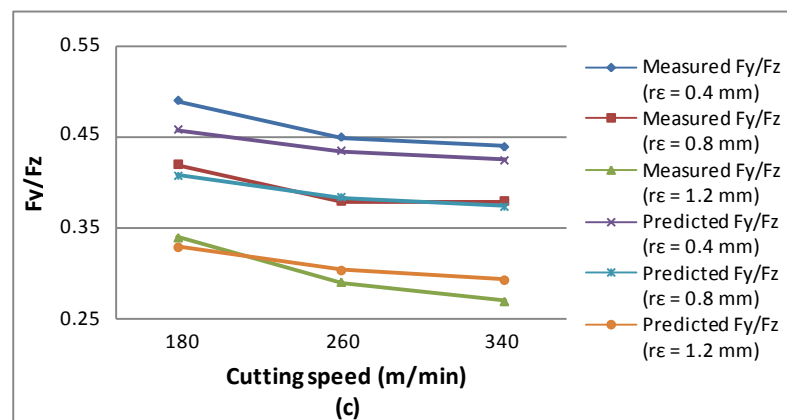
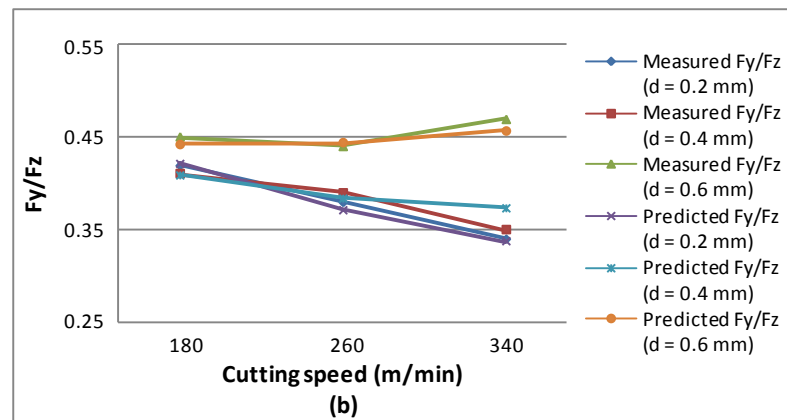
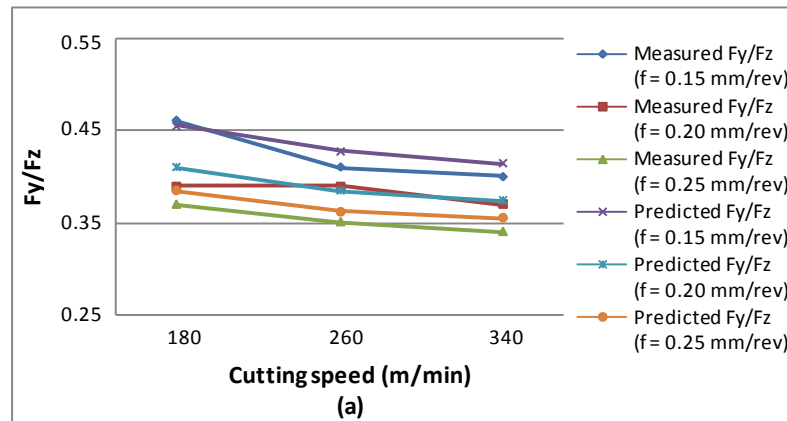
ตารางที่ 4.13 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผล (ต่อ)

No.	Cutting speed	Feed rate	Depth of cut	Nose radius	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Fy (N)	Fz (N)	Fy/Fz	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
15	260	0.2	0.6	0.8	1.9976	112.79	255.35	0.44	427.57
16	340	0.2	0.2	0.8	1.5708	33.56	98.03	0.34	416.24
17	340	0.2	0.4	0.8	1.6579	68.78	195.25	0.35	424.77
18	340	0.2	0.6	0.8	1.721	117.64	250.24	0.47	438.69
19	180	0.2	0.4	0.4	3.5867	86.83	175.63	0.49	405.38
20	180	0.2	0.4	0.8	2.0307	76.62	181.72	0.42	411.47
21	180	0.2	0.4	1.2	1.1615	68.36	200.99	0.34	432.36
22	260	0.2	0.4	0.4	3.4585	72.45	159.72	0.45	415.71
23	260	0.2	0.4	0.8	1.9476	69.16	180.42	0.38	421.25
24	260	0.2	0.4	1.2	1.0458	60.18	208.98	0.29	439.90
25	340	0.2	0.4	0.4	3.2817	70.56	161.37	0.44	418.65
26	340	0.2	0.4	0.8	1.5842	69.16	180.59	0.38	428.32
27	340	0.2	0.4	1.2	0.9484	57.73	210.27	0.27	448.78

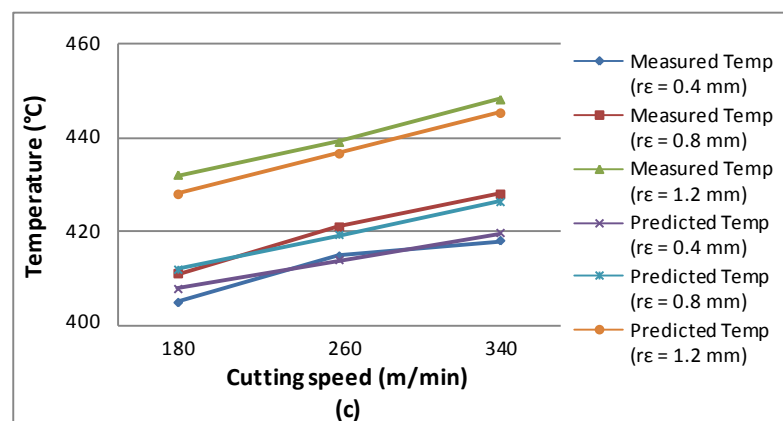
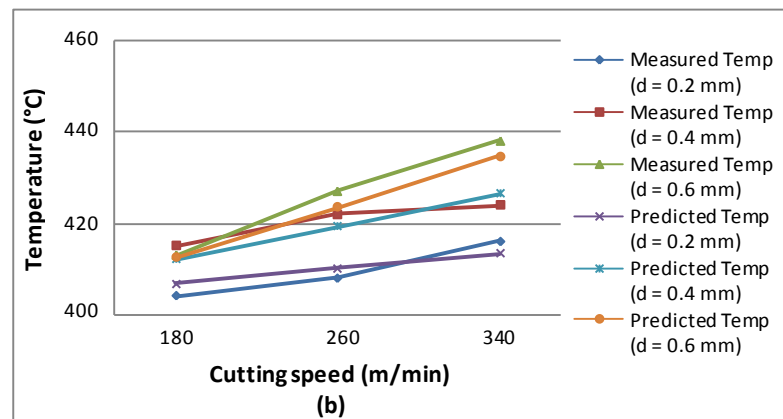
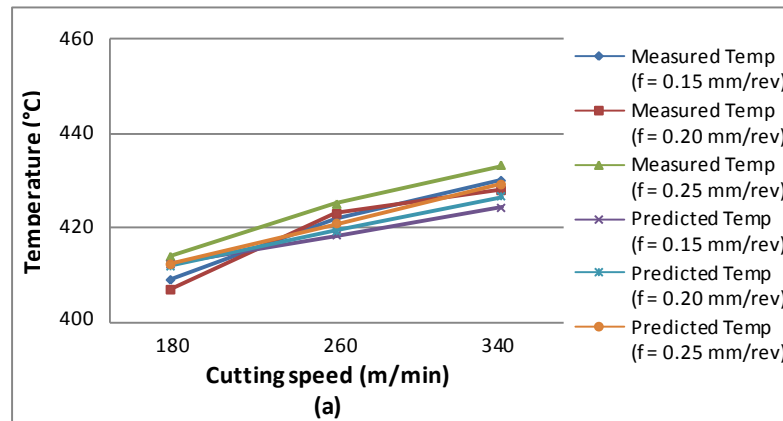




รูปที่ 4.14 (a) ค่าความขรุขระผิวจากการทดลองกับค่าความขรุขระผิวจากสมการแบบจำลองที่อัตราป้อนตัดต่างๆ (b) ค่าความขรุขระผิวจากการทดลองกับค่าความขรุขระผิวจากสมการแบบจำลองที่ความลึกตัดต่างๆ (c) ค่าความขรุขระผิวจากการทดลองกับค่าความขรุขระผิวจากสมการแบบจำลองที่ขนาดรัศมีจุ่มก็มีดต่างๆ



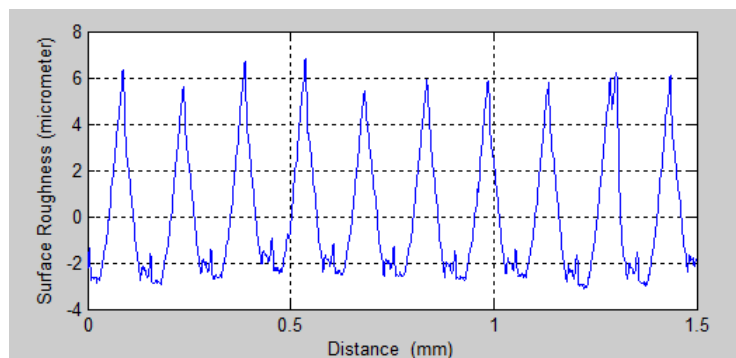
รูปที่ 4.15 (a) อัตราส่วนแรงตัดจากการทดลองกับอัตราส่วนแรงตัดจากสมการแบบจำลองที่อัตราป้อนตัดต่างๆ (b) อัตราส่วนแรงตัดจากการทดลองกับอัตราส่วนแรงตัดจากสมการแบบจำลองที่ความลึกตัดต่างๆ (c) อัตราส่วนแรงตัดจากการทดลองกับอัตราส่วนแรงตัดจากสมการแบบจำลองที่ขนาดรัศมีจุมุมิตต่างๆ



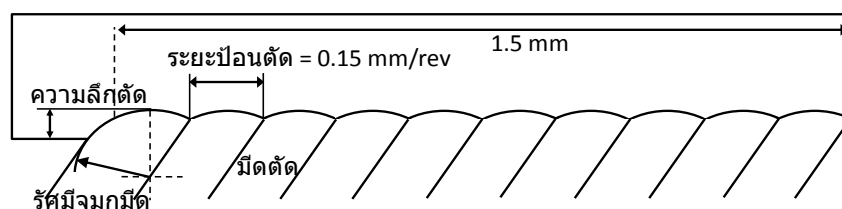
รูปที่ 4.16 (a) อุณหภูมิตัดจากการทดลองกับอุณหภูมิตัดจากสมการแบบจำลองที่อัตราป้อนตัดต่างๆ (b) อุณหภูมิตัดจากการทดลองกับอุณหภูมิตัดจากสมการแบบจำลองที่ความลึกตัดต่างๆ (c) อุณหภูมิตัดจากการทดลองกับอุณหภูมิตัดจากสมการแบบจำลองที่ขนาดรัศมีจุ่มมีดต่างๆ

#### 4.7 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตในเชิงความถี่

การวิเคราะห์ข้อมูลในเชิงความถี่ เป็นการศึกษารูปแบบสัญญาณของข้อมูลที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่งๆ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองซึ่งอยู่ในโดเมนเวลา (Time domain) ทำการแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่ (Frequency domain) โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast fourier transform) เนื่องจากผลการทดลองที่ผ่านมาสรุปได้ว่าความขรุขระผิวมีความสัมพันธ์กับอัตราป้อนตัด และสอดคล้องตามทฤษฎีความขรุขระผิว เมื่อนำข้อมูลความขรุขระผิวมาพล็อตเทียบกับระยะทาง ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นเงื่อนไขการตัดของความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุมกมีด 0.4 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าลักษณะของข้อมูลที่เกิดขึ้น มีรูปแบบ และรูปแบบของข้อมูลมีลักษณะเป็นลูกคลื่นที่เกิดขึ้นซ้ำๆ ซึ่งตรงตามความความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจริงบนชิ้นงาน และเกิดลูกคลื่นจำนวน 10 ลูก เมื่อพิจารณาการตัดด้วยอัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบดังรูปที่ 4.18 พบว่าสอดคล้องกันกับความขรุขระผิว ดังนั้นก็เป็นไปได้ว่าแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นก็น่าจะมีลักษณะการเกิดรูปแบบเช่นเดียวกับความขรุขระผิว



รูปที่ 4.17 ลักษณะความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นในระยะทาง 1.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.18 การตัดชิ้นงานด้วยอัตราป้อนตัดที่ 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ

เมื่อนำข้อมูลแรงตัดพลวัตมาพล็อตเทียบกับเวลาดังรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าลักษณะของข้อมูลเกิดเป็นรูปแบบที่เป็นลักษณะลูกคลื่นเช่นเดียวกับความขรุขระผิว ดังนั้นเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบข้อมูลบนพื้นฐานเดียวกัน จึงใช้ระยะทางการตัดที่เท่ากันในการเปรียบเทียบ ในการหาระยะทางการตัดเพื่อนำข้อมูลมาใช้เปรียบเทียบ จะต้องมีการแปลงค่าดังนี้

1. คำนวณความเร็วรอบของชิ้นงาน ( $N_w$ ) สำหรับใช้หาความเร็วป้อน ตามสมการที่ 4.7-1

$$N_w = 1000v/\pi D \quad (4.7-1)$$

โดย  $v$  คือ ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที) และ  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร) ดังนั้น

$$\begin{aligned} N_w &= 1000 \cdot (260) / \pi \cdot (58) \\ &= 1427.63 \text{ รอบต่อนาที} \end{aligned}$$

2. คำนวณความเร็วป้อน ( $V_f$ ) สำหรับใช้หาระยะทางการตัด ตามสมการที่ 4.7-2

$$V_f = fN_w \quad (4.7-2)$$

โดย  $f$  คือ อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ) ดังนั้น

$$\begin{aligned} V_f &= (0.15) \cdot (1427.63) \\ &= 214.14 \text{ มิลลิเมตรต่อนาที} \end{aligned}$$

3. คำนวณระยะทางการตัด ( $S$ ) สำหรับใช้ในการคำนวณหาจำนวนข้อมูล เมื่อใช้เวลาในการตัด 1 วินาทีในการเปรียบเทียบ ดังนั้นจะได้ระยะทางการตัดสำหรับ 1 วินาที คือ

$$\begin{aligned} S &= V_f/60 \\ &= 214.14/60 \\ &= 3.57 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

4. คำนวณจำนวนข้อมูล

เนื่องจากอัตราสุมของแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวไม่เท่ากัน โดยแรงตัดพลวัตใช้อัตราสุมเท่ากับ 10,000 ข้อมูลต่อวินาที แต่ความขรุขระผิวใช้อัตราสุมเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที ดังนั้นการเปรียบเทียบด้วยระยะทางการตัด 1 วินาที แรงตัดพลวัตสามารถใช้ 10,000 ข้อมูลมาคำนวณได้เลย แต่สำหรับความ

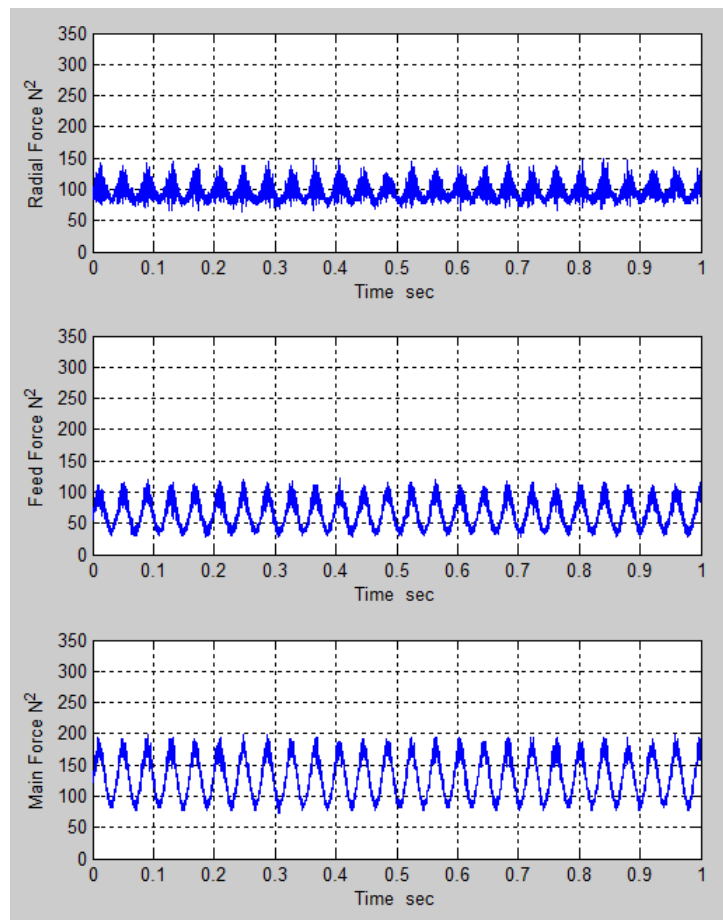
ขรุขระผิว อัตราสູ່มของความขรุขระผิวเป็นของเครื่องวัดความขรุขระผิว ซึ่งไม่ใช่ระยะเวลาตัดจริง ดังนั้นจำเป็นต้องคำนวณหาจำนวนข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการคำนวณต่อไป

ในการวัดความขรุขระผิวได้ตั้งค่าให้เข็มวัดความขรุขระผิวเดินวัดด้วยความเร็วเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยจะทำการวัดด้วยระยะทาง 12.5 มิลลิเมตร ดังนั้นในการวัดความขรุขระผิวจะใช้เวลาในการวัดทั้งหมดเท่ากับ  $12.5/0.5 = 25$  วินาที ดังนั้นหากใช้ระยะทางในการตัด 1 วินาที จำนวนข้อมูลที่ต้องใช้สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\text{จำนวนข้อมูล} = (\text{ระยะทางในการตัด 1 วินาที}/0.5) \cdot 400$$

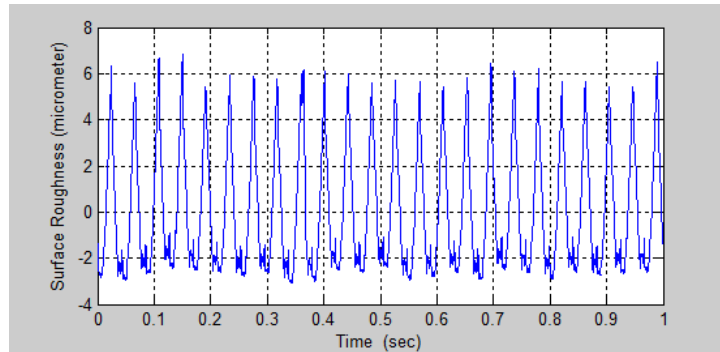
เมื่อระยะทางการตัด คือ 3.57 มิลลิเมตร ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{จำนวนข้อมูล} &= (3.57/0.5) \cdot 400 \\ &= 2,856 \text{ ข้อมูล} \end{aligned}$$



รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา

ดังนั้นจากการพล็อตแรงตัดพลวัตเทียบกับเวลารูปที่ 4.19 และการพล็อตความขรุขระผิวเทียบกับเวลารูปที่ 4.20 เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลในโดเมนเวลาที่ใช้ระยะทางการตัดด้วยเวลา 1 วินาทีในการอ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบ ผลปรากฏว่าทั้งความขรุขระผิวและแรงตัดเกิดจำนวนลูกคลื่นที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าทั้งความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตมีความถี่เดียวกัน ดังนั้นจึงนำมาวิเคราะห์ต่อในเชิงความถี่

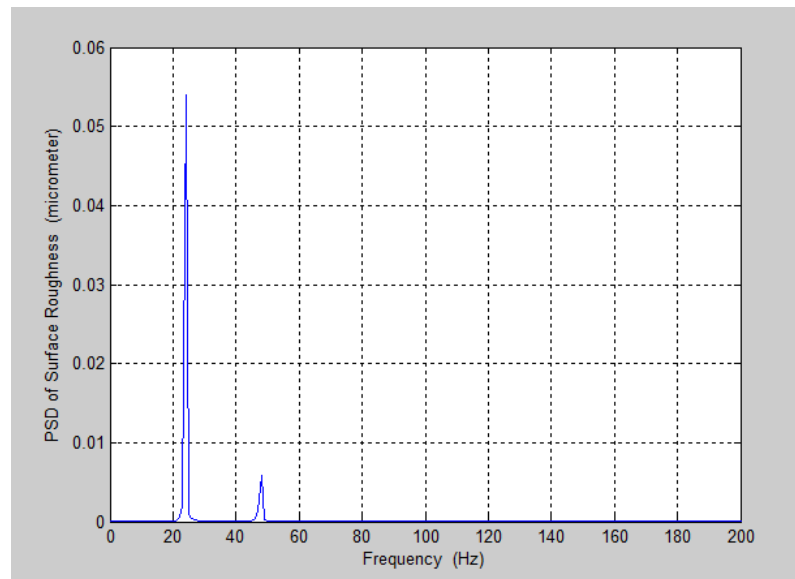


รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนเวลา

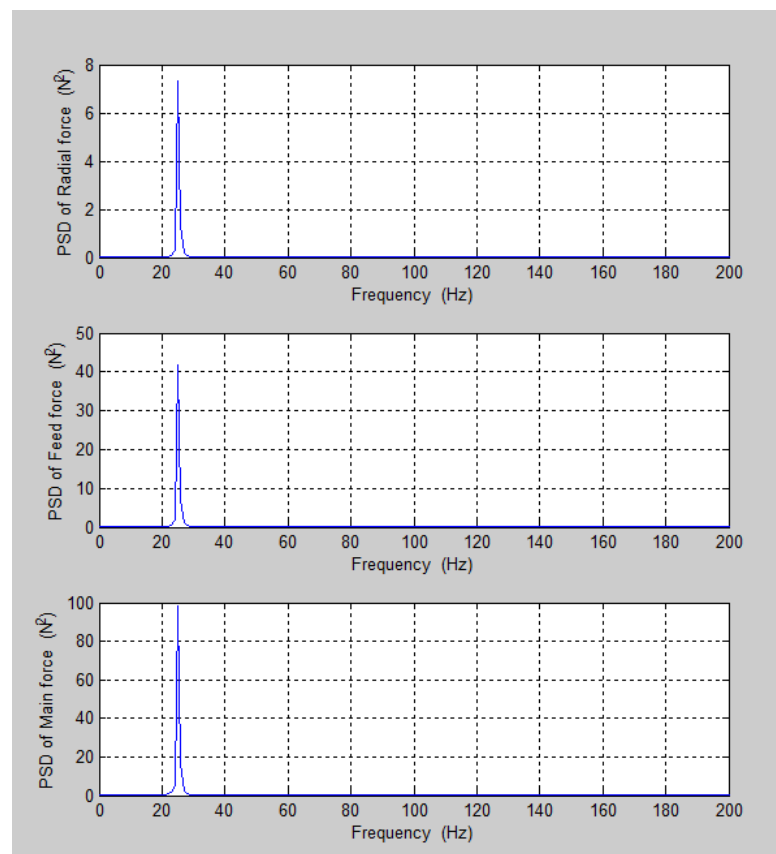
จากนั้นนำข้อมูลที่คำนวณได้มาแปลงด้วย ฟูเรียอย่างรวดเร็ว จะได้การวิเคราะห์ ความขรุขระผิวในโดเมนความถี่ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และการวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่แสดงในรูปที่ 4.22 ผลปรากฏว่าเกิด PSD ของแรงตัดพลวัตที่ ความถี่ 25 Hz ซึ่งสอดคล้องกับความถี่ของ PSD ของความขรุขระผิว ดังนั้นสรุปได้ว่าความขรุขระผิวและแรงตัด พลวัตมีความสัมพันธ์กันสามารถใช้แรงตัด พลวัต ซึ่งสามารถวัดได้ภายในกระบวนการมาพยากรณ์ความขรุขระผิวได้ในขณะตัด

การวิเคราะห์ข้างต้นเป็นการตัดด้วยเงื่อนไข คือ ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร ส่วนเงื่อนไขการตัดอื่นๆแสดงในภาคผนวก ง

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตในเชิงความถี่ในงานวิจัยนี้ เป็นการวิเคราะห์ความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตที่มีลักษณะการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าความถี่ที่เกิดขึ้นของแรงตัดพลวัตอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า 100 เฮิรตซ์ (Hz)



รูปที่ 4.21 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนความถี่



รูปที่ 4.22 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่



#### 4.8 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเศษโลหะและเงื่อนไขการตัด

เศษโลหะเกิดจาก เนื้อวัสดุชิ้นงานเกิดการแปรรูปในความเค้นเฉือน ในบริเวณที่เรียกว่า ระนาบเฉือน (Shear plane) หรือพื้นที่เฉือน (Shear area) ซึ่งขอบวนการแปรรูปนี้ค่อนข้างซับซ้อน และอยู่ใต้อิทธิพลของตัวแปรหลายตัว เช่น ชนิดของวัสดุ อุณหภูมิของขอบวนการ ลักษณะของแรง ที่มากระทำ ลักษณะทางเรขาคณิตของขอบวนการ เป็นต้น

จากผลการทดลองเศษโลหะที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแบบต่อเนื่องมีขนาดความยาว ความหนา และความกว้างที่แตกต่างกันในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ดังแสดงในภาคผนวก ค



(a) 180\_0.15\_0.4\_0.8



(b) 180\_0.25\_0.4\_0.8

รูปที่ 4.23 เศษโลหะจากเงื่อนไขการตัด (a) 180\_0.15\_0.4\_0.8 (b) 180\_0.25\_0.4\_0.8

รูปที่ 4.23 (a) เป็นการตัดด้วยเงื่อนไขการตัด คือ ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร และรูปที่ 4.23 (b) เป็นการตัดด้วยเงื่อนไขการตัด คือ ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร จากการตัดด้วยสองเงื่อนไขข้างต้น ทำให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องทั้งสองเงื่อนไข แต่ทั้งสองเงื่อนไขให้เศษโลหะที่มีความยาวและความหนาแตกต่างกัน โดยรูปที่ 4.23 (a) และ (b) มีความแตกต่างกันที่อัตราป้อนตัด จะเห็นได้ว่าที่อัตราป้อนตัดมากทำให้เกิดการแตกหักที่ดีกว่า เนื่องจากอัตราป้อนตัดมากส่งผลให้เศษโลหะมีความหนามากกว่าเศษโลหะที่อัตราป้อนตัดน้อย เมื่อมีการสัมผัสกับหน้าคายเศษโลหะของมีดตัด จะทำให้เกิดการโค้งงอและแตกหักได้ง่ายกว่าเศษโลหะที่มีความหนาน้อย จึงทำให้ขนาดความยาวของเศษโลหะสั้นกว่าอัตราป้อนตัดน้อย



(a) 260\_0.15\_0.2\_0.8



(b) 260\_0.15\_0.6\_0.8

รูปที่ 4.24 เศษโลหะจากเงื่อนไขการตัด (a) 260\_0.15\_0.2\_0.8 (b) 260\_0.15\_0.6\_0.8

รูปที่ 4.24 (a) เป็นการตัดด้วยเงื่อนไขการตัด คือ ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุกมีด 0.8 มิลลิเมตร และรูปที่ 4.24 (b) เป็นการตัดด้วยเงื่อนไขการตัด คือ ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุกมีด 0.8 มิลลิเมตร จากการตัดด้วยสองเงื่อนไขข้างต้น ทำให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องทั้งสองเงื่อนไข แต่ทั้งสองเงื่อนไขให้เศษโลหะที่มีความยาวและความกว้างแตกต่างกัน โดยรูปที่ 4.24 (a) และ (b) มีความแตกต่างกันที่ความลึกตัด จะเห็นได้ว่าที่ความลึกตัดมากทำให้เกิดการแตกหักที่ดีกว่า เนื่องจากความลึกตัดมากส่งผลให้เศษโลหะมีความกว้างมากกว่าเศษโลหะที่ความลึกตัดน้อย เมื่อสัมผัสกับหน้าคายเศษโลหะของมีดตัด จะทำให้แนวโน้มเกิดการแตกหักได้ง่ายกว่าเศษโลหะที่มีความกว้างน้อย จึงทำให้ขนาดความยาวของเศษโลหะสั้นกว่าความลึกตัดน้อย



(a) 180\_0.2\_0.4\_0.4



(b) 180\_0.2\_0.4\_1.2

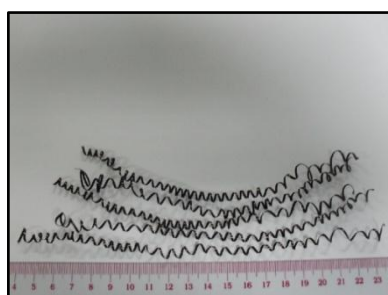
รูปที่ 4.25 เศษโลหะจากเงื่อนไขการตัด (a) 180\_0.2\_0.4\_0.4 (b) 180\_0.2\_0.4\_1.2

รูปที่ 4.25 (a) เป็นการตัดด้วยเงื่อนไขการตัด คือ ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุกมีด 0.4 มิลลิเมตร และรูปที่ 4.25 (b) เป็นการตัดด้วยเงื่อนไขการตัด คือ ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุกมีด 1.2 มิลลิเมตร จากการตัด

ด้วยสองเงื่อนไขข้างต้น ทำให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องทั้งสองเงื่อนไข แต่ทั้งสองเงื่อนไขให้เศษโลหะที่มีความยาว ความหนาและแตกต่างกัน โดยรูปที่ 4.25 (a) และ (b) มีความแตกต่างกันที่รัศมีจุมุกมีด จะเห็นได้ว่าที่รัศมีจุมุกมีดน้อยทำให้เกิดการแตกหักที่ดีกว่า เนื่องจากรัศมีจุมุกมีดน้อยส่งผลให้เศษโลหะมีความหนามากกว่าเศษโลหะที่รัศมีจุมุกมีดมาก เมื่อสัมผัสกับหน้าคายเศษโลหะของมีดตัด จะทำให้แนวโน้มเกิดการแตกหักได้ง่ายกว่าเศษโลหะที่มีความหนาน้อย จึงทำให้ขนาดความยาวของเศษโลหะสั้นกว่ารัศมีจุมุกมีดมาก



(a) 180\_0.2\_0.4\_1.2



(b) 340\_0.2\_0.4\_1.2

รูปที่ 4.26 เศษโลหะจากเงื่อนไขการตัด (a) 180\_0.2\_0.4\_1.2 (b) 340\_0.2\_0.4\_1.2

รูปที่ 4.26 (a) เป็นการตัดด้วยเงื่อนไขการตัด คือ ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุกมีด 1.2 มิลลิเมตร และรูปที่ 4.26 (b) เป็นการตัดด้วยเงื่อนไขการตัด คือ ความเร็วตัด 340 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุกมีด 1.2 มิลลิเมตร จากการตัดด้วยสองเงื่อนไขข้างต้น ทำให้เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องทั้งสองเงื่อนไข แต่ทั้งสองเงื่อนไขให้เศษโลหะที่มีความยาว ความหนาและแตกต่างกัน โดยรูปที่ 4.26 (a) และ (b) มีความแตกต่างกันที่ความเร็วตัด จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วตัดต่ำทำให้เกิดการแตกหักที่ดีกว่า เข้าใจได้ว่ามุมของระนาบเฉือนมีขนาดเล็กลงที่ความเร็วตัดต่ำเป็นผลให้ความหนาของเศษโลหะมีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อมีการชนกับมีดตัดบนหน้าคายเศษโลหะจึงนำไปสู่การแตกหักของเศษโลหะได้ง่ายกว่า จึงทำให้ขนาดความยาวของเศษโลหะสั้นกว่ารัศมีจุมุกมีดมาก

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองกับเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ซึ่งมีคาร์บอนอยู่ประมาณ 0.45% ทำให้มีคุณสมบัติค่อนข้างเหนียว ประกอบกับเงื่อนไขในการตัดที่ใช้มีอัตราป้อนตัดและความลึกตัดไม่มาก อีกทั้งด้วยมีดใหม่ตลอดการทดลอง จึงทำให้การทดลองนี้เกิดเศษโลหะที่เป็นแบบต่อเนื่อง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนาสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวสำหรับชิ้นงานในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน (JIS:S45C) ด้วยมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยการตัดที่มีผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน แรงตัด และอุณหภูมิในการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุ่มกมิด และเพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยสุดโดยพิจารณาภายในช่วงความขรุขระผิวที่ยอมรับได้สำหรับชิ้นงานที่ใช้ในเครื่องจักรกล คือ ความขรุขระผิวเฉลี่ย ( $R_a$ ) ไม่เกิน 3.125 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน JIS B0601(1982) อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้พัฒนาสมการของอัตราส่วนแรงตัดและอุณหภูมิตัดด้วย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาสมการพยากรณ์ความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัดในกระบวนการกลึงด้วยเครื่องซีเอ็นซีประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์นเคน โดยสมการพยากรณ์เป็นฟังก์ชันของปัจจัยการตัดซึ่งประกอบด้วยความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุ่มกมิด ในงานวิจัยนี้ได้ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์สำหรับวัดแรงตัดในขณะตัด และอินฟาเรดไพโรมิเตอร์สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิขณะตัด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวและเงื่อนไขการตัด อย่างไรก็ตามแรงป้อนตัด ( $F_y$ ) มีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวมากที่สุด และแรงตัดหลัก ( $F_z$ ) ได้รับอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัด [11] ดังนั้นแรงตัดจำเป็นต้องทำให้สามารถใช้ได้ทั่วไปไม่ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนไปโดยการทำเป็นอัตราส่วนและเป็นเหตุผลให้งานวิจัยนี้เลือกใช้อัตราส่วนแรงตัดระหว่างแรงป้อนตัดและแรงตัดหลัก คือ  $F_y/F_z$  จากการทดลองสามารถสร้างสมการพยากรณ์สำหรับความขรุขระผิว อุณหภูมิตัด และอัตราส่วนแรงตัด ดังแสดงในสมการ 5.1-1 5.1-2 และ 5.1-3

$$R_a = -0.26446 + 0.00155v + 24.9288f - 0.14769d - 2.24985r_c - 0.000003v^2 + 26.2372f^2 + 0.26389d^2 + 2.32399r_c^2 - 0.00785vf + 0.00063vd + 0.00013vr_c - 0.49417fd - 21.1958fr_c - 0.03958dr_c \quad (5.1-1)$$

$$T = 429.368 - 0.09937v - 140.532f + 5.92532d - 41.356r_c + 0.00000002v^2 + 109.397f^2$$

$$\begin{aligned}
& - 60.0023d^2 + 37.1823r_e^2 + 0.29305vf + 0.24564vd + 0.04061vr_e + 86.0064fd \\
& - 12.8333fr_e - 6.85145dr_e
\end{aligned} \tag{5.1-2}$$

$$\begin{aligned}
\frac{F_y}{F_z} = & 1.28971 - 0.00155v - 3.389f - 0.68784d - 0.260534r_e + 0.000001v^2 + 4.1405f^2 \\
& + 0.57524d^2 - 0.0928r_e^2 + 0.00075vf + 0.00155vd - 0.00002vr_e - 0.12832fd \\
& + 1.17489fr_e + 0.03654dr_e
\end{aligned} \tag{5.1-3}$$

อัตราป้อนตัดและรัศมีจุมุกมีดมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวมากกว่าความเร็วตัดและความลึกตัด โดยความขรุขระผิวดีขึ้นเมื่ออัตราป้อนตัดลดลง หรือรัศมีจุมุกมีดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีความขรุขระผิว ( $Ra = f^2/32r_e$ )

การเพิ่มความเร็วตัดมีผลให้อุณหภูมิตัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้เนื้อวัสดุชิ้นงานอ่อนนุ่มขึ้นทำให้ตัดง่ายขึ้น นั่นหมายถึงอัตราส่วนแรงตัดน้อยลง อย่างไรก็ตามอัตราส่วนแรงตัดลดลงในขณะที่อัตราป้อนตัดมากขึ้น ซึ่งตีความได้ว่าแรงตัดหลัก ( $F_z$ ) ได้รับอิทธิพลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแรงป้อนตัด ( $F_y$ ) ดังจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนแรงตัดลดลง ขณะที่รัศมีจุมุกมีดเพิ่มขึ้นช่วยให้มุมคมตัดด้านข้างลดลง ซึ่งมีผลให้แรงป้อนตัดลดลง ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดจึงลดลง [34]

อัตราส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกตัดเพิ่มขึ้นมีสาเหตุจากพื้นที่หน้าสัมผัสระหว่างมีดและเนื้อวัสดุชิ้นงานมากขึ้น [10]

เงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยที่สุดได้จากการทดลอง คือ ความเร็วตัดสูงสุด 340 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนต่ำสุด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัดต่ำสุด 0.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุกมีดสูงสุด 1.2 มิลลิเมตร ซึ่งจะให้ความขรุขระผิวน้อยสุดอยู่ที่ประมาณ 0.6652 ไมโครเมตร

การทดสอบสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวแสดงให้เห็นว่าสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือในการประมาณความขรุขระผิวมากกว่าสมการทฤษฎีความขรุขระผิว

## 5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ความขรุขระผิวน้อยสุดเมื่อความเร็วตัดและรัศมีจุมุกมีดอยู่ในระดับสูง แต่อัตราป้อนตัดและความลึกตัดอยู่ในระดับต่ำ ความขรุขระผิวที่ดีจะสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อความเร็วตัดสูงเพียงพอเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการหลอมติดของโลหะที่มีดตัด (Build up edge) [35] หรือเหตุผลอื่นคือเนื้อวัสดุของชิ้นงานอ่อนนุ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิตัดสูงขึ้นทำให้ตัดง่ายขึ้น ส่งผลให้อัตราส่วนแรงตัด

น้อยลง การเพิ่มอัตราป้อนตัดส่งผลให้ความขรุขระผิวมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีความขรุขระผิว ขณะที่การเพิ่มขึ้นของรัศมีจุมกมีดทำให้ความขรุขระผิวลดลง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีความขรุขระผิวด้วยเช่นกัน ความขรุขระผิวที่ดีที่สุดจะได้รับเมื่อความลึกตัดเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร เนื่องจากยิ่งความลึกตัดมากจะทำให้ให้แรงตัดมากขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลให้ความขรุขระผิวมากขึ้น ดังนั้นสรุปได้ว่าความขรุขระผิวที่ดีกว่าจะได้รับเมื่อความลึกตัดน้อย อย่างไรก็ตามเนื่องจากความซับซ้อนของกลไกการตัดอุณหภูมิตัดที่เกิดขึ้นจากความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้นก็ไม่ได้มีผลดีต่อความขรุขระผิวอย่างเดียว หากแต่ยังส่งผลต่อความสึกหรอของมีดตัดอีกด้วย

### 5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย

1. สมการแบบจำลองสำหรับพยากรณ์ความขรุขระผิว อัตราส่วนแรงตัด และอุณหภูมิตัดรวมทั้งเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุด ที่ได้จากการผลการทดลองในงานวิจัย สามารถนำไปใช้ได้สำหรับชิ้นงานในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน (JIS:S45C) ด้วยมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิวเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้กับชิ้นงานที่เป็นวัสดุอื่น หรือมีดตัดชนิดอื่น เนื่องจากทั้งสองปัจจัยมีผลต่อความขรุขระผิวที่แตกต่างกัน
2. การติดตั้งอินฟราเรดไพโรมิเตอร์สำหรับการวัดอุณหภูมิตัดอาจใช้เวลาค่อนข้างนาน เนื่องจากการปรับตำแหน่งเพื่อให้ได้จุดโฟกัสในตำแหน่งตัดแต่ละครั้งต้องมีการกลึงเพื่อตรวจสอบตำแหน่งว่าถูกต้องหรือไม่ และปรับเปลี่ยนจนกว่าจะได้ตำแหน่งที่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเปลี่ยนเม็ดมีดก็ต้องทำการปรับตำแหน่งใหม่ทุกครั้ง เนื่องจากขนาดรัศมีจุมกมีดที่ไม่เท่ากันจึงทำให้ตำแหน่งตัดไม่เหมือนกัน

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

1. แนวทางดำเนินการวิจัยที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถนำไปปรับใช้ในการทดลองกับชิ้นงานวัสดุชนิดอื่น มีดตัดประเภทอื่น หรือกระบวนการผลิตอื่นๆได้
2. จากผลการวิเคราะห์ความขรุขระผิวและแรงตัดในเชิงความถี่ ซึ่งทั้งความขรุขระผิวและแรงตัดมีความถี่เดียวกัน ดังนั้น สามารถใช้แรงตัดในการพยากรณ์ความขรุขระผิวแบบในกระบวนการได้
3. การติดตั้งอินฟราเรดไพโรมิเตอร์สำหรับการวัดอุณหภูมิตัดซึ่งใช้เวลาในการปรับตั้งค่อนข้างนาน อาจมีการออกแบบจิ๊กหรือฟิกซ์เจอร์ใหม่ เพื่อช่วยลดเวลาในการปรับตั้ง
4. เนื่องจากการทดลองในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลอง แบบบล็อก -เบห์นเคน เนื่องจากต้องการลดต้นทุน ดังนั้นอาจประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองชนิดอื่นแทน

## รายการอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ. เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. 2551.
- [2] Nikolaos, I., Galanis, Dimitrios, E., Manolakos. Surface roughness prediction in turning of femoral head. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 51 (2010) : 79-86.
- [3] Routara, B. C., Bandyopadhyay, A., and Sahoo, P. Roughness modeling and optimization in CNC end milling using response surface method: effect of workpiece material variation. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 40 (2009) : 1166-1180.
- [4] Suresh Kumar Reddy, N., Venkateswara Rao, P. Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 26 (2005) : 1202-1210.
- [5] Ilhan, Asiltürka, Mehmet, ÇunkaŞ. Modelling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method. Expert Systems with Applications, 36:3216-3222.
- [6] Vishal S. Sharma, Suresh Dhiman, Rakesh Sehgal, and Sharma S. K. Estimation of cutting forces and surface roughness for hard turning using neural networks. Journal of Intelligent Manufacturing 19 (2008) : 473-483.
- [7] Benardos, P.G., Vosniakos, G.-C. Predicting surface roughness in machining: a review. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003) : 833-844.
- [8] Julie, Z., Zhang, Joseph, C., Chen. Neural Networks-Based In-Process Surface Roughness Adaptive Control System in Turning Operations. International Symposium on Neural Networks LNCS 3973 (2006) : 970-975.
- [9] Tugrul Ozel, 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

- [10] Somkiat Tangjitsitcharoen. Monitoring of dry cutting and applications of cutting fluid. Journal of Engineering Tribology 224 (2010) : 209-219.
- [11] Lee J.H., Kim D.E., and Lee S.J. Statistical analysis of cutting force ratios for flank-wear monitor. Journal of Materials Processing Technology 74 (1998) : 104-114.
- [12] Molinari, A., Moufki, A. A new thermomechanical model of cutting applied to turning operations. Part I. Theory. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) : 166-180.
- [13] Choudhury S.K., Bartarya G. Role of temperature and surface finish in predicting tool wear using neural network and design of experiments. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003) : 747-753.
- [14] 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 47 (2004) : 933-938.
- [15] ปิยะ ศิริธรรมปิติ. การศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยการประยุกต์ใช้วิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [16] Nalbant, M., Gokkaya, H., and Sur, G. Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. Materials and Design 28 (2007) : 1379-1385.
- [17] Dilbag Singh, Venkateswara Rao, P. A surface roughness prediction model for hard turning process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 32 (2007) : 1115-1124.
- [18] Saeed, Zare, Chavoshi, Mehdi, Tajdari. Surface roughness modelling in hard turning operation of AISI 4140 using CBN cutting tool. International Journal of Material Forming 3 (2010) : 233-239.
- [19] Mahdavinejad, R.A., Sharifi Bidgoli, H. Optimization of surface roughness parameters in dry turning. Journal of Achievements in Materials and



Manufacturing Engineering 37 (2009) : 571-577.

- [20] Paulo Davim J. A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. Journal of Materials Processing Technology 116 (2001) : 305-308.
- [21] Choudhury, I.A., El-Baradie, M.A. Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments. Journal of Materials Processing Technology 67 (1997) : 55-61.
- [22] Yusuf Sahin, A., Riza, Motorcu. Surface Roughness Prediction Model in Machining of Carbon Steel by PVD Coated Cutting Tools. American Journal of Applied Sciences 1 (2004) : 12-17.
- [23] สมชาติ อารยพิทยา. การสืบหาเงื่อนไขการตัดโลหะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตัดแบบแห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [24] Somkiat Tangjitsitcharoen. Intelligent Monitoring and Estimation of Surface Roughness on CNC Turning. Key Engineering Materials 443 (2010) : 376-381.
- [25] Jeffrey, D., Thiele, Shreyes, N., Melkote. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. Journal of Materials Processing Technology 94 (1999) : 216-226.
- [26] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ. เอกสารประกอบการสอนวิชาการตัดโลหะ. 2551.
- [27] Degarmo E.P., Black J T. and Ronald A. Kohser, Materials and Process in Manufacturing, 9th Edition., USA: John Wiley& Son, 2004.
- [28] Serope Kalpakjian and Steven Schmid, Manufacturing Engineering and Technology, 5th ed., Singapore: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [29] Abukhshim, N.A., Mativenga P.T., Ssheikh, M.A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) : 782-800.
- [30] Kai Cheng, Machining dynamics: fundamentals, applications and practices. Springer Series in Advanced Manufacturing, 2009.
- [31] ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

- [32] จักร จันทลักขณา. การแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (FFT) และการประยุกต์ใช้เพื่อวินิจฉัยสภาพเครื่องจักร ตอนที่ 1: แกนอ้างอิงเทียบทางความถี่ด้วยการวิเคราะห์แบบฟูริเยร์. วารสารพัฒนาเทคนิคศึกษา สจพ. 44 (2545).
- [33] Tuncay Erzurumlu, Hasan Oktem. Comparison of response surface model with neural network in determining the surface quality of moulded parts. Materials and Design 28 (2007) : 459-465.
- [34] Chen W. Cutting forces and surface finish when machining medium hardness steel using CBN tools. International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 (2000) : 455-466.
- [35] Somkiat T. and Suthas R. Monitoring of cutting conditions with dry cutting on CNC turning Machine. Key Engineering Materials 443 (2010) : 382-387.

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**

ตารางแสดงผลการทดลองสำหรับผลตอบต่างๆ

No.	Cutting Speed	Feed Rate	Depth of Cut	Nose radius	Ra			
					1	2	3	Average
1	180	0.15	0.4	0.8	1.055	1.046	1.036	1.0457
2	340	0.15	0.4	0.8	0.965	0.978	0.994	0.9790
3	180	0.25	0.4	0.8	2.518	2.502	2.486	2.5020
4	340	0.25	0.4	0.8	2.679	2.680	2.724	2.6943
5	260	0.2	0.2	0.4	3.247	3.233	3.215	3.2317
6	260	0.2	0.6	0.4	3.262	3.272	3.303	3.2790
7	260	0.2	0.2	1.2	1.074	1.062	1.018	1.0513
8	260	0.2	0.6	1.2	0.873	0.912	0.936	0.9070
9	180	0.2	0.4	0.4	3.398	3.446	3.451	3.4317
10	340	0.2	0.4	0.4	3.063	3.046	3.053	3.0540
11	180	0.2	0.4	1.2	0.990	1.039	1.021	1.0167
12	340	0.2	0.4	1.2	1.258	1.262	1.286	1.2687
13	260	0.15	0.2	0.8	1.055	1.030	1.039	1.0413
14	260	0.25	0.2	0.8	2.689	2.703	2.734	2.7087
15	260	0.15	0.6	0.8	1.091	1.060	1.106	1.0857
16	260	0.25	0.6	0.8	2.733	2.730	2.737	2.7333
17	180	0.2	0.2	0.8	2.042	2.057	2.041	2.0467
18	340	0.2	0.2	0.8	1.788	1.816	1.804	1.8027
19	180	0.2	0.6	0.8	2.080	2.066	2.055	2.0670
20	340	0.2	0.6	0.8	1.843	1.871	1.876	1.8633
21	260	0.15	0.4	0.4	2.248	2.255	2.321	2.2747
22	260	0.25	0.4	0.4	4.738	4.754	4.750	4.7473
23	260	0.15	0.4	1.2	0.867	0.898	0.903	0.8893
24	260	0.25	0.4	1.2	1.664	1.665	1.670	1.6663
25	260	0.2	0.4	0.8	1.909	1.917	1.914	1.9133
26	260	0.2	0.4	0.8	1.850	1.842	1.850	1.8473
27	260	0.2	0.4	0.8	1.699	1.756	1.869	1.7747

No.	Cutting Speed	Feed Rate	Depth of Cut	Nose radius	Rz			
					1	2	3	Average
1	180	0.15	0.4	0.8	6.319	6.071	5.257	5.8823
2	340	0.15	0.4	0.8	5.200	5.175	5.236	5.2037
3	180	0.25	0.4	0.8	11.371	11.224	11.574	11.3897
4	340	0.25	0.4	0.8	11.206	11.225	11.175	11.2020
5	260	0.2	0.2	0.4	13.763	13.718	13.879	13.7867
6	260	0.2	0.6	0.4	13.734	13.632	14.168	13.8447
7	260	0.2	0.2	1.2	5.709	5.796	5.448	5.6510
8	260	0.2	0.6	1.2	5.586	5.444	5.192	5.4073
9	180	0.2	0.4	0.4	14.860	15.082	14.861	14.9343
10	340	0.2	0.4	0.4	12.817	12.693	12.948	12.8193
11	180	0.2	0.4	1.2	6.344	6.250	6.186	6.2600
12	340	0.2	0.4	1.2	5.040	5.181	5.174	5.1317
13	260	0.15	0.2	0.8	4.830	4.676	5.032	4.8460
14	260	0.25	0.2	0.8	10.984	10.984	10.965	10.9777
15	260	0.15	0.6	0.8	5.540	5.334	5.506	5.4600
16	260	0.25	0.6	0.8	11.321	11.109	11.051	11.1603
17	180	0.2	0.2	0.8	8.161	8.254	8.400	8.272
18	340	0.2	0.2	0.8	7.526	7.921	7.741	7.7293
19	180	0.2	0.6	0.8	8.747	9.192	9.204	9.0477
20	340	0.2	0.6	0.8	8.361	7.782	7.869	8.0040
21	260	0.15	0.4	0.4	9.595	9.465	9.594	9.5513
22	260	0.25	0.4	0.4	20.083	20.162	20.286	20.1770
23	260	0.15	0.4	1.2	3.946	4.049	3.985	3.9933
24	260	0.25	0.4	1.2	7.779	7.658	7.647	7.6947
25	260	0.2	0.4	0.8	8.740	9.049	9.421	9.0700
26	260	0.2	0.4	0.8	7.548	7.654	7.949	7.7170
27	260	0.2	0.4	0.8	7.765	8.063	9.065	8.2977

### **ภาคผนวก ข**

ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของการทดลองสำหรับผลตอบต่างๆ

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)

### Response Surface Regression: Ra versus Cutting spee, Feed rate, ...

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Ra

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.84512	0.07579	24.344	0.000
Cutting speed	-0.12050	0.03790	-3.180	0.008
Feed rate	0.81136	0.03790	21.410	0.000
Depth of cut	0.01933	0.03790	0.510	0.619
Nose radius	-1.10158	0.03790	-29.068	0.000
Cutting speed*Cutting speed	-0.02262	0.05684	-0.398	0.698
Feed rate*Feed rate	0.06559	0.05684	1.154	0.271
Depth of cut*Depth of cut	0.01056	0.05684	0.186	0.856
Nose radius*Nose radius	0.37184	0.05684	6.541	0.000
Cutting speed*Feed rate	-0.03142	0.06564	-0.479	0.641
Cutting speed*Depth of cut	0.01007	0.06564	0.153	0.881
Cutting speed*Nose radius	0.00400	0.06564	0.061	0.952
Feed rate*Depth of cut	-0.00494	0.06564	-0.075	0.941
Feed rate*Nose radius	-0.42392	0.06564	-6.458	0.000
Depth of cut*Nose radius	-0.00317	0.06564	-0.048	0.962

S = 0.131277 PRESS = 1.15743

R-Sq = 99.16% R-Sq(pred) = 95.27% R-Sq(adj) = 98.17%

Analysis of Variance for Ra

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	24.2679	24.2679	1.73342	100.58	0.000
Linear	4	22.6403	22.6403	5.66008	328.43	0.000
Square	4	0.9043	0.9043	0.22607	13.12	0.000
Interaction	6	0.7234	0.7234	0.12056	7.00	0.002
Residual Error	12	0.2068	0.2068	0.01723		
Lack-of-Fit	10	0.1972	0.1972	0.01972	4.10	0.212
Pure Error	2	0.0096	0.0096	0.00481		
Total	26	24.4747				

Estimated Regression Coefficients for Ra using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-0.264458
Cutting speed	0.00155016
Feed rate	24.9288
Depth of cut	-0.147691
Nose radius	-2.24985
Cutting speed*Cutting speed	-3.53364E-06
Feed rate*Feed rate	26.2372
Depth of cut*Depth of cut	0.263889
Nose radius*Nose radius	2.32399
Cutting speed*Feed rate	-0.00785417
Cutting speed*Depth of cut	0.000629687
Cutting speed*Nose radius	0.000125000
Feed rate*Depth of cut	-0.494167
Feed rate*Nose radius	-21.1958
Depth of cut*Nose radius	-0.0395833



ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

### Response Surface Regression: Rz versus Cutting spee, Feed rate, ...

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Rz

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	8.36156	0.3350	24.957	0.000
Cutting speed	-0.47464	0.1675	-2.833	0.015
Feed rate	3.13872	0.1675	18.736	0.000
Depth of cut	0.13847	0.1675	0.827	0.425
Nose radius	-4.24794	0.1675	-25.358	0.000
Cutting speed*Cutting speed	-0.04739	0.2513	-0.189	0.854
Feed rate*Feed rate	0.16040	0.2513	0.638	0.535
Depth of cut*Depth of cut	-0.25856	0.2513	-1.029	0.324
Nose radius*Nose radius	1.62457	0.2513	6.465	0.000
Cutting speed*Feed rate	0.12275	0.2902	0.423	0.680
Cutting speed*Depth of cut	-0.12533	0.2902	-0.432	0.673
Cutting speed*Nose radius	0.24667	0.2902	0.850	0.412
Feed rate*Depth of cut	-0.10783	0.2902	-0.372	0.717
Feed rate*Nose radius	-1.73108	0.2902	-5.966	0.000
Depth of cut*Nose radius	-0.07542	0.2902	-0.260	0.799

S = 0.580309 PRESS = 20.0425

R-Sq = 98.92% R-Sq(pred) = 94.63% R-Sq(adj) = 97.65%

Analysis of Variance for Rz

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	369.071	369.071	26.3622	78.28	0.000
Linear	4	337.693	337.693	84.4232	250.69	0.000
Square	4	18.956	18.956	4.7389	14.07	0.000
Interaction	6	12.422	12.422	2.0704	6.15	0.004
Residual Error	12	4.041	4.041	0.3368		
Lack-of-Fit	10	3.120	3.120	0.3120	0.68	0.726
Pure Error	2	0.921	0.921	0.4607		
Total	26	373.112				

Estimated Regression Coefficients for Rz using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	0.469559
Cutting speed	-0.0112535
Feed rate	102.688
Depth of cut	10.8110
Nose radius	-11.1818
Cutting speed*Cutting speed	-7.40451E-06
Feed rate*Feed rate	64.1611
Depth of cut*Depth of cut	-6.46389
Nose radius*Nose radius	10.1536
Cutting speed*Feed rate	0.0306875
Cutting speed*Depth of cut	-0.00783333
Cutting speed*Nose radius	0.00770833
Feed rate*Depth of cut	-10.7833
Feed rate*Nose radius	-86.5542
Depth of cut*Nose radius	-0.942708

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแรงตัดในแนวรัศมี (Fx)

### Response Surface Regression: Fx versus Cutting speed, Feed rate, ...

The analysis was done using coded units.

#### Estimated Regression Coefficients for Fx

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	137.938	3.365	40.996	0.000
Cutting speed	-5.317	1.682	-3.161	0.008
Feed rate	10.825	1.682	6.434	0.000
Depth of cut	35.278	1.682	20.969	0.000
Nose radius	30.114	1.682	17.900	0.000
Cutting speed*Cutting speed	1.797	2.524	0.712	0.490
Feed rate*Feed rate	-2.725	2.524	-1.080	0.301
Depth of cut*Depth of cut	-4.432	2.524	-1.756	0.104
Nose radius*Nose radius	5.617	2.524	2.226	0.046
Cutting speed*Feed rate	5.135	2.914	1.762	0.103
Cutting speed*Depth of cut	-0.430	2.914	-0.148	0.885
Cutting speed*Nose radius	-5.356	2.914	-1.838	0.091
Feed rate*Depth of cut	7.198	2.914	2.470	0.029
Feed rate*Nose radius	-3.128	2.914	-1.074	0.304
Depth of cut*Nose radius	16.849	2.914	5.782	0.000

S = 5.82785      PRESS = 2193.52  
R-Sq = 98.64%    R-Sq(pred) = 92.70%    R-Sq(adj) = 97.06%

#### Analysis of Variance for Fx

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	29659.9	29659.9	2118.57	62.38	0.000
Linear	4	27562.3	27562.3	6890.57	202.88	0.000
Square	4	494.7	494.7	123.68	3.64	0.036
Interaction	6	1602.9	1602.9	267.15	7.87	0.001
Residual Error	12	407.6	407.6	33.96		
Lack-of-Fit	10	363.7	363.7	36.37	1.66	0.434
Pure Error	2	43.9	43.9	21.95		
Total	26	30067.5				

#### Estimated Regression Coefficients for Fx using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	90.3459
Cutting speed	-0.324549
Feed rate	156.009
Depth of cut	-40.4266
Nose radius	9.66797
Cutting speed*Cutting speed	0.000280719
Feed rate*Feed rate	-1090.19
Depth of cut*Depth of cut	-110.809
Nose radius*Nose radius	35.1056
Cutting speed*Feed rate	1.28375
Cutting speed*Depth of cut	-0.0268868
Cutting speed*Nose radius	-0.167360
Feed rate*Depth of cut	719.817
Feed rate*Nose radius	-156.418
Depth of cut*Nose radius	210.614

## ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแรงป้อนตัด (Fy)

**Response Surface Regression: Fy versus Cutting spee, Feed rate, ...**

The analysis was done using coded units.

## Estimated Regression Coefficients for Fy

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	68.1159	2.457	27.725	0.000
Cutting speed	-4.9148	1.228	-4.001	0.002
Feed rate	6.1691	1.228	5.022	0.000
Depth of cut	39.5776	1.228	32.218	0.000
Nose radius	-6.8741	1.228	-5.596	0.000
Cutting speed*Cutting speed	1.8888	1.843	1.025	0.326
Feed rate*Feed rate	-1.8464	1.843	-1.002	0.336
Depth of cut*Depth of cut	8.1824	1.843	4.441	0.001
Nose radius*Nose radius	1.5624	1.843	0.848	0.413
Cutting speed*Feed rate	0.0296	2.128	0.014	0.989
Cutting speed*Depth of cut	1.4552	2.128	0.684	0.507
Cutting speed*Nose radius	0.1214	2.128	0.057	0.955
Feed rate*Depth of cut	4.3030	2.128	2.022	0.066
Feed rate*Nose radius	0.4261	2.128	0.200	0.845
Depth of cut*Nose radius	-4.0901	2.128	-1.922	0.079

S = 4.25543      PRESS = 1233.89

R-Sq = 98.96%    R-Sq(pred) = 94.11%    R-Sq(adj) = 97.75%

## Analysis of Variance for Fy

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	20743.7	20743.7	1481.69	81.82	0.000
Linear	4	20110.2	20110.2	5027.55	277.63	0.000
Square	4	483.2	483.2	120.81	6.67	0.005
Interaction	6	150.2	150.2	25.04	1.38	0.297
Residual Error	12	217.3	217.3	18.11		
Lack-of-Fit	10	212.2	212.2	21.22	8.38	0.111
Pure Error	2	5.1	5.1	2.53		
Total	26	20961.0				

## Estimated Regression Coefficients for Fy using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	55.4983
Cutting speed	-0.255798
Feed rate	227.718
Depth of cut	-34.5668
Nose radius	-17.6058
Cutting speed*Cutting speed	0.000295127
Feed rate*Feed rate	-738.565
Depth of cut*Depth of cut	204.560
Nose radius*Nose radius	9.76501
Cutting speed*Feed rate	0.00740562
Cutting speed*Depth of cut	0.0909519
Cutting speed*Nose radius	0.00379357
Feed rate*Depth of cut	430.304
Feed rate*Nose radius	21.3042
Depth of cut*Nose radius	-51.1266

## ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแรงตัดหลัก (Fz)

**Response Surface Regression: Fz versus Cutting spee, Feed rate, ...**

The analysis was done using coded units.

## Estimated Regression Coefficients for Fz

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	177.158	3.546	49.961	0.000
Cutting speed	-6.207	1.773	-3.501	0.004
Feed rate	29.265	1.773	16.506	0.000
Depth of cut	81.302	1.773	45.857	0.000
Nose radius	13.317	1.773	7.511	0.000
Cutting speed*Cutting speed	0.883	2.659	0.332	0.746
Feed rate*Feed rate	-5.166	2.659	-1.943	0.076
Depth of cut*Depth of cut	2.623	2.659	0.986	0.344
Nose radius*Nose radius	12.387	2.659	4.658	0.001
Cutting speed*Feed rate	-0.107	3.071	-0.035	0.973
Cutting speed*Depth of cut	-2.697	3.071	-0.878	0.397
Cutting speed*Nose radius	-0.662	3.071	-0.216	0.833
Feed rate*Depth of cut	14.124	3.071	4.599	0.001
Feed rate*Nose radius	-1.884	3.071	-0.613	0.551
Depth of cut*Nose radius	-0.365	3.071	-0.119	0.907

S = 6.14171 PRESS = 2576.88

R-Sq = 99.52% R-Sq(pred) = 97.28% R-Sq(adj) = 98.97%

## Analysis of Variance for Fz

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	94379.3	94379.3	6741.4	178.72	0.000
Linear	4	92186.9	92186.9	23046.7	610.99	0.000
Square	4	1348.9	1348.9	337.2	8.94	0.001
Interaction	6	843.5	843.5	140.6	3.73	0.025
Residual Error	12	452.6	452.6	37.7		
Lack-of-Fit	10	444.0	444.0	44.4	10.26	0.092
Pure Error	2	8.7	8.7	4.3		
Total	26	94832.0				

## Estimated Regression Coefficients for Fz using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-49.0205
Cutting speed	-0.0600264
Feed rate	929.233
Depth of cut	119.052
Nose radius	-64.5328
Cutting speed*Cutting speed	0.000138000
Feed rate*Feed rate	-2066.46
Depth of cut*Depth of cut	65.5630
Nose radius*Nose radius	77.4196
Cutting speed*Feed rate	-0.0267439
Cutting speed*Depth of cut	-0.168532
Cutting speed*Nose radius	-0.0206988
Feed rate*Depth of cut	1412.39
Feed rate*Nose radius	-94.1940
Depth of cut*Nose radius	-4.56669

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลอัตราส่วนแรงตัด (Fy/Fz)

### Response Surface Regression: Fy/Fz versus Cutting spee, Feed rate, ...

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Fy/Fz

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.384508	0.010940	35.147	0.000
Cutting speed	-0.017477	0.005470	-3.195	0.008
Feed rate	-0.032433	0.005470	-5.929	0.000
Depth of cut	0.035673	0.005470	6.522	0.000
Nose radius	-0.065401	0.005470	-11.956	0.000
Cutting speed*Cutting speed	0.007075	0.008205	0.862	0.405
Feed rate*Feed rate	0.010351	0.008205	1.262	0.231
Depth of cut*Depth of cut	0.023010	0.008205	2.804	0.016
Nose radius*Nose radius	-0.014848	0.008205	-1.810	0.095
Cutting speed*Feed rate	0.003009	0.009474	0.318	0.756
Cutting speed*Depth of cut	0.024766	0.009474	2.614	0.023
Cutting speed*Nose radius	-0.000503	0.009474	-0.053	0.958
Feed rate*Depth of cut	-0.001283	0.009474	-0.135	0.895
Feed rate*Nose radius	0.023498	0.009474	2.480	0.029
Depth of cut*Nose radius	0.002923	0.009474	0.309	0.763

S = 0.0189487 PRESS = 0.0242692

R-Sq = 95.62% R-Sq(pred) = 75.32% R-Sq(adj) = 90.50%

Analysis of Variance for Fy/Fz

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	0.094010	0.094010	0.006715	18.70	0.000
Linear	4	0.082886	0.082886	0.020722	57.71	0.000
Square	4	0.006384	0.006384	0.001596	4.44	0.020
Interaction	6	0.004740	0.004740	0.000790	2.20	0.115
Residual Error	12	0.004309	0.004309	0.000359		
Lack-of-Fit	10	0.004152	0.004152	0.000415	5.31	0.169
Pure Error	2	0.000156	0.000156	0.000078		
Total	26	0.098319				

Estimated Regression Coefficients for Fy/Fz using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	1.28971
Cutting speed	-0.00155028
Feed rate	-3.38900
Depth of cut	-0.687835
Nose radius	-0.260525
Cutting speed*Cutting speed	1.10547E-06
Feed rate*Feed rate	4.14050
Depth of cut*Depth of cut	0.575238
Nose radius*Nose radius	-0.0928005
Cutting speed*Feed rate	0.000752136
Cutting speed*Depth of cut	0.00154785
Cutting speed*Nose radius	-1.57322E-05
Feed rate*Depth of cut	-0.128319
Feed rate*Nose radius	1.17489
Depth of cut*Nose radius	0.0365419

## ผลการวิเคราะห์ข้อมูลคุณหมุมิตัด

**Response Surface Regression: Temp versus Cutting spee, Feed rate, ...**

The analysis was done using coded units.

## Estimated Regression Coefficients for Temp

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	419.259	2.644	158.563	0.000
Cutting speed	7.200	1.322	5.446	0.000
Feed rate	1.204	1.322	0.911	0.380
Depth of cut	6.702	1.322	5.069	0.000
Nose radius	11.408	1.322	8.629	0.000
Cutting speed*Cutting speed	0.000	1.983	0.000	1.000
Feed rate*Feed rate	0.273	1.983	0.138	0.893
Depth of cut*Depth of cut	-2.400	1.983	-1.210	0.249
Nose radius*Nose radius	5.949	1.983	3.000	0.011
Cutting speed*Feed rate	1.172	2.290	0.512	0.618
Cutting speed*Depth of cut	3.930	2.290	1.716	0.112
Cutting speed*Nose radius	1.300	2.290	0.568	0.581
Feed rate*Depth of cut	0.860	2.290	0.376	0.714
Feed rate*Nose radius	0.257	2.290	0.112	0.913
Depth of cut*Nose radius	-0.548	2.290	-0.239	0.815

S = 4.57975 PRESS = 1439.74

R-Sq = 92.56% R-Sq(pred) = 57.41% R-Sq(adj) = 83.87%

## Analysis of Variance for Temp

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	3129.11	3129.11	223.508	10.66	0.000
Linear	4	2740.31	2740.31	685.077	32.66	0.000
Square	4	310.34	310.34	77.585	3.70	0.035
Interaction	6	78.46	78.46	13.077	0.62	0.709
Residual Error	12	251.69	251.69	20.974		
Lack-of-Fit	10	248.84	248.84	24.884	17.49	0.055
Pure Error	2	2.85	2.85	1.423		
Total	26	3380.80				

## Estimated Regression Coefficients for Temp using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	429.368
Cutting speed	-0.0993683
Feed rate	-140.532
Depth of cut	5.92532
Nose radius	-41.3560
Cutting speed*Cutting speed	2.04205E-08
Feed rate*Feed rate	109.397
Depth of cut*Depth of cut	-60.0023
Nose radius*Nose radius	37.1823
Cutting speed*Feed rate	0.293049
Cutting speed*Depth of cut	0.245640
Cutting speed*Nose radius	0.0406131
Feed rate*Depth of cut	86.0064
Feed rate*Nose radius	12.8333
Depth of cut*Nose radius	-6.85145

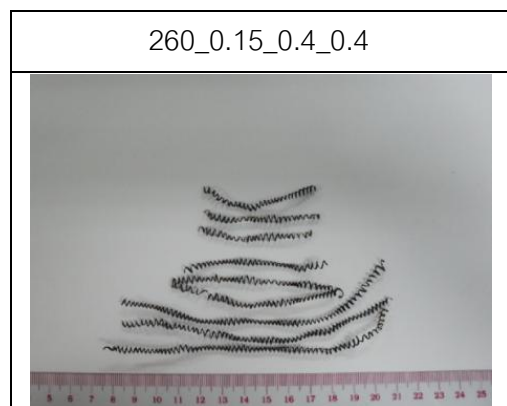
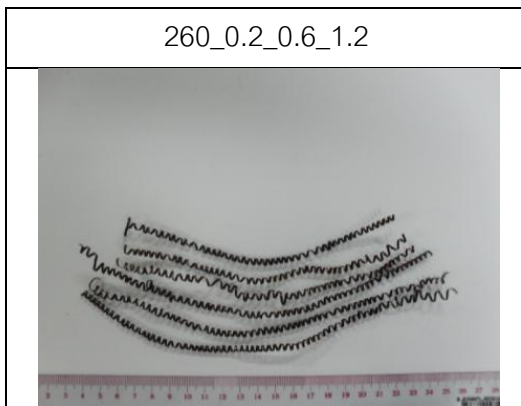
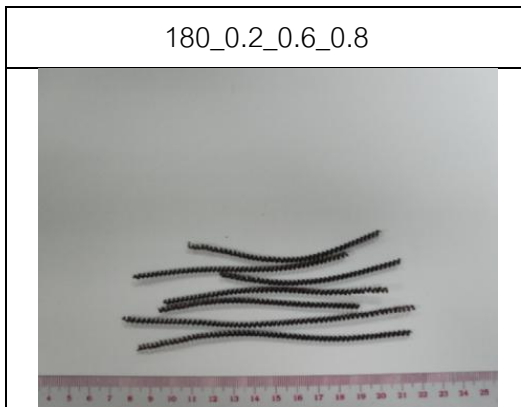
**ภาคผนวก ค**  
เศษโลหะเงื่อนไขการตัดต่างๆ

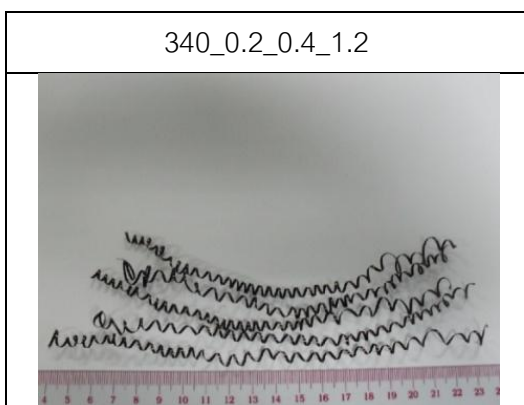
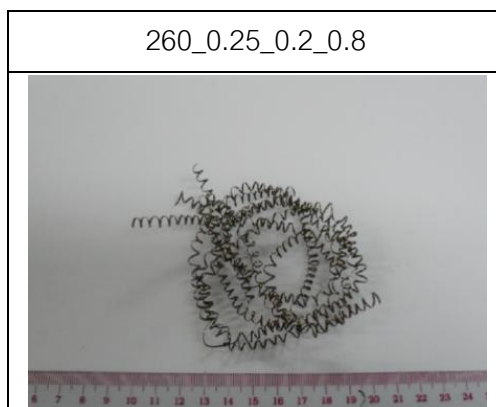
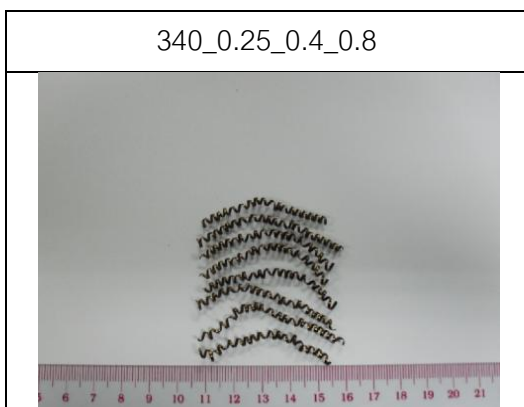
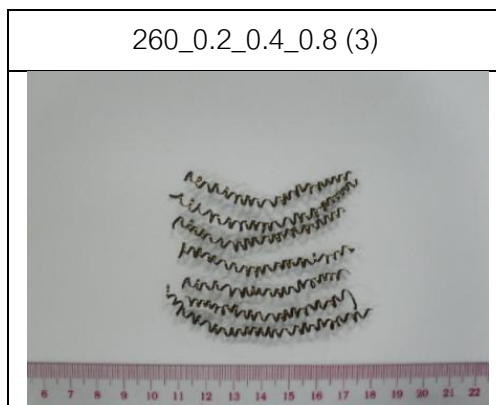
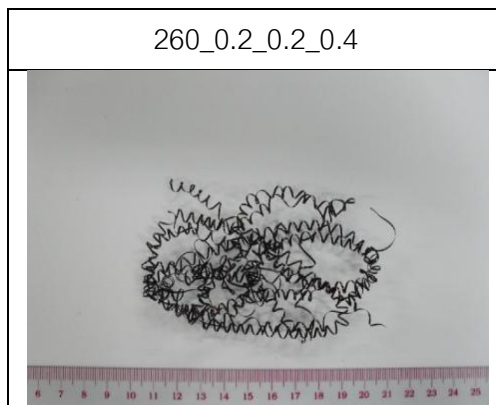
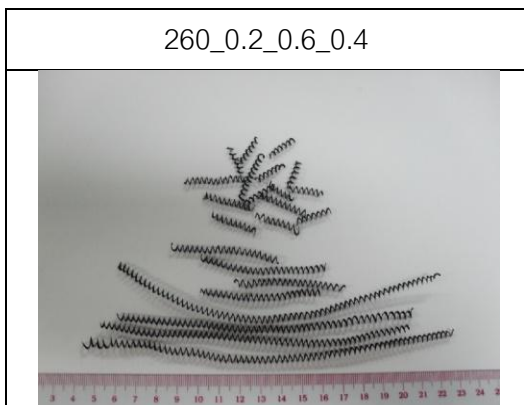


## เศษโลหะจากเงื่อนไขการตัดต่างๆ









340\_0.2\_0.2\_0.8



340\_0.2\_0.4\_0.4



340\_0.2\_0.6\_0.8



### ภาคผนวก ง

โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ และ  
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

### โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ความขรุขระผิว

(สำหรับเงื่อนไขการตัด คือ ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุกมีด 1.2 มิลลิเมตร)

```
clear;
samp=3465;
fname='surfaceroughness115';
ext='.txt';
filename=[fname,ext];
load(filename);
eval(['data=',[fname],'.']);
[N,n]=size(data);
t=1/samp;
tt=(0:t*(N-6536));
f=(0:N-6536)/(N-6535)*samp;
freq=f(1:(N-6535)/2);
SurfaceRoughness=fft(data(1:3465,2))/(N*2);
absSurfaceRoughness=abs(SurfaceRoughness(1:(N-6535)/2));
PabsSurfaceRoughness=absSurfaceRoughness.^2;
figure(1);
plot(freq,PabsSurfaceRoughness);grid;zoom on ;xlabel('Frequency (Hz)');ylabel('PSD of
Surface Roughness (micrometer^2)');
figure(2);
plot(tt,data(1:3465,2));grid;zoom on ;xlabel('Time (sec)');ylabel('Surface Roughness
(micrometer)');
```

### โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์แรงตัด

```

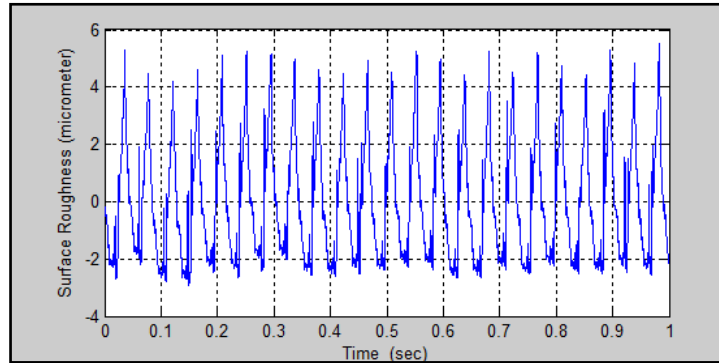
clear;
samp=10000;
fname1 = 'forcedif24';
ext1 = '.txt';
filename = [fname1,ext1];
load (filename);
eval(['data1=',[fname1],';']);
[N1,n1]=size(data1);
fname2 = 'force24';
ext2 = '.txt';
filename = [fname2,ext2];
load (filename);
eval(['data2=',[fname2],';']);
[N2,n2]=size(data2);
t=1/samp;
tt=(0:t*(N2-10021));
f=(0:N1-10021)/(N1-10020)*samp;
freq=f(1:(N1-10020)/2);
FX=fft(data1(1:10000,1))/(N1-10020)*2;
absFX=abs(FX(1:(N1-10020)/2));
PabsFX=absFX.^2;
FY=fft(data1(1:10000,2))/(N1-10020)*2;
absFY=abs(FY(1:(N1-10020)/2));
PabsFY=absFY.^2;
FZ=fft(data1(1:10000,3))/(N1-10020)*2;
absFZ=abs(FZ(1:(N1-10020)/2));
PabsFZ=absFZ.^2;
figure(3);

```

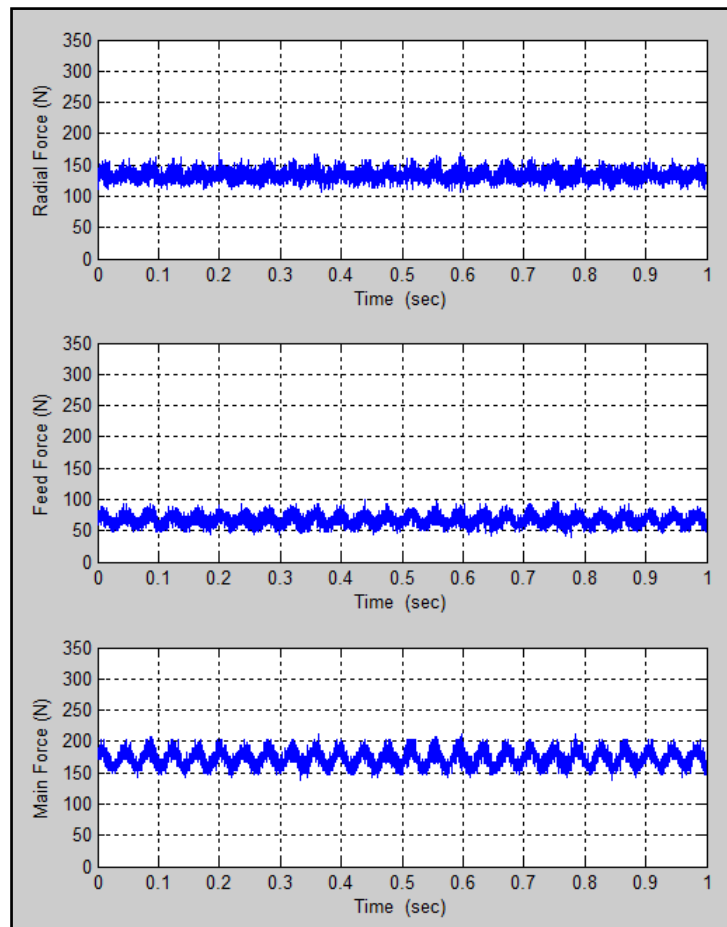
```
subplot(3,1,1);plot(freq,PabsFX);grid;zoom on ;xlabel('Frequency (Hz)');ylabel('PSD of  
Radial force (N^2)');  
subplot(3,1,2);plot(freq,PabsFY);grid;zoom on ;xlabel('Frequency (Hz)');ylabel('PSD of  
Feed force (N^2)');  
subplot(3,1,3);plot(freq,PabsFZ);grid;zoom on ;xlabel('Frequency (Hz)');ylabel('PSD of  
Main force (N^2)');  
figure(4);  
subplot(3,1,1);plot(tt,data2(1:10000,1));grid;zoom on ;xlabel('Time (sec)');ylabel('Radial  
Force (N)');  
set(subplot(3,1,1),'YLim',[0 350]);set(subplot(3,1,1),'YTick',[0 50 100 150 200 250 300  
350]);  
subplot(3,1,2);plot(tt,data2(1:10000,2));grid;zoom on ;xlabel('Time (sec)');ylabel('Feed  
Force (N)');  
set(subplot(3,1,2),'YLim',[0 350]);set(subplot(3,1,2),'YTick',[0 50 100 150 200 250 300  
350]);  
subplot(3,1,3);plot(tt,data2(1:10000,3));grid;zoom on ;xlabel('Time (sec)');ylabel('Main  
Force (N)');  
set(subplot(3,1,3),'YLim',[0 350]);set(subplot(3,1,3),'YTick',[0 50 100 150 200 250 300  
350]);
```

### ผลการวิเคราะห์ความขรุขระผิวและแรงตัดในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่

- 1) เงื่อนไขการตัด คือ ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมีด 0.8 มิลลิเมตร

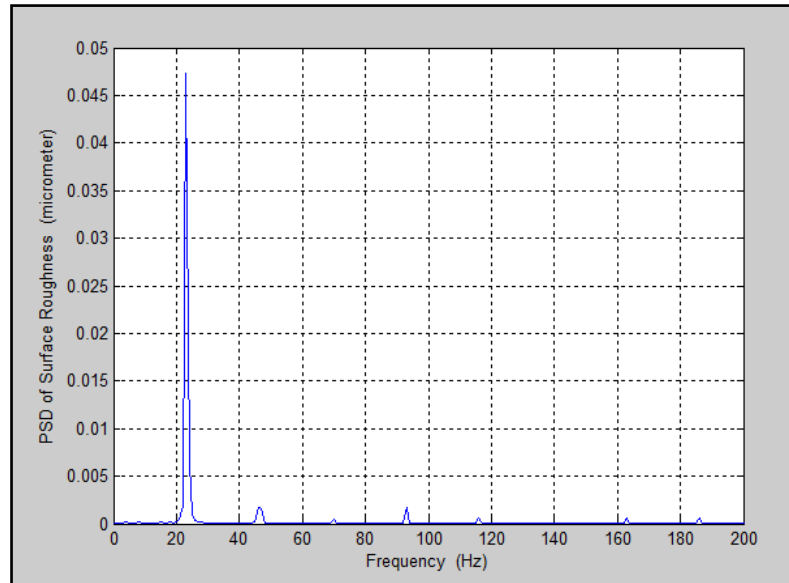


การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนเวลา

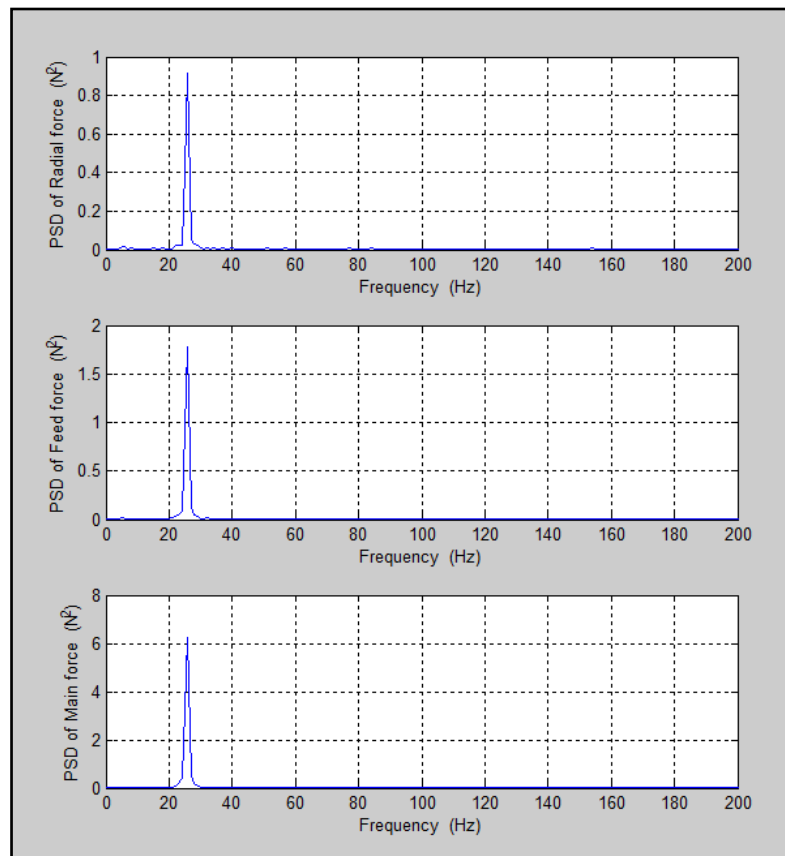


การวิเคราะห์แรงตัดในโดเมนเวลา



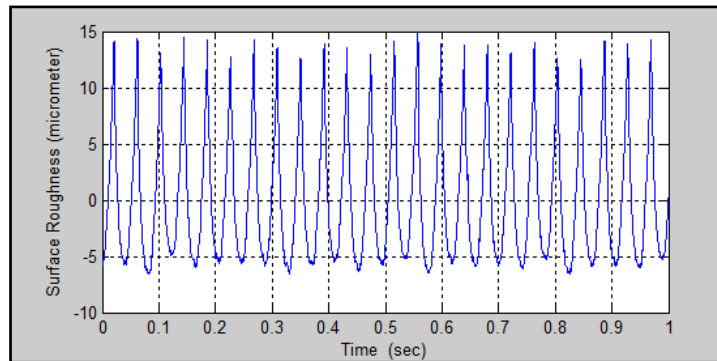


การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนความถี่

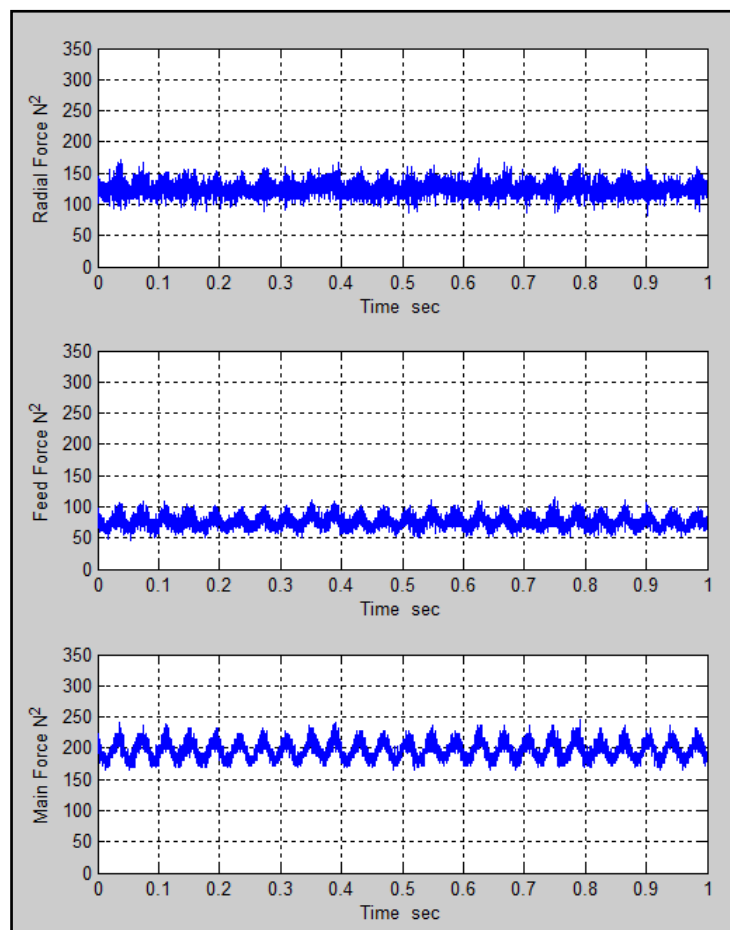


การวิเคราะห์แรงตัดในโดเมนความถี่

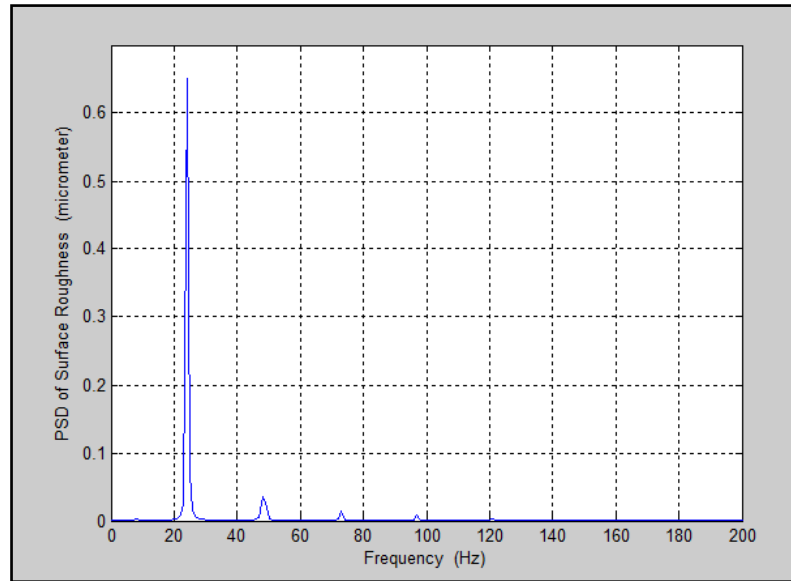
- 2) เงื่อนไขการตัด คือ ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร



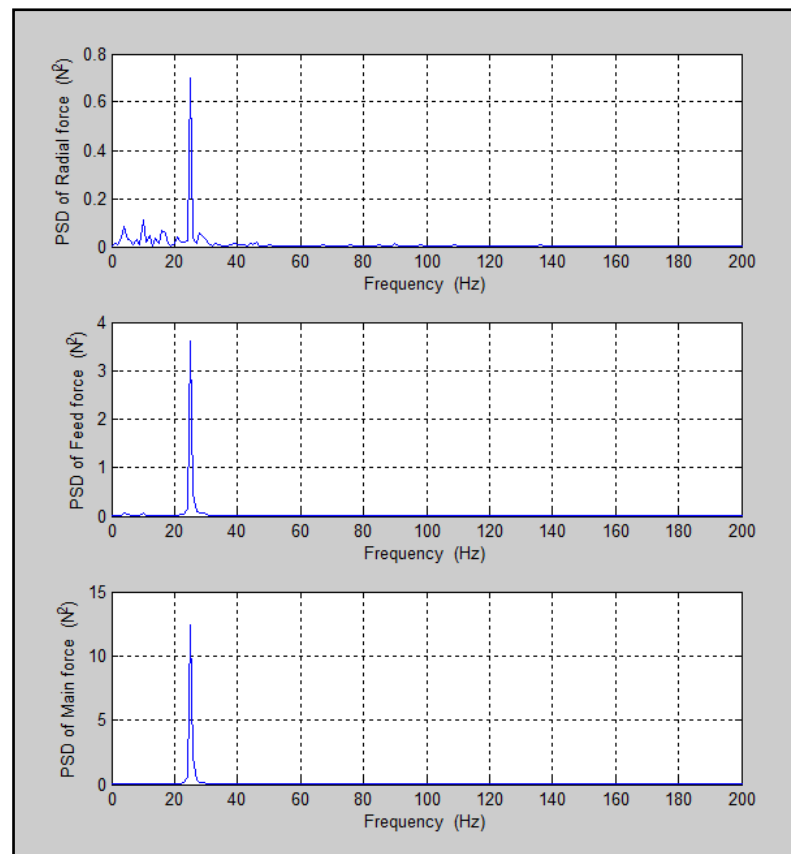
การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนเวลา



การวิเคราะห์แรงตัดในโดเมนเวลา

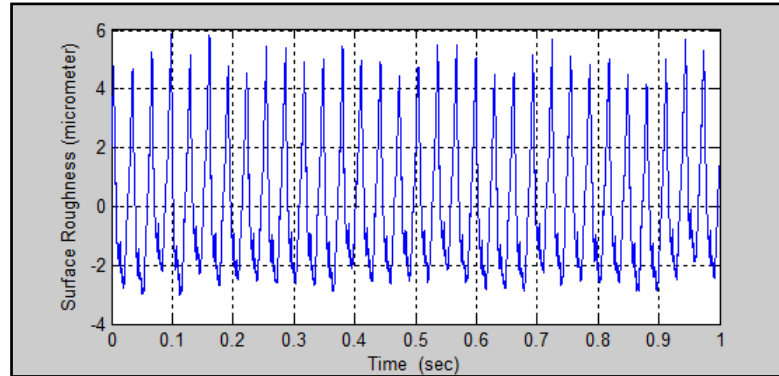


การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนความถี่

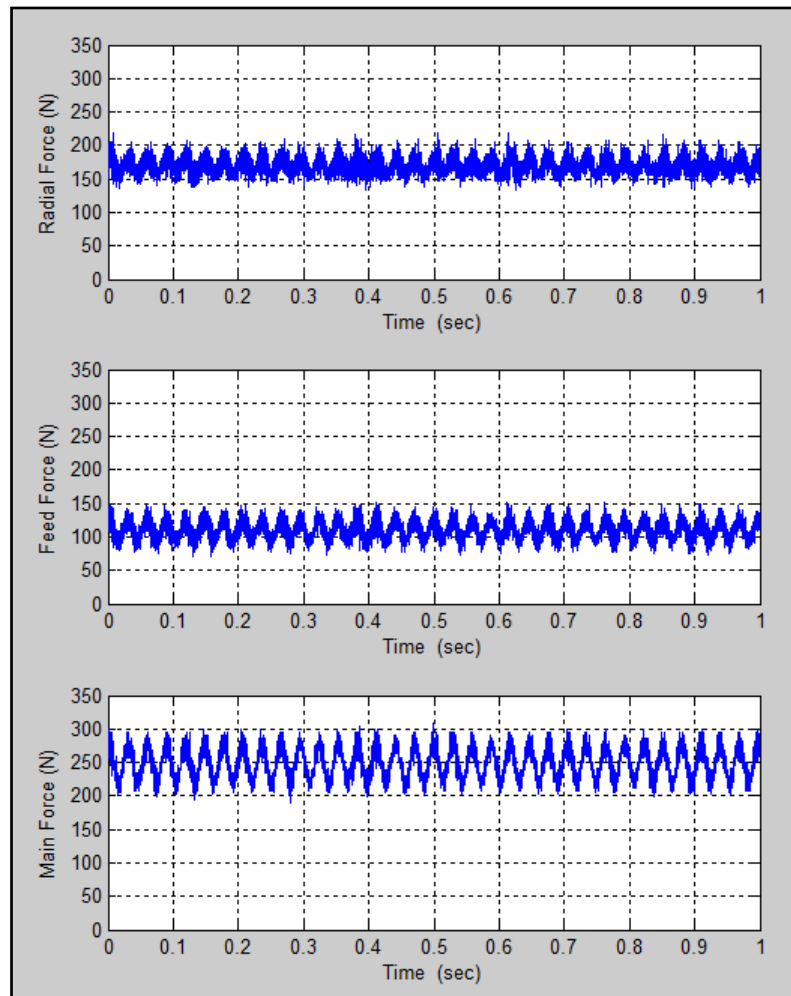


การวิเคราะห์แรงตัดในโดเมนความถี่

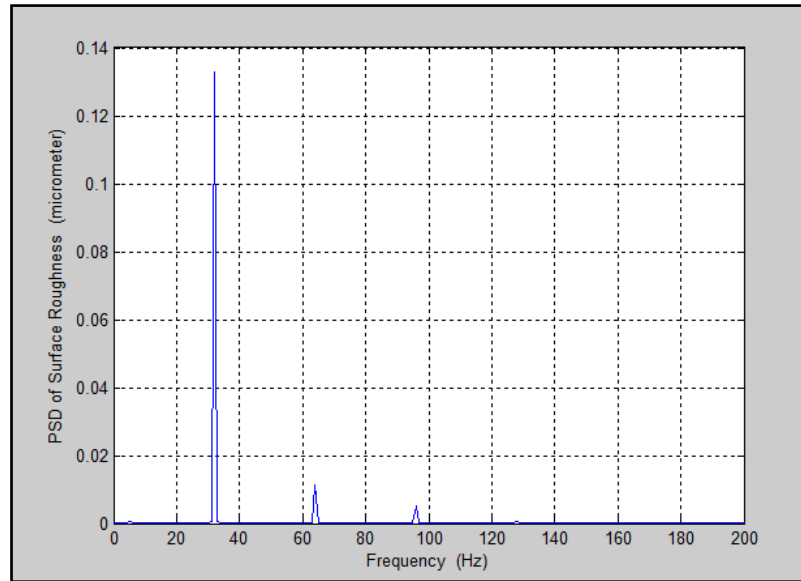
- 3) เงื่อนไขการตัด คือ ความเร็วตัด 340 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.6 มิลลิเมตร และรัศมีจุกมีด 0.8 มิลลิเมตร



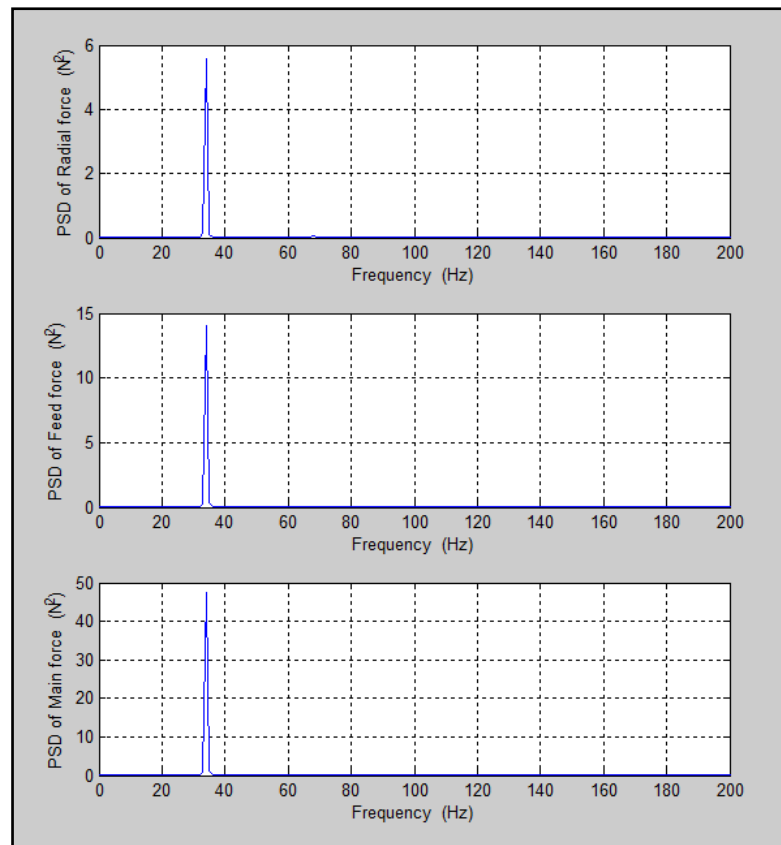
การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนเวลา



การวิเคราะห์แรงตัดในโดเมนเวลา

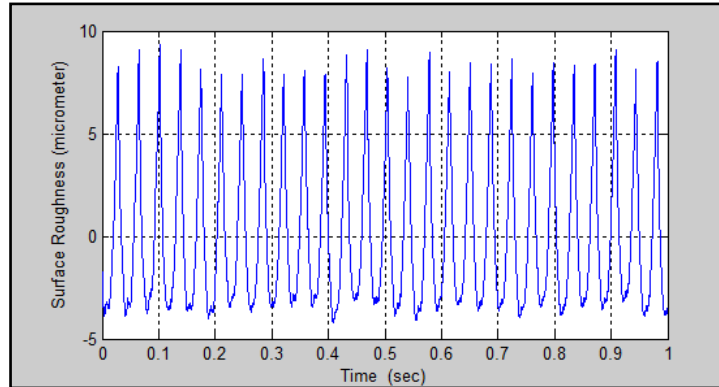


การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนความถี่

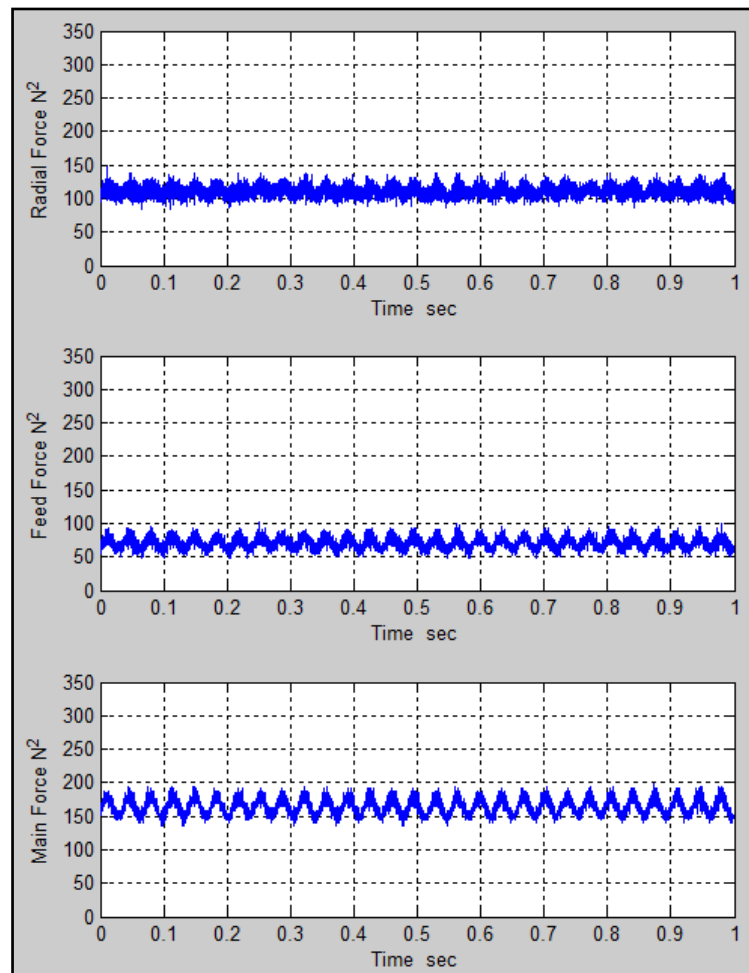


การวิเคราะห์แรงตัดในโดเมนความถี่

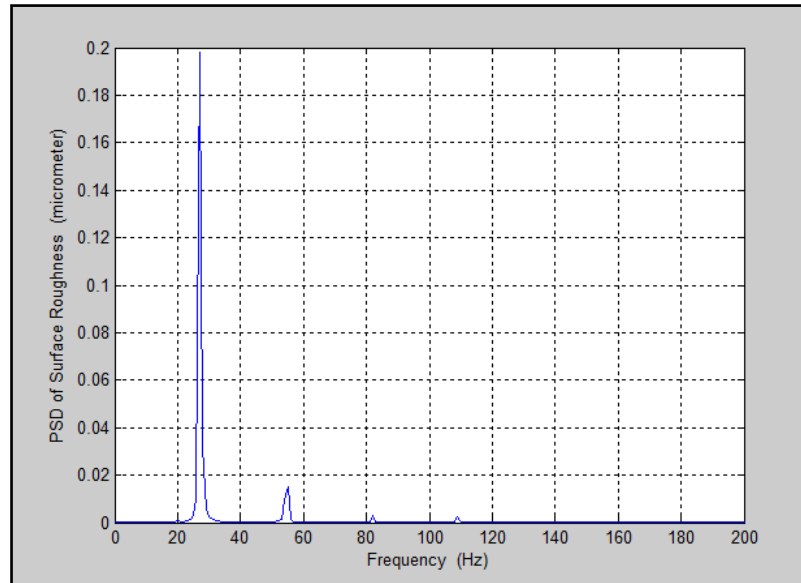
- 4) เงื่อนไขการตัด คือ ความเร็วตัด 340 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร



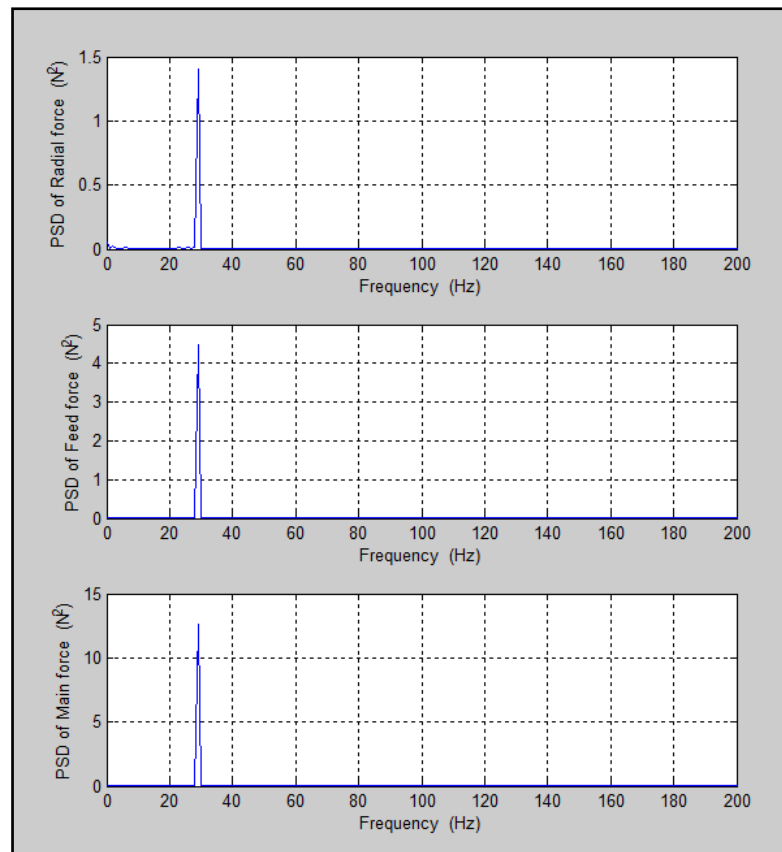
การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนเวลา



การวิเคราะห์แรงตัดในโดเมนเวลา

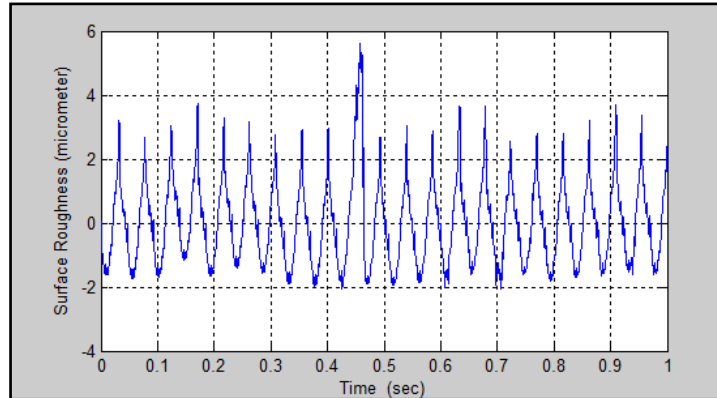


การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนความถี่

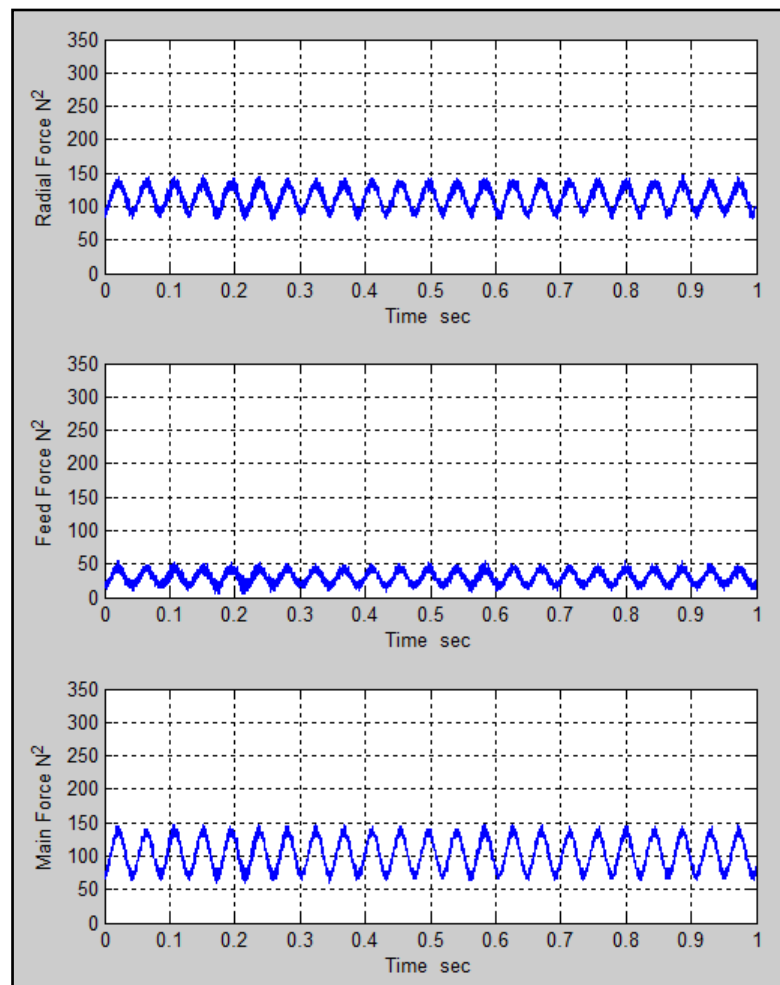


การวิเคราะห์แรงตัดในโดเมนความถี่

- 5) เงื่อนไขการตัด คือ ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุกมีด 1.2 มิลลิเมตร

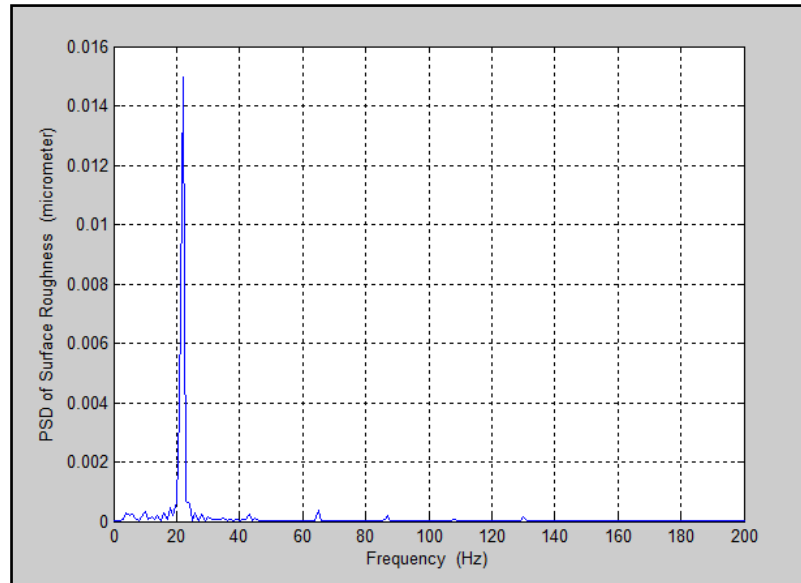


การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนเวลา

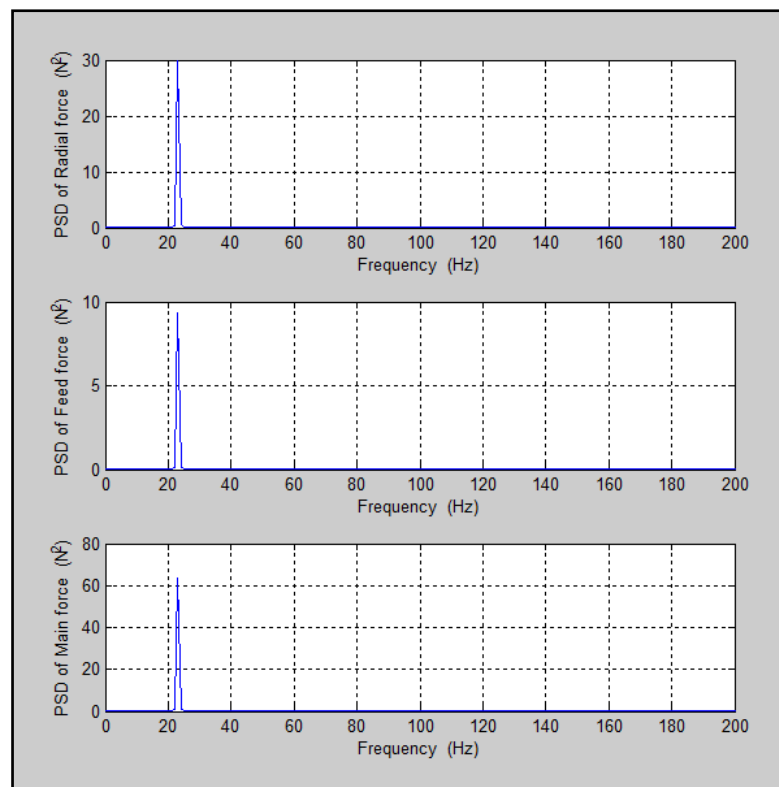


การวิเคราะห์แรงตัดในโดเมนเวลา





การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนความถี่



การวิเคราะห์แรงตัดในโดเมนความถี่

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศิริวัลย์ จันทร์ผ่อง เกิดเมื่อวันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดตรัง สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย จังหวัดตรัง เข้าศึกษา ต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยมหิดล จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2548 ภายหลังจบการศึกษาได้เข้าทำงานที่บริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่งวิศวกร จากนั้นจึงได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรม มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา