

การทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานโดยใช้แรงตัดพลวัตในกระบวนการกัดหัวบอล

นางสาวแพรว เทศนิยม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

IN-PROCESS PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS USING DYNAMIC
CUTTING FORCE IN BALL END MILLING PROCESS

Ms. Prae Thesniyom

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานโดยใช้แรงตัดพลวัต ในกระบวนการกัดหัวบอล
โดย	นางสาวแพร เทศนิยม
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญญ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญญ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์สมบัติไชย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคีก)

แพร่ เทคนิคนิยม : การทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานโดยใช้แรงตัดพลวัตในกระบวนการ
กัดหัวบอล (IN-PROCESS PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS USING
DYNAMIC CUTTING FORCE IN BALL END MILLING PROCESS)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ, 237 หน้า

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการนำเสนอแบบจำลองที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการพยากรณ์
ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกัดเหล็กกล้าคาร์บอน (S50C) ด้วยมีดตัดหัวบอลชนิด
คาร์ไบด์ 2 ฟันกัดเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตร โดยการประยุกต์ใช้อัตราส่วนพื้นที่ได้
กราฟแรงตัดพลวัต ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้สมการเอ็กซ์โปเนนเชียล 5 ตัวแปรสำหรับการพยากรณ์ค่า
ความขรุขระผิว ประกอบด้วย ความเร็วรอบ 8,000-12,000 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนตัด
0.02-0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ, ความลึกตัด 0.5-0.9 มิลลิเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดขนาด
6 และ 10 มิลลิเมตร และอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัด ซึ่งจากผลการ
ทดลองเมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่พบว่าค่าความถี่ของแรงตัดพลวัตและค่าความถี่ของความ
ขรุขระผิวชิ้นงานมีความสอดคล้องกันโดยความถี่ทั้งสองเกิดขึ้นที่ค่าเดียวกัน จึงสามารถนำค่าแรง
ตัดพลวัตในโดเมนเวลามาคำนวณหาพื้นที่ได้กราฟเพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้
ทั้งนี้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตถูกนำมาใช้ในการพยากรณ์เนื่องจากขนาดแรงตัดอาจเปลี่ยนแปลงไป
ตามเงื่อนไขการตัด ดังนั้นการใช้อัตราส่วนแรงตัดจะทำให้สามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้
ไม่ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณถูกนำมาใช้ในการสร้าง
แบบจำลองที่ใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะกัดที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
โดยการยืนยันผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดใหม่เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง
พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถพยากรณ์ค่าได้อย่างแม่นยำโดยค่าความแม่นยำของการ
พยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยเท่ากับ 92.9% และ ความขรุขระผิวสูงสุดเท่ากับ 91.4%
นอกจากนี้จากการสร้างแบบจำลองแยกสำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด 6 และ 10
มิลลิเมตรและการตัดทดสอบพบว่าผลการพยากรณ์มีค่าใกล้เคียงกับการใช้แบบจำลองรวม แต่
การใช้แบบจำลองรวมมีความเหมาะสมในการนำไปใช้มากกว่าเนื่องจากสามารถนำไปใช้ได้ในทุก
กรณีและไม่ต้องทำการทดลองซ้ำเพื่อหาแบบจำลองใหม่เมื่อขนาดของมีดตัดเปลี่ยนแปลงไป

ภาควิชา...วิศวกรรมอุตสาหการ..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา...วิศวกรรมอุตสาหการ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2556.....

5470984821 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : BALL END MILLING / SURFACE ROUGHNESS / CUTTING FORCE RATIO

PRAE THESNIYOM: IN-PROCESS PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS
USING DYNAMIC CUTTING FORCE IN BALL END MILLING PROCESS.

ADVISOR: ASSOC.PROF.SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, D.Eng, 237 pp.

The objective of this research is to propose the practical model to predict the in-process surface roughness during the ball-end milling process for carbon steel (S50C) by using 2-tooth cutter with Titanium aluminium nitride coatings. The exponential equation is employed to represent the model with five parameters which are the spindle speed at 8,000-12,000 rev/min, the feed rate at 0.02-0.06 mm/rev, the tool diameter 6 and 10 mm, the depth of cut 0.5-0.9 mm, and the dynamic cutting force ratio. The dimensionless ratio of cutting force is proposed to predict the in-process surface roughness regardless of the cutting conditions. Hence, the proposed model can be used to predict the in-process surface roughness even though the cutting conditions are changed.

The experimentally obtained results showed that the frequency of the dynamic cutting force corresponds to the frequency of the surface roughness in the frequency domain. The multiple regression analysis is employed to develop the model with the prediction interval at 95% confident level. The new cutting tests have been conducted to verify the developed in-process surface roughness model and the results have run satisfaction. Finally, it is proved that the model can be used to predict the in-process surface roughness with the highly acceptable prediction accuracy of 92.9% for the average surface roughness and 91.4% for the ten-point average surface roughness. Moreover, the specific models for the tool diameters of 6 and 10 mm are also developed to compare with the proposed model. The experimental results showed that all models can predict surface roughness nearly the same during the in-process with the high accuracy. However, the proposed model with five parameters is more useful because it can be generally used even though the tool diameter is changed.

Department :.....Industrial Engineering..... Student's Signature.....
Field of Study :.....Industrial Engineering..... Advisor's Signature.....
Academic Year :.....2013.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้โอกาส คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้แนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานวิจัยจนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดต่างๆ พร้อมทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณนายชาญณรงค์ รุ่งเรืองและนายจักรพันธ์ เมืองวัฒน์ ที่ได้แนะนำวิธีการใช้อุปกรณ์และจัดทำเครื่องมือช่วยที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงช่วยแก้ไขแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดลองจนทำให้งานวิจัยสำเร็จตามเป้าหมาย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว, เพื่อนๆทุกคนและหัวหน้าทุกคนสำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจซึ่งเป็นส่วนช่วยทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จลงได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	11
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน.....	11
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	12
1.5 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย	12
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	13
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	42
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	42
3.2 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	42
3.3 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.4 วิธีการทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล	47
3.5 การออกแบบการทดลอง.....	50
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	53

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	55
4.1 ผลการทดลอง.....	55
4.2 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่.....	58
4.3 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา.....	62
4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวกับเงื่อนไขการตัด	63
4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัตกับเงื่อนไขการตัด	76
4.6 การสร้างสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวขึ้นงาน.....	93
4.7 การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวขึ้นงาน	97
4.8 การทดสอบความแม่นยำของสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวขึ้นงาน	100
4.9 การสร้างแบบจำลองแยก.....	106
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	127
5.1 สรุปผลการวิจัย	127
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	128
5.3 อุปสรรคในงานวิจัย	129
5.4 ข้อเสนอแนะ	129
รายการอ้างอิง	130
ภาคผนวก.....	133
ภาคผนวก ก โพรแกรมการแปลงค่าสัญญาณจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ และผลการแปลงค่า	134
ภาคผนวก ข กราฟแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ	191
ภาคผนวก ค ภาพขึ้นงานที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ.....	217
ภาคผนวก ง โพรแกรมและตัวอย่างการแปลงสัญญาณแบบเวฟเล็ต	219
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	237

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1.1	งานวิจัยค่าความขรุขระผิวในอดีต	7
ตารางที่ 1.2	เงื่อนไขการกัด	11
ตารางที่ 3.1	ค่าความไม่แน่นอนของเซนเซอร์และเครื่องมือวัด	46
ตารางที่ 3.2	ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	50
ตารางที่ 3.3	เมตริกซ์การออกแบบการทดลอง	51
ตารางที่ 4.1	ผลการทดลอง	56
ตารางที่ 4.2	เงื่อนไขการตัดใหม่ในขอบเขตและค่าที่ได้จากการทดลอง	102
ตารางที่ 4.3	เงื่อนไขการตัดใหม่ในขอบเขตและค่าที่ได้จากการทดลอง	103
ตารางที่ 4.4	เงื่อนไขการตัดใหม่นอกขอบเขตและค่าที่ได้จากการทดลอง	104
ตารางที่ 4.5	เงื่อนไขการตัดใหม่นอกขอบเขตและค่าที่ได้จากการทดลอง	105
ตารางที่ 4.6	เงื่อนไขการตัดใหม่และค่าที่ได้จากการทดลอง	117
ตารางที่ 4.7	เงื่อนไขการตัดใหม่และค่าที่ได้จากการทดลอง	118
ตารางที่ 4.8	การตัดทดสอบในและนอกขอบเขตโดยใช้ขนาดมีดตัด 8 มิลลิเมตร	119
ตารางที่ 4.9	การตัดทดสอบโดยใช้สมการรวมและแยกที่มีดตัด 6 และ 10 มิลลิเมตร	120

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 การพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตเชิงกล	2
รูปที่ 1.2 ตัวอย่างเซนเซอร์ชนิดต่างๆที่ใช้ในกระบวนการผลิต	5
รูปที่ 1.3 กระบวนการกัดแบบหวับอลและการวัดความขรุขระผิว	9
รูปที่ 2.1 กระบวนการตัดต่าง ๆ ที่เป็นพื้นฐานสำคัญ.....	13
รูปที่ 2.2 วิธีการกัด (ก) การกัดแนวราบ (ข) การกัดแนวตั้ง	14
รูปที่ 2.3 (ก) การกัดเต็มหน้า (ข) การกัดนำร่อง (ค) การกัดข้าง (ง) การกัดคร่อม.....	15
รูปที่ 2.4 การกัดแบบแนวตั้ง (ก) การกัดเต็มหน้า (ข) การกัดหน้าบางส่วน (ค) การกัดร่อง (ง) การกัดขอบ (จ) การกัดเจาะ (ฉ) การกัดผิวโค้ง.....	15
รูปที่ 2.5 ทิศทางการกัด (ก) การกัดขึ้น (ข) การกัดลง.....	16
รูปที่ 2.6 ประเภทของเครื่องกัด (ก) เครื่องกัดแนวอน (ข) เครื่องกัดแนวตั้ง.....	17
รูปที่ 2.7 เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์.....	17
รูปที่ 2.8 การตัดในกระบวนการกัด.....	18
รูปที่ 2.9 การกัดเต็มหน้า (Slab milling) จากมุมมองด้านหน้า	19
รูปที่ 2.10 การตัดแนวตั้ง หรือการกัดผิวหน้าจากมุมมองด้านบน (ก) การกัดเต็มหน้า (ข) การกัดบางส่วน.....	20
รูปที่ 2.11 แรงในกระบวนการกัด.....	22
รูปที่ 2.12 แรงตัดสถิตและแรงตัดพลวัตในกระบวนการกัดแบบหวับอล.....	23
รูปที่ 2.13 รายละเอียดของผิวชิ้นงาน.....	24
รูปที่ 2.14 ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra).....	26
รูปที่ 2.15 ค่าความขรุขระผิวสูงสุด (Rz).....	26
รูปที่ 2.16 การแปลงสัญญาณโดเมนความถี่จากโดเมนเวลา	27
รูปที่ 2.17 (ก) หาพื้นที่ได้กราฟด้วยสามเหลี่ยม (ข) แบ่งพื้นที่ได้กราฟเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู.....	28
รูปที่ 2.18 การหาค่าปริพันธ์โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู.....	28
รูปที่ 2.19 ระบบหรือกระบวนการที่ใช้ในการทดลองโดยทั่วไป.....	30
รูปที่ 2.20 ตัวแบบของการทดลองแบบ 2 และ 3 ปัจจัย.....	31
รูปที่ 3.1 ความขรุขระของผิวสำหรับกระบวนการผลิต.....	43
รูปที่ 3.2 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	43

รูปที่ 3.3	มีดตัดแบบหัวบอล.....	44
รูปที่ 3.4	เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน.....	44
รูปที่ 3.5	ไดนาโมมิเตอร์สำหรับวัดแรงตัด.....	45
รูปที่ 3.6	ชาร์จแอมป์ไฟเออร์สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด.....	45
รูปที่ 3.7	ออสซิลโลสโคปสำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัด.....	46
รูปที่ 3.8	เครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน.....	46
รูปที่ 3.9	ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	47
รูปที่ 3.10	การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรง.....	48
รูปที่ 3.11	การเชื่อมต่อสายไดนาโมมิเตอร์กับเครื่องขยายสัญญาณและเครื่องออสซิลโลสโคป	48
รูปที่ 3.12	การเตรียมชิ้นงาน.....	49
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ra และ Rz.....	58
รูปที่ 4.2	ลักษณะข้อมูลค่าความขรุขระผิวในโดเมนเวลา.....	59
รูปที่ 4.3	ลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา.....	59
รูปที่ 4.4	ลักษณะข้อมูลค่าความขรุขระผิวในโดเมนความถี่.....	61
รูปที่ 4.5	ลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่.....	62
รูปที่ 4.6	การหาพื้นที่ด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู.....	63
รูปที่ 4.7	ตัวอย่างการคำนวณพื้นที่แรงตัดที่ ความเร็วตัด 12,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.9 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด 10 มิลลิเมตร.....	63
รูปที่ 4.8	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความขรุขระผิว	64
รูปที่ 4.9	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความขรุขระผิว	65
รูปที่ 4.10	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนและความขรุขระผิว...	66
รูปที่ 4.11	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนและความขรุขระผิว...	67
รูปที่ 4.12	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราป้อนและค่าความขรุขระผิว.....	68
รูปที่ 4.13	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและความขรุขระผิว .	69
รูปที่ 4.14	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและความขรุขระผิว .	70
รูปที่ 4.15	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกตัดและค่าความขรุขระผิว.....	71
รูปที่ 4.16	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดมีดตัดและความขรุขระผิว .	72

รูปที่ 4.17	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดมีดตัดและความขรุขระผิว .	73
รูปที่ 4.18	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดมีดตัดและความขรุขระผิว .	74
รูปที่ 4.19	รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดและค่าความขรุขระผิว	75
รูปที่ 4.20	ปัจจัยหลักของความขรุขระผิวเฉลี่ย.....	76
รูปที่ 4.21	ปัจจัยหลักของความขรุขระผิวสูงสุด.....	76
รูปที่ 4.22	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ และอัตราส่วนแรงตัด	77
รูปที่ 4.23	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ และอัตราส่วนแรงตัด	78
รูปที่ 4.24	แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความลึกตัด 0.9 มิลลิเมตร และอัตราป้อน 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ.....	79
รูปที่ 4.25	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนและอัตราส่วนแรงตัด .	80
รูปที่ 4.26	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนและอัตราส่วนแรงตัด .	81
รูปที่ 4.27	แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความลึกตัด 0.9 มิลลิเมตร และความเร็วรอบ 8000 รอบต่อนาที.....	82
รูปที่ 4.28	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและอัตราส่วนแรงตัด	83
รูปที่ 4.29	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและอัตราส่วนแรงตัด	84
รูปที่ 4.30	แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และความเร็วรอบ 8000 รอบต่อนาที.....	85
รูปที่ 4.31	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด และอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัด.....	86
รูปที่ 4.32	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด และอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัด.....	87
รูปที่ 4.33	ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด และอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัด.....	88

รูปที่ 4.34	แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัด ที่ความลึกตัด 0.9 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และความเร็วรอบ 8000 รอบต่อนาที.....	89
รูปที่ 4.35	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร.....	90
รูปที่ 4.36	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร.....	90
รูปที่ 4.37	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับค่าความขรุขระผิวสูงสุด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร.....	91
รูปที่ 4.38	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับค่าความขรุขระผิวสูงสุด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร.....	91
รูปที่ 4.39	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย.....	92
รูปที่ 4.40	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับค่าความขรุขระผิวสูงสุด.....	92
รูปที่ 4.41	การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย.....	94
รูปที่ 4.42	การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุด.....	95
รูปที่ 4.43	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย.....	95
รูปที่ 4.44	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุด.....	96
รูปที่ 4.45	กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ย.....	96
รูปที่ 4.46	กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวสูงสุด.....	97
รูปที่ 4.47	ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณด้วยค่าแปลงลอการิทึม ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย.....	98
รูปที่ 4.48	ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณด้วยค่าแปลงลอการิทึม ค่าความขรุขระผิวสูงสุด.....	99
รูปที่ 4.49	ขั้นตอนการทดสอบความแม่นยำของสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน...	101
รูปที่ 4.50	กราฟแสดงค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองด้วยเงื่อนไขใหม่ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ในขอบเขต.....	102
รูปที่ 4.51	กราฟแสดงค่าความขรุขระผิวสูงสุดที่ได้จากการทดลองด้วยเงื่อนไขใหม่ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ในขอบเขต.....	103

รูปที่ 4.52	กราฟแสดงค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองด้วยเงื่อนไขใหม่ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์นอกขอบเขต.....	104
รูปที่ 4.53	กราฟแสดงค่าความขรุขระผิวสูงสุดที่ได้จากการทดลองด้วยเงื่อนไขใหม่ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์นอกขอบเขต.....	105
รูปที่ 4.54	การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ขนาด 6 มิลลิเมตร.....	108
รูปที่ 4.55	การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุดที่ขนาด 6 มิลลิเมตร....	108
รูปที่ 4.56	การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ขนาด 10 มิลลิเมตร...	108
รูปที่ 4.57	การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุดที่ขนาด 10 มิลลิเมตร...	109
รูปที่ 4.58	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ขนาด 6 มิลลิเมตร....	109
รูปที่ 4.59	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุดที่ขนาด 6 มิลลิเมตร...	110
รูปที่ 4.60	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ขนาด 10 มิลลิเมตร...	110
รูปที่ 4.61	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุดที่ขนาด 10 มิลลิเมตร...	110
รูปที่ 4.62	กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ย ที่ขนาด 6 มิลลิเมตร.....	111
รูปที่ 4.63	กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวสูงสุด ที่ขนาด 6 มิลลิเมตร.....	111
รูปที่ 4.64	กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ย ที่ขนาด 10 มิลลิเมตร.....	112
รูปที่ 4.65	กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวสูงสุด ที่ขนาด 10 มิลลิเมตร.....	112
รูปที่ 4.66	ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณด้วยค่าแปลงลอการิทึมของค่าความขรุขระผิว เฉลี่ยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร.....	113
รูปที่ 4.67	ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณด้วยค่าแปลงลอการิทึมของค่าความขรุขระผิว สูงสุดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร.....	113
รูปที่ 4.68	ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณด้วยค่าแปลงลอการิทึมของค่าความขรุขระผิว เฉลี่ยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร.....	114
รูปที่ 4.69	ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณด้วยค่าแปลงลอการิทึมของค่าความขรุขระผิว สูงสุดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร.....	115

รูปที่ 4.70	กราฟแสดงค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองด้วยเงื่อนไขใหม่เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ในสมการรวมและแยก.....	117
รูปที่ 4.71	กราฟแสดงค่าความขรุขระผิวสูงสุดที่ได้จากการทดลองด้วยเงื่อนไขใหม่เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ในสมการรวมและแยก.....	118
รูปที่ 4.72	ลักษณะของเวฟเล็ตที่แฟมิลีต่างๆ.....	121
รูปที่ 4.73	ลักษณะของเวฟเล็ตแบบดอเบชีส์ที่ความละเอียดของรูปคลื่นต่างๆ.....	121
รูปที่ 4.74	ลักษณะของเวฟเล็ตที่ค่า a และ b ต่างๆกัน.....	123
รูปที่ 4.75	แสดงค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลองในโดเมนเวลา.....	124
รูปที่ 4.76	แสดงค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลองในโดเมนความถี่.....	124
รูปที่ 4.77	แสดงค่าแรงตัดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบเวฟเล็ตในโดเมนเวลา.....	125
รูปที่ 4.78	แสดงค่าแรงตัดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบเวฟเล็ตในโดเมนเวลา.....	126

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

1.1.1 ภาพรวมของอุตสาหกรรมการผลิต

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตได้มีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากสภาวะแวดล้อมของธุรกิจที่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ ในปี 2558 ประเทศไทยกำลังจะก้าวเข้าสู่การเป็นสมาชิกประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (ASEAN Economic Community : AEC) โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะความเชื่อมโยงเศรษฐกิจระหว่างภูมิภาค ให้มีความเข้มแข็งขึ้นและเพิ่มอำนาจต่อรองในเวทีเศรษฐกิจโลก ทำให้กฎระเบียบด้านการลงทุนในประเทศสมาชิกผ่อนคลายลง

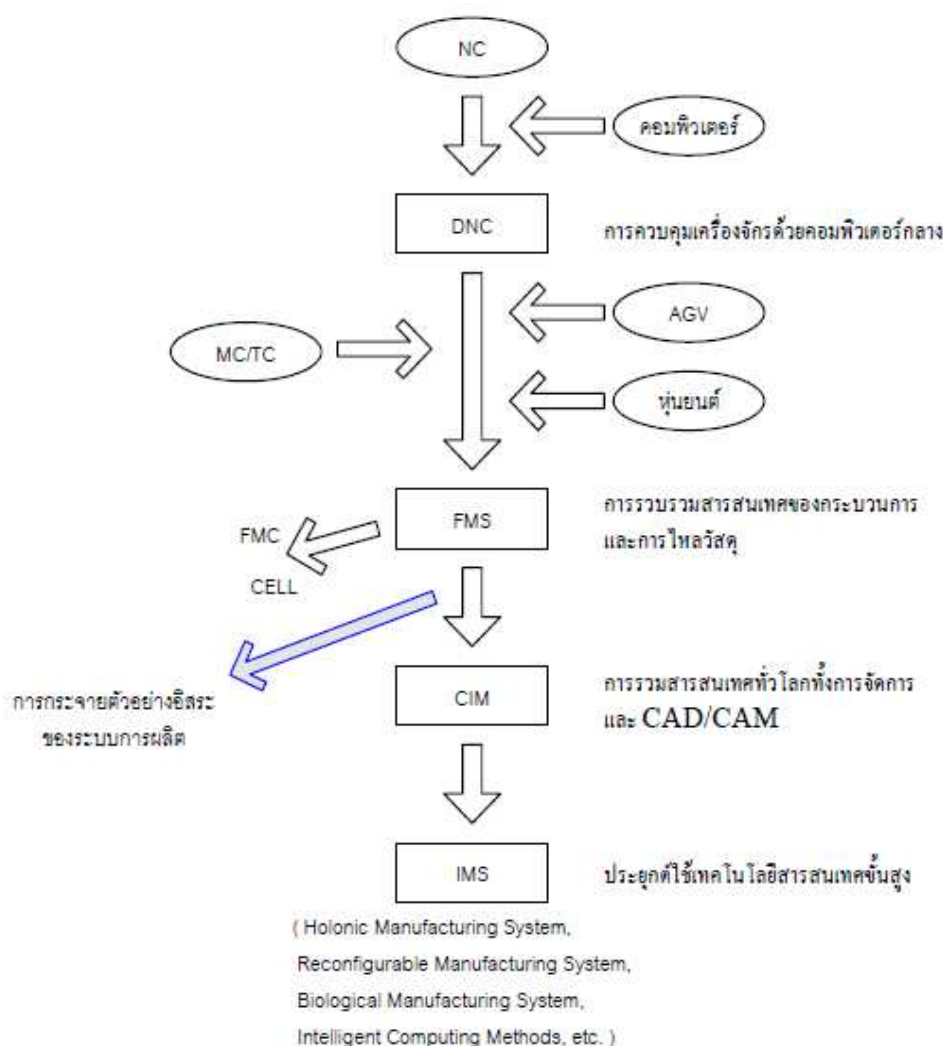
การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลกระทบต่อทั้งทางด้านบวกและด้านลบแก่ประเทศไทย กล่าวคือ สินค้าในอุตสาหกรรมการผลิตของประเทศไทยมีโอกาสขยายตลาดออกไปนอกประเทศมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันกำแพงภาษีที่ลดลงหรือถูกยกเลิกก็ทำให้สินค้าจากต่างประเทศเข้ามามีบทบาทในประเทศไทยมากขึ้นซึ่งทำให้อัตราการแข่งขันทางด้านอุตสาหกรรมการผลิตเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเกิดข้อเปรียบเทียบด้านคุณภาพและราคาสำหรับผู้บริโภค ทำให้ผู้ประกอบการต้องพยายามปรับปรุงกระบวนการผลิตสินค้าให้มีประสิทธิภาพและต้นทุนการผลิตที่สามารถรองรับการแข่งขันที่จะทวีความรุนแรงขึ้น

ผู้ประกอบการหลายแห่งจึงมีมาตรการในการปรับโครงสร้างการผลิตสินค้าของตนเองให้มีประสิทธิภาพขึ้น เช่น การนำเครื่องจักรกลเข้ามาใช้แทนแรงงานคน การลดต้นทุนการผลิตด้านวัตถุดิบลง และการหาเทคนิคใหม่ๆ เพื่อเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต เป็นต้น โดยอุตสาหกรรมหลักของไทยที่มีส่วนสำคัญต่อประเทศมีหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ และ อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ซึ่งใช้วัตถุดิบสำคัญที่ใช้เป็นปัจจัยในการผลิตคือ เหล็กกล้าคาร์บอน

เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุประเภทโลหะที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นฐานสำหรับอุตสาหกรรมการผลิต แต่เนื่องจากอุปสงค์ทางการใช้เหล็กที่ปรับตัวสูงขึ้นในปี 2555 ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวของอุตสาหกรรมภายในประเทศ ทำให้ราคาเหล็กในประเทศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ดังนั้นต้นทุนด้านวัตถุดิบประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนจึงมีความสำคัญและควรได้รับการควบคุม เพื่อให้เกิดของเสียในระบบการผลิตน้อยที่สุด

1.1.2 การพัฒนาด้านเทคโนโลยีการผลิต [1]



รูปที่ 2.1 การพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตเชิงกล [1]

การพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตเชิงกลในอดีตเริ่มต้นมาจากระบบอัตโนมัติโดยการใช้เครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลข (Numerical Control) โดยต่อมาได้รับการพัฒนาเป็นระบบการควบคุมเชิงตัวเลขทางตรง (Direct NC, DNC) ซึ่งถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์กลาง หลังจากการนั้นเทคโนโลยีการผลิตจึงเข้าสู่ยุคการใช้ระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น (Flexible Manufacturing System, FMS) ซึ่งเป็นการควบคุมบูรณาการของสารสนเทศและการไหลของวัสดุในระบบการผลิต โดยภายในระบบชิ้นงานและเครื่องมือต่างๆจะถูกขนส่งระหว่างคลังสินค้ากับเครื่องจักรโดย

อัตโนมัติผ่านรถเอจีวี (Automated Guide Vehicles, AGVs) และทำการขนถ่ายโดยหุ่นยนต์อื่นๆ ในอดีตเชื่อว่าระบบดังกล่าวรองรับความต้องการของอุตสาหกรรมได้อย่างครบถ้วน เช่น การใช้เครื่องซีเอ็นซีที่มีความซับซ้อนในกระบวนการผลิต แต่ระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นมีข้อเสียคือต้องใช้การลงทุนสูงและไม่สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างได้ตามลักษณะของอุตสาหกรรมแต่ละประเภท จึงทำให้เกิดระบบการผลิตแบบเซลล์ (Flexible Manufacturing Cell, FMC) ซึ่งมีขนาดเล็กและประกอบด้วยฟังก์ชันที่จำเป็นต่อระบบการผลิต รวมถึงมีต้นทุนที่ต่ำกว่าการผลิตแบบเดิมและยังสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการของลูกค้าในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท

ในยุคต่อมาคอมพิวเตอร์บูรณาการการผลิต (Computer Integrated Manufacturing, CIM) เป็นอีกระบบหนึ่งซึ่งนำเอาความสามารถในการประมวลผลสารสนเทศของอุตสาหกรรมการผลิตเข้ามาควบคุมกิจกรรมการผลิต ได้แก่ การตลาด การจัดการ การควบคุมกระบวนการผลิต และการบริการ แต่อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตได้อย่างแท้จริง ระบบการผลิตที่แจกจ่ายงานได้ด้วยตัวเอง (Autonomous distributed manufacturing systems) จึงกลายเป็นระบบซึ่งเข้ามามีบทบาทและสามารถตอบสนองของความต้องการของการผลิตในอนาคตได้มากขึ้น

เนื่องจากการพัฒนาทางอุตสาหกรรมที่เปลี่ยนไปตลอดเวลาทำให้ระบบการผลิตในอนาคตควรมีการตอบสนองที่รวดเร็วและอัจฉริยะ เพื่อให้ชิ้นงานที่ได้ที่มีคุณภาพสูง และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ระบบการผลิตที่สามารถสนองตอบต่อคุณลักษณะต่างๆ ดังกล่าวคือ ระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing Systems: IMS) ซึ่งสามารถควบคุมและตรวจสอบตัวเองได้ เพื่อที่จะสร้างผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบซึ่งผลิตภัณฑ์จะถูกผลิตได้ในสภาวะแวดล้อมจำลองและสามารถผลิตสินค้าเพื่อตอบสนองความต้องการที่มีความหลากหลายอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุปสงค์จากลูกค้า

1.1.3 เทคโนโลยีเครื่องจักรกลอัจฉริยะและเซนเซอร์วัดแรง

เพื่อตอบสนองต่อระบบการผลิตอัจฉริยะ ระบบการผลิตในอนาคตจึงควรถูกพัฒนาให้มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นเช่นกัน เครื่องจักรกลอัจฉริยะจึงได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้น โดยเครื่องจักรกลที่มีความอัจฉริยะอยู่ภายในจะสามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง และสามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่นๆ เพื่ออำนวยความสะดวกในการผลิตได้

เครื่องจักรกลอัจฉริยะที่ควบคุมโดยตัวเลขมีความสามารถมากกว่าเครื่องจักรกลแบบธรรมดาในด้านการตัดสินใจแทนผู้ปฏิบัติงานและเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดให้เหมาะสมกับได้

โดยอัตโนมัติ นอกจากนี้ยังทำให้อัตราผลิตภาพเพิ่มขึ้นอย่างมากโดยการลดเวลาที่ไม่ได้ผลิต (Non-productive time) ในวัฏจักรการผลิตลง เครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่ซับซ้อนได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในทางปฏิบัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต เช่น เครื่องกัด 5 แกนที่มีการติดตั้งชุดเปลี่ยนเครื่องมืออัตโนมัติและเครื่องเปลี่ยนพาลเลตอัตโนมัติ เป็นต้น ความก้าวหน้าที่สำคัญของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีคือ การควบคุมที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ในกระบวนการตัด (Adaptive control, AC) ซึ่งจะถูกควบคุมด้วยระบบซีเอ็นซี เช่น การนำเซ็นเซอร์หลายรูปแบบมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องจักรกลซีเอ็นซีเพื่อตรวจจับสถานะของการตัดซึ่งใช้ในการปรับกลับและปรับการทำงานเพื่อให้ได้เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่สุด

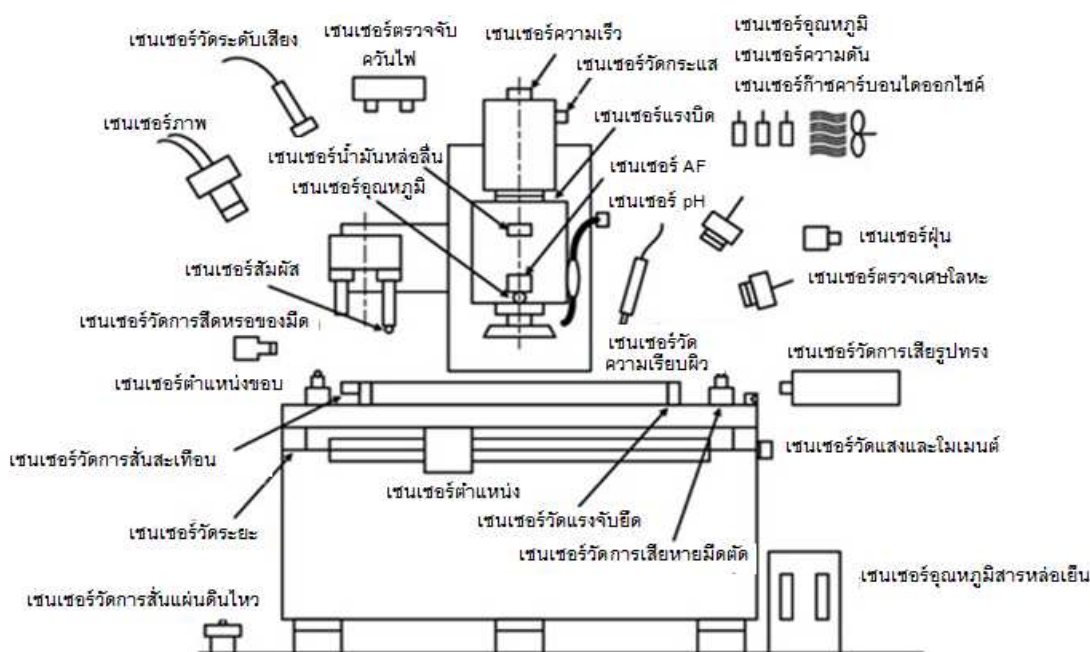
ระบบควบคุมที่เพิ่มเติมเข้าไปในเครื่องจักรกลอัจฉริยะโดยส่วนมากแล้วจะประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์หรือตัวตรวจวัดต่างๆมากมายติดตั้งอยู่เพื่อทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เซ็นเซอร์กลายเป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการผลิตเนื่องจากมีความสามารถตรวจติดตามในกระบวนการผลิตได้ และยังสามารถนำมาใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต เช่น การตัดความเร็วสูง, การกลึงงานแข็ง นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงอัตราผลิตภาพ, เพิ่มคุณภาพ, เพิ่มความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์, ลดรอบเวลาการผลิต และลดค่าแรงงาน โดยเซ็นเซอร์จะทำหน้าที่รับสัญญาณและเปลี่ยนสัญญาณออกในรูปแบบอื่นสำหรับการใช้งานต่อไป เซ็นเซอร์มีบทบาทที่แตกต่างกันในกระบวนการผลิตมีดังนี้

- ระบบการผลิตปริมาณมาก (Large-scale Manufacturing System) เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ ปฏิบัติงานภายใต้ความน่าเชื่อถือและความพร้อม (Availability) ที่สูง ดังนั้นกระบวนการผลิตควรมีช่วยเหลือจากระบบการตรวจติดตามจากเซ็นเซอร์เนื่องจากการตรวจติดตามระบบที่มีการผลิตปริมาณมากนั้นอยู่นอกเหนือจากความสามารถของผู้ปฏิบัติงานที่จะทำได้
- การเพิ่มขึ้นของค่าแรงงานและการขาดแคลนพนักงานที่มีทักษะ ซึ่งต้องการนำเอากระบวนการตรวจติดตามและเซ็นเซอร์เข้ามาใช้แทนแรงงานมนุษย์
- การผลิตชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและต้องการความแม่นยำสูง (Ultra-Precision Manufacturing) เช่น ชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์, ชิ้นส่วนยานยนต์, ชิ้นงานที่ต้องการความเรียบผิว ซึ่งต้องการใช้เทคโนโลยีการตรวจติดตามในกระบวนการผลิตขั้นสูงโดยการใช้ระบบเซ็นเซอร์ที่มีความน่าเชื่อถือ
- การใช้เครื่องจักรที่มีความซับซ้อน ซึ่งต้องการการบูรณาการของระบบการตรวจติดตามเพื่อที่จะป้องกันความเสียหายของเครื่องจักร

- เครื่องจักรกลที่ใช้งานหนัก (Heavy-Duty Machine) และความเร็วสูงที่ใช้เซนเซอร์แทนแรงงานมนุษย์เนื่องจากเหตุผลด้านความปลอดภัย
- ความตระหนักทางด้านสิ่งแวดล้อม ในการผลิตปัจจุบันทำให้ต้องการเซนเซอร์ที่จะตรวจติดตามการปล่อยของเสียจากกระบวนการผลิต ทั้งในอากาศและน้ำ

ชนิดของเซนเซอร์ที่ใช้สำหรับการตรวจติดตามกระบวนการผลิตและกระบวนการการตัดมีมากมาย เซนเซอร์ที่นิยมใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมการตัด คือ เซนเซอร์วัดแรง เซนเซอร์วัดกำลัง และเซนเซอร์อะคูสติคิมิสชั่น ทั้งนี้การออกแบบเซนเซอร์ขั้นสูงร่วมกับเทคโนโลยีการผลิตทำให้เกิดการปรับปรุงสารสนเทศเกี่ยวกับสถานะของระบบเพื่อที่จะทำให้เกิดกระบวนการที่เหมาะสมและควบคุมได้ ดังนั้นการเลือกใช้เซนเซอร์แต่ละชนิดนั้นจึงต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในการติดตั้งในกระบวนการผลิต นอกจากนี้การศึกษาค้นคว้าเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยการใช้เซนเซอร์ติดตั้งเพื่อทำงานกับเครื่องจักรในระหว่างกระบวนการผลิตทำให้ทราบได้ว่าเกิดข้อผิดพลาดประการใดขึ้นในกระบวนการผลิตแบบทันทีทั้งที่เนื่องจากสามารถส่งผ่านข้อมูลในขณะตัดได้ทันที

ในการตรวจติดตามกระบวนการผลิตด้วยการใช้เซนเซอร์ตรวจวัดสัญญาณ เช่น แรงตัด, อุณหภูมิ เป็นการตรวจติดตามโดยทางอ้อม (Indirect monitoring process) โดยการนำสัญญาณที่ตรวจจับได้ในกระบวนการผลิตมาแปลงค่าเพื่อให้ทราบสถานะของกระบวนการผลิตโดยไม่จำเป็นต้องหยุดกระบวนการผลิตเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างเซนเซอร์ชนิดต่างๆที่ใช้ในกระบวนการผลิต [1]

1.1.4 ภาพรวมของกระบวนการกีดในปัจจุบันและการวัดค่าความขรุขระผิว

เครื่องกัดซีเอ็นซีเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการผลิตซึ่งสามารถผลิตชิ้นงานซึ่งมีลักษณะซับซ้อนและสามารถเพิ่มอัตราการผลิตได้รวมถึงช่วยลดต้นทุนจากการจ้างแรงงานได้โดยส่วนใหญ่ เครื่องกัดซีเอ็นซีมักถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตที่ต้องการความละเอียดแม่นยำซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่มีความเกี่ยวข้องกับคุณภาพผิวของชิ้นงานอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในชิ้นส่วนแม่พิมพ์ซึ่งเป็นชิ้นส่วนพื้นฐานที่ต้องการขนาดและความขรุขระผิวตามที่มาตรฐานกำหนดเพื่อนำไปผลิตชิ้นงานต่อไป ดังนั้นการเลือกใช้งานเครื่องจักรกลซีเอ็นซีให้เกิดประสิทธิภาพสูงจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพผิวของชิ้นงานด้วย

ในอดีตการวัดค่าความขรุขระผิวทำได้โดยการวัดค่าความขรุขระผิวหลังกระบวนการตัด โดยไม่สามารถตรวจติดตามแนวโน้มของคุณภาพของชิ้นงานได้ในระหว่างกระบวนการได้ดังแสดงในตาราง 1.1 เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นผู้ปฏิบัติงานจะไม่สามารถทราบได้จนกว่าจะหยุดเครื่องจักรเพื่อทำการตรวจสอบ ทำให้ไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างทัน่วงทีและเกิดปริมาณของเสียมากเป็นผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นรวมถึงอาจเป็นผลให้อัตราผลิตช้าลง

นอกจากนั้นกระบวนการผลิตในยุคใหม่ต้องเผชิญกับการแข่งขันด้านต้นทุนการผลิตและคุณภาพของชิ้นงาน แต่ละองค์กรจะต้องหาวิธีในการลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องรวมถึงการตระหนักถึงผลกระทบของของเสียที่ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการลดปริมาณการใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการกัดเพื่อลดต้นทุนการผลิตและลดมลพิษที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยในปี 2010 ได้มีการศึกษากระบวนการกัดเหล็กกล้าคาร์บอนแบบหัวบอลเพื่อหาต้นทุนการผลิตที่ต่ำสุด [2] โดยเปรียบเทียบระหว่างใช้สารหล่อเย็น 3 แบบคือ แบบแห้ง, แบบเปียก และแบบละออง ภายใต้ช่วงของค่าความขรุขระผิวที่กำหนด ต่อมาในปี 2011 ได้มีการศึกษากระบวนการกัดอะลูมิเนียมแบบหัวบอลเพื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตระหว่างการใช้ลมเป่าและแบบเปียก [3] และการสร้างสมการเพื่อหาค่าความขรุขระผิวน้อยสุดในการกัดอะลูมิเนียมโดยใช้ลมเป่าในปี 2012 [4] จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการผลิตในอนาคตจะไปในแนวทางการผลิตแบบแห้งมากขึ้นเพื่อลดต้นทุนการผลิตและลดปริมาณมลภาวะที่ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 1.1 งานวิจัยค่าความขรุขระผิวในอดีต

งานวิจัย	เงื่อนไขการตัด	รายละเอียด	ข้อจำกัด
[5]	ความเร็วตัด อัตราป้อน ความลึกในการตัด ค่าตัวแปรการสั่นสะเทือน	การวัดค่าความขรุขระผิวเพื่อหาความสัมพันธ์กับเงื่อนไขการกัดบนเครื่องกัดซีเอ็นซี โดยใช้ Neural fuzzy system ในการวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างแบบจำลอง	แบบจำลองที่ได้ไม่สามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้ในขณะตัดจริงและต้องมีการสอนระบบใหม่ทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัด
[6]	ความเร็วตัด อัตราป้อน ความลึกในการตัด	การสร้างระบบควบคุมแบบปรับตัวจากเงื่อนไขการตัด ซึ่งใช้ในการปรับค่าเพื่อควบคุมความขรุขระผิวของชิ้นงานในขณะกัดบนเครื่องกัดซีเอ็นซี	แบบจำลองที่ได้ไม่สามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้ในขณะตัดจริงและไม่สามารถพยากรณ์ค่าได้เมื่อเงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไป
[7]	อัตราป้อน ความเร็วรอบ อัตราส่วนความกว้างกัดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด การสึกหรอของมีดตัด การใช้สารหล่อเย็น แรงตัด	การศึกษาค่าความขรุขระผิวในการกัดแบบห้วงบอลโดยการประยุกต์ใช้ Artificial neural network (AANs) เพื่อหาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิว	แบบจำลองที่ได้ไม่สามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้ในขณะตัดจริงและเมื่อเงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไปต้องมีการสร้างฐานข้อมูลให้กับระบบใหม่
[8]	ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกตัด	การวัดค่าความขรุขระผิวในกระบวนการกัดแบบห้วงบอลโดยใช้ Genetic expression programming (GEP) ในการสร้างแบบจำลองและศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิว	แบบจำลองที่ได้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่ความเร็วรอบสูงและไม่สามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้ในขณะตัดจริง

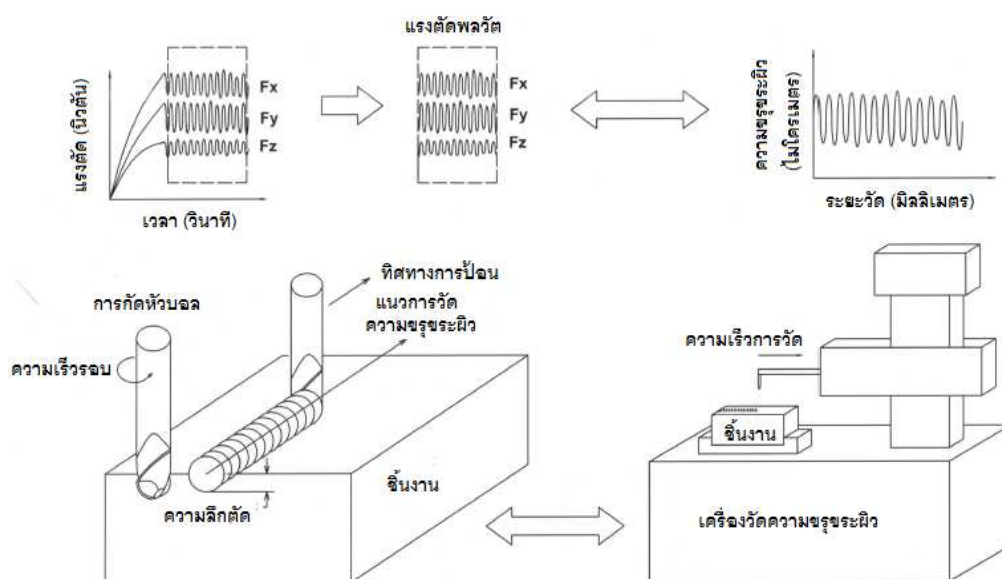
1.1.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน

ความขรุขระผิวของชิ้นงานเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานในกระบวนการกัด จากงานวิจัยในอดีตพบว่าแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดและเงื่อนไขการตัดต่างๆ ได้แก่ ความเร็วรอบ, ความลึกตัด, อัตราการป้อน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด จะส่งผลโดยตรงต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน ดังนั้นปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จึงควรนำมาใช้ในศึกษาเพื่อควบคุมคุณภาพผิวของชิ้นงานต่อไป

1.1.6 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวและแรงตัด

นักวิจัยในปัจจุบันได้พยายามศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตอัจฉริยะซึ่งมีความสามารถในการตรวจติดตามกระบวนการผลิตเพื่อสามารถระบุปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยผู้ปฏิบัติงานสามารถหยุดการผลิตได้อย่างทันท่วงที ทำให้ได้ขนาดของชิ้นงานที่ถูกต้อง มีคุณภาพผิวชิ้นงานที่ดีและลดจำนวนของเสียลง การพัฒนาความสามารถของระบบการผลิตแบบอัจฉริยะมาอย่างต่อเนื่องทำให้ในปัจจุบันสามารถทำการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์หรือเซนเซอร์ตรวจวัดแรงเข้าที่บริเวณด้ามมีดตัดหรืออุปกรณ์จับชิ้นงานเพื่อตรวจจับสัญญาณที่เกิดขึ้นในขณะตัดชิ้นงานและสามารถนำสัญญาณที่เกิดขึ้นไปใช้ในการวิเคราะห์ได้ เช่น การวิเคราะห์แรงตัดหรืออุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดชิ้นงาน เป็นต้น

จากการพัฒนาความสามารถของระบบการผลิตแบบอัจฉริยะทำให้เกิดแนวความคิดในการใช้เซนเซอร์ตรวจวัดแรงหรือไดนาโมมิเตอร์ตรวจวัดแรงตัดที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการตัดและการศึกษาเพื่อแสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของสัญญาณค่าแรงตัดที่เกิดขึ้นมีลักษณะสอดคล้องกับสัญญาณค่าความขรุขระผิวที่วัดได้ จากนั้นจึงนำค่าแรงตัดที่ได้มาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจริงในระหว่างกระบวนการผลิตต่อไป ลักษณะของแนวความคิดดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 1.3 ซึ่งเป็นกรอบแนวความคิดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 1.3 กระบวนการกัดแบบหัวบอลและการวัดความขรุขระผิว

ในปี 2011 ได้มีงานวิจัยกระบวนการตัดเหล็กกล้าคาร์บอนบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ตรวจวัดแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัดและนำมาสร้างสมการเพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานในขณะที่ตัดจริงสัมพันธ์กับอัตราส่วนแรงตัดสถิต [9] จากงานวิจัยพบว่าแรงตัดมีผลต่อค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นโดยขนาดแรงตัดอาจเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขการตัด ดังนั้นการใช้อัตราส่วนแรงตัดจะทำให้สามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้ทุกกรณีไม่ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป

ต่อมาในปี 2013 ได้มีการพัฒนาสมการที่ใช้พยากรณ์ค่าความขรุขระผิวบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยการใช้อัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัตในขณะที่ตัด [10] พบว่าการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่ตัดโดยใช้อัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัต [10] จะให้ค่าความแม่นยำสูงกว่าการใช้อัตราส่วนแรงตัดสถิต [9] เนื่องจากเมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่พบว่าค่าความถี่ของแรงตัดพลวัตและค่าความขรุขระผิวมีความสอดคล้องใกล้เคียงกัน เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ในโดเมนเวลาโดยการคำนวณพื้นที่แรงตัดพลวัตโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู จึงได้แบบจำลองค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะที่ตัดที่มีความแม่นยำสูงขึ้น

นอกจากนี้ในปี 2011 ยังมีงานวิจัยที่ใช้อัตราส่วนของแรงตัดสถิตที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบบหัวบอลมาสร้างสมการแบบจำลองเพื่อหาค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่ตัด ทำให้สามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้ในขณะตัดจริง สัมพันธ์กับเงื่อนไขการตัดได้แก่ ความเร็วตัด,

อัตราป้อนตัด, เส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด, ความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัดสถิต [11] แต่จากงานวิจัยการวัดความขรุขระผิวบนเครื่องกลึงพบว่าหากมีการพัฒนาโดยการใช้อัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัตในการพยากรณ์อาจจะได้ค่าความแม่นยำสูงกว่าการใช้อัตราส่วนของแรงตัดสถิต [9],[10]

จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงเป็นการวิจัยเพื่อพัฒนาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นในขณะตัดจริงโดยใช้อัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัตและเงื่อนไขการตัดสำหรับการกัดเหล็กกล้าด้วยมีดตัดหัวบอลบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ โดยการตรวจวัดแรงที่เกิดขึ้นจากการตัดด้วยไดนาโมมิเตอร์ ซึ่งเป็นการพัฒนาแบบจำลองที่มีอยู่ในปัจจุบันเพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีค่าความแม่นยำที่สูงขึ้น งานวิจัยทำโดยการนำแรงตัดพลวัตที่ได้จากกระบวนการกัดมาวิเคราะห์เทียบกับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากเครื่องวัดความขรุขระผิวโดยแนวโน้มของสัญญาณแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวเมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่ควรมีความสัมพันธ์สอดคล้องกัน จากนั้นจึงนำสัญญาณแรงตัดพลวัตที่ได้ในโดเมนเวลามาคำนวณหาค่าพื้นที่ใต้กราฟโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูและนำไปสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกัดหัวบอลและอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. กระบวนการกัดแบบแห้ง (Dry Cutting) บนเครื่องซีเอ็นซีแมชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น Variaxis 500-5X
2. เงื่อนไขการตัดแสดงดังตาราง

ตารางที่ 1.2 เงื่อนไขการกัด

ความเร็วรอบการตัด(รอบต่อนาที)	8000	10000	12000
อัตราการป้อนตัด(มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.02	0.04	0.06
ความลึกตัด(มิลลิเมตร)	0.5	0.7	0.9
เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัด(มิลลิเมตร)	6	10	

3. วัสดุชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (S50C) ขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร และสูง 45 มิลลิเมตร
4. มีดตัดที่ใช้เป็นมีดตัดแบบหัวบอล (Ball End Milling) ชนิดคมมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตร
5. กำหนดค่าเครื่องออสซิลโลสโคป โดยตั้งค่าต่างๆ ดังนี้
 - Low-pass filter = 5,000 Hz.
 - Sampling rate = 10,000 Sampling/second
6. สมการต้นแบบค่าความขรุขระผิวจะประกอบด้วยความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด และอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่ตัด
7. การคำนวณค่าความแม่นยำของแบบจำลองจะใช้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเป็นตัวแปรในการชี้วัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำสมการต้นแบบที่พัฒนาขึ้นไปประมาณค่าความขรุขระผิวในกระบวนการกัดได้เพื่อให้สามารถตรวจติดตามค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจริงได้ในขณะกัดที่เงื่อนไขการตัดใดๆ และสามารถหยุดเครื่องจักรเพื่อตรวจสอบหรือปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดได้อย่างทัน่วงทีเมื่อพบว่าค่าความขรุขระผิวสูงเกินค่าที่ต้องการ
2. สามารถนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการตรวจติดตามความขรุขระผิวในกระบวนการกัดสำหรับเครื่องจักรกลอัจฉริยะต่อไปในอนาคต

1.5 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกัด รวมถึงศึกษาขั้นตอนการใช้เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์และทดลองใช้เครื่อง
2. ออกแบบการทดลองและกำหนดเงื่อนไขในการตัดที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน
3. ทำการทดลองบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลของแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดในแต่ละเงื่อนไขการตัด
4. นำชิ้นงานที่ได้จากการกัดมาวัดเพื่อเก็บข้อมูลค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นที่เวลาเดียวกับแรงตัดพลวัต
5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)
6. สร้างสมการแบบจำลองและสรุปผลที่ได้จากงานวิจัย
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 กระบวนการตัด (Machining Process)

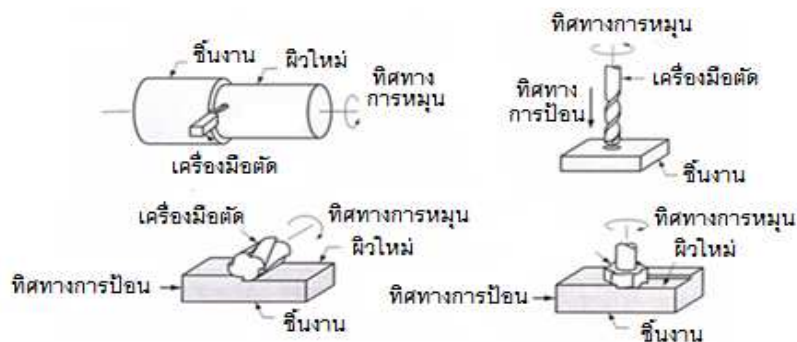
กระบวนการตัด หมายถึง กระบวนการใช้เครื่องมือกัดหรือมีดตัดในการขจัดเนื้อวัสดุที่ไม่ต้องการออกจากชิ้นงานในรูปของเศษโลหะ เพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานตามที่ต้องการ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปโดยการเฉือนทำให้เกิดเศษโลหะ เมื่อเศษโลหะถูกตัดออกจากชิ้นงาน จะเกิดผิวชิ้นงานใหม่

กระบวนการตัดมีความสำคัญในเชิงพาณิชย์และเชิงเทคโนโลยีดังนี้

- สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางกับวัสดุหลายประเภท เช่น โลหะแข็ง พลาสติก
- สามารถใช้ในการทำชิ้นงานที่มีรูปร่างหลากหลาย รวมถึงชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน
- สามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดพิถีพิถันความเผื่อน้อยกว่ากระบวนการผลิตส่วนใหญ่

กระบวนการตัดนิยมใช้กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิตแบบอื่นมาแล้ว เช่น งานหล่อ, งานตีขึ้นรูป ซึ่งเป็นกระบวนการในการผลิตชิ้นงานสำเร็จให้มีขนาดรูปร่างที่ถูกต้องและมีผิวงานตามที่ต้องการ

กระบวนการตัดโดยทั่วไปเป็นการใช้เครื่องมือตัดหรือมีดตัดในการกำจัดเนื้อโลหะออกจากชิ้นงานโดยอาศัยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงาน ซึ่งการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ประกอบด้วยความเร็ว (Speed) และการป้อน (Feed) โดยรูปร่างของเครื่องมือตัดและลักษณะการตัดผิวชิ้นงานประกอบกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ทำให้ได้ชิ้นงานตามรูปร่างและความขรุขระผิวงานตามที่ต้องการ

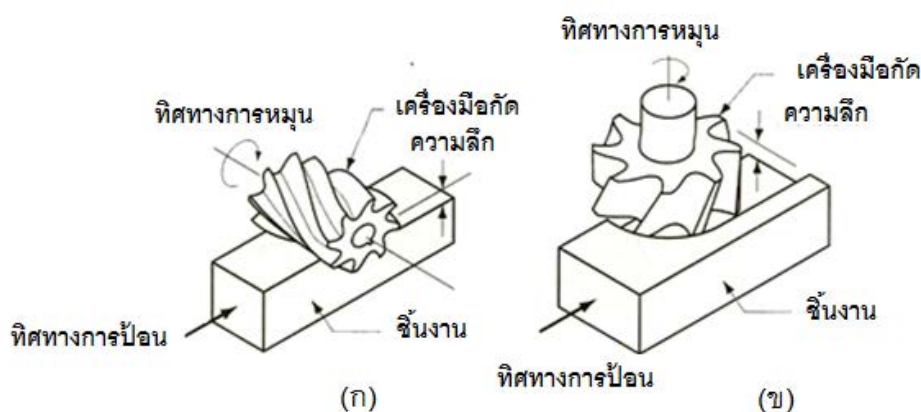


รูปที่ 2.1 กระบวนการตัดต่าง ๆ ที่เป็นพื้นฐานสำคัญ [12]

2.1.2 กระบวนการกัด (Milling process) [12]

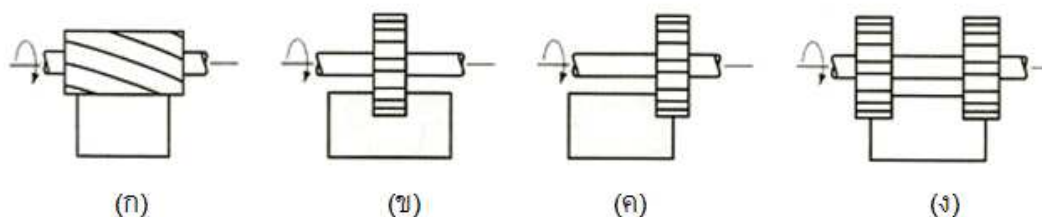
การกัดเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งใช้เครื่องมือตัดที่มีหลายคมตัด (Multiple cutting edges) หมุนและเคลื่อนที่สัมพันธ์กับการป้อนชิ้นงานทำให้เกิดระนาบของผิวงานใหม่ โดยทิศทางการป้อน (Feed direction) ของชิ้นงานจะตั้งฉากกับแกนการหมุนของเครื่องมือตัด

การกัดขึ้นรูปมีหลายประเภท แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมี 2 วิธี ได้แก่ การกัดแนวราบ (Peripheral milling) และ การตัดแนวตั้ง (Face milling)



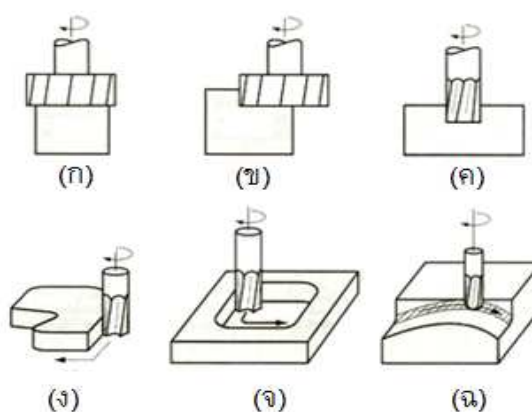
รูปที่ 2.2 วิธีการกัด (ก) การกัดแนวราบ (ข) การกัดแนวตั้ง [12]

1. การกัดแนวราบ (Peripheral milling or plain milling) คือ การกัดที่มีแกนหมุนขนานกับพื้นผิวชิ้นงาน และบริเวณตัด คือ ส่วนเส้นรอบวงของมีดตัด แบ่งออกเป็น
 - การกัดเต็มหน้า (Slab milling) การกัดแนวราบที่มีดตัดกว้างกว่าชิ้นงานทั้งสองด้าน
 - การกัดนำร่อง (Slot milling) การกัดแนวราบที่มีดตัดแคบกว่าชิ้นงาน ทำให้เกิดเป็นช่อง
 - การกัดข้าง (Side milling) การกัดแนวราบที่มีดตัดตัดด้านข้างของชิ้นงาน
 - การกัดคร่อม (Straddle milling) เหมือนกับการกัดด้านข้างแต่กระทำกับทั้งสองด้าน



รูปที่ 2.3 (ก) การกัดเต็มหน้า (ข) การกัดหน้าร่อง (ค) การกัดข้าง (ง) การกัดคร่อม [12]

2. การกัดแนวตั้ง (Face milling or end milling) คือ การกัดที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับพื้นผิวชิ้นงานและกระบวนการกัดเกิดขึ้นบริเวณเส้นรอบวงของมีดตัด แบ่งออกเป็น
- การกัดเต็มหน้า (Conventional face milling) การกัดแนวตั้งที่มีมีดตัดมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าความกว้างชิ้นงาน
 - การกัดหน้าบางส่วน (Partial face milling) การกัดแนวตั้งที่กระทำกับชิ้นงานด้านเดียว
 - การกัดร่อง (End milling) การกัดแนวตั้งที่มีมีดตัดมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าผิวชิ้นงาน
 - การกัดขอบ (Profile milling) การกัดแนวตั้งที่มีมีดตัดกระทำต่อขอบด้านนอกของชิ้นงาน
 - การกัดเจาะ (Pocket milling) การกัดแนวตั้งที่มีมีดตัดเจาะรูและกัดชิ้นงานให้เรียบ
 - การกัดผิวโค้ง (Surface contouring) การกัดแนวตั้งด้วยมีดตัดหัวบอลบนผิวเกิดเป็นส่วนโค้งสามมิติ

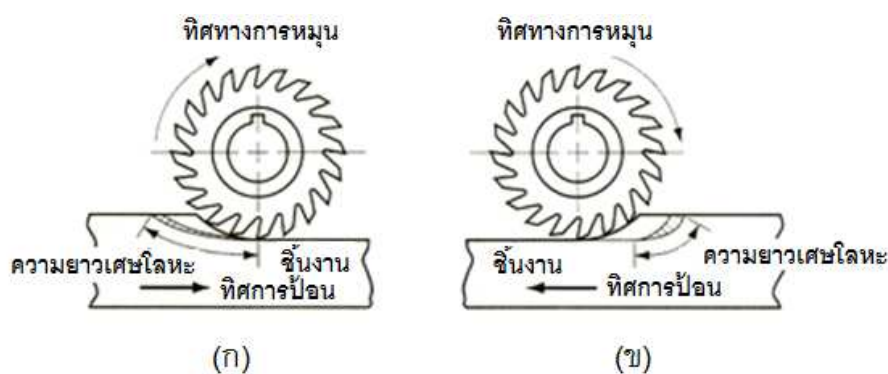


รูปที่ 2.4 การกัดแบบแนวตั้ง (ก) การกัดเต็มหน้า (ข) การกัดหน้าบางส่วน (ค) การกัดร่อง (ง) การกัดขอบ (จ) การกัดเจาะ (ฉ) การกัดผิวโค้ง [12]

ทิศทางการกัดแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

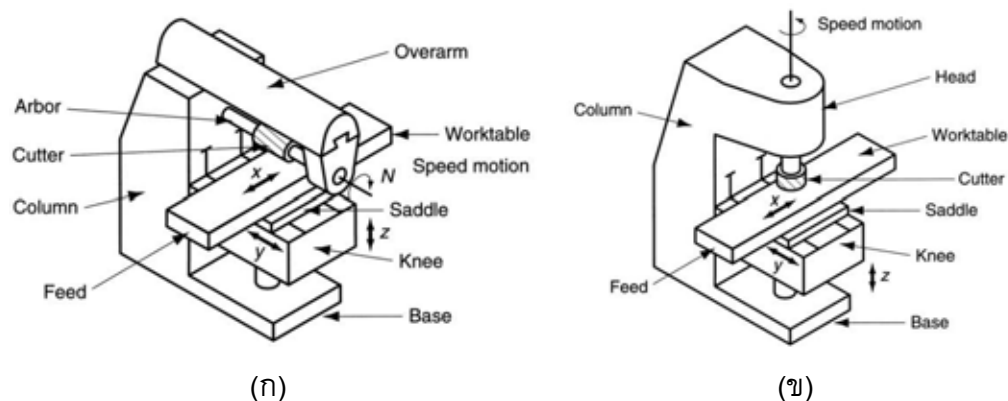
1. การกัดขึ้น (Up milling หรือ Conventional milling)
 - การหมุนของฟันตัดมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการป้อน
 - เศษโลหะที่เกิดขึ้นเริ่มต้นจะมีขนาดบางมากและจะหนาขึ้นระหว่างการกวาดของฟันตัด
 - ทิศทางของแรงตัดเป็นแบบหมุนขึ้นโดยจะหมุนในทิศที่ยกชิ้นงานขึ้นและชี้ฟันตัดจะหมุนออกจากชิ้นงาน
 - เหมาะกับงานตัดประเภทงานตัดหยาบ (Rough cut)

2. การกัดลง (Down milling หรือ Climb milling)
 - การหมุนของฟันตัดมีทิศทางเดียวกับทิศทางการป้อน
 - เศษโลหะที่เกิดขึ้นจะมีขนาดหนาและจะบางลงระหว่างการกวาดของฟันตัด
 - ความยาวของเศษโลหะในการกัดลงจะน้อยกว่าการกัดขึ้นทำให้เครื่องกัดทำงานโดยใช้เวลาต่อปริมาณการกัดวัสดุน้อยกว่าและมีส่วนช่วยในการยืดอายุเครื่องมือตัดได้
 - ทิศทางของแรงตัดเป็นแบบหมุนลงโดยจะหมุนในทิศเข้าหาชิ้นงานและเครื่องกัด
 - เหมาะกับงานตัดประเภทงานตัดละเอียด (Finish cut)



รูปที่ 2.5 ทิศทางการกัด (ก) การกัดขึ้น (ข) การกัดลง [12]

เครื่องกัดได้ถูกออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานต่างๆ จึงทำให้เครื่องกัดมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันอย่างมาก เครื่องกัดสามารถแบ่งตามลักษณะแกนหมุนจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องกัดแนวนอน (Horizontal milling machine) และเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical milling machine)



รูปที่ 2.6 ประเภทของเครื่องกัด (ก) เครื่องกัดแนวนอน (ข) เครื่องกัดแนวตั้ง [12]

อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนี้เพื่อตอบสนองต่อความต้องการในด้านการผลิตซึ่งต้องการปริมาณการผลิตสูงๆ ในระยะเวลาอันสั้น และการผลิตชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อน จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องกัดให้มีประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นในการผลิตเพิ่มขึ้น โดยการใช้เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ (CNC machining center) ซึ่งสามารถทำงานได้หลากหลายและช่วยลดรอบระยะเวลาในการผลิตให้สั้นลง



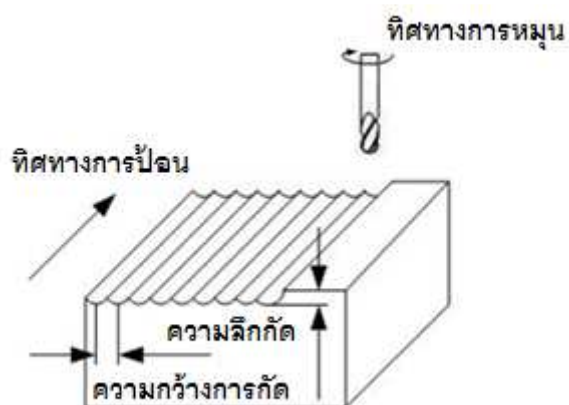
รูปที่ 2.7 เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์

2.1.3 เงื่อนไขการตัดในกระบวนการกัด (Cutting conditions in milling process)

เครื่องกัดเป็นเครื่องมือกลพื้นฐานที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในงานอุตสาหกรรมโดยอัตราป้อนชิ้นงานสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นอัตราเร็วเชิงเส้นในหน่วย มิลลิเมตร/นาที ได้ดังสมการ

$$f_r = N \times n_t \times f \quad (2.1)$$

เมื่อ	f_r	คือ อัตราป้อน	(มิลลิเมตรต่อนาที)
	N	คือ ความเร็วรอบในการตัด	(รอบต่อนาที)
	n_t	คือ จำนวนฟันของมีดตัด	
	f	คือ การป้อนกัดต่อฟัน (Chip load)	(มิลลิเมตรต่อฟันต่อรอบ)



รูปที่ 2.8 การตัดในกระบวนการกัด

1. ความเร็วการตัด (Cutting speed, v) คำนวณได้จาก

$$v = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad (2.2)$$

เมื่อ	v	คือ ความเร็วการตัด	(มิลลิเมตรต่อนาที)
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของมีดตัด	(มิลลิเมตร)
	N	คือ ความเร็วรอบในการตัด	(รอบต่อนาที)

2. ความเร็วรอบในการตัด (Spindle rotation speed, N) คำนวณได้จาก

$$N = \frac{1000v}{\pi \times D} \quad (2.3)$$

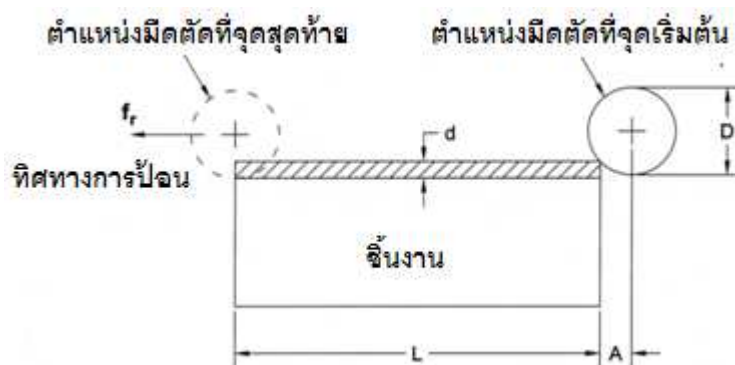
เมื่อ	N	คือ ความเร็วรอบในการตัด	(รอบต่อนาที)
	v	คือ ความเร็วในการตัด	(มิลลิเมตรต่อนาที)
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัด	(มิลลิเมตร)

3. อัตราการกำจัดเนื้อโลหะ (R_{MR}) ในกระบวนการกัดแบบเต็มหน้า (Slab milling)

คำนวณจาก

$$R_{MR} = w \times d \times f_r \quad (2.4)$$

เมื่อ	R_{MR}	คือ อัตราการกำจัดเนื้อโลหะ	(ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที)
	w	คือ ความกว้างของชิ้นงาน	(มิลลิเมตร)
	d	คือ ความลึกในการกัด	(มิลลิเมตร)
	f_r	คือ อัตราป้อน (Feed rate)	(มิลลิเมตรต่อนาที)



รูปที่ 2.9 การกัดเต็มหน้า (Slab milling) จากมุมมองด้านหน้า [12]

4. เวลาในการกัด (T_m)

4.1. สำหรับการกัดแบบสแลป ต้องคำนวณระยะทางเข้าตัด (A) ที่จะเข้าถึงความลึกมีดทั้งหมดจากสมการ

$$A = \sqrt{d(D - d)} \quad (2.5)$$

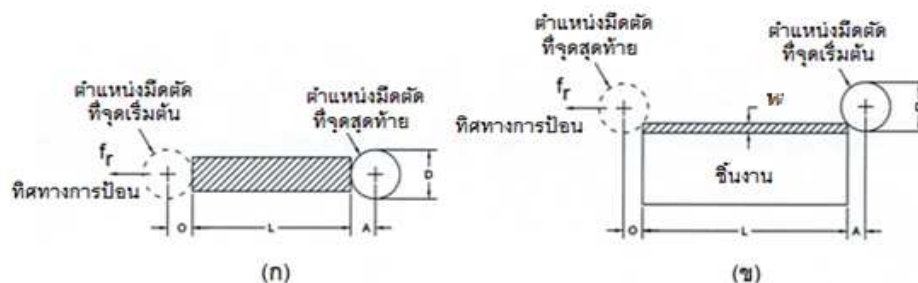
เมื่อ	A	คือ ระยะทางเข้าตัด	(มิลลิเมตร)
	d	คือ ความลึกในการตัด	(มิลลิเมตร)
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัด	(มิลลิเมตร)

สามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการตัด (T_m) ได้จาก

$$T_m = \frac{L + A}{f_r} \quad (2.6)$$

เมื่อ	T_m	คือ เวลาในการกัด	(นาที)
	L	คือ ความยาวของชิ้นงาน	(มิลลิเมตร)
	A	คือ ระยะเข้าตัด	(มิลลิเมตร)
	f_r	คือ อัตราป้อน (Feed rate)	(มิลลิเมตรต่อนาที)

4.2. สำหรับการตัดแนวตั้ง หรือการกัดผิวหน้า (Face milling) แยกได้เป็นสองกรณี ดังรูป



รูปที่ 2.10 การตัดแนวตั้ง หรือการกัดผิวหน้าจากมุมมองด้านบน

(ก) การกัดเต็มหน้า (ข) การกัดบางส่วน [12]

การกัดเต็มหน้า ตำแหน่งศูนย์กลางของมีดตัดอยู่ในตำแหน่งกว้างกว่าชิ้นงาน (ระยะ A และ O มีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด) นั่นคือ

$$A = O = \frac{D}{2} \quad (2.7)$$

การกัดบางส่วน มีดตัดอยู่ในตำแหน่งที่เกินออกมาจากด้านหนึ่งและตัดชิ้นงานลึกเข้าไป (w) สามารถคำนวณระยะเข้าและออกของการตัดได้จาก

$$A = O = \sqrt{w(D - w)} \quad (2.8)$$

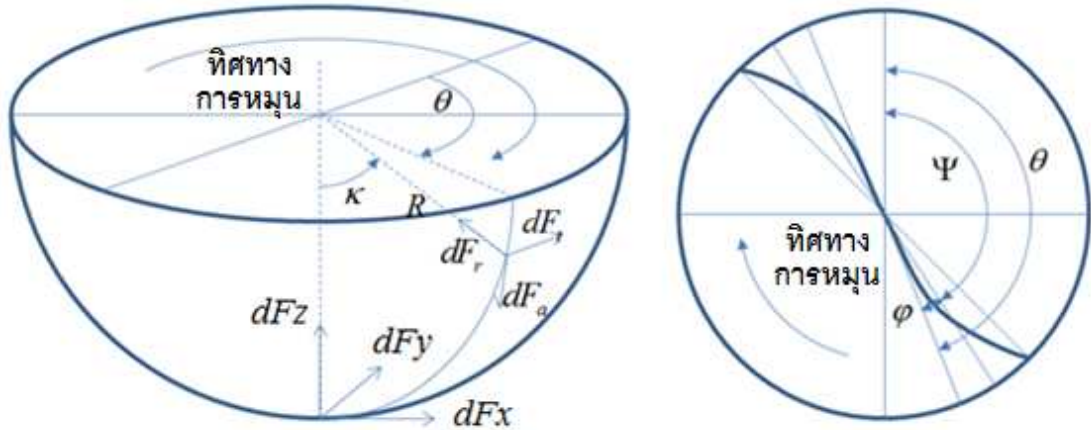
เมื่อ	D	คือ ผ่านศูนย์กลางของมีดตัด	(มิลลิเมตร)
	w	คือ ความกว้างการตัดชิ้นงาน	(มิลลิเมตร)

สามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการตัด (T_m) ของทั้ง 2 กรณีได้จาก

$$T_m = \frac{L + 2A}{f_r} \quad (2.9)$$

เมื่อ	L	คือ ความยาวของชิ้นงาน	(มิลลิเมตร)
	A	คือ ระยะเข้าตัด	(มิลลิเมตร)
	f_r	คือ อัตราป้อน (Feed rate)	(มิลลิเมตรต่ออนาที)

2.1.4 แรงในกระบวนการกัด [13]



รูปที่ 2.11 แรงในกระบวนการกัด [13]

แรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดตามแนวแกน X, Y และ Z ได้แก่

F_x คือ แรงตัดในแนวทิศทางป้อน (หน่วยนิวตัน)

F_y คือ แรงตัดในแนวตั้งฉากกับทิศทางป้อน (หน่วยนิวตัน)

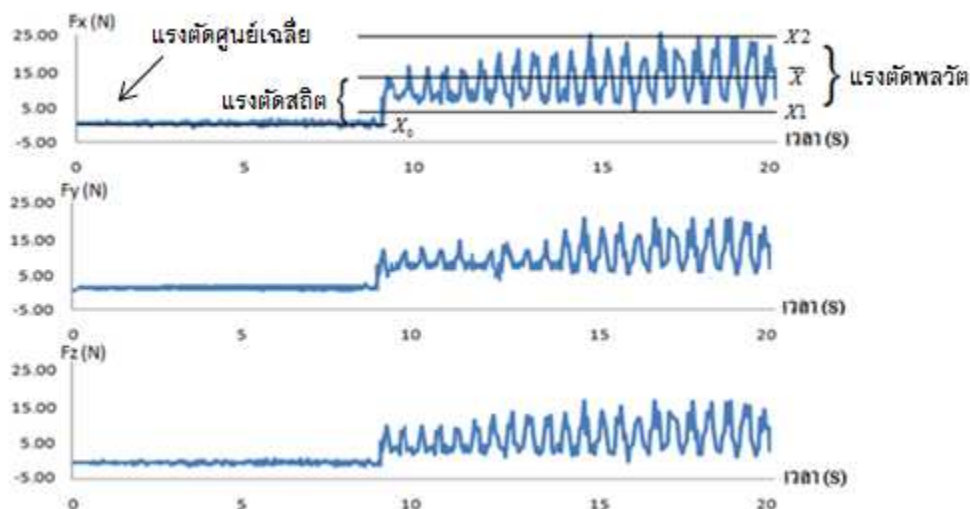
F_z คือ แรงตัดในแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน (หน่วยนิวตัน)

กำหนดให้
$$\varphi = \frac{z}{R_0} \tan(i_0) \quad (2.10)$$

$$\psi(z) = \theta + (j-1) \frac{2\Pi}{N_f} - \varphi \quad (2.11)$$

เมื่อ R_0 คือรัศมีมีดตัด, θ คือมุมการหมุนของมีดตัด, N_f คือจำนวนฟัน และมีดตัดมีมุมเกลียวเท่ากับ i_0 และมีตำแหน่งของฟันกัดเท่ากับ j ที่ความสูงตัดเท่ากับ z โดยแรงตัดที่เกิดขึ้นตามแนวแกน X, Y และ Z สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแรงตัดหลัก (Tangential cutting force: F_t), แรงรัศมีหรือแรงรูน (Radial cutting force: F_r) และแรงตัดตามแนวแกน (Axial cutting force: F_a) ได้ดังนี้

$$\begin{pmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin(\kappa) \sin(\psi) & -\cos(\psi) & -\cos(\kappa) \sin(\psi) \\ -\sin(\kappa) \cos(\psi) & \sin(\psi) & -\cos(\kappa) \cos(\psi) \\ \cos(\kappa) & 0 & -\sin(\kappa) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dF_r \\ dF_t \\ dF_a \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

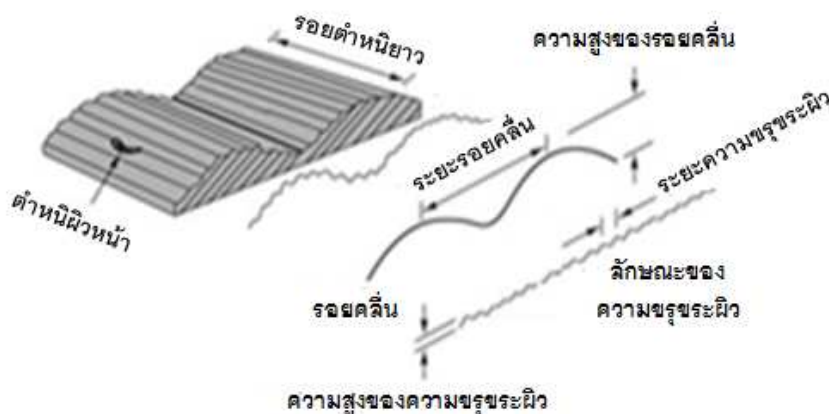


รูปที่ 2.12 แรงตัดสถิตและแรงตัดพลวัตในกระบวนการกัดแบบหัวบอล

จากรูป 2.12 แรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ แรงตัดพลวัต (Dynamic force) คือ และแรงตัดสถิต (Static force) โดยจากรูปแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นที่มีขนาดอยู่ในช่วง X_1 และ X_2 ส่วนแรงตัดสถิตคือผลต่างของค่าเฉลี่ยแรงตัดพลวัต (\bar{X}) และแรงตัดศูนย์ (X_0)

2.1.5 ความเรียบผิวสำเร็จ (Surface Finish) [14]

เป็นค่าที่อธิบายถึงลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวหรือความสมบูรณ์ของพื้นผิวซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัสดุ ความเรียบผิวสำเร็จมีผลมาจากพารามิเตอร์ในการตัดหลายอย่าง ซึ่งรวมถึงรูปทรงของมีดตัด รูปทรงของชิ้นงาน ความแข็งแรงของเครื่องจักร วัสดุชิ้นงาน ปัจจัยในการตัด และวัสดุที่ทำมีดตัด กระบวนการตัดเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างและขนาดตรงตามที่ต้องการ ทำให้เกิดผิวของชิ้นงานที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไปตามเงื่อนไขการตัด ซึ่งความเรียบผิวของชิ้นงานเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องได้รับการควบคุมให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ลักษณะของผิวสำเร็จของชิ้นงานสามารถแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.13 รายละเอียดของผิวชิ้นงาน [14]

- **ความขรุขระผิว (Roughness)** บนพื้นผิวของชิ้นงานประกอบไปด้วยช่องว่างขนาดเล็กและละเอียดที่ติดกันหลายๆช่อง ซึ่งเป็นรอยที่ได้จากการใช้เครื่องมือตัดบนผิวชิ้นงาน ความสูงเฉลี่ยหรือความลึกเฉลี่ยบนผิวชิ้นงานหรือความขรุขระผิวจะวัดโดยใช้ช่วงความยาวที่เรียกว่าช่วงความยาวจำกัด (Cut off length) หรือ ช่วงความยาวการสุ่มของความขรุขระผิว (Roughness sampling length)

ค่านิยามและการระบุพารามิเตอร์แสดงความขรุขระของพื้นผิวสำหรับผลิตภัณฑ์ มีดังนี้

- **ความขรุขระผิวเฉลี่ยบนผิวชิ้นงาน (Ra)** ค่าเฉลี่ยนี้วัดจากกราฟความขรุขระผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง ระยะค่าเฉลี่ยนี้จะอยู่บนกราฟตามแนวแกน x ของเส้นอ้างอิง และแนวแกน y มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร (μm)
- **ความขรุขระผิวสูงสุด (Ry)** จะวัดจากจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร (μm)
- **ความขรุขระผิวเฉลี่ยบนผิวชิ้นงานแบบ 10 จุด (Rz)** เป็นค่าความขรุขระผิวซึ่งวัดจากความขรุขระผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง โดยนำความสูงของความขรุขระผิว 5 จุดด้านบน และความสูงของความขรุขระผิว 5 จุดด้านล่างมาใช้ในการคำนวณหาค่าเฉลี่ย มีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm)

- **รอยคลื่น (Waviness)** มีลักษณะเป็นรอยขรุขระบนผิวชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่าช่วงความยาวการสุ่มของความขรุขระผิว (Roughness sampling length) (ประมาณ 1 ไมโครเมตร) ซึ่งอาจเกิดจากการสั่นสะเทือนหรืออุณหภูมิ
- **รอยตำหนิยาว (Lay)** เป็นรอยตำหนิที่มีลักษณะยาว ซึ่งเกิดขึ้นในทิศทางของการป้อนมีดตัด, การเคลื่อนที่ระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือตัด
- **ตำหนิผิวหน้า (Surface Flaw)** เป็นรอยตำหนิที่มีอยู่ในชิ้นงานมาแต่เดิม เช่น รอยแตกร้าวหรือโพรงอากาศภายในชิ้นงาน

โดยทั่วไปค่าความขรุขระผิวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนตัดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดตัดได้ ซึ่งค่าความขรุขระผิว (R_i) ทางทฤษฎีสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

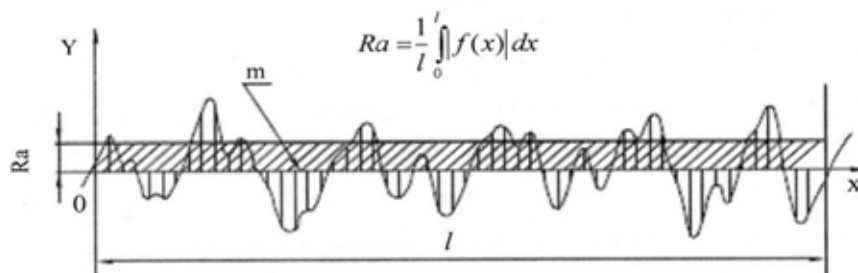
$$R_i = \frac{f^2}{8 \left(R \pm \frac{fn}{\pi} \right)} \quad (2.13)$$

เมื่อ	R_i	คือ ค่าความขรุขระผิว	(มิลลิเมตร)
	f	คือ อัตราการป้อนตัด	(มิลลิเมตร/ฟัน)
	R	คือ รัศมีมีดตัด	(มิลลิเมตร)
	n	คือ จำนวนฟันของดอกกัด	

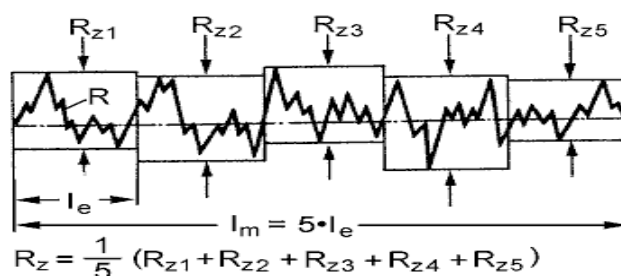
โดย เครื่องหมาย + หมายถึงการกัดแบบขึ้น (Up milling)
 เครื่องหมาย - หมายถึงการกัดแบบลง (Down milling)

2.1.6 การวัดค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน

วิธีวัดค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (Average surface roughness (Ra)) ซึ่งค่า Ra ที่คำนวณได้จากสมการดังรูปที่ 2.14 และวิธีการวัดความขรุขระผิวสูงสุด (Ten-point average surface roughness (Rz)) ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังรูปที่ 2.15



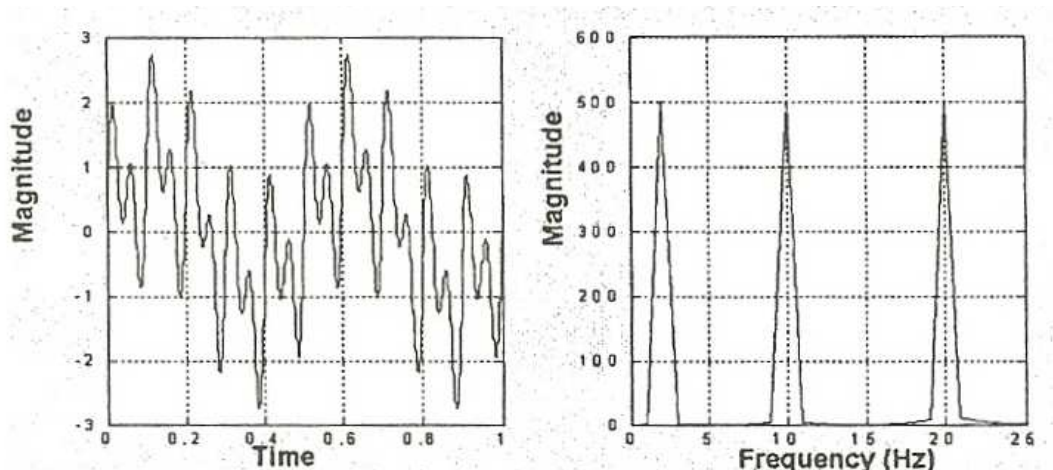
รูปที่ 2.14 ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) [15]



รูปที่ 2.15 ค่าความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) [16]

2.1.7 การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing)

การประมวลผลของสัญญาณเป็นการวิเคราะห์เพื่อให้ทราบถึงองค์ประกอบที่สำคัญของสัญญาณนั้นและสามารถตัดองค์ประกอบที่ไม่สำคัญซึ่งไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณ ซึ่งจะทำให้การประมวลผลสัญญาณมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการแปลงสัญญาณเป็นโดเมนความถี่โดยใช้ข้อมูลสัญญาณจากโดเมนเวลาดังรูปที่ 2.16 และสมการที่ 2.14 เมื่อ $f(t)$ คือสัญญาณใดๆ



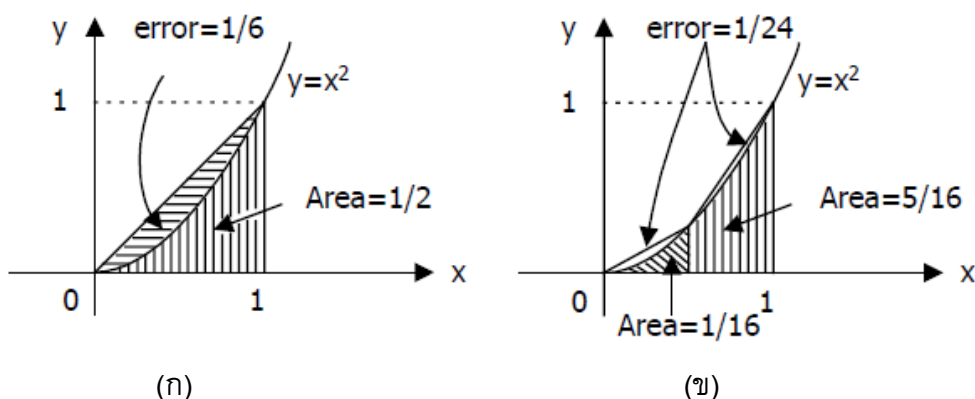
รูปที่ 2.16 การแปลงสัญญาณโดเมนความถี่จากโดเมนเวลา [17]

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2\pi f t} dt \quad (2.14)$$

การพิจารณาที่โดเมนเวลาของสัญญาณในการวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้นเพียงค่าเดียวอาจทำให้ข้อมูลผลการทดลองที่ได้ไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ จึงต้องทำการแปลงสัญญาณเป็นโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สัญญาณได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากสัญญาณบางประเภทสามารถวิเคราะห์ได้จากผลรวมของฟังก์ชันไซน์ (Sine Function) ในระดับและความถี่ต่างๆ ดังนั้นเมื่อนำความถี่และขนาดของสัญญาณหรือสเปกตรัมของความถี่ของสัญญาณนั้นมาใช้ในการวิเคราะห์ จะทำให้ทราบลักษณะการกระจายกำลังของสัญญาณในความถี่ต่างๆ ซึ่งสามารถนำมาใช้วิเคราะห์สัญญาณนั้นๆ ได้ เนื่องจากจะทำให้ทราบว่าระดับของสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์นั้นอยู่ในช่วงใดของสเปกตรัมของความถี่ได้

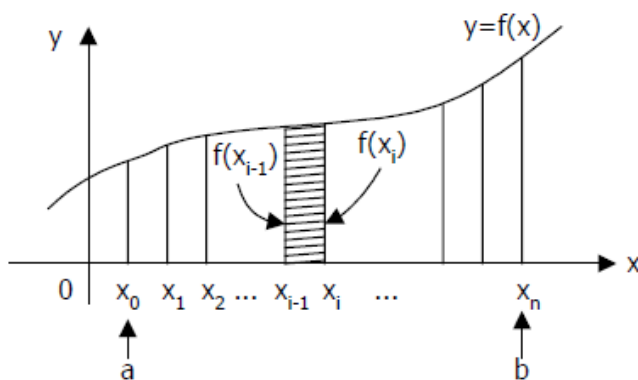
2.1.8 วิธีการประมาณพื้นที่ด้วยสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Method) [18]

เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ซึ่งนำมาใช้หาพื้นที่ใต้โค้งโดยประมาณด้วยสี่เหลี่ยมคางหมู ซึ่งได้จากการแบ่งพื้นที่ใต้โค้งออกเป็นส่วนย่อย n ส่วนเท่าๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยการหาพื้นที่ของสี่เหลี่ยมคางหมุย่อยๆ ในแต่ละช่วงแล้วจึงนำพื้นที่ที่ได้แต่ละช่วงมารวมกันเป็นค่าปริพันธ์ของฟังก์ชัน $f(x)$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปร x จาก a ถึง b



รูปที่ 2.17 (ก) หาพื้นที่ใต้กราฟด้วยสามเหลี่ยม (ข) แบ่งพื้นที่ใต้กราฟเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู [18]

ในรูปที่ 2.17 (ก) เป็นการหาพื้นที่ใต้กราฟด้วยสามเหลี่ยม ซึ่งอาจทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟออกเป็นส่วนๆ แบบสี่เหลี่ยมคางหมูดังรูปที่ 2.17 (ข) ซึ่งส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนที่ได้มีค่าน้อยลง และทำการหาค่าปริพันธ์ของฟังก์ชัน $f(x)$ จาก $x = a$ ถึง $x = b$ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การหาค่าปริพันธ์โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู [18]

วิธีการใช้สี่เหลี่ยมคางหมูจะแบ่งช่วงของกราฟจาก a ถึง b ออกเป็น n ส่วนเท่า ๆ กัน โดยจากการแบ่งจะทำให้ได้สี่เหลี่ยมคางหมูที่ตำแหน่ง $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ และเมื่อพิจารณาที่รูปสี่เหลี่ยมคางหมูในลำดับที่ i ซึ่งอยู่ระหว่าง x_{i-1} และ x_i พบว่าจะมีความกว้าง (w) เท่ากับ $(b-a)/n$ ซึ่งจะคำนวณหาพื้นที่ได้จากสมการ 2.14

$$A_i = \frac{w}{2}(f(x_{i-1}) + f(x_i)) \quad (2.15)$$

จากสมการพบว่าพื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมคางหมูทั้งหมด n รูปสามารถใช้ค่าแทนที่ได้ เมื่อกำหนดให้ T_n คือเป็นผลรวมของพื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมคางหมูทั้งหมดจะคำนวณได้ ดังนี้

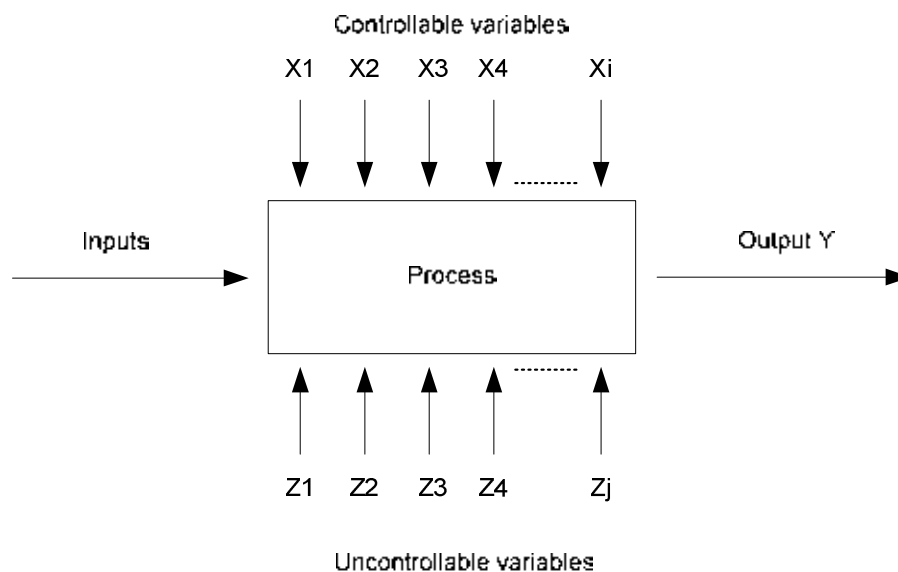
$$\begin{aligned} T_n &= A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_{n-1} + A_n \\ &= \frac{w}{2} [f(x_0) + f(x_1)] + \frac{w}{2} [f(x_1) + f(x_2)] + \frac{w}{2} [f(x_2) + f(x_3)] \\ &\quad + \dots + \frac{w}{2} [f(x_{n-2}) + f(x_{n-1})] + \frac{w}{2} [f(x_{n-1}) + f(x_n)] \\ &= \frac{w}{2} [f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n)] \end{aligned} \quad (2.16)$$

จากสมการพบว่าค่าความแม่นยำของการใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูนั้นจะขึ้นกับจำนวนของรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่นำมาใช้ และนอกจากนี้จากสมการยังพบว่าพื้นที่ใต้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงสามารถแทนที่ได้ด้วยสี่เหลี่ยมคางหมูได้ทันที แต่ในขณะที่พื้นที่ใต้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งอาจต้องแบ่งพื้นที่ออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูย่อยๆ หลายๆ รูปแทน

2.1.9 การออกแบบการทดลอง [19], [20]

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ คือ วิธีการวางแผนการทดลอง เพื่อให้ได้ข้อมูลการทดลองที่มีความถูกต้องและเหมาะสมแก่การนำไปวิเคราะห์ผล ทำให้การทดลองมีความน่าเชื่อถือและมีประสิทธิภาพและเป็นวิธีที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองได้หากเกิดความผิดพลาดขึ้นจากการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะสังเกตและบอกถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or responses) จากกระบวนการนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรหรือปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable variables or factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรหรือปัจจัยที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or noise variables or factors) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่



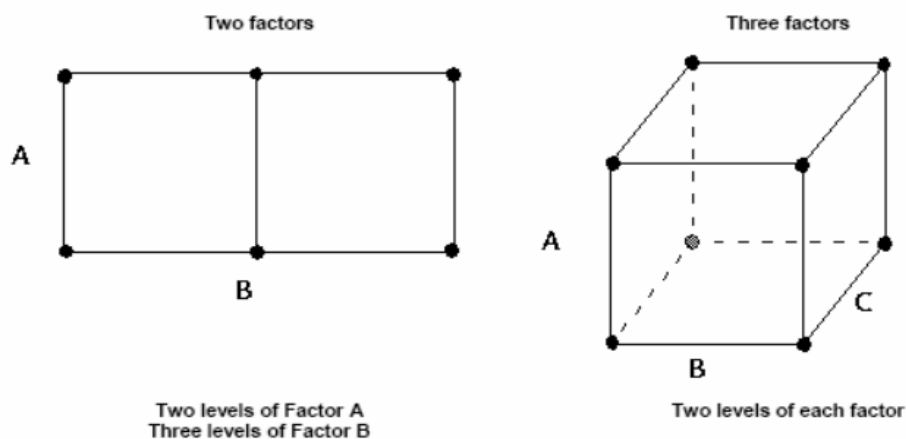
รูปที่ 2.19 ระบบหรือกระบวนการที่ใช้ในการทดลองโดยทั่วไป [19]

การควบคุมตัวแปรที่ควบคุมได้และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบที่ต้องการจะศึกษา ซึ่งตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวแปรรบกวนมักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก หรือส่วนของอุปกรณ์หรือระบบที่ยากแก่การควบคุม เนื่องจากการควบคุมต้องใช้ความระมัดระวังสูง เพราะเมื่อชำรุดอาจส่งผลถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น แหล่งที่มาของวัตถุดิบ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต พนักงานที่ควบคุม อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น นอกจากนี้การออกแบบกระบวนการทดลองและการกำหนดค่าพารามิเตอร์หรือเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในระบบหรือกระบวนการก็มีความสำคัญเช่นกัน

โดยส่วนใหญ่ผลตอบที่ได้จากการทดลองมักมีผลกระทบมาจากปัจจัยที่ต้องการนำมาศึกษา เรียกรวบรวมแผนและการดำเนินการทดลองว่า กลยุทธ์ของการทดลอง (Strategy of experimentation) ซึ่งมีหลายกลยุทธ์ที่ผู้ทดลองสามารถนำไปใช้ได้ เช่น แบบหนึ่งปัจจัยต่อครั้ง (One-factor-at-a-time) หรือการออกแบบเชิงตัวประกอบ (Factorial design) เป็นต้น

ในการออกแบบเชิงตัวประกอบ ผลตอบที่ได้จากการทดลอง (Response) จะได้รับการเก็บค่าในทุกๆปัจจัยและระดับของการทดลอง ในแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง (Combination of factor levels) เป็นเงื่อนไขที่ผู้ทดลองกำหนดขึ้นเพื่อให้ได้ผลตอบจากการทดลองที่ต้องการทราบ เงื่อนไขของการทดลองแต่ละเงื่อนไข เรียกว่า รัน (Run) และวิธีการทดลองเพื่อให้ได้ค่าผลตอบจากแต่ละเงื่อนไขการทดลองเรียกว่า แบบการทดลอง (Design)

รูปที่ 2.20 แสดงการออกแบบการทดลองโดยใช้ แบบ 2 และ 3 ปัจจัยโดยแต่ละจุดในรูปแสดงถึง แต่ละเงื่อนไขของการทดลอง เช่น การออกแบบการทดลองแบบ 2 ปัจจัย (Two-factor design) เมื่อพิจารณาจุดที่อยู่ด้านล่างพบว่าเป็นค่าที่ ระดับปัจจัย A และ B มีค่าต่ำ (Low)



รูปที่ 2.20 ตัวแบบของการทดลองแบบ 2 และ 3 ปัจจัย [19]

ในการออกแบบการทดลองผู้ทดลองควรคำนึงถึงหลักการพื้นฐาน 3 ประการคือ

1. **การทดลองซ้ำ (Replication)** คือการทำการทดลองซ้ำที่เงื่อนไขเดิมเพื่อทดสอบและป้องกันผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ การทำการทดลองซ้ำอาจเกิดประโยชน์แก่ผู้ที่ทำการทดลองในกรณีที่เกิดความผิดพลาดขึ้นในการทำการทดลอง กล่าวคือ ผู้ทดลองสามารถนำผลการทดลองซ้ำมาหาค่าเฉลี่ยและนำผลที่ได้ไปใช้วิเคราะห์ต่อไป
2. **การสุ่ม (Randomization)** เป็นพื้นฐานหลักสำหรับการใช้วิธีการทางสถิติที่ใช้สำหรับออกแบบทดลองเพื่อแสดงให้เห็นว่าการทดลองแต่ละครั้งเป็นอิสระต่อกันและเป็นการลดอิทธิพลจากปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการทดลองได้
3. **การควบคุม (Blocking)** เป็นวิธีหนึ่งซึ่งใช้ในการเพิ่มความแม่นยำให้แก่การทดลอง โดยการควบคุมปัจจัยอื่นๆในการทดลองให้คงที่ และทำการเปรียบเทียบเงื่อนไขต่างๆ ที่ต้องการทราบในแต่ละบล็อก

2.1.10 การทำการทดลองตามวิธีการออกแบบการทดลอง

การใช้วิธีการเชิงสถิติมาช่วยในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลที่ได้มีความสำคัญ ผู้ทดลองควรมีความเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาที่กำลังศึกษา, วิธีการเก็บข้อมูล และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ทั้งนี้วิธีการในการดำเนินการทำดังต่อไปนี้

1. การทำความเข้าใจถึงปัญหา

ในขั้นตอนนี้ผู้ทดลองจะต้องพยายามศึกษาแนวความคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และควรรหาข้อมูลจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ฝ่ายวิศวกรรม ฝ่ายควบคุมคุณภาพ ฝ่ายผลิต ฝ่ายการตลาด ผู้บริหาร ลูกค้าและฝ่ายบุคคล เพื่อให้ได้ความชัดเจนของปัญหาที่เกิดขึ้น

2. การเลือกตัวแปรผลตอบ

การเลือกผลตอบที่ได้จากการทดลอง ผู้ออกแบบการทดลองควรมีความรู้และความเข้าใจในผลตอบที่ต้องการศึกษาว่าผลตอบดังกล่าวมีผลกระทบมาจากตัวแปรใดบ้าง ควรวัดค่าตัวแปรต่างๆอย่างไร และใช้วิธีใดในการวัดผล

3. การเลือกการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองควรพิจารณาถึงจำนวนของการทดลองที่ใช้ โดยผู้ทำการทดลองควรคำนึงถึงผลการทดลองที่ต้องการได้เป็นสำคัญ ควรเลือกวิธีการเก็บข้อมูลที่มีความเหมาะสมและควรพิจารณาว่าต้องมีการทดลองซ้ำหรือการควบคุมใดๆหรือไม่

4. การทำการทดลอง

เมื่อเริ่มทำการทดลองผู้ทดลองควรทำตามวิธีการออกแบบการทดลองที่เลือกใช้และทำการทดลองด้วยความระมัดระวังเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้น ทำให้ผลการทดลองที่ได้เสียหายและไม่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลได้

5. การเลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต

ในการทำการทดลอง ผู้ทดลองคือผู้ที่กำหนดระดับและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นผู้ทดลองจึงควรทราบว่าปัจจัยและระดับของแต่ละการทดลองที่เลือกใช้ส่งผลต่อผลตอบที่ได้ อย่างไรก็ตามสิ่งที่จะสามารถเลือกใช้ค่าได้อย่างเหมาะสม

6. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

ผู้ทดลองสามารถนำวิธีการทางสถิติหลายวิธีมาใช้ในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองควบคู่กับวิธีการทางวิศวกรรมในการวิเคราะห์ ซึ่งแม้ว่าวิธีการดังกล่าวจะมีความซับซ้อน แต่เป็นสิ่งที่ผู้ทดลองควรเลือกใช้เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมและมีความน่าเชื่อถือในการนำไปใช้ได้

7. การสรุปและการทดสอบ

เมื่อทำการทดลองและวิเคราะห์ผลแล้ว ผู้ทดลองควรทำการสรุปผลเพื่อหาแนวทางการดำเนินการหรือข้อเสนอแนะเพิ่มเติม นอกจากนี้ผู้ทดลองควรทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้ ทั้งนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการทดลอง

2.1.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวน [19]

ในกรณีที่สนใจจะศึกษาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากรตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไปและมีการทดสอบเพียงครั้งเดียว สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการทำการทดสอบทีละคู่ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) เป็นวิธีการพื้นฐานทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนองหรือลักษณะทางคุณภาพ

ในการวิเคราะห์จะแยกสาเหตุของความแตกต่างออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

1. **ความแตกต่างที่สามารถอธิบายได้ (Explained variation)** คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปัจจัยหรือวิธีปฏิบัติที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง บางครั้งอาจถูกเรียกว่า ความแตกต่างระหว่างกลุ่ม (Between group variation)

2. **ความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้ (Unexplained variation)** คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถอธิบายได้เนื่องจากขาดความรู้ หรือความรู้เกี่ยวกับระบบยังไม่มากพอ ซึ่งในบางครั้งอาจเกิดจากกรณีที่ผู้ศึกษาทราบถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลอง ซึ่งในการวิเคราะห์ความแปรปรวนกล่าวถึงความแตกต่างในส่วนนี้ในรูปของความผิดพลาดหรือส่วนที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ (Error or residual) ถ้าผู้ทดลองมีความรู้หรือความสามารถในการควบคุมการทดลองมากขึ้น ความผิดพลาดส่วนนี้ก็จะลดลง

2.1.12 การทดสอบข้อสมมติในการวิเคราะห์การถดถอย [20]

ข้อสมมติที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์การถดถอยที่สำคัญมี 4 ประการคือ

1. ข้อมูลมีการแจกแจงปกติ
2. ค่าเฉลี่ยผิดพลาดเท่ากับศูนย์
3. ความแปรปรวนคงที่
4. ค่าผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน

ในการทดสอบข้อสมมติจะใช้กราฟที่แตกต่างกันดังนี้

1. กราฟความน่าจะเป็นเป็นการแจกแจงปกติ (Normal probability plot) ใช้ในการทดสอบข้อข้อที่ 1 ถ้ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง หรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ข้อสมมติที่ 1 ผ่าน
2. Residual plot ใช้ในการทดสอบข้อสมมติข้อที่ 2 และ 3 โดยพิจารณาว่าค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ (จุดกระจายรอบศูนย์ อย่างสมดุ) และความกว้างของแถบคงที่ (ความแปรปรวนคงที่) และกราฟกระจายอย่างสุ่มแสดงถึงความเป็นอิสระต่อกันของค่าผิดพลาด ตรวจสอบข้อสมมติที่ 4

3. Residual plot (ตัวแปรอิสระ) ใช้พิจารณาความเป็นอิสระต่อกัน ถ้ายังมีรูปแบบสัมพันธ์กัน แสดงว่าสมการถดถอยที่ใช้มีรูปแบบไม่เหมาะสม

2.1.13 การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ [20]

วิธีการทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบที่นิยมใช้มี 3 วิธี คือ

1. การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

เป็นการพิสูจน์ว่าตัวแปรอิสระที่ถูกเลือกใช้ในสมการถดถอยอธิบายการเปลี่ยนแปลงของผลตอบหรือตัวแปรตามได้มากน้อยเพียงใด สมการที่มีค่า R^2 ที่มีค่ามากจะเป็นสมการที่มีความเหมาะสมมาก อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ผลพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย เช่น การเพิ่มหรือลดจำนวนตัวแปรอิสระในสมการ อาจส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป จึงนิยมใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจที่ทำการปรับแล้ว (R^2_{adj}) แทน

2. การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ

การทดสอบนี้จะทำขึ้นเฉพาะกรณีที่มีการเก็บข้อมูลซ้ำ แต่ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าต่างกัน มักจะเป็นข้อมูลที่ได้ออกแบบการทดลอง เนื่องจากต้องทำการเก็บค่าซ้ำ โดยพิจารณาจากค่า P-Value ของการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ ถ้ามีค่ามากกว่าค่า α ที่กำหนดแล้ว แสดงว่าสมการมีความเหมาะสม

3. การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยและการประมาณค่าแบบช่วง

การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยจัดได้ว่าเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่จะนำสมการไปใช้ในการพยากรณ์ โดยจะทำการประมาณค่าพยากรณ์ที่ต้องการโดยใช้ค่าประมาณแบบจุดและช่วงต่อไป โดยทั่วไปมักนิยมทดสอบสมมติฐานเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยซึ่งจะทำให้ทราบว่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้นจะสามารถลดรูปลงอีกได้หรือไม่

2.1.14 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ [20]

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัว หรือปัจจัยตั้งแต่สองตัวขึ้นไป กับตัวแปรตาม หรือค่าตอบสนอง แนวทางปฏิบัติ

อาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการประมาณความสัมพันธ์ สามารถเกิดขึ้นได้หลายกรณี โดยสรุปแบ่งได้เป็น 5 กรณี คือ

1. ค่าผิดพลาดจากการวัด (Measurement error or pure error) เกิดจากการคลาดเคลื่อนในการวัดค่า
2. ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการละตัวแปรอิสระ (Omission error) เกิดจากการใส่ตัวแปรในสมการประมาณน้อยกว่าความสัมพันธ์ที่แท้จริง
3. ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเพิ่มตัวแปรอิสระ (Inclusion error) เกิดในกรณีใส่ตัวแปรอิสระลงในสมการถดถอยมากเกินไปจนความสัมพันธ์ที่แท้จริง
4. ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเลือกรูปแบบสมการผิด (Functional form error) เกิดในกรณีที่ผู้ศึกษากำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรอิสระผิดไปจากที่ควรเป็น
5. ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเลือกวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ (Estimation error)

การสร้างสมการถดถอยเชิงพหุ สามารถพิจารณาได้ 3 วิธีคือ

1. วิธี Backward elimination เริ่มจากการสร้างสมการเต็มรูปแบบแล้วลดรูปโดยพิจารณาจากค่า P-Value ของตัวแปรอิสระ ที่มีค่า $P\text{-Value} > \alpha$ และมีค่าสูงสุดจะถูกเลือกออกจากสมการจนไม่สามารถลดรูปได้อีก
2. วิธี Forward elimination เริ่มจากสมการถดถอยอย่างง่ายและพิจารณาเพิ่มตัวแปรอิสระทีละตัว โดยดูจากค่านัยสำคัญ P-Value ที่น้อยที่สุดเป็นตัวเริ่ม แล้วเพิ่มจนกว่าจะเพิ่มไม่ได้อีก
3. วิธี Stepwise selection เป็นการนำเอาหลักการของวิธี Backward elimination และ Forward elimination มาใช้คู่กัน โดยทุกครั้งที่เลือกตัวแปรอิสระตัวใหม่เข้าในสมการ จะทำการพิจารณาว่า ตัวแปรอิสระควรอยู่ในสมการหรือควรตัดออกไป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยซึ่งเกี่ยวข้องกับความขรุขระผิวในอดีตเป็นการพยากรณ์ความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นก่อนกระบวนการตัดโดยการใช้จ่ายเงินไขการตัดต่างๆในการสร้างสมการ ในปี 1999 Lou, S. J. และ Chen, J. C. [5] ได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการวัดค่าความขรุขระผิวในขณะกัดอะลูมิเนียม (ISRR) โดยการใช้เซนเซอร์ตรวจวัดแรงสั่นสะเทือน (Accelerometer) เพื่อวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น และใช้การแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลที่มีความละเอียด 12 บิต จากนั้นจึงใช้ Neural fuzzy system ในการวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างแบบจำลอง จากผลการทดลองพบว่าความเร็วกัด, อัตราป้อน, ความลึกในการกัดและค่าตัวแปรการสั่นสะเทือนสามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีระดับความแม่นยำ 96% และใช้ระยะเวลาในการพยากรณ์ค่าประมาณ 0.5 วินาที งานวิจัยนี้ได้ถูกพัฒนาต่อในปี 2007 โดย Zhang, J. Z. และ Chen, J. C. [6] ใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวเพื่อควบคุมความขรุขระผิวของชิ้นงานบนเครื่องกัดซีเอ็นซี ระบบดังกล่าวจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ระบบย่อย ได้แก่ ระบบการวิเคราะห์ความขรุขระผิวขณะตัดจริง โดยการคำนวณค่าความขรุขระผิวอ้างอิงเพื่อนำมาเทียบกับค่าความขรุขระผิวขณะตัดซึ่งคำนวณได้จากแบบจำลองแรงตัด และระบบควบคุมพารามิเตอร์แบบปรับตัวขณะตัด ซึ่งจะทำางานเมื่อค่าความขรุขระผิวที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าความขรุขระผิวอ้างอิง โดยระบบจะนำค่าความแตกต่างของความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นไปปรับอัตราป้อนใหม่เพื่อให้ความขรุขระผิวลดลงอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ จากการทดลองและการสร้างแบบจำลองในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวขณะตัดเทียบกับความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจริงพบว่าแบบจำลองมีความแม่นยำ 91.5%

นอกจากนี้ในอดีตยังมีการศึกษาตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวในกระบวนการกัดเช่นกันโดยในปี 2002 Benardos, P.G. และ Vosniakos, G.C. [7] ได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวในการกัดอะลูมิเนียมแบบใช้หัวบอลโดยการประยุกต์ใช้ Artificial neural network (AANs) ซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม Matlab และการออกแบบการทดลองโดยวิธีของทากูชิ โดยการใช้ตัวแปรได้แก่ ความลึกตัด, อัตราป้อน, ความเร็วรอบ, อัตราส่วนความกว้างกัดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด, การสึกหรอของมีดตัด, การใช้สารหล่อเย็น และแรงกัด โดยในขณะนั้น AANs เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวและสามารถใช้งานได้ง่ายในกรณีที่มีตัวแปรหลายๆค่า ซึ่งจากการทดลองพบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุดได้แก่อัตราป้อน, ความลึกตัด, อัตราส่วนความกว้างกัดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดและแรงกัดตามแนวแกน X ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปศึกษาต่อได้อีก 2 แนวทางได้แก่การลงทุนใช้เครื่องมือกัดและชิ้นงานอื่นๆในการสร้างฐานข้อมูลสำหรับ AANs เพื่อใช้ในการพยากรณ์

และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้เกิดค่าความขรุขระผิวที่น้อยที่สุด ต่อมาในปี 2007 Colak, O., Kurbanoglu, C. และ Kayacan M.C. [8] ทำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวในกระบวนการกัดแบบหวับอลโดยใช้ Genetic expression programming (GEP) ในการสร้างแบบจำลองซึ่งมีเงื่อนไขการตัดได้แก่ ความเร็วรอบ, อัตราป้อน, ความลึกตัด ซึ่งจากการทดลองพบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำ 91% และจากการวิเคราะห์กราฟที่ได้จากการทดลองพบว่าเมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้น ความขรุขระผิวมีแนวโน้มสูงขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มความลึกตัดและความเร็วรอบทำให้ความขรุขระผิวมีแนวโน้มลดลง แต่ทั้งนี้แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีข้อบกพร่องของได้แก่ ในการทดลองที่ความเร็วรอบสูงค่าความขรุขระผิวที่พยากรณ์ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากกว่าที่ความเร็วรอบต่ำ อย่างไรก็ตามในการใช้งานจริงจะนิยมใช้ค่าความเร็วรอบสูงเพื่อให้ได้ค่าความขรุขระผิวน้อย จึงทำให้สามารถนำแบบจำลองนี้ไปใช้งานได้

ข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตคือไม่สามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจริงในขณะตัดได้ทำให้เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบ อาจทำให้เกิดของเสียซึ่งส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น อย่างไรก็ตามพัฒนาการของเครื่องจักรกลอัจฉริยะโดยการประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในการตรวจติดตามระบบการผลิตทำให้ในปัจจุบันเกิดงานวิจัยที่สามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้ในขณะกัด โดยในปี 2011 Tangjitsitcharoen, S. [9] สามารถพยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงานในขณะตัดจริงบนเครื่องกลึง โดยใช้เงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด รัศมีจุกมีด ความลึกตัด อัตราป้อนตัด และอัตราส่วนแรงตัดสถิต ซึ่งสามารถใช้ไดนามิเตอร์ในการตรวจวัดแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดจริงและใช้สมการถดถอยพหุคูณเพื่อแสดงความสัมพันธ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งนี้วัตถุประสงค์ของการทดลองคือการนำสมการพยากรณ์ที่ได้ไปใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานในขณะตัดจริงเพื่อลดของเสียที่อาจเกิดขึ้นและช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้ โดยจากการทดลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนแรงตัด, รัศมีจุกมีดและความเร็วในการตัดสูงขึ้น ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จะมีค่าลดลง ในขณะที่เมื่ออัตราป้อนตัดและความลึกตัดมากขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการสั่นสะเทือนของมีดตัดเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการที่ถูกรสร้างขึ้นเทียบกับค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจริงพบว่าค่าความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยอยู่ที่ 87.3% และความขรุขระผิวสูงสุดอยู่ที่ 86.5% ต่อมาในปี 2012 Tangjitsitcharoen, S. [11] มีการสร้างสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในขณะกัดแบบหวับอลโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัด 5 ปัจจัยคือ ความเร็วในการกัด, อัตราการป้อน, เส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด, ความลึกในการกัดและอัตราส่วนแรงกัดสถิต โดยใช้ไดนามิเตอร์ติดตั้งบนเครื่องซีเอ็นซี แมชชีนนิ่งเซนเตอร์ 5 แกน เพื่อวัดแรงกัดที่เกิดขึ้นจริง และใช้

สมการถดถอยพหุคูณเพื่อแสดงความสัมพันธ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออัตราส่วนแรงกีดสูงขึ้น ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่าลดลงในขณะที่เมื่อความเร็วในการตัด, อัตราการป้อน, เส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดและความลึกในการกัดมากขึ้นจะทำให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น และสมการที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้จริงแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตามแรงที่เกิดในกระบวนการกัดมีสองชนิดคือแรงตัดสถิตและแรงตัดพลวัตซึ่งพบว่าแรงตัดพลวัตมีความสอดคล้องกับลักษณะของค่าขรุขระผิวมากกว่า ดังนั้นการใช้แรงตัดพลวัตแทนการใช้แรงตัดสถิตจึงอาจจะทำให้สมการพยากรณ์ที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น ในปี 2013 Tangjitsitcharoen, S. [10] ได้มีการพัฒนาแบบจำลองโดยใช้แรงตัดพลวัตโดยศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวของชิ้นงานและอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นจริงในขณะตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยค่าความขรุขระผิวจะถูกแสดงในรูปสมการถดถอยพหุคูณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดของอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัตและเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด รัศมีจุมุมมีด และความลึกตัด ของโดยใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้ไดนามิเตอร์ในการวัดแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นจริงในขณะตัด จากการทดลองเมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่พบว่าค่าความถี่ทั้งสองมีความสอดคล้องใกล้เคียงกัน จึงสามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ได้ในโดเมนเวลาโดยการคำนวณพื้นที่แรงตัดพลวัตโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูและสร้างเป็นแบบจำลองค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัด โดยแบบจำลองนี้มีค่าความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวอยู่ที่ 90.3% ซึ่งมีค่าความแม่นยำสูงกว่าการพยากรณ์โดยใช้แรงตัดสถิต

แนวโน้มของงานวิจัยในปัจจุบันมุ่งเน้นที่จะลดปริมาณการใช้สารหล่อเย็นเพื่อผลกระทบที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมและลดต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการผลิต ในปี 2010 Tangjitsitcharoen, S., Rungruang, C. และ Laiaddee, D. [2] จึงเกิดงานวิจัยเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการกัดเหล็กกล้าคาร์บอนแบบหวับอด โดยการใช้สารหล่อเย็น 3 แบบคือ แบบแห้ง, แบบเปียก และแบบละออง เพื่อศึกษาอายุมีดตัดและความขรุขระผิวของชิ้นงานสัมพันธ์กับเงื่อนไขการกัด ได้แก่ ความเร็วในการกัด, อัตราป้อน, ความลึกในการกัด, และเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด รวมถึงการสร้างแบบจำลองสำหรับต้นทุนที่ใช้ในการกัดทั้งสามแบบสัมพันธ์กับอายุมีดตัด, ระยะเวลาในการกัด และเงื่อนไขการกัด ได้แก่ ความเร็วการกัด, อัตราป้อน และ ความลึกตัด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากผลการทดลองพบว่าเมื่อค่าความเร็วกัดสูงขึ้น ค่าความขรุขระผิวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้มีดสึกหรอมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มค่าความลึกในการกัดจะมีผลทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลงเนื่องจากพื้นที่การกัดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความร้อนถ่ายเทได้ดี

ขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าแรงตัดที่ระยะเวลา 30 นาทีพบว่าการตัดแบบแห้งใช้แรงตัดมากที่สุด เนื่องจากหน้าสัมผัสระหว่างมีดตัดและชิ้นงานมีค่ามากซึ่งเป็นผลมาจากการตัดแบบแห้งจะเกิดการสึกหรอของมีดตัดมากที่สุด และเมื่อตัดต่อเนื่องจนถึงระยะเวลา 60 นาทีพบว่าการตัดแบบแห้งจะใช้แรงในการตัดน้อยที่สุดเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะตัดส่งผลให้ชิ้นงานอ่อนนุ่มและทำให้คุณสมบัติเหมาะสมแก่การตัดเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นพบว่าการกัดแบบละเอียดของใช้ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการกัดแบบอื่นและพบว่าเงื่อนไขการกัดที่เหมาะสมที่สุดเกิดขึ้นที่ความเร็วการกัด 10,000 รอบต่อนาที, ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร, อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อฟัน และความหนาแน่นละเอียดของ 5.5 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อมาในปี 2011 สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และ ชาญรงค์ รุ่งเรือง [3] ได้มีการวิจัยและพัฒนาการศึกษาเงื่อนไขการกัดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกัดอะลูมิเนียมแบบหวับอลแบบใช้ลมเป่าและแบบเปียก โดยใช้เงื่อนไขการกัด ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราการป้อนตัด และความลึกตัด เพื่อใช้ในการลดต้นทุนค่าสารหล่อเย็นและลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้เทคนิคบ็อกซ์-เบห์นเคน ในการวิเคราะห์หาค่าความขรุขระผิว ปริมาณสารปนเปื้อนในพื้นที่ทำงานและต้นทุนการใช้สารหล่อเย็น และสร้างแบบจำลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองระหว่างค่าความขรุขระผิวและเงื่อนไขการกัดพบว่า การใช้ความลึกในการตัดสูงขึ้นจะทำให้ค่าความขรุขระผิวต่ำลงเนื่องจากเมื่อความลึกในการตัดสูงขึ้นจะทำให้เกิดการคายความร้อนที่ผิวตัดมากขึ้น ทำให้มีดสึกหรอช้าลง ในขณะที่ถ้าเพิ่มอัตราการป้อนจะทำให้ค่าความขรุขระผิวสูงขึ้น เนื่องจากเกิดแรงตัดสูงขึ้น และนอกจากนี้หากเปรียบเทียบระหว่างการกัดแบบใช้ลมเป่าและแบบเปียกพบว่าการกัดแบบเปียกให้ความขรุขระผิวน้อยกว่าแบบลมเป่าเนื่องจากสารหล่อเย็นทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวตัดทำให้มีดสึกหรอช้าลงและสารหล่อเย็นยังช่วยหล่อลื่นให้การเฉือนตัดง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามหากวิเคราะห์ต้นทุนจากการใช้สารหล่อเย็นและปริมาณสารปนเปื้อนที่เกิดขึ้นพบว่าเงื่อนไขการกัดที่เหมาะสมซึ่งทำให้เกิดต้นทุนต่ำที่สุดและค่าความขรุขระผิวยังคงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้คือการตัดแบบใช้ลมเป่าที่ความเร็วรอบ 2,180 รอบต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ต่อมาในปี 2012 Karunasawat, K. และ Tangjitsitcharoen [4] เกิดงานวิจัยซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการสร้างสมการเพื่อหาค่าความขรุขระผิวน้อยสุดในการกัดอะลูมิเนียมแบบหวับอลโดยใช้ลมเป่าเพื่อลดการใช้สารหล่อเย็น โดยใช้เงื่อนไขในการกัด 5 ปัจจัยคือ ความเร็วในการกัด, อัตราการป้อน, เส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด, ความลึกในการกัดและความดันของลมเป่า โดยใช้ไดนามิเตอร์ติดตั้งบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 5 แกน เพื่อวัดแรงกัดที่เกิดขึ้น ในบทความนี้จะใช้การทดลองแบบเทคนิคบ็อกซ์-เบห์นเคน

และสร้างแบบจำลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความดันของลมเป่าเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้อุณหภูมิในการตัดลดลงและเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ต้องใช้แรงตัดมากขึ้น ทำให้เกิดความขรุขระผิวมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มอัตราการป้อนและความลึกในการกัดส่งผลให้ทำให้เกิดความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ในทางกลับกันเมื่อความเร็วในการกัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความขรุขระผิวลดลง และจากการทดลองพบว่าค่าความขรุขระผิวน้อยสุดเกิดขึ้นที่ความเร็วในการกัด 2,600 รอบต่อนาที, อัตราการป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ, เส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด 6.0 มิลลิเมตร, ความลึกในการกัด 0.75 มิลลิเมตร และความดันของลมเป่า 0.3 เมกะปาสคาล

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสมการเพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่เกิดขึ้นจริงในขณะตัดโดยใช้อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัต ซึ่งได้จากตัวแปรต้นคือเงื่อนไขการตัดต่างๆ ประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราการป้อน ความลึกตัดและเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด และมีตัวแปรตามที่มีผลจากปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษา คือ ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะกัด

3.2 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวของชิ้นงาน

ในการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้กระบวนการกัดนั้น ปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานคือ ความขรุขระผิวของชิ้นงาน จากงานวิจัยในอดีตพบว่าแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการจะส่งผลโดยตรงกับค่าความขรุขระผิว โดยมีปัจจัยอื่นๆเป็นองค์ประกอบ อย่างไรก็ตามปัจจัยต่างๆเหล่านั้นเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ โดยจะทำการกำหนดปัจจัยที่ไม่ต้องการศึกษาให้เป็นปัจจัยคงที่และศึกษาปัจจัยจากวิธีการเป็นหลัก

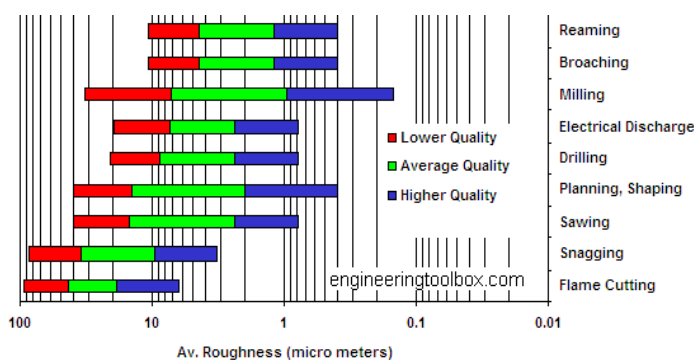
จากงานวิจัยในอดีตพบว่าเงื่อนไขการตัดต่างๆ ได้แก่ ความเร็วรอบ, ความลึกตัด อัตราการป้อน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด ส่งผลโดยตรงต่อความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัดในงานวิจัยนี้จึงใช้เงื่อนไขการตัดเหล่านี้มาเป็นตัวแปรต้นในการทดลอง

3.2.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ระดับของปัจจัยจะถูกกำหนดเป็นแบบค่าคงที่ ซึ่งในแต่ละปัจจัยแบ่งออกเป็น 2 ระดับและ 3 ระดับ โดยอาศัยข้อมูลทางด้านเทคนิคของบริษัทผู้ผลิตมีดตัดที่แนะนำจากคู่มือการใช้งานมีดตัดโดยกำหนดให้ดังนี้

1. ความเร็วรอบการตัด เลือกว่าใช้ที่ระดับ 8,000 10,000 และ 12,000 รอบต่อนาที
2. ความลึกตัด เลือกว่าใช้ที่ระดับ 0.5, 0.7 และ 0.9 มิลลิเมตร
3. อัตราการป้อนตัด เลือกว่าใช้ที่ระดับ 0.02, 0.04 และ 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ
4. เส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด เลือกว่าใช้ที่ 6 และ 10 มิลลิเมตร

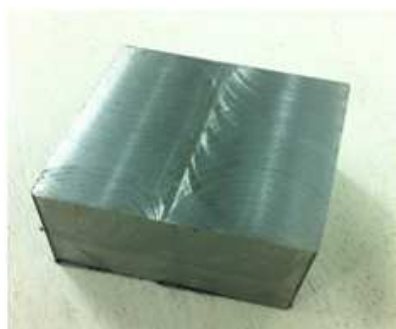
เกณฑ์การเลือกเงื่อนไขการตัดจะเลือกเงื่อนไขที่ให้ค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 0.9 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 4287-1997 เนื่องจากอยู่ในช่วงที่ให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานดีและนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการความขรุขระผิวที่มีคุณภาพสูงได้



รูปที่ 3.1 ความขรุขระของผิวสำหรับกระบวนการผลิต [21]

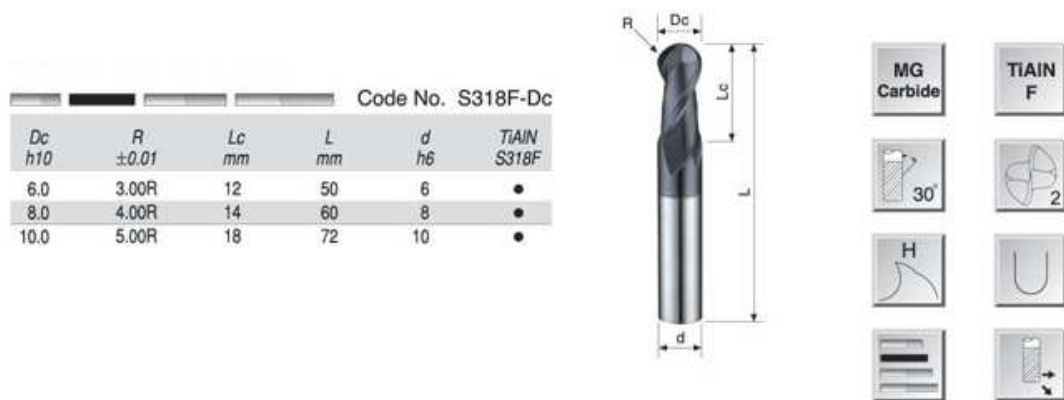
3.3 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. วัสดุชิ้นงาน ที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (S50C) ซึ่งมีขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร และสูง 45 มิลลิเมตร โดยวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง จะกำหนดให้มีค่าความแข็งเท่ากันเพื่อเป็นการลดปัจจัยในการศึกษาลงเนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาถึงค่าความแข็งของชิ้นงาน



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

2. มีดตัด เป็นมีดตัดแบบหัวบอล (Ball End Milling) ชนิดคาร์ไบด์ 2 ฟันกัดเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 และ 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 มีดตัดแบบหัวบอล

3. เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ที่ใช้ในการทำการทดลองตัดชิ้นงานเป็นชนิด 5 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น Variaxis 500-5X



รูปที่ 3.4 เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน

4. เซนเซอร์วัดแรงหรือไดนาโมมิเตอร์ ยี่ห้อ Kistler รุ่น 9257B สำหรับวัดแรงตัด



รูปที่ 3.5 ไดนาโมมิเตอร์สำหรับวัดแรงตัด

5. ชาร์จแอมป์ไฟเออร์หรือเครื่องขยายสัญญาณ ยี่ห้อ Kistler รุ่น 5073 สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด



รูปที่ 3.6 ชาร์จแอมป์ไฟเออร์สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด

6. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL 750 ใช้สำหรับแสดงค่าสัญญาณและบันทึกค่าที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด



รูปที่ 3.7 ออสซิลโลสโคปสำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัด

7. เครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน (Roughness tester) ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-400 ใช้สำหรับวัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน

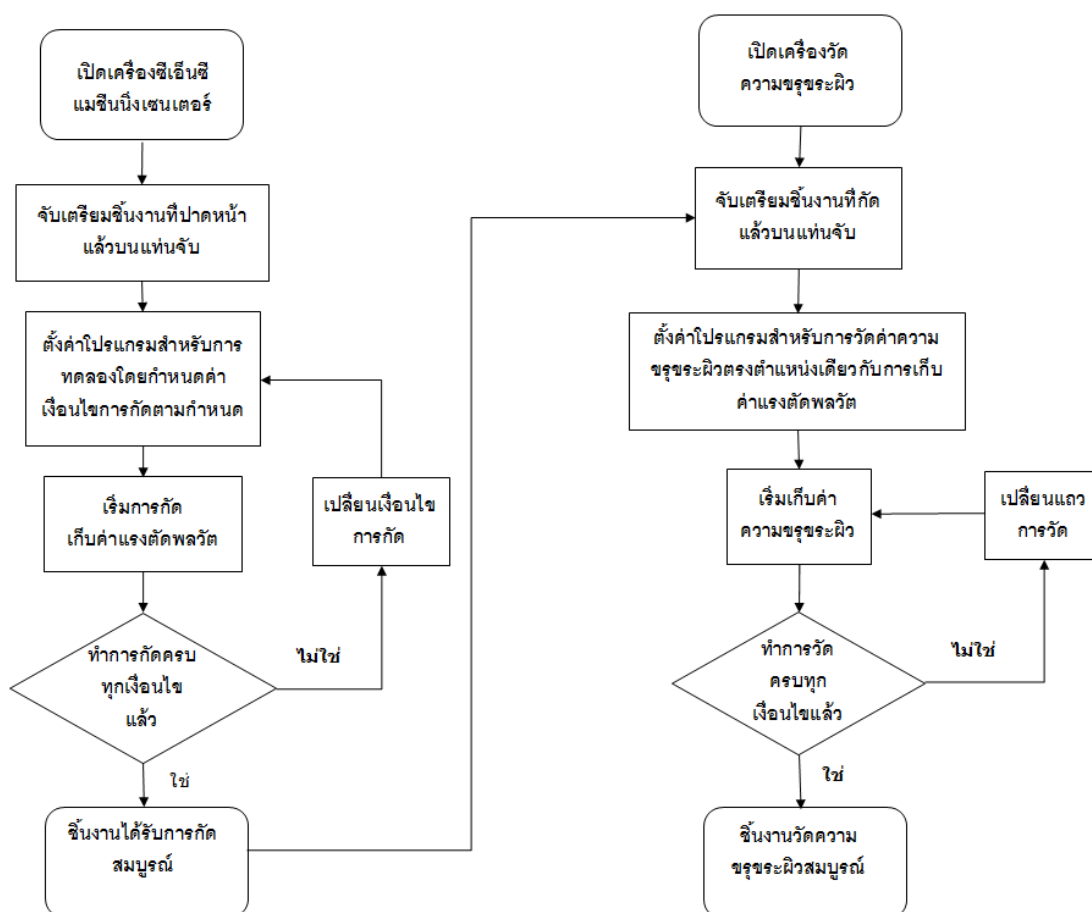
โดยค่าความไม่แน่นอนของเซนเซอร์และเครื่องมือวัดแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าความไม่แน่นอนของเซนเซอร์และเครื่องมือวัด

เครื่องมือวัด	รุ่น	ค่าความไม่แน่นอน
เซนเซอร์วัดแรงตัด	Kistler 9257B	0.2 N
ออสซิลโลสโคป	YOKOGAWA DL 750	2.0%
เครื่องขยายสัญญาณ	Kistler 5073	0.5%
เครื่องวัดความขรุขระผิว	Mitutoyo SJ-400	0.2 μm

3.4 วิธีการทดลองและการเก็บข้อมูล

งานวิจัยนี้เป็นกระบวนการกักแบบแห้งโดยมีขั้นตอนการทดลองของการวิจัยในแต่ละเงื่อนไขการตัดดังรูป



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

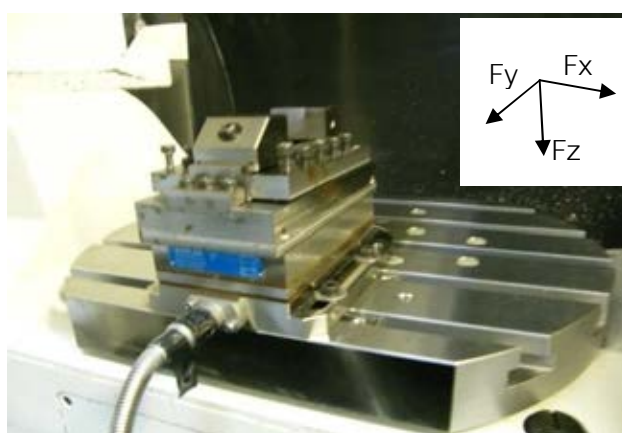
ในการเก็บข้อมูลนั้นจะทำการเก็บข้อมูลค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานและแรงตัดพลวัตจากชิ้นงานตามเงื่อนไขของการกัด โดยจะเก็บค่าดังต่อไปนี้

- แรงตัดพลวัตในแนว X (F_x)
- แรงตัดพลวัตในแนว Y (F_y)
- แรงตัดพลวัตในแนว Z (F_z)
- ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z)

โดยค่าแรงที่เก็บได้ทั้ง 3 แกนมีหน่วยเป็น นิวตัน (N) และค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร (μm) แล้วนำเงื่อนไขต่างๆไปทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระผิวกับอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตในแนวป้อน (F_x) และในแนวตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน (F_z) เนื่องจากทั้งสองแรงนี้มีอิทธิพลโดยตรงกับการเกิดความขรุขระผิวชิ้นงาน

วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลในแต่ละเงื่อนไขการตัดมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรงเพื่อใช้ในการวัดแรงตัดชิ้นงานบนฐานของแท่นจับชิ้นงานเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์



รูปที่ 3.10 การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรง

2. เชื่อมต่อไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรงกับเครื่องขยายสัญญาณเพื่อขยายสัญญาณของแรงตัดที่ได้ จากนั้นจึงต่อเครื่องขยายสัญญาณเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคปเพื่อแสดงและบันทึกสัญญาณที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.11 การเชื่อมต่อสายไดนาโมมิเตอร์กับเครื่องขยายสัญญาณและเครื่องออสซิลโลสโคป

3. ปรับตั้งค่าเครื่องออกซิลโลสโคป โดยตั้งค่าต่างๆ ดังนี้
 - Low-pass filter = 5,000 Hz
 - Sampling rate = 10,000 Sampling/second
4. เปิดเครื่องกักซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซนเตอร์และนำชิ้นงานที่จะใช้ในการกักจับบนแท่นยึดจับชิ้นงานซึ่งอยู่ในเครื่อง จากนั้นจึงทำการปาดหน้าชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานได้ระนาบเดียวกัน



รูปที่ 3.12 การเตรียมชิ้นงาน

5. ตั้งค่าโปรแกรมตามแต่ละเงื่อนไขการกัก จากนั้นจึงทำการกักและบันทึกสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะที่กักจากเครื่องออกซิลโลสโคปเพื่อนำมาวิเคราะห์ต่อไป

ในการทดลองนั้นชุดข้อมูลที่ได้ออกมาจะอยู่ในหน่วยโวลท์ และต้องทำการแปลงหน่วยในส่วนของสัญญาณแรงตัด ตามค่า Sensitivity ได้ต่อไปนี้

- แรงตัดในแนวแกน X (F_x (N)) = V_x (Volt) x 200 (N/Volt)
- แรงตัดในแนวแกน Y (F_y (N)) = V_y (Volt) x 200 (N/Volt)
- แรงตัดในแนวแกน Z (F_z (N)) = V_z (Volt) x 200 (N/Volt)

6. นำชิ้นงานที่ได้จากการกักมาติดตั้งบนเครื่องวัดความขรุขระผิวเพื่อวัดค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย โดยปรับตั้งค่าช่วงความยาวจำกัด (Cut off length) ของเครื่องวัดความขรุขระผิวเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตรแล้วนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ต่อไป

3.5 การออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้จะประกอบด้วยปัจจัยหลัก 4 ปัจจัย ในแต่ละปัจจัยมี 2 และ 3 ระดับ แสดงดังตารางที่ 3.1 เป็นการตัดแบบแห้งโดยมีจำนวนครั้งในการทำการทดลองทั้งหมด 54 การทดลอง ในแต่ละการทดลองมีการบันทึกผลค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน และแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกัด

ตารางที่ 3.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ			สัญลักษณ์
1. ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	8,000	10,000	12,000	V
2. อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.02	0.04	0.06	f
3. ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.5	0.7	0.9	d
4. เส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด (มิลลิเมตร)	6	-	10	D

ตารางที่ 3.3 เมตริกซ์การออกแบบการทดลอง

Run No.	Order	D	d	f	v	AFx/AFz	Ra	Rz
1	40	10	0.7	0.04	8000			
2	27	6	0.9	0.06	12000			
3	37	10	0.7	0.02	8000			
4	18	6	0.7	0.06	12000			
5	32	10	0.5	0.04	10000			
6	5	6	0.5	0.04	10000			
7	12	6	0.7	0.02	12000			
8	17	6	0.7	0.06	10000			
9	22	6	0.9	0.04	8000			
10	25	6	0.9	0.06	8000			
11	30	10	0.5	0.02	12000			
12	43	10	0.7	0.06	8000			
13	51	10	0.9	0.04	12000			
14	47	10	0.9	0.02	10000			
15	2	6	0.5	0.02	10000			
16	10	6	0.7	0.02	8000			
17	15	6	0.7	0.04	12000			
18	35	10	0.5	0.06	10000			
19	19	6	0.9	0.02	8000			
20	54	10	0.9	0.06	12000			
21	49	10	0.9	0.04	8000			
22	39	10	0.7	0.02	12000			
23	8	6	0.5	0.06	10000			
24	28	10	0.5	0.02	8000			
25	45	10	0.7	0.06	12000			
26	53	10	0.9	0.06	10000			
27	3	6	0.5	0.02	12000			

Run No.	Order	D	d	f	v	AFx/AFz	Ra	Rz
28	7	6	0.5	0.06	8000			
29	23	6	0.9	0.04	10000			
30	29	10	0.5	0.02	10000			
31	1	6	0.5	0.02	8000			
32	52	10	0.9	0.06	8000			
33	21	6	0.9	0.02	12000			
34	33	10	0.5	0.04	12000			
35	4	6	0.5	0.04	8000			
36	31	10	0.5	0.04	8000			
37	41	10	0.7	0.04	10000			
38	48	10	0.9	0.02	12000			
39	6	6	0.5	0.04	12000			
40	50	10	0.9	0.04	10000			
41	13	6	0.7	0.04	8000			
42	16	6	0.7	0.06	8000			
43	38	10	0.7	0.02	10000			
44	44	10	0.7	0.06	10000			
45	46	10	0.9	0.02	8000			
46	11	6	0.7	0.02	10000			
47	14	6	0.7	0.04	10000			
48	26	6	0.9	0.06	10000			
49	34	10	0.5	0.06	8000			
50	42	10	0.7	0.04	12000			
51	9	6	0.5	0.06	12000			
52	20	6	0.9	0.02	10000			
53	36	10	0.5	0.06	12000			
54	24	6	0.9	0.04	12000			

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.6.1 การแปลงสัญญาณ

หลังจากทำการทดลองสามารถนำแรงตัดพลวัตที่ได้มาทำการแปลงเป็นโดเมนความถี่โดยใช้สัญญาณที่ได้จากการทดลองในโดเมนเวลาด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วเพื่อหาความสัมพันธ์ของสัญญาณทั้งสองและนำไปวิเคราะห์ในโดเมนเวลาต่อไป

3.6.2 การหาพื้นที่ใต้กราฟแรงตัดพลวัต

แรงตัดพลวัตที่ได้ถูกทำการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่แล้วจะถูกนำมาหาค่าพื้นที่ใต้กราฟของข้อมูลในขณะตัดที่โดเมนเวลา โดยจะนำอัตราส่วนพื้นที่ของแรงตัดพลวัตในแนวป้อน (F_x) และในแนวตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน (F_z) ในขณะตัดที่โดเมนเวลา เป็นปัจจัยในการสร้างสมการความสัมพันธ์ต่อไป

3.6.3 การตรวจสอบการแจกแจงความเป็นปกติของข้อมูล

สร้างกราฟค่าของส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าความน่าจะเป็นสะสม P_k ($P_k = (K-1/2)n$) หรือ Normal Probability Plot โดยใช้ค่า $P_k \times 100$ อยู่บนแกนตั้ง และค่าส่วนตกค้าง (Residual) อยู่ในแกนนอน ทั้งนี้เพื่อทดสอบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างปกติ โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

H_0 : ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

H_a : ข้อมูลไม่กระจายตัวแบบปกติ

ถ้าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) ข้อมูลควรมีการเรียงตัวกันในแนวเส้นตรง ลักษณะของการเกิดจุดจะต้องไม่รวมเป็นกลุ่มและความห่างระหว่างจุดแต่ละจุดควรมีความใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้จะยอมรับความผิดพลาดที่ 5% ดังนั้นหากได้ค่า $P\text{-Value} > 0.05$ จึงยอมรับสมมติฐาน นั่นคือข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

3.6.4 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

สร้างกราฟระหว่างส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล โดยที่ลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอนและค่าส่วนตกค้าง (Residual) อยู่บนแกนตั้ง โดยค่า

ความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ควรเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ซึ่งลักษณะข้อมูลที่เหมาะสมนั้นควรจะกระจายตัวอยู่อย่างกระจัดกระจายไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน

3.6.5 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

สร้างกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) โดยที่ค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) อยู่บนแกนนอน และค่าส่วนตกค้าง (Residual) อยู่บนแกนตั้ง เพื่อทดสอบการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของข้อมูลก่อนการนำไปใช้งาน ถ้ากราฟที่สร้างขึ้นมา มีการกระจายตัวอย่างกระจัดกระจาย แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนและไม่มี ความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นซึ่งมีความเหมาะสมที่จะสามารถนำไปใช้งานได้

3.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูลของการออกแบบการทดลอง

เมื่อพิสูจน์ได้ว่ากลุ่มประชากรที่มีการแจกแจงปกติ, เป็นอิสระจากกัน และมีความเสถียรของความแปรปรวนจึงสามารถใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวในการวิเคราะห์ ข้อมูลของการทดลองได้ โดยเขียนเป็นสมมติฐานทางสถิติได้ดังนี้

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

$$H_a: \text{มี } \mu \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน}$$

การทดลองนี้ทดสอบโดยใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% (α เท่ากับ 0.05) โดยจะคำนวณค่า P-Value ของสมการพหุการณ์ หากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะแสดงว่าปัจจัยที่เลือกมาใช้ในสมการมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นจึงนำข้อมูลมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) และ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่า (Adjusted R-squared) หากค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันและมีค่ามากแสดงว่าตัวแปรที่ใช้ในสมการพหุการณ์ มีความเหมาะสม จึงนำข้อมูลดังกล่าวมาทดสอบสัมประสิทธิ์โดยตั้งสมมติฐานว่า

$$H_0: \beta_j = 0$$

$$H_a: \beta_j \neq 0$$

จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นส่งผลต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อสมการพหุการณ์

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการตัด ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกตัดและเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด ที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัต โดยแยกวิเคราะห์เป็นหัวข้อต่างๆตามพารามิเตอร์ในการตัดต่อผลตอบดังนี้

4.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองเพื่อใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน แสดงในตารางที่ 4.1 โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการทดลองและผลตอบที่ทำการพิจารณาดังต่อไปนี้

ปัจจัยในการทดลอง

1. ความเร็วรอบ (v) หน่วย รอบต่อนาที
2. อัตราป้อน (f) หน่วย มิลลิเมตรต่อรอบ
3. ความลึกตัด (d) หน่วย มิลลิเมตร
4. เส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด (D) หน่วย มิลลิเมตร

ผลตอบในการทดลอง

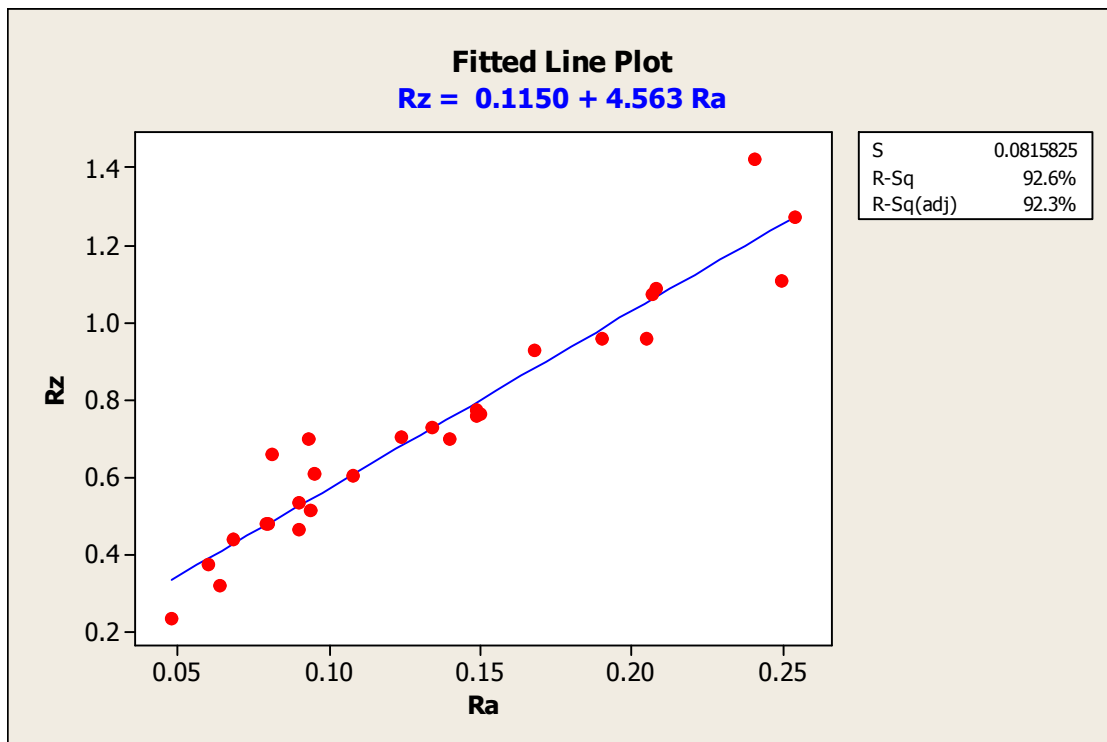
1. ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) หน่วย ไมโครเมตร
2. อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัต (AF_x/AF_z)

ในการวิเคราะห์ค่าความขรุขระผิวจะวิเคราะห์ค่าความขรุขระผิวทั้ง 2 ค่า คือ ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) และ ค่าความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) และเนื่องจากผลตอบของความขรุขระผิวทั้ง 2 ค่าอาจมีความสัมพันธ์กัน จึงทำการทดสอบโดยการสร้างสมการความสัมพันธ์ของค่าทั้งสอง และหากสมการความสัมพันธ์ที่ได้มีค่า $R-Sq$ (adj) สูงแสดงว่าผลตอบของค่าความขรุขระผิวทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง

Run No.	Order	D	d	f	v	AFx/AFz	Ra	Rz
1	40	10	0.7	0.04	8000	2.9232	0.133	0.703
2	27	6	0.9	0.06	12000	4.8356	0.329	1.399
3	37	10	0.7	0.02	8000	2.0166	0.075	0.413
4	18	6	0.7	0.06	12000	3.5833	0.194	1.035
5	32	10	0.5	0.04	10000	2.4666	0.105	0.538
6	5	6	0.5	0.04	10000	1.9219	0.072	0.465
7	12	6	0.7	0.02	12000	2.1179	0.078	0.489
8	17	6	0.7	0.06	10000	3.0426	0.145	0.707
9	22	6	0.9	0.04	8000	2.9980	0.140	0.792
10	25	6	0.9	0.06	8000	3.9100	0.205	1.170
11	30	10	0.5	0.02	12000	2.0680	0.077	0.457
12	43	10	0.7	0.06	8000	3.4264	0.180	1.000
13	51	10	0.9	0.04	12000	4.3411	0.269	1.342
14	47	10	0.9	0.02	10000	2.5004	0.105	0.595
15	2	6	0.5	0.02	10000	1.5575	0.051	0.248
16	10	6	0.7	0.02	8000	1.4683	0.056	0.347
17	15	6	0.7	0.04	12000	3.6425	0.128	0.785
18	35	10	0.5	0.06	10000	3.4187	0.173	0.829
19	19	6	0.9	0.02	8000	1.9302	0.071	0.455
20	54	10	0.9	0.06	12000	5.0433	0.458	1.938
21	49	10	0.9	0.04	8000	3.2098	0.152	0.860
22	39	10	0.7	0.02	12000	2.5776	0.111	0.608
23	8	6	0.5	0.06	10000	2.4250	0.094	0.552
24	28	10	0.5	0.02	8000	1.7769	0.054	0.320
25	45	10	0.7	0.06	12000	4.4643	0.290	1.447
26	53	10	0.9	0.06	10000	4.5685	0.317	1.623
27	3	6	0.5	0.02	12000	1.6548	0.058	0.332

Run No.	Order	D	d	f	v	AFx/AFz	Ra	Rz
28	7	6	0.5	0.06	8000	2.1383	0.079	0.480
29	23	6	0.9	0.04	10000	3.2018	0.168	0.927
30	29	10	0.5	0.02	10000	1.9559	0.060	0.371
31	1	6	0.5	0.02	8000	1.5217	0.048	0.234
32	52	10	0.9	0.06	8000	4.0911	0.241	1.422
33	21	6	0.9	0.02	12000	2.5621	0.093	0.698
34	33	10	0.5	0.04	12000	3.2398	0.140	0.696
35	4	6	0.5	0.04	8000	1.8686	0.064	0.317
36	31	10	0.5	0.04	8000	2.0709	0.090	0.462
37	41	10	0.7	0.04	10000	3.2501	0.149	0.760
38	48	10	0.9	0.02	12000	3.2005	0.149	0.772
39	6	6	0.5	0.04	12000	2.7124	0.094	0.513
40	50	10	0.9	0.04	10000	3.6841	0.208	1.087
41	13	6	0.7	0.04	8000	2.8510	0.095	0.610
42	16	6	0.7	0.06	8000	2.9729	0.134	0.725
43	38	10	0.7	0.02	10000	2.0312	0.080	0.478
44	44	10	0.7	0.06	10000	3.9696	0.250	1.108
45	46	10	0.9	0.02	8000	2.1093	0.090	0.534
46	11	6	0.7	0.02	10000	1.9066	0.068	0.439
47	14	6	0.7	0.04	10000	2.8250	0.108	0.604
48	26	6	0.9	0.06	10000	4.1713	0.254	1.275
49	34	10	0.5	0.06	8000	3.3646	0.150	0.761
50	42	10	0.7	0.04	12000	3.5824	0.190	0.958
51	9	6	0.5	0.06	12000	3.3749	0.124	0.701
52	20	6	0.9	0.02	10000	2.3639	0.081	0.658
53	36	10	0.5	0.06	12000	3.6673	0.207	1.071
54	24	6	0.9	0.04	12000	4.1207	0.205	0.956



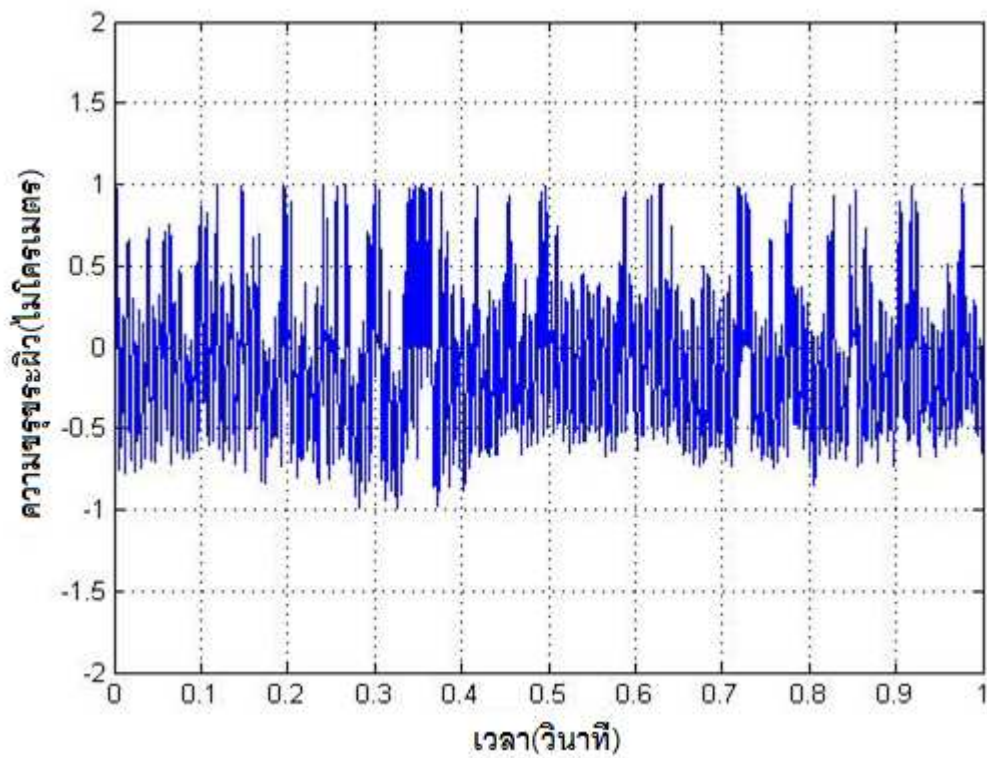
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ra และ Rz

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ra และ Rz พบว่าค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 92.3% จึงสามารถอธิบายได้ว่า Ra กับ Rz มีความสัมพันธ์กัน นั่นคือ ค่า Ra ที่เปลี่ยนแปลงไป ก็จะส่งผลให้ Rz เปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นกัน

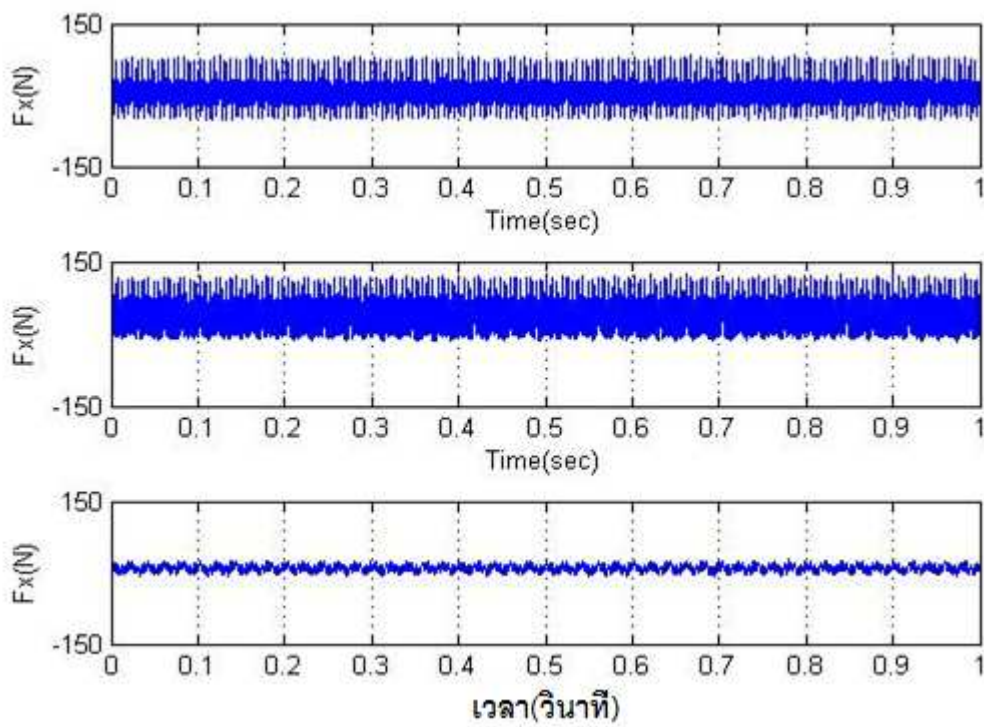
4.2 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่

การนำสัญญาณแรงตัดพลวัตที่ได้มาสร้างสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว เริ่มจากหาความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองโดยการแปลงสัญญาณแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวที่อยู่ในโดเมนเวลาให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของสัญญาณทั้งสองก่อน

ตัวอย่างผลการทดลองที่ใช้เงื่อนไขการตัดดังนี้ ความเร็วตัด 10,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.9 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.2 ลักษณะข้อมูลค่าความขรุขระมือในโดเมนเวลา



รูปที่ 4.3 ลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา

การวิเคราะห์ข้อมูลในโดเมนเวลาเพื่อหาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัต โดยใช้ระยะทางการตัดในเวลา 1 วินาทีในการอ้างอิงเปรียบเทียบ พบว่าทั้งความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตมีจำนวนลูกคลื่นที่สอดคล้องกัน ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตมีความถี่เดียวกัน แต่เนื่องจากอัตราส่วนของแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวไม่เท่ากัน โดยแรงตัดพลวัตใช้อัตราส่วนเท่ากับ 10,000 ข้อมูลต่อวินาที แต่ความขรุขระผิวใช้อัตราส่วนเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที ดังนั้นการเปรียบเทียบด้วยระยะทางในการตัด 1 วินาทีจะต้องแปลงจำนวนข้อมูลของค่าความขรุขระผิวก่อนเพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลแรงตัดพลวัตดังนี้

1. ความเร็วป้อน (มิลลิเมตรต่อนาที) สำหรับใช้หาระยะทางการตัด สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\text{ความเร็วป้อน (Vf)} = \text{อัตราป้อน (f)} \times \text{ความเร็รรอบ (v)} \quad (4.2-1)$$

จากตัวอย่างข้างต้นจะได้

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วป้อน (Vf)} &= 0.06 \times 10000 \\ &= 600 \quad \text{มิลลิเมตรต่อนาที} \end{aligned}$$

2. ระยะทางในการตัด 1 วินาที (มิลลิเมตรต่อวินาที) ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างค่าความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัต สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{ระยะทางในการตัด 1 วินาที (S)} &= \text{Vf} / 60 \\ &= 600 / 60 \\ &= 10 \quad \text{มิลลิเมตร} \end{aligned} \quad (4.2-2)$$

3. การคำนวณจำนวนข้อมูลเพื่อใช้ในการแปลงค่า

ในการวัดความขรุขระผิวได้ตั้งค่าให้เข็มวัดความขรุขระผิวให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตรใน 1 วินาที โดยเครื่องวัดความขรุขระผิวใช้อัตราส่วนเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที ดังนั้นสามารถคำนวณจำนวนข้อมูลที่ใช้ในเวลา 1 วินาทีของค่าความขรุขระผิวเพื่อใช้เทียบกับจำนวนข้อมูลของแรงตัดพลวัตได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนข้อมูล} &= (\text{ระยะทางในการตัด 1 วินาที} / 0.5) \times 400 \\ &= (10 / 0.5) \times 400 \\ &= 8000 \quad \text{ข้อมูล} \end{aligned}$$

หลังจากการคำนวณจำนวนข้อมูลของค่าความขรุขระผิว สามารถนำค่าที่คำนวณได้ไปใช้ในการแปลงสัญญาณทั้งสองให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่ได้

ตัวอย่างการแปลงสัญญาณให้อยู่ในโดเมนความถี่

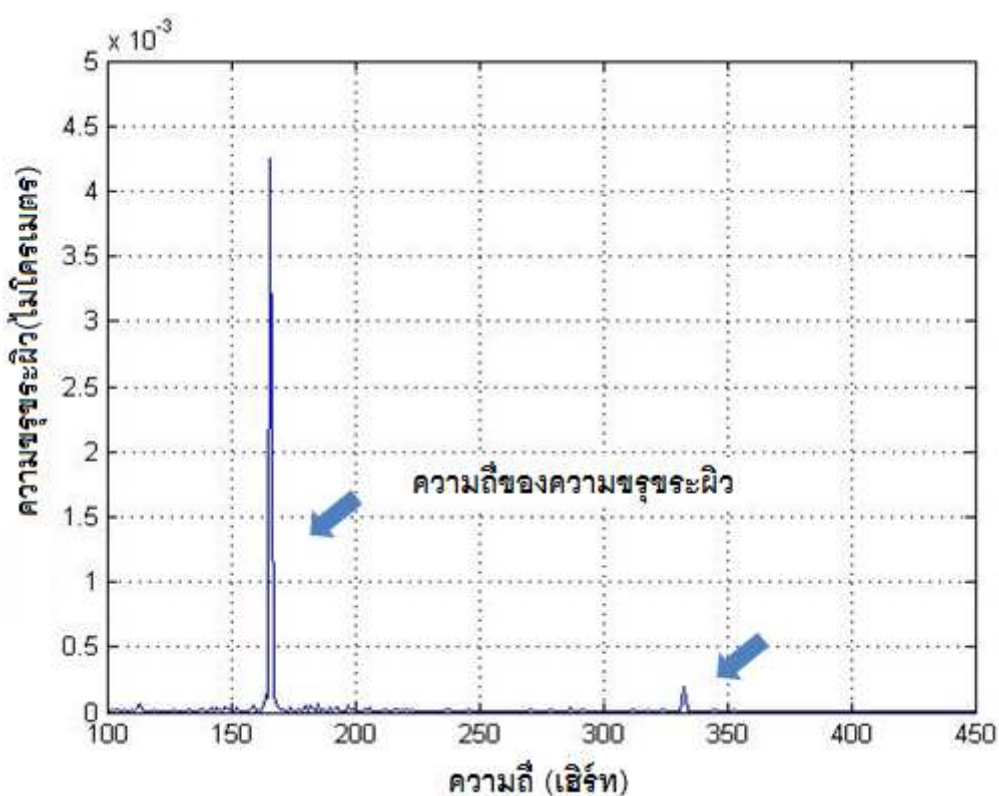
$$\text{ความถี่ที่เกิดขึ้นจากฟันกั๊ดที่ 1 คำนวณจาก} \quad fq = \frac{v}{60} \quad (4.2-3)$$

$$\text{ความถี่ที่เกิดขึ้นจากฟันกั๊ดที่ 2 คำนวณจาก} \quad fq = \frac{v}{60} \times 2 \quad (4.2-4)$$

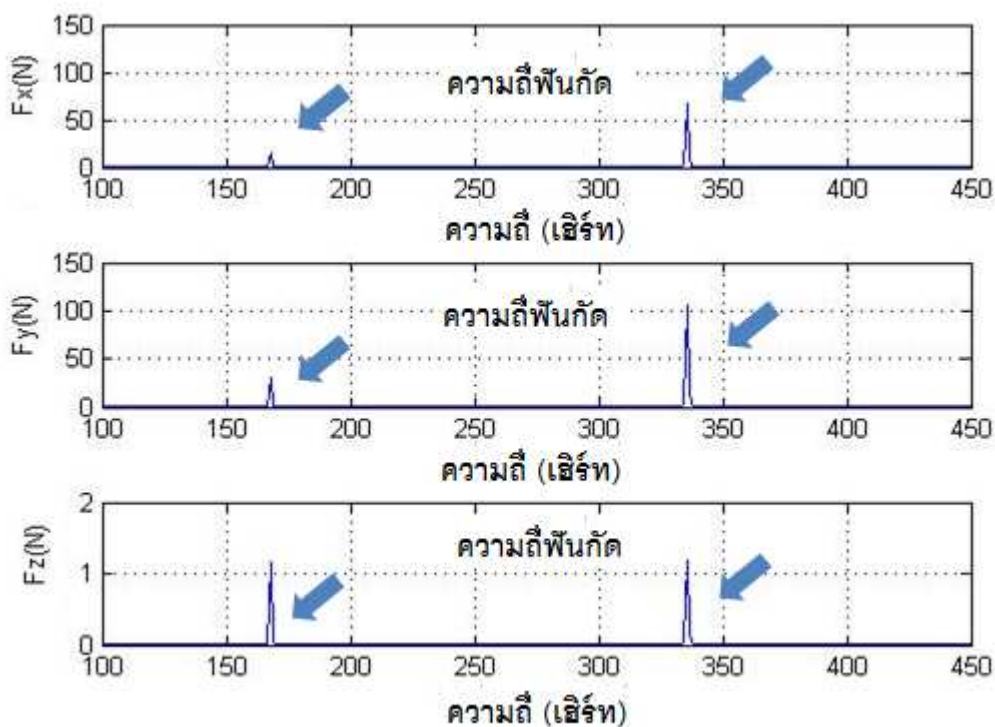
เมื่อ fq คือ ความถี่ในการตัดในเวลา 1 วินาที (เฮิรตซ์)

v คือ ความเร็วรอบตัด (รอบต่อนาที)

จากการคำนวณตัวอย่างควรได้ความถี่ที่เกิดจากฟันที่ 1 คือ $fq = 10000/60 = 166$ เฮิรตซ์และความถี่ที่เกิดจากฟันที่ 2 คือ $fq = 10000 \times 2 / 60 = 333$ เฮิรตซ์ตามลำดับ รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างพาวเวอร์สเปกตรัมและการทดสอบความถี่ของการตัด ซึ่งได้จากการนำข้อมูลจากผลการทดลองมาวิเคราะห์โดยอาศัยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast flourier transform)



รูปที่ 4.4 ลักษณะข้อมูลค่าความขรุขระผิวในโดเมนความถี่



รูปที่ 4.5 ลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่

จากผลการทดลองพบว่าสัญญาณทั้งสองเกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกัน จึงมีความเป็นไปได้ว่าสัญญาณทั้งสองมีความสัมพันธ์กันและสามารถนำข้อมูลในโดเมนเวลามาวิเคราะห์ต่อไปได้

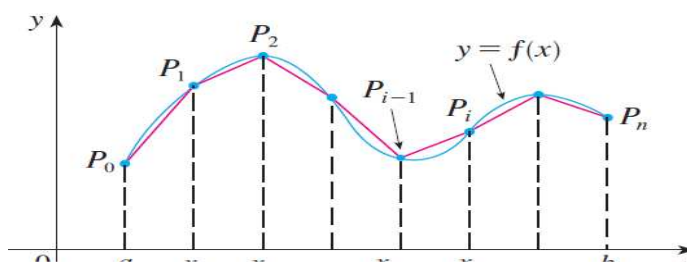
รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวและเงื่อนไขการตัดอื่นๆในโดเมนเวลาและความถี่แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

4.3 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา

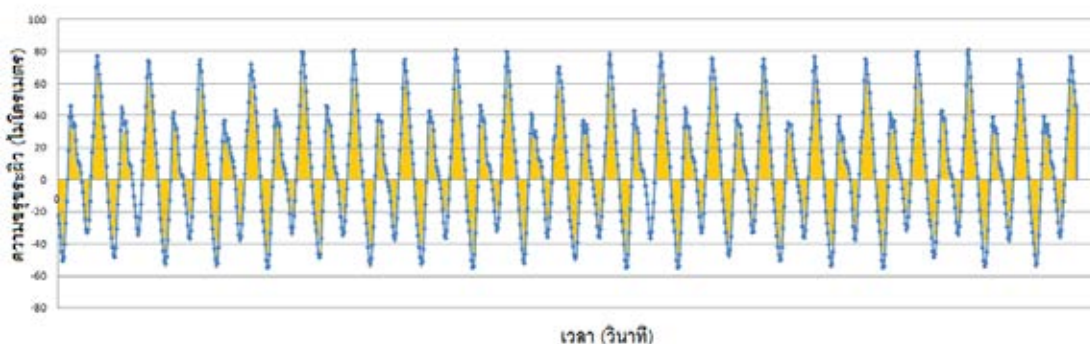
หลังจากการวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวในโดเมนความถี่ พบว่าค่าความถี่ของสัญญาณทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าสัญญาณทั้งสองมีความสัมพันธ์กันในโดเมนความถี่ ซึ่งแสดงว่าทั้งสองสัญญาณมีความสัมพันธ์สอดคล้องกันในโดเมนเวลาเช่นกัน

จากการทดลองจะใช้การวิเคราะห์พื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาด้วยการใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) ดังแสดงในสมการที่ 4.3

$$\frac{1}{2}d(f(a) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(b)) \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.6 การหาพื้นที่ด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู



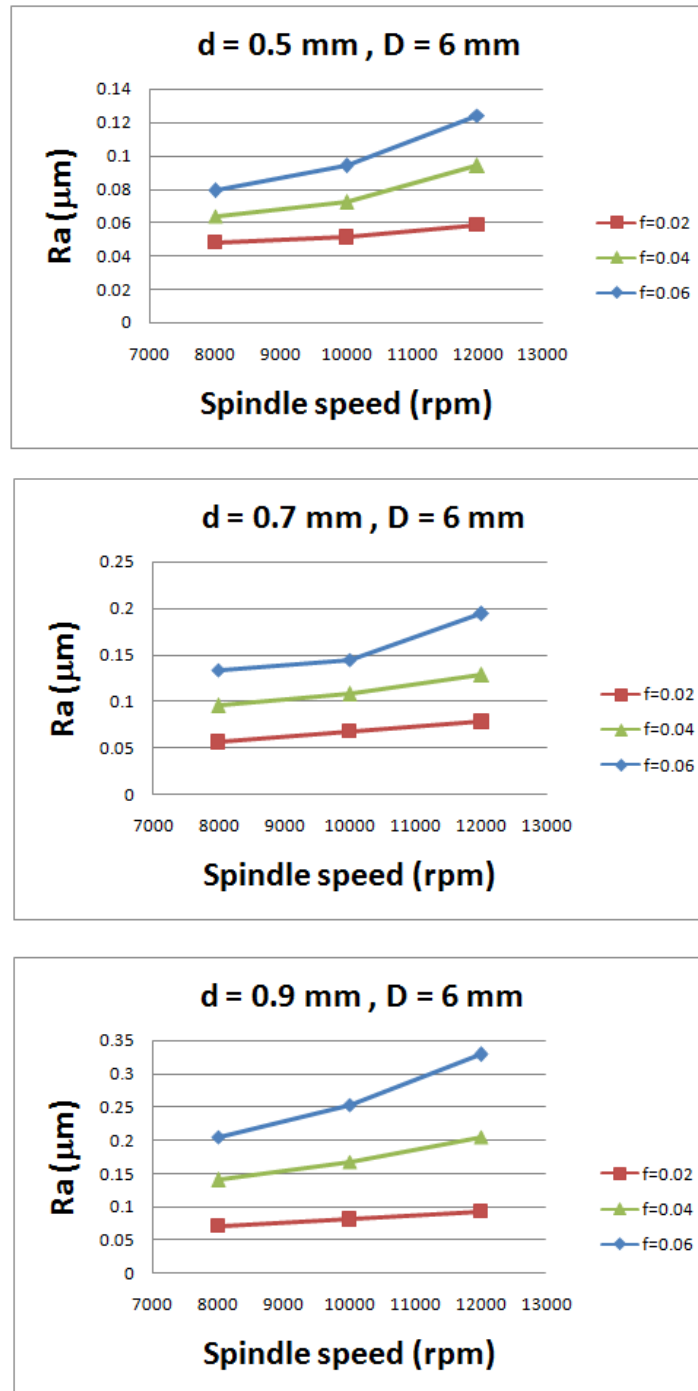
รูปที่ 4.7 ตัวอย่างการคำนวณพื้นที่แรงตัดที่ ความเร็วตัด 10,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.7 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด 10 มิลลิเมตร

เนื่องจากขนาดของแรงตัดพลวัตจะเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขการตัดที่เลือกใช้ ดังนั้นเมื่อนำพื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดพลวัตทั้งแรงในแนวทิศทางการป้อน (AFx) และพื้นที่ใต้กราฟของแรงในแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน (AFz) ที่เกิดขึ้นมาหารกันเป็นอัตราส่วน (AFx/AFz) และนำค่าที่ได้ไปใช้เป็นตัวแปรในการสร้างสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว จะทำให้สมการที่สร้างขึ้นสามารถใช้ได้ในทุกกรณีโดยไม่คำนึงถึงอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

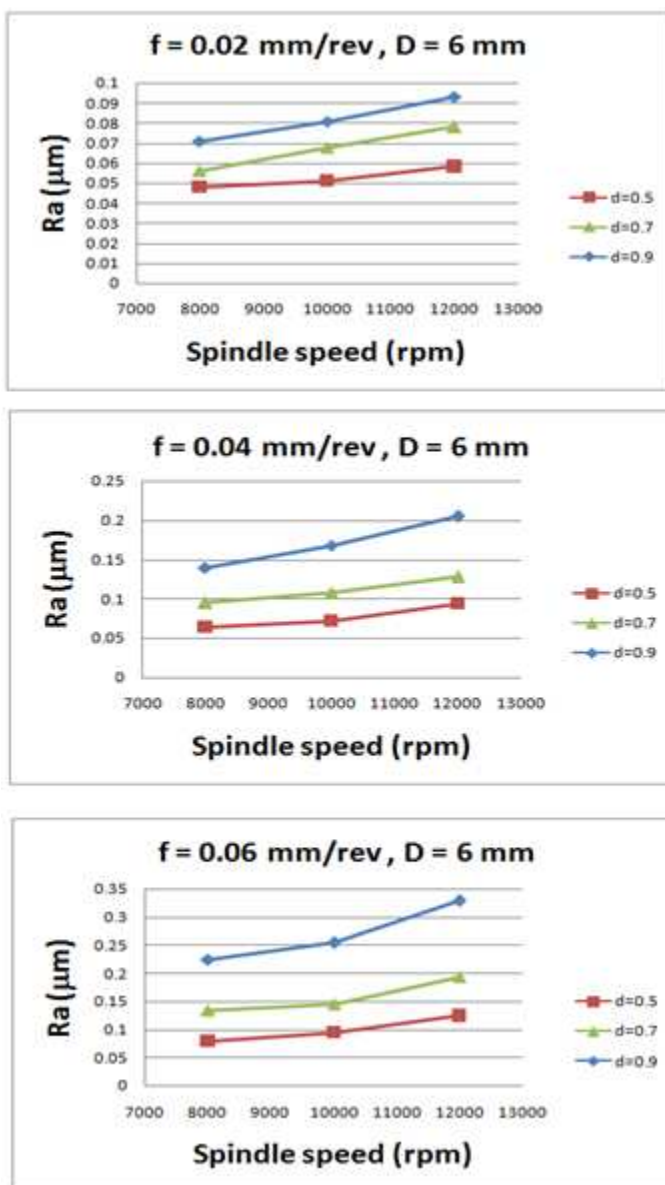
4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวกับเงื่อนไขการตัด

ความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวและเงื่อนไขการตัดสามารถนำมาสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ได้ดังนี้

4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วรอบและค่าความขรุขระผิว



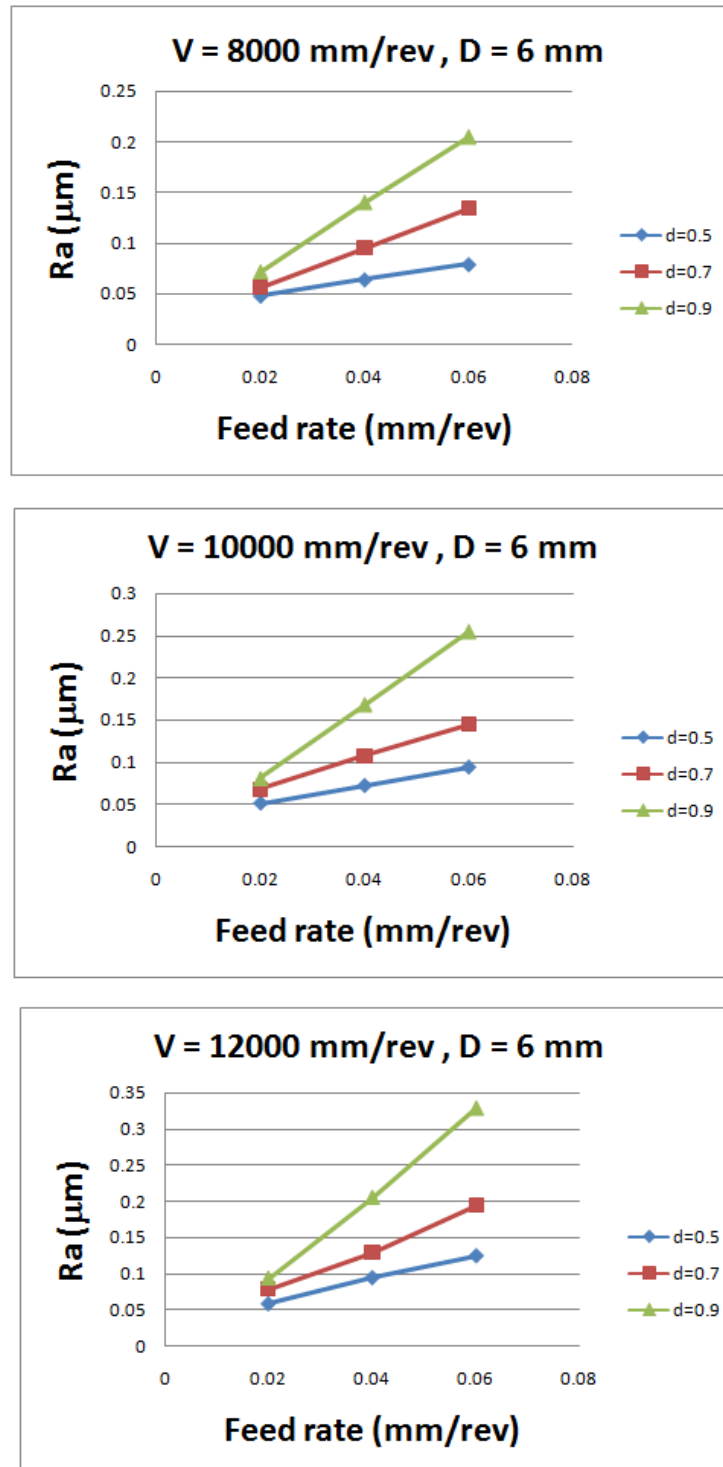
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความขรุขระผิว



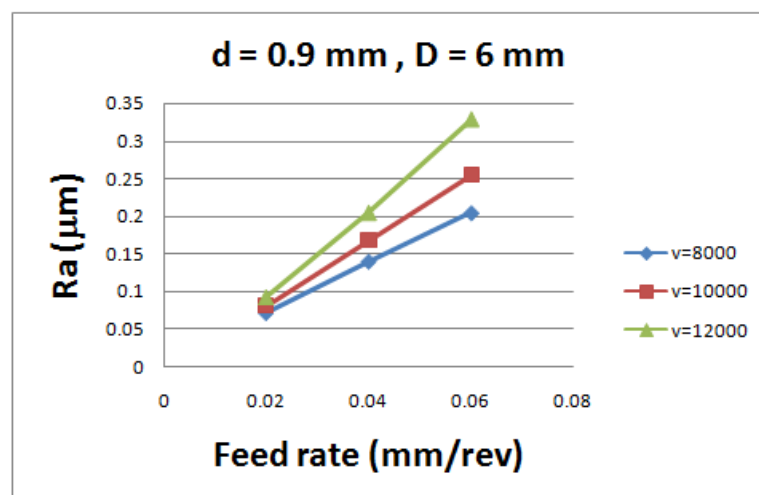
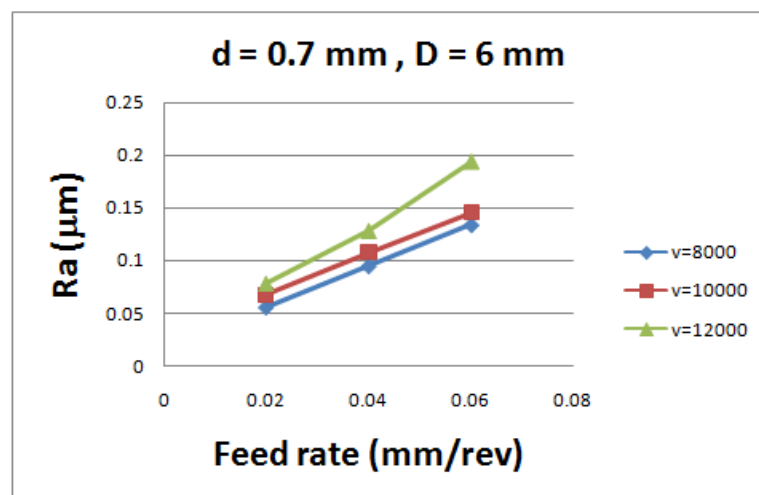
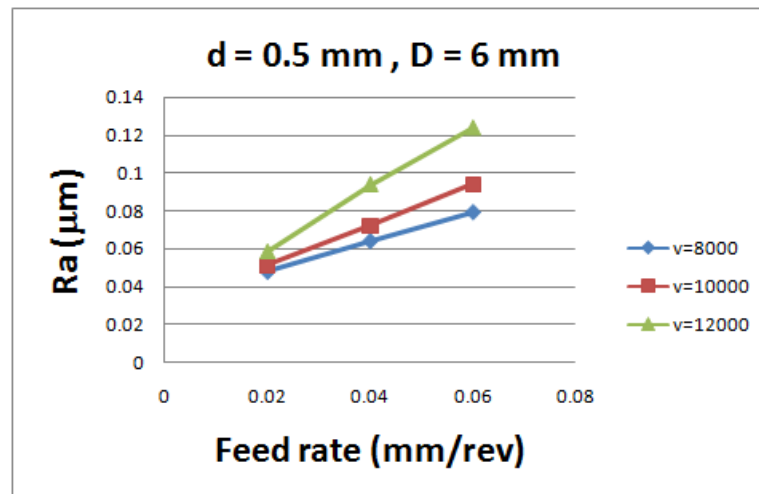
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความขรุขระผิว

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าที่ความลึกตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด และอัตราป้อนเดียวกัน ความเร็วรอบการตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วรอบการตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนบริเวณหัวมีดตัดเพิ่มขึ้นจากการหมุนที่แรงขึ้น เมื่อเข้าสู่กระบวนการตัดการสั่นสะเทือนนี้จึงส่งผลให้เกิดความขรุขระผิวชิ้นงานที่มากขึ้น

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราป้อนและค่าความขรุขระผิว

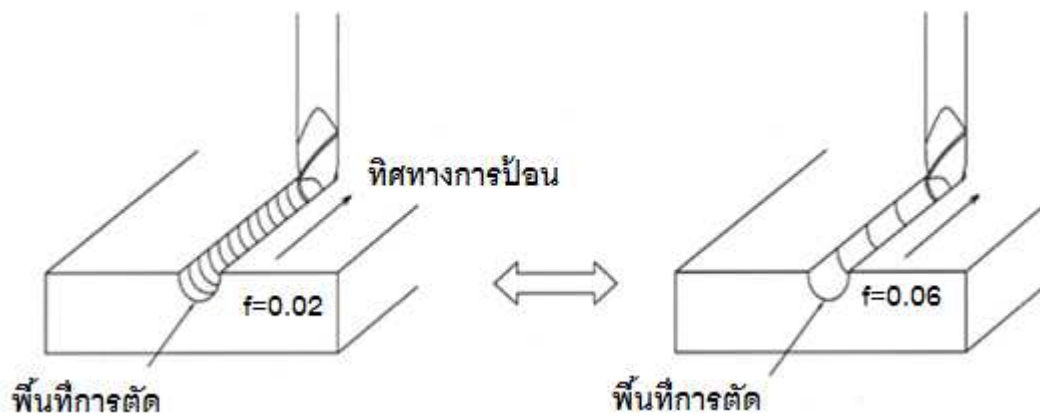


รูปที่ 4.10 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนและความขรุขระผิว



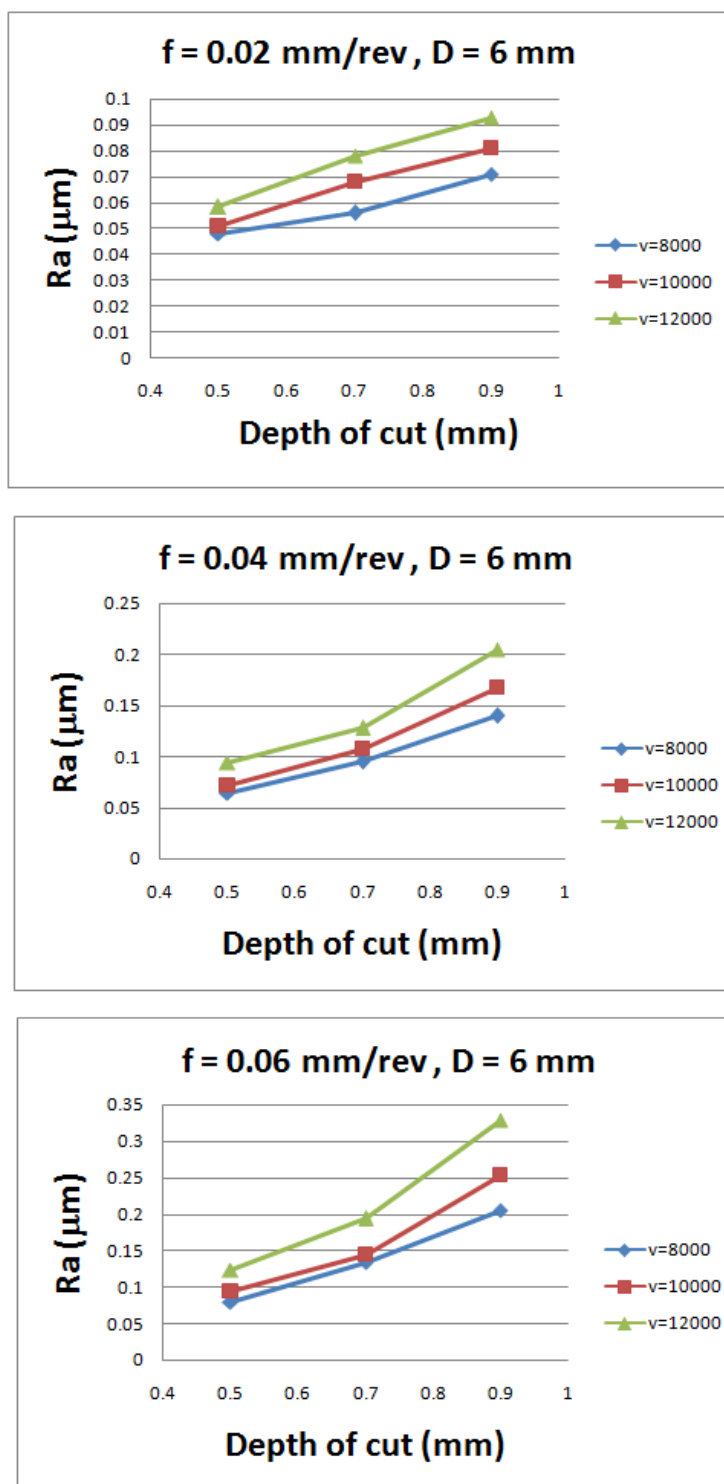
รูปที่ 4.11 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนและความขรุขระผิว

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าที่ความเร็วรอบ ความลึกตัดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มีดตัดเดียวกัน อัตราป้อนตัดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความขรุขระผิวชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราป้อนตัดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้มีดตัดถูกป้อนเข้าไปตัดชิ้นงานมากขึ้นดังแสดงในรูป 4.12 ทำให้ต้องใช้แรงในขณะตัดมากขึ้น เมื่อเกิดแรงในการตัดเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ความขรุขระผิวของชิ้นงานที่ได้จากการตัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม

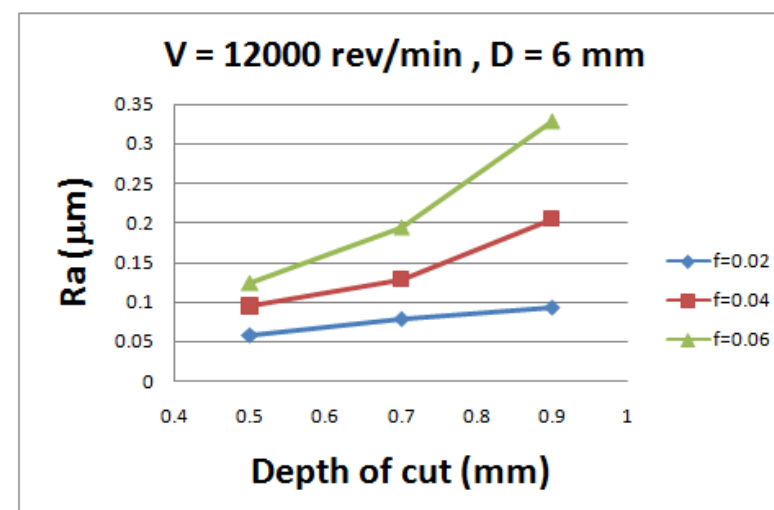
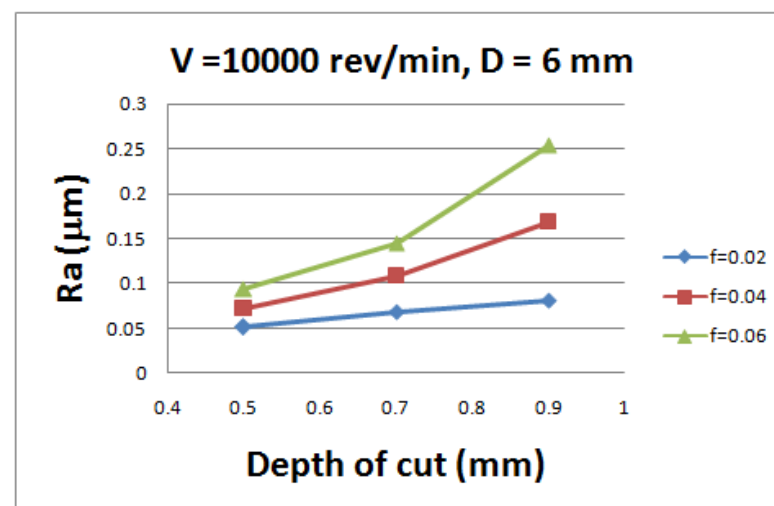
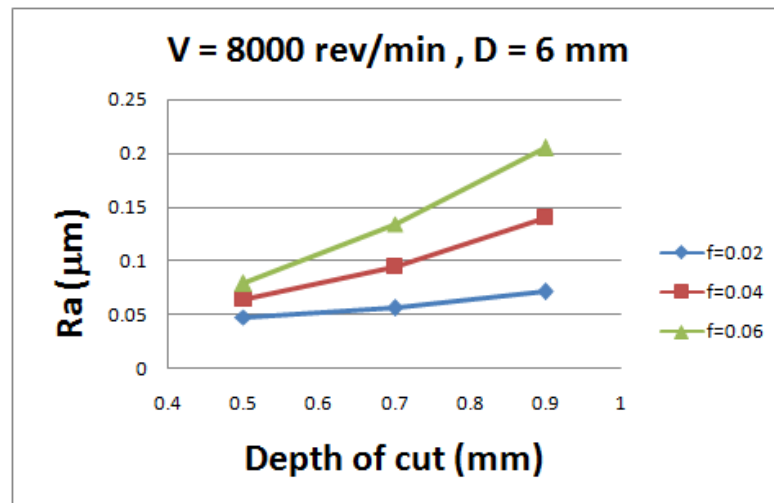


รูปที่ 4.12 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราป้อนและค่าความขรุขระผิว

4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกตัดและค่าความขรุขระผิว

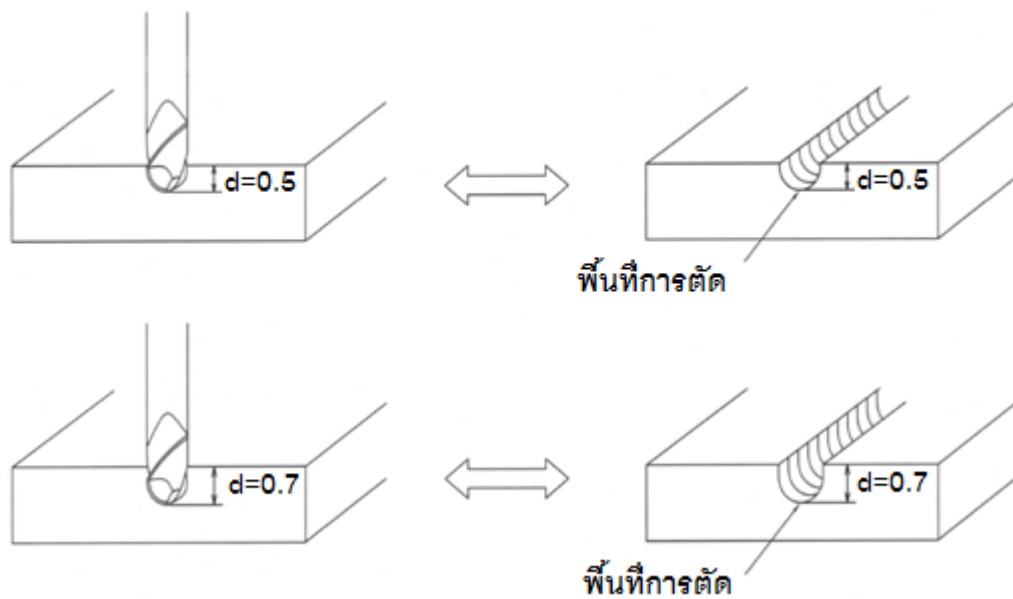


รูปที่ 4.13 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและความขรุขระผิว



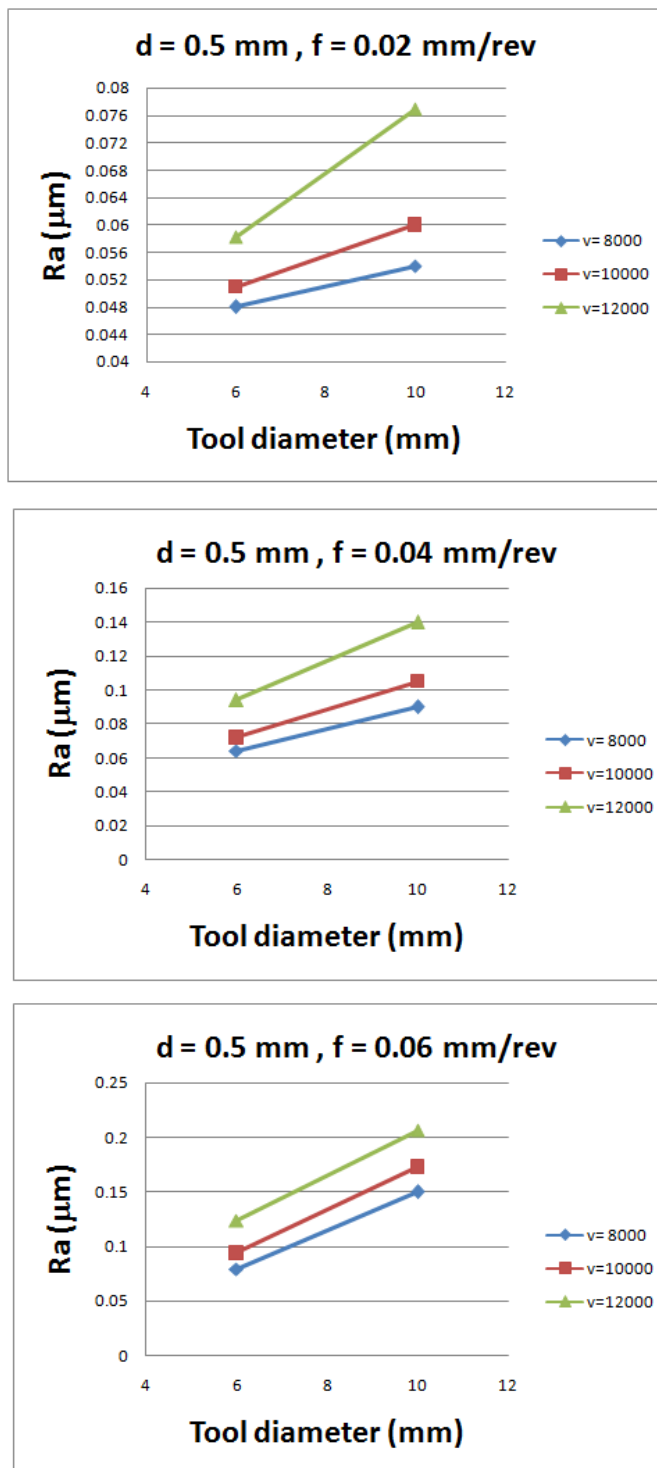
รูปที่ 4.14 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและความขรุขระผิว

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าที่ความเร็วรอบ อัตราป้อนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดเดียวกัน เมื่อความลึกตัดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความลึกตัดที่เพิ่มมากขึ้นนั้นทำให้พื้นที่ในการตัดเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีดตัดจะถูกป้อนเข้าไปตัดชิ้นงานลึกขึ้นดังแสดงในรูป 4.15 ทำให้ระบบต้องใช้แรงขณะตัดเพิ่มมากขึ้น และแรงที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลกระทบต่อทำให้ค่าความขรุขระของผิวชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นตาม

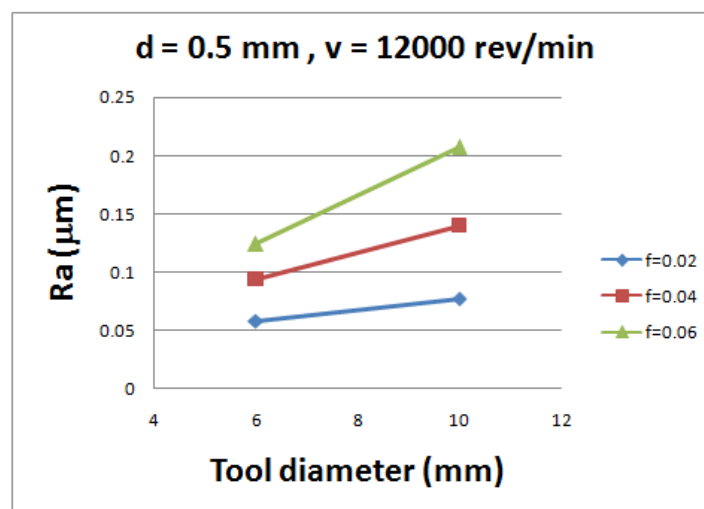
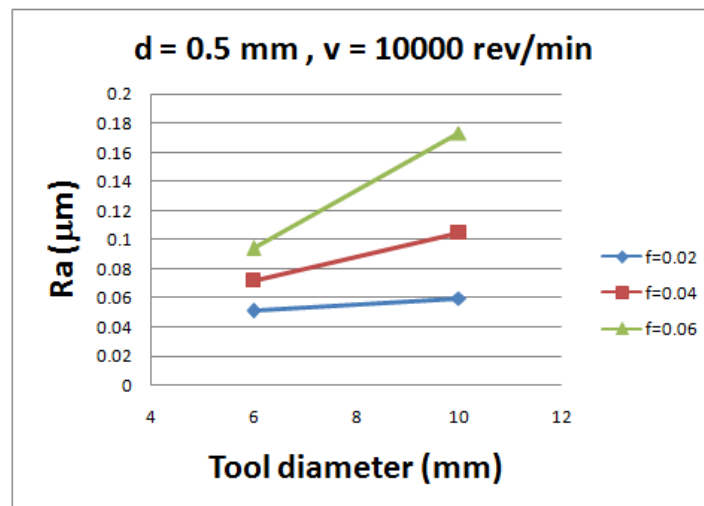
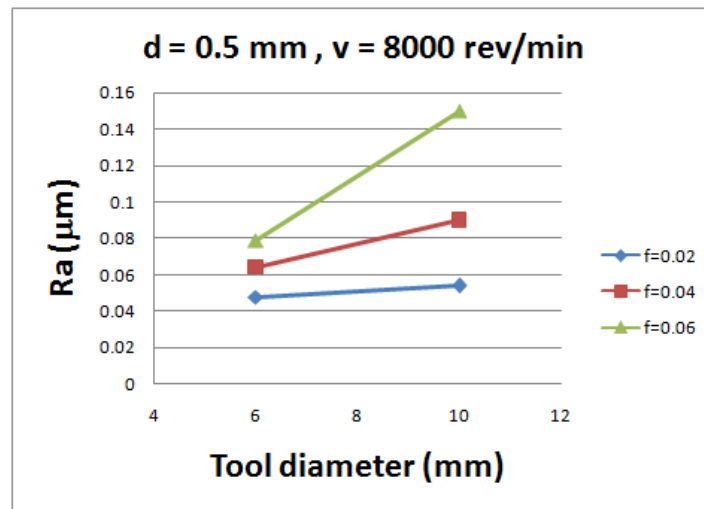


รูปที่ 4.15 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกตัดและค่าความขรุขระผิว

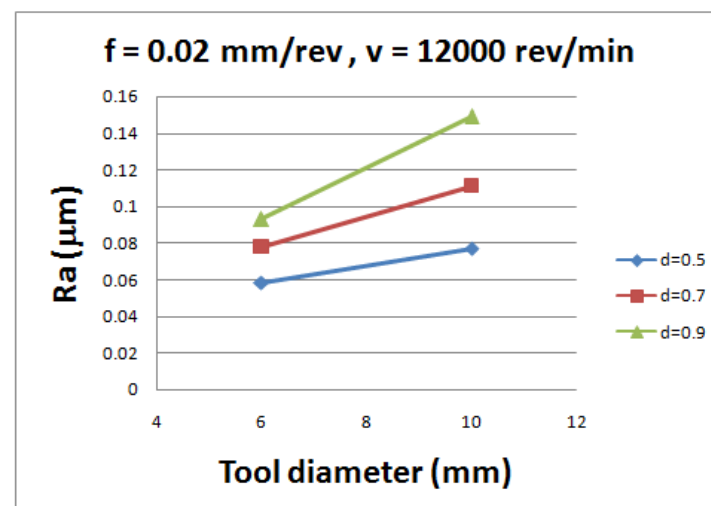
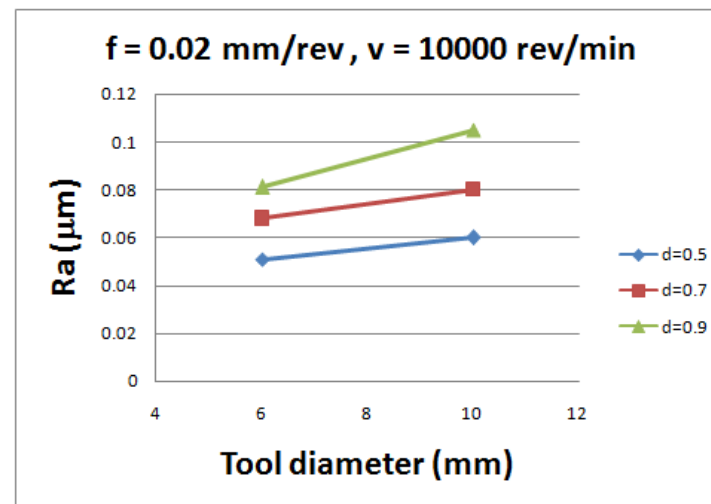
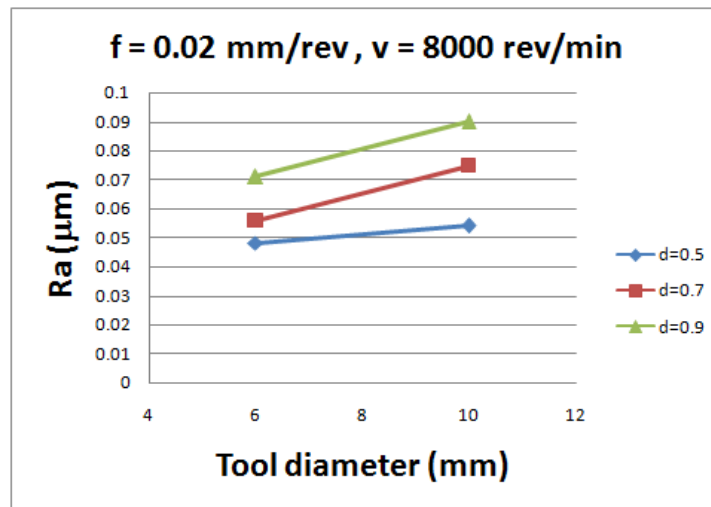
4.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดและค่าความขรุขระผิว



รูปที่ 4.16 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดมีดตัดและความขรุขระผิว

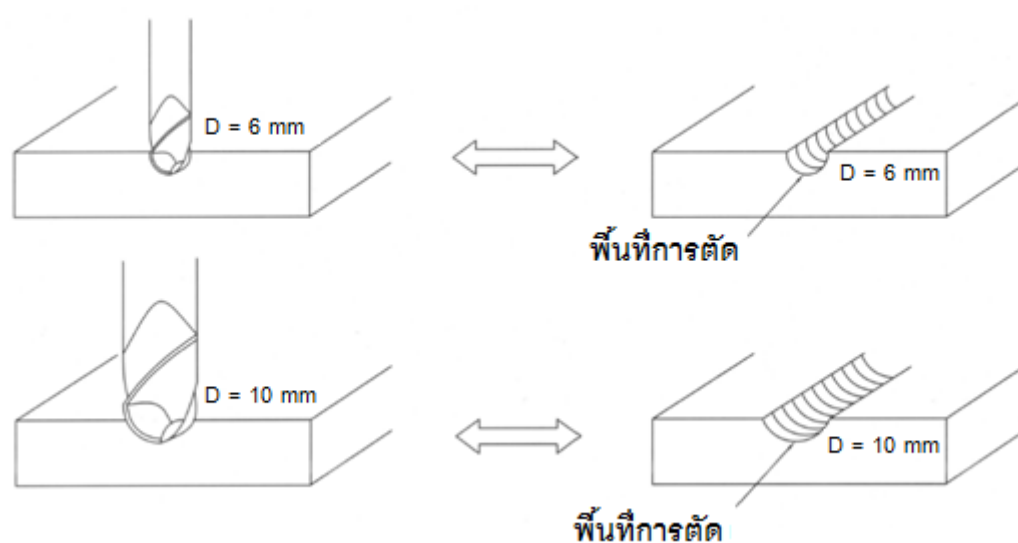


รูปที่ 4.17 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเม็ดตัดและความขรุขระผิว



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดมีดตัดและความขรุขระผิว

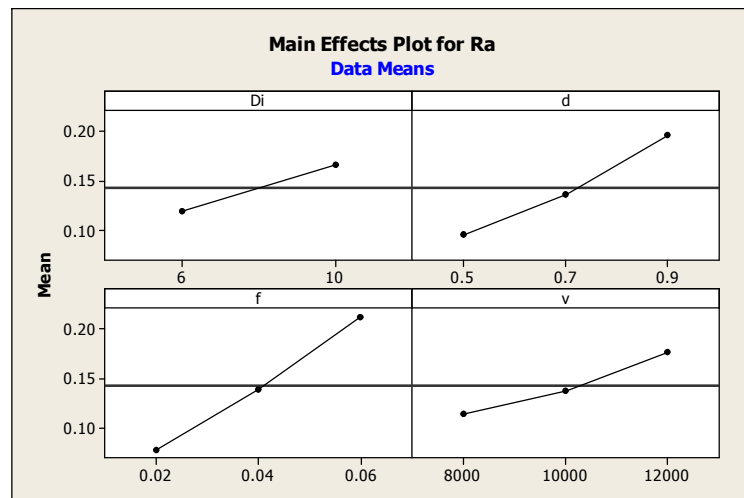
จากรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 พบว่าที่ความลึกตัด ความเร็วรอบ และอัตราป้อนเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงขึ้น เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดและชิ้นงานในการตัดเพิ่มขึ้น พื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะส่งผลให้ใช้แรงในกระบวนการตัดเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากในระหว่างการตัดมีดตัดจะถูกป้อนเข้าตัดชิ้นงานในพื้นที่มากขึ้นดังแสดงในรูป 4.19 โดยแรงในการตัดที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลกระทบต่อความขรุขระของผิวชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้น



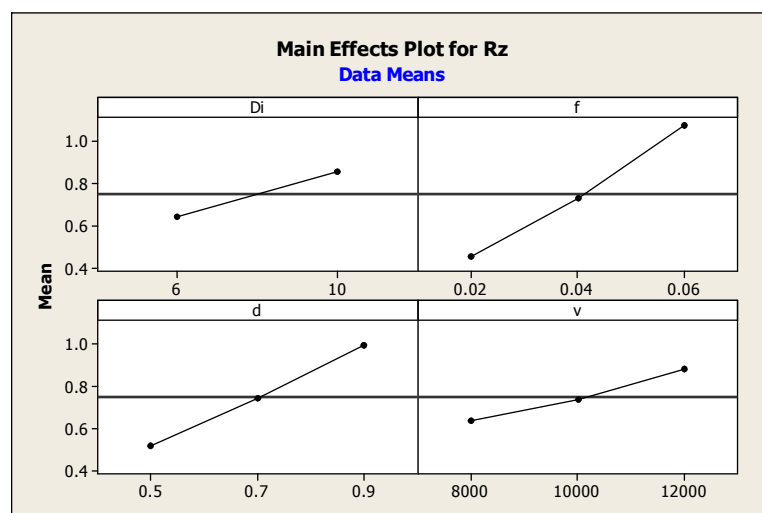
รูปที่ 4.19 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดและค่าความขรุขระผิว

แนวโน้มของเงื่อนไขการตัดอื่นๆ และแนวโน้มของค่าความขรุขระผิวสูงสุดก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวสูงสุดและเงื่อนไขการตัดอื่นๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ข. และจากลักษณะกราฟทำให้คาดคะเนได้ว่าในสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของเงื่อนไขการตัดจึงควรมีค่าเป็นบวก

นอกจากนั้นสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดเทียบกับความขรุขระผิวในทุกๆ เงื่อนไขได้จากการสร้างกราฟปัจจัยหลักระหว่างความขรุขระผิวกับค่าเงื่อนไขการตัดได้ดังนี้



รูปที่ 4.20 ปัจจัยหลักของความขรุขระผิวเฉลี่ย



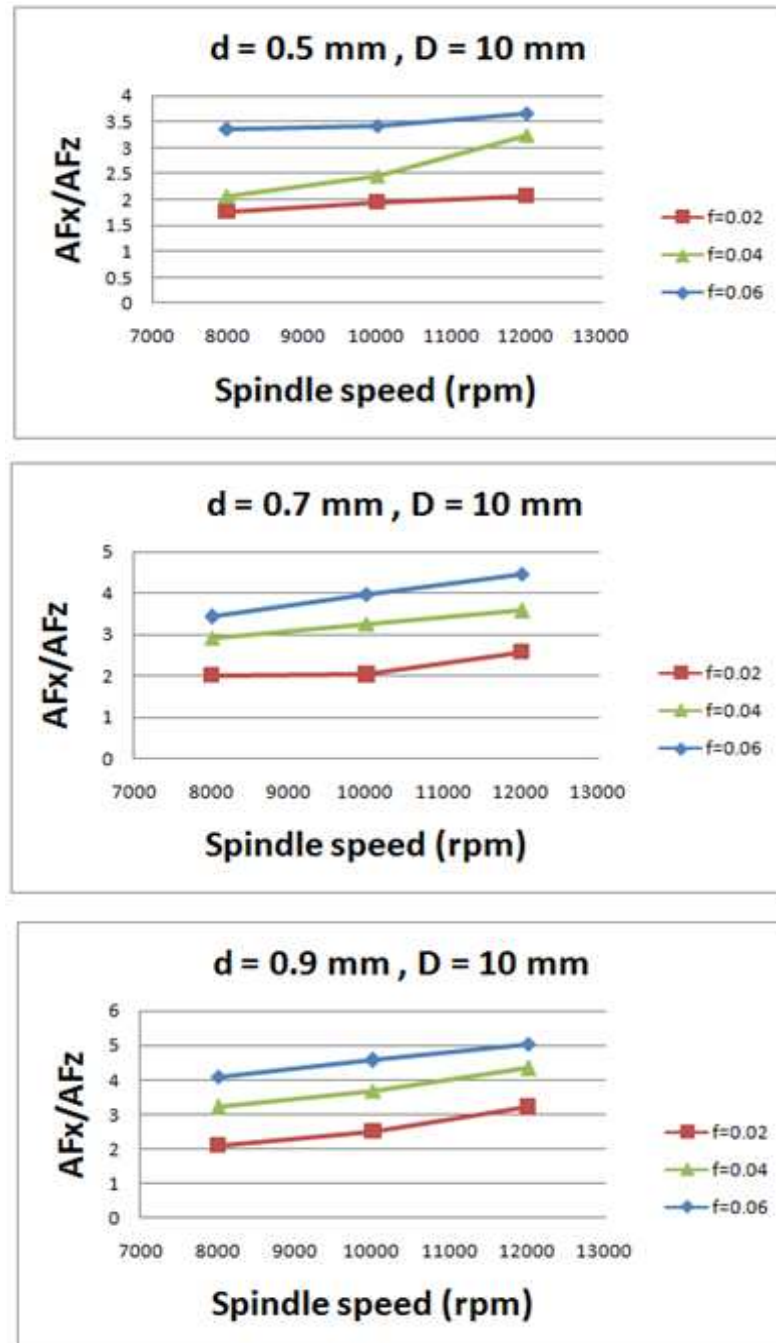
รูปที่ 4.21 ปัจจัยหลักของความขรุขระผิวสูงสุด

จากรูปที่ 4.20 และ 4.21 พบว่าปัจจัยหลักของความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุดพบว่าเงื่อนไขการตัดทุกตัว ได้แก่ ความเร็วรอบการตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด แปรผันตรงกับค่าความขรุขระผิว

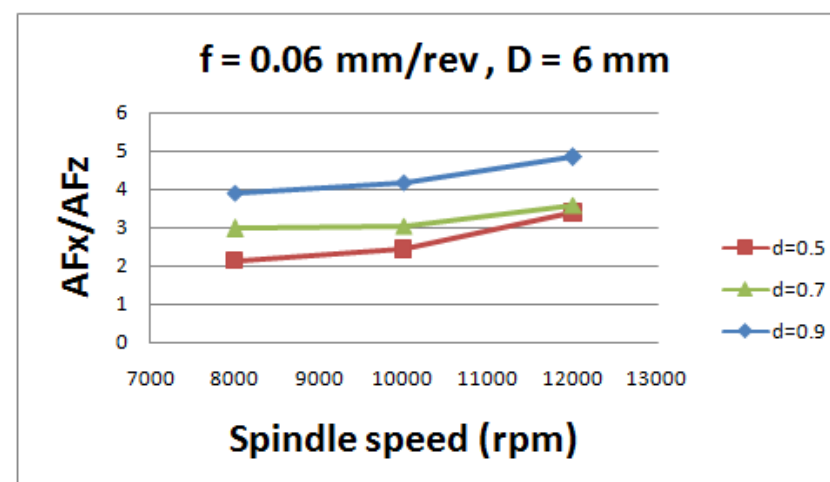
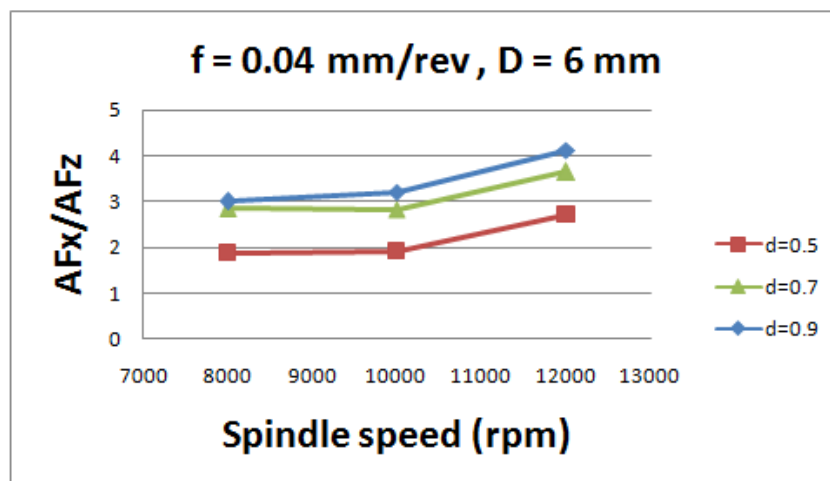
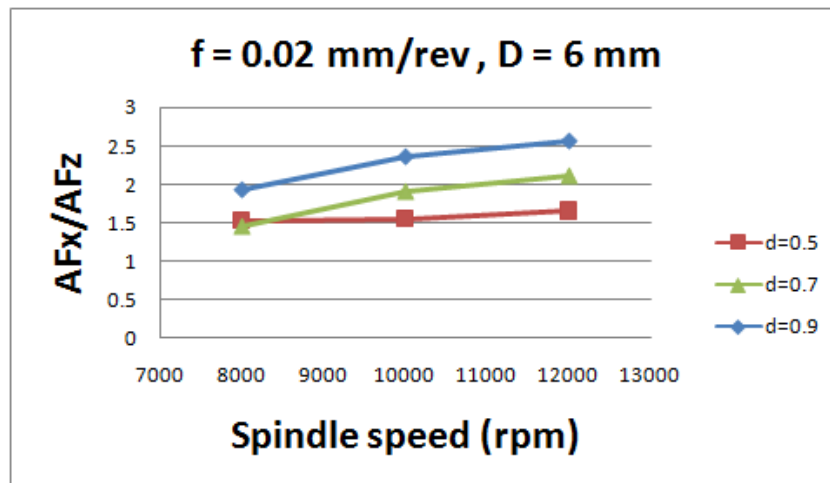
4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัตกับเงื่อนไขการตัด

ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนพื้นที่ที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตและเงื่อนไขการตัดสามารถนำมาสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ได้ดังนี้

4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วรอบและอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัต

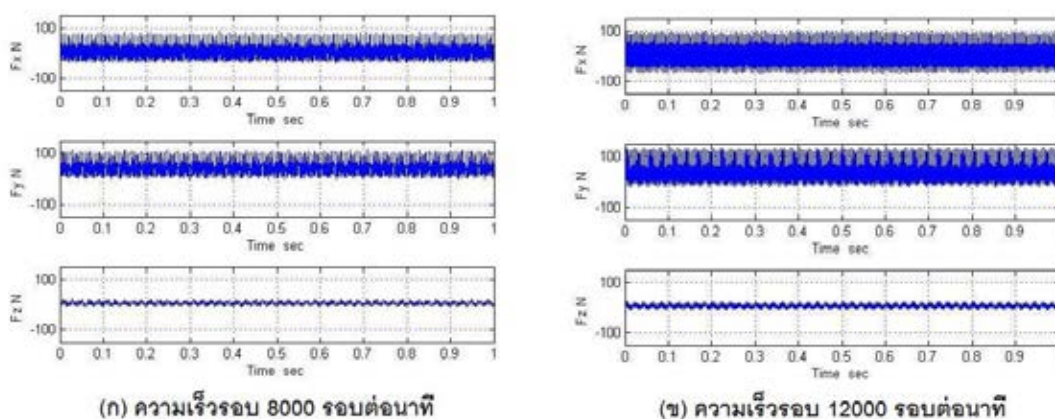


รูปที่ 4.22 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและอัตราส่วนแรงตัด



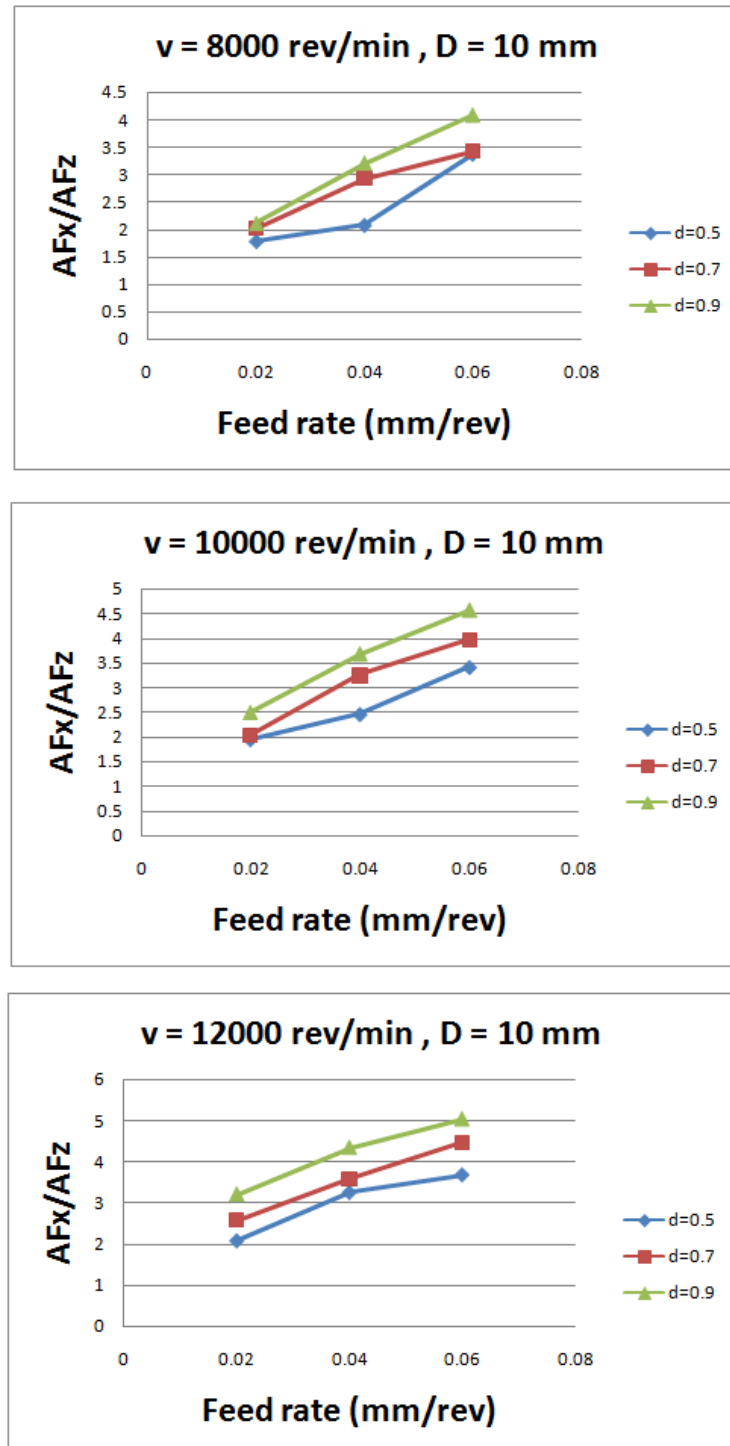
รูปที่ 4.23 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและอัตราส่วนแรงตัด

จากรูปที่ 4.22 และ 4.23 พบว่าที่ความถี่กักตึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด และอัตราป้อนเดียวกัน ความเร็วรอบการตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่ออัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟแรงตัดพลวัตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วรอบตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้แรงตัดบริเวณหัวมีดตัดเพิ่มขึ้นจากการหมุนที่เร็วขึ้น เพื่อพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นในโดเมนเวลาจึงพบว่าแรงที่เกิดขึ้นส่งผลให้ขนาดของแรงตามแนวแกนป้อน (F_x) มีค่าสูงขึ้นและสูงขึ้นมากกว่าแรงในแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน (F_z) ดังรูป 4.24 เนื่องจากการสั่นสะเทือนมีผลต่อแรงในแนวแกนป้อนมากกว่า ดังนั้นการเพิ่มความเร็วรอบจึงทำให้อัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของแรงมีค่าเพิ่มมากขึ้น

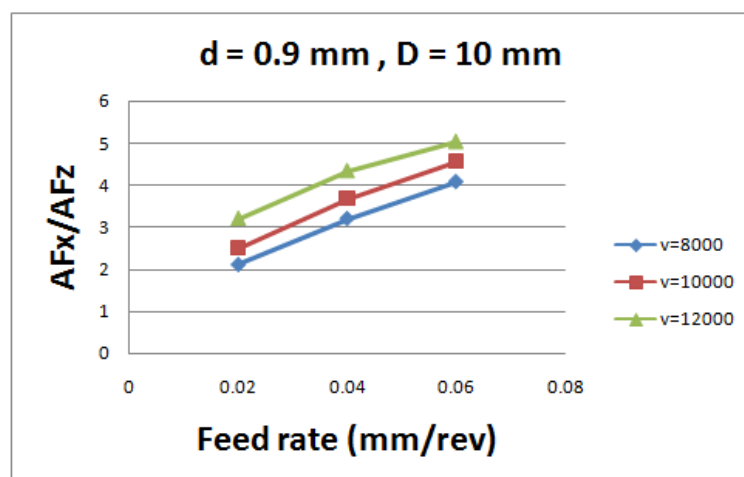
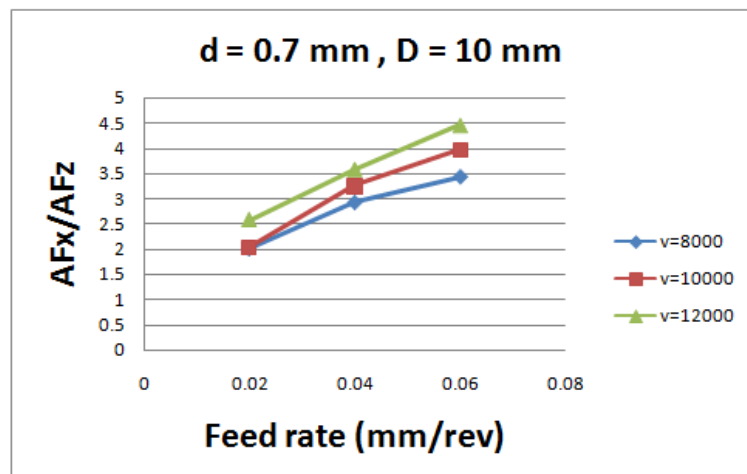
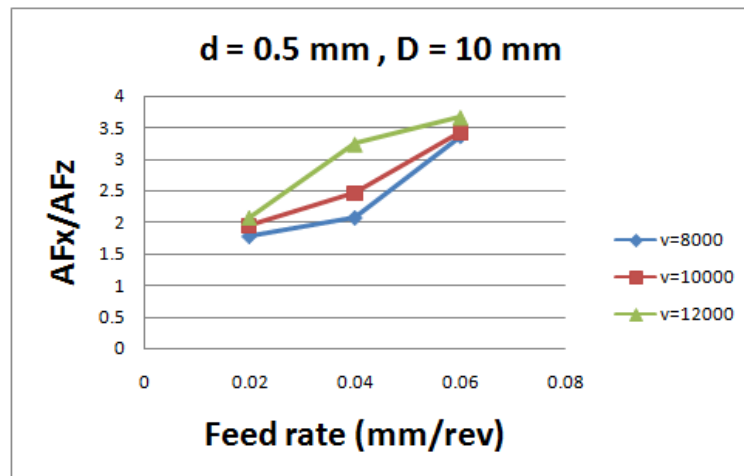


รูปที่ 4.24 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัด
ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความถี่กักตึง 0.9 มิลลิเมตร
และอัตราป้อน 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ

4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราป้อนและอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟแรงตัดพลวัต

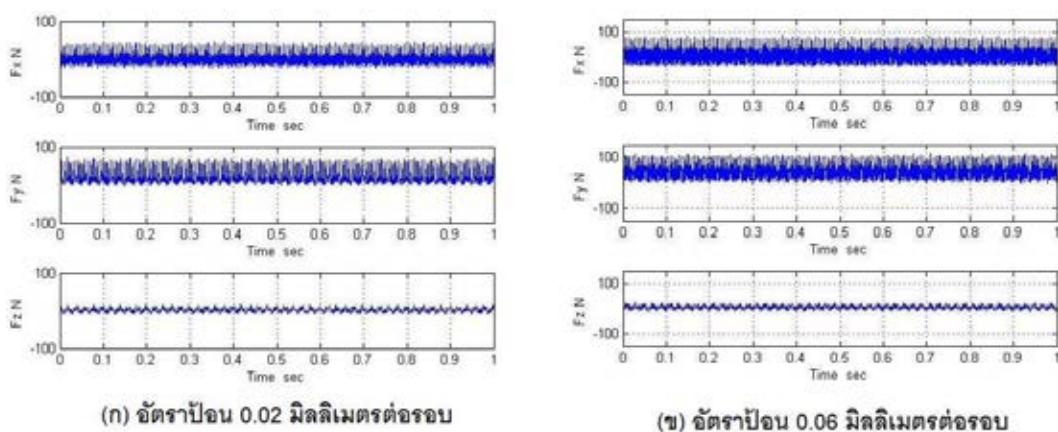


รูปที่ 4.25 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนและอัตราส่วนแรงตัด



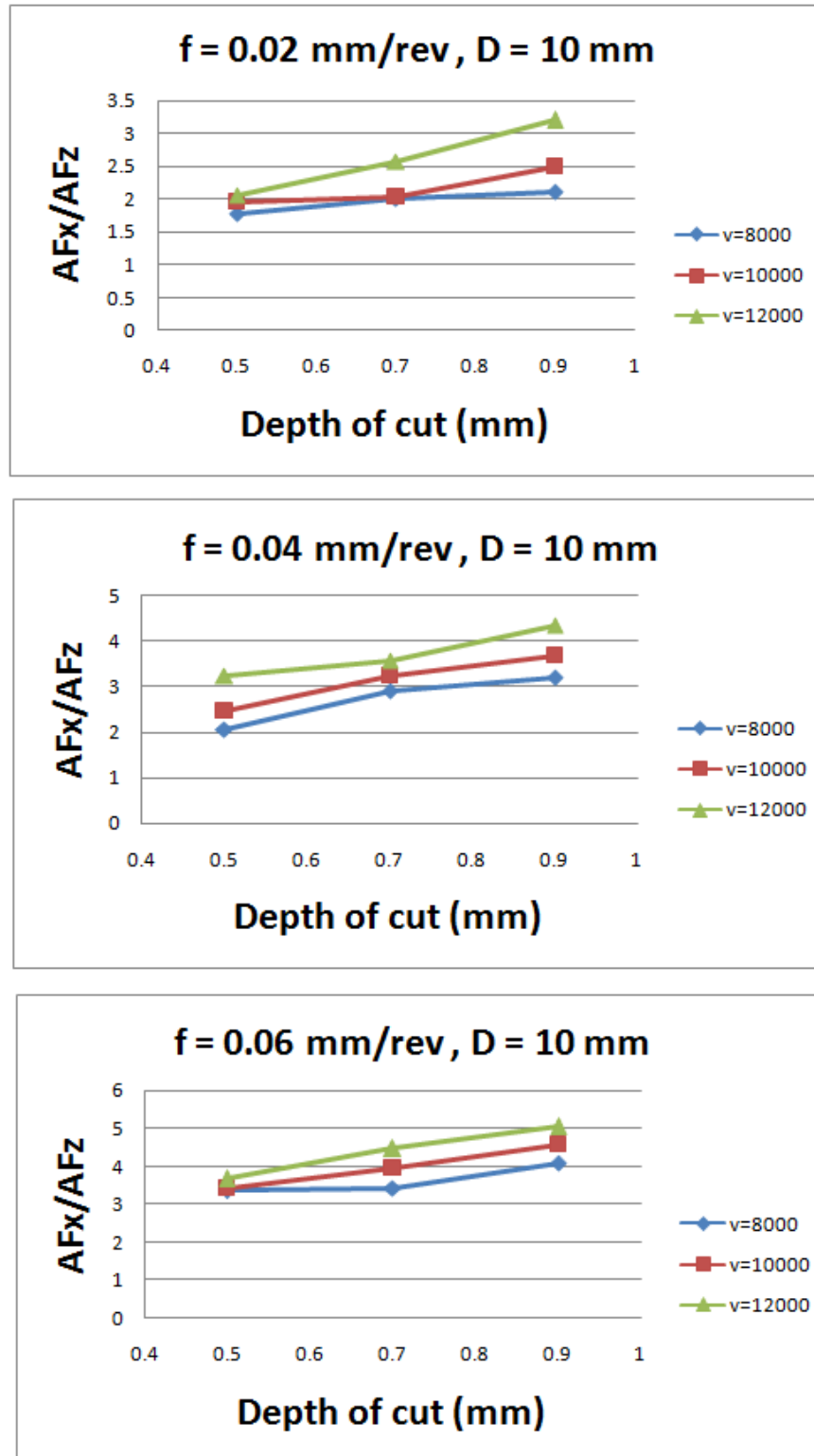
รูปที่ 4.26 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนและอัตราส่วนแรงตัด

จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 พบว่าที่ความเร็วรอบ ความลึกตัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มีดตัดเดียวกัน อัตราป้อนตัดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราป้อนตัดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ชิ้นงานถูกตัดในอัตราที่เร็วขึ้นและมากขึ้นทำให้เกิดแรงในระหว่างกระบวนการตัดมากขึ้น เมื่อพิจารณาในโดเมนเวลาพบว่าแรงที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้ขนาดของแรงตามแนวแกนป้อน (F_x) มีค่าสูงขึ้นและสูงขึ้นมากกว่าแรงในแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน (F_z) ดังรูป 4.27 เนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นส่งผลการตัดในแนวแกนป้อนมากกว่า ดังนั้นจึงทำให้อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงมีค่าเพิ่มมากขึ้น

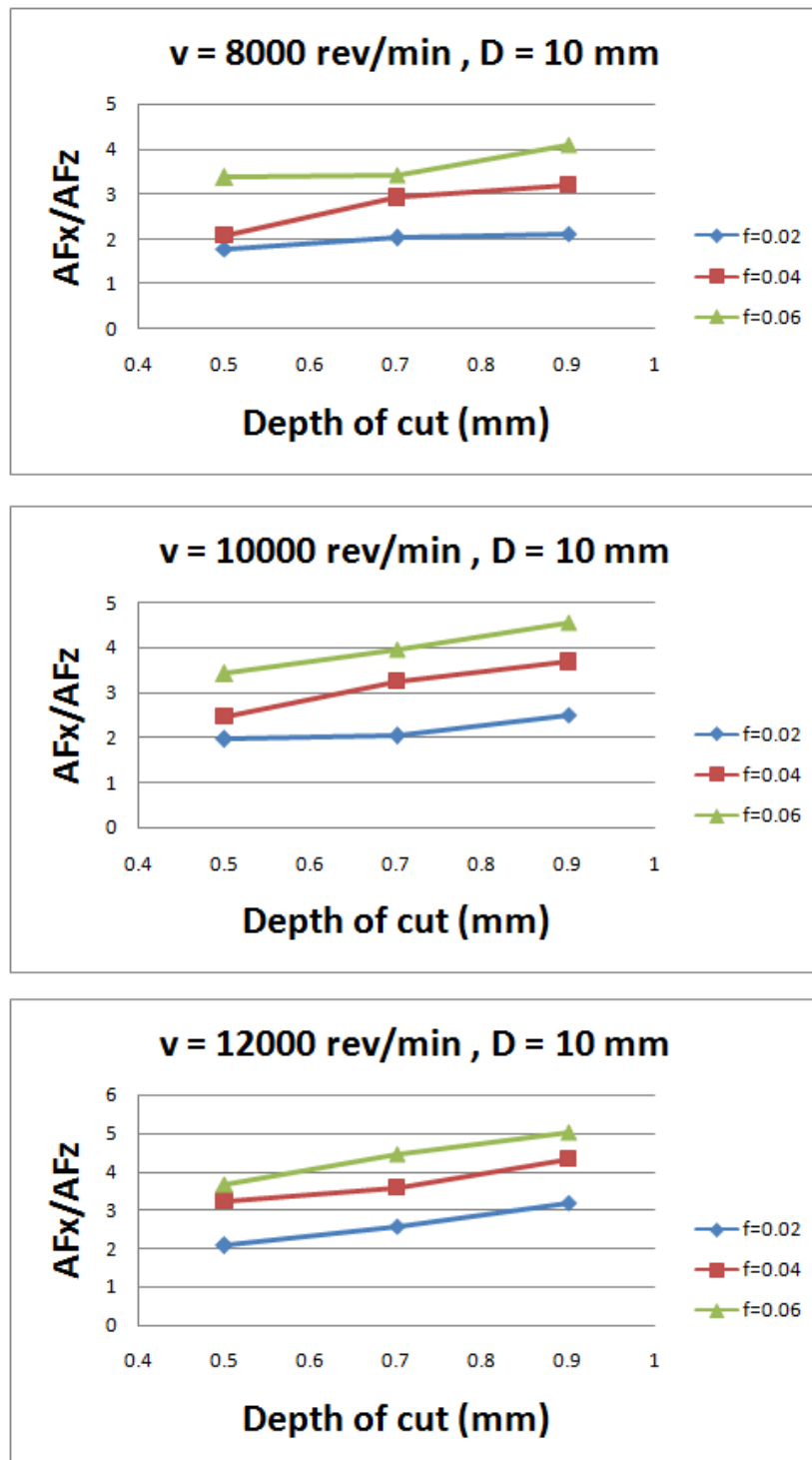


รูปที่ 4.27 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัด
ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความลึกตัด 0.9 มิลลิเมตร
และความเร็วรอบ 8000 รอบต่อนาที

4.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกตัดและอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัต

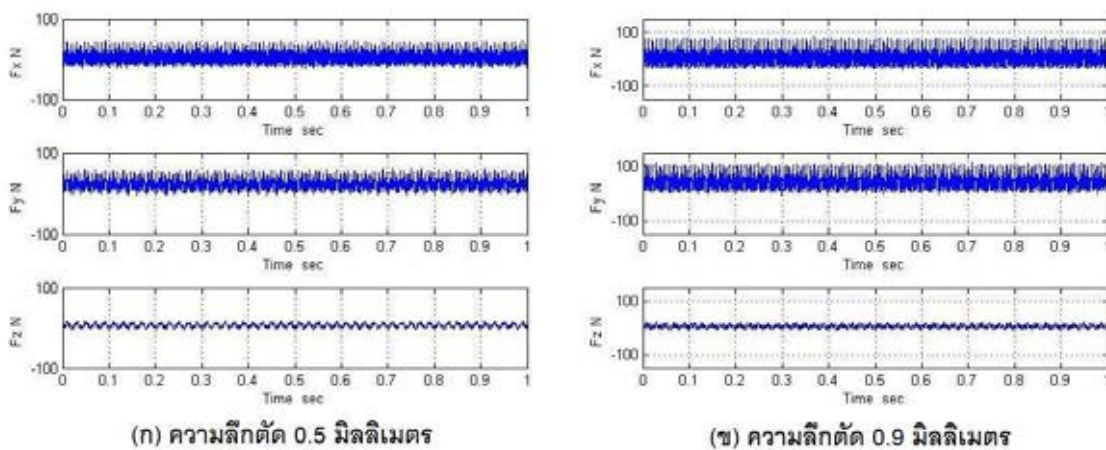


รูปที่ 4.28 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและอัตราส่วนแรงตัด



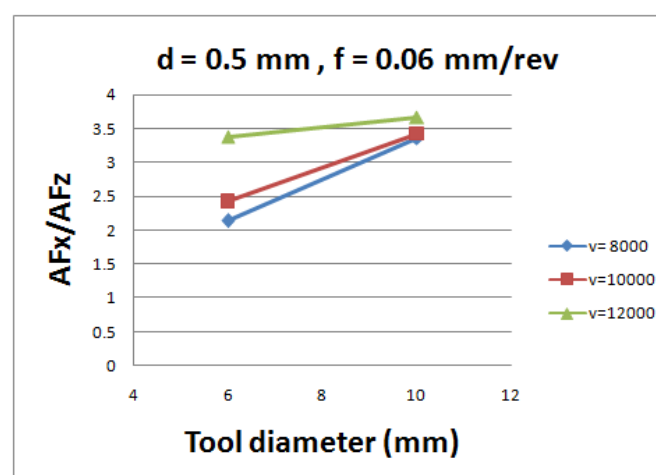
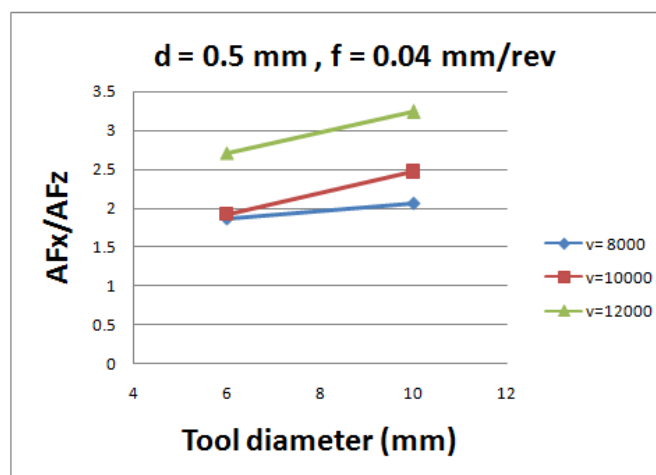
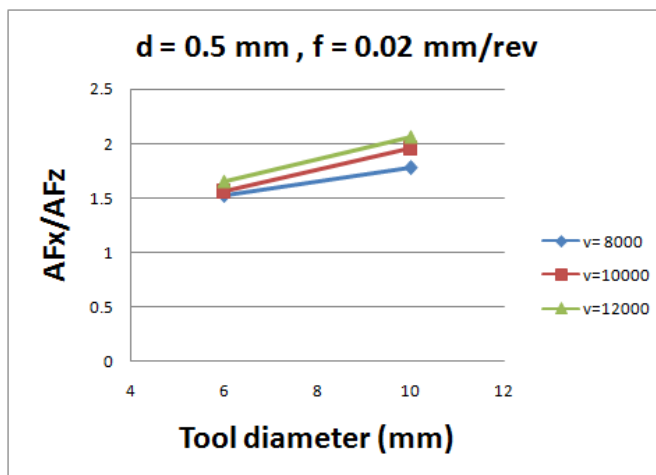
รูปที่ 4.29 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและอัตราส่วนแรงตัด

จากรูปที่ 4.28 และ 4.29 พบว่าที่ความเร็วรอบ อัตราป้อนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดเดียวกัน เมื่อความลึกตัดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความลึกตัดที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจะส่งผลให้ชิ้นงานถูกตัดลึกขึ้น โดยจะทำให้เกิดแรงกระบวนกรตัดเพิ่มมากขึ้นด้วยเนื่องมาจากพื้นที่ในการตัดที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาแรงตัดในโดเมนเวลาพบว่าแรงที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้ขนาดของแรงตามแนวแกนป้อน (F_x) มีค่าสูงขึ้นและสูงขึ้นมากกว่าแรงในแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน (F_z) ดังรูป 4.30 เนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นส่งผลการตัดในแนวแกนป้อนมากกว่า ดังนั้นจึงทำให้อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงมีค่าเพิ่มมากขึ้น

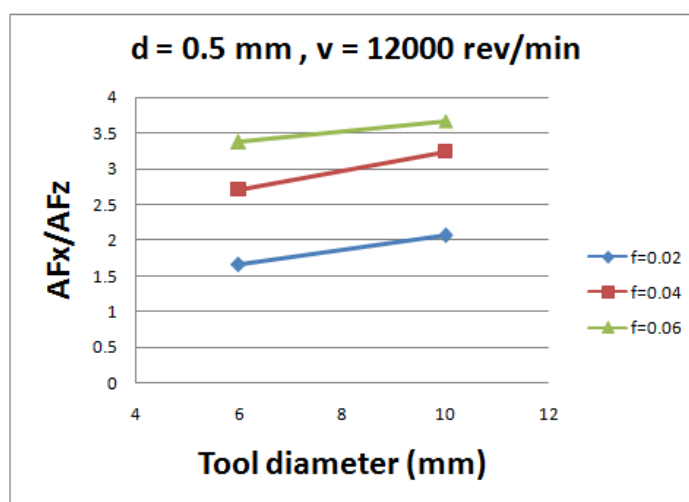
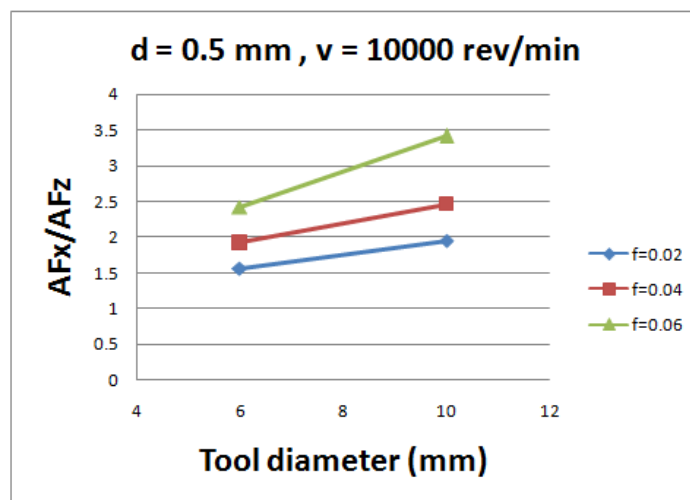
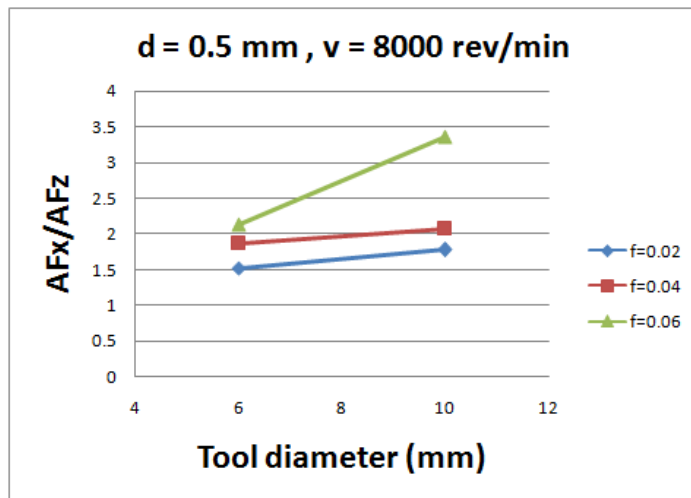


รูปที่ 4.30 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และความเร็วรอบ 8000 รอบต่อนาที

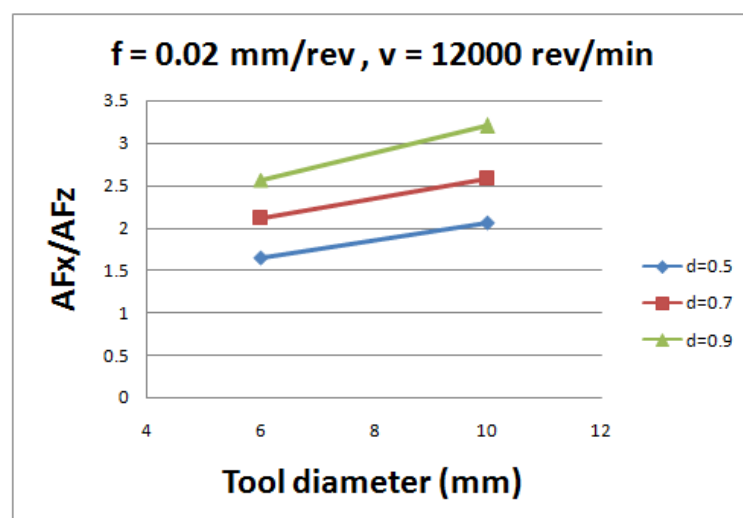
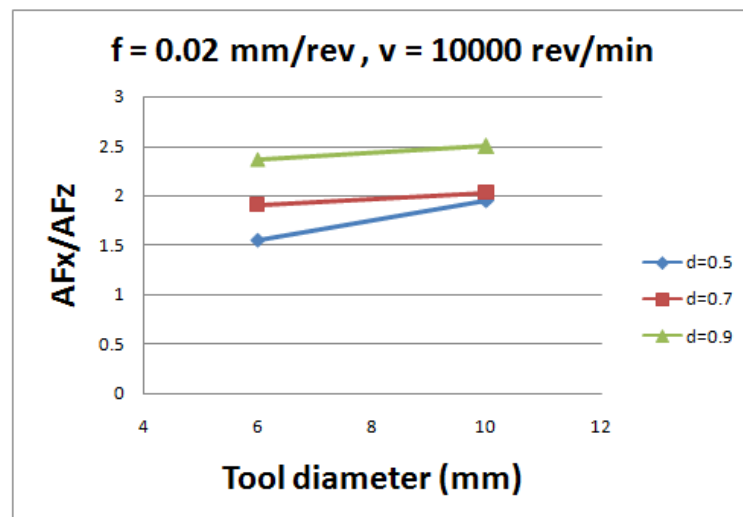
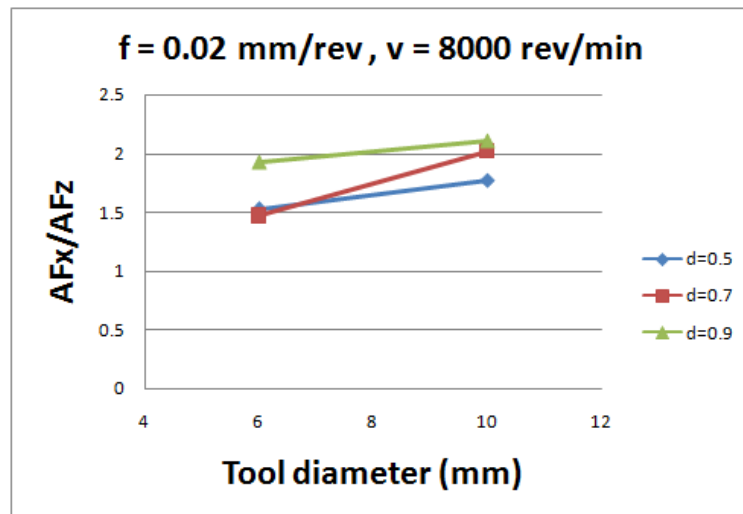
4.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดมิตัดและอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัต



รูปที่ 4.31 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมิตัดและอัตราส่วนแรงตัด

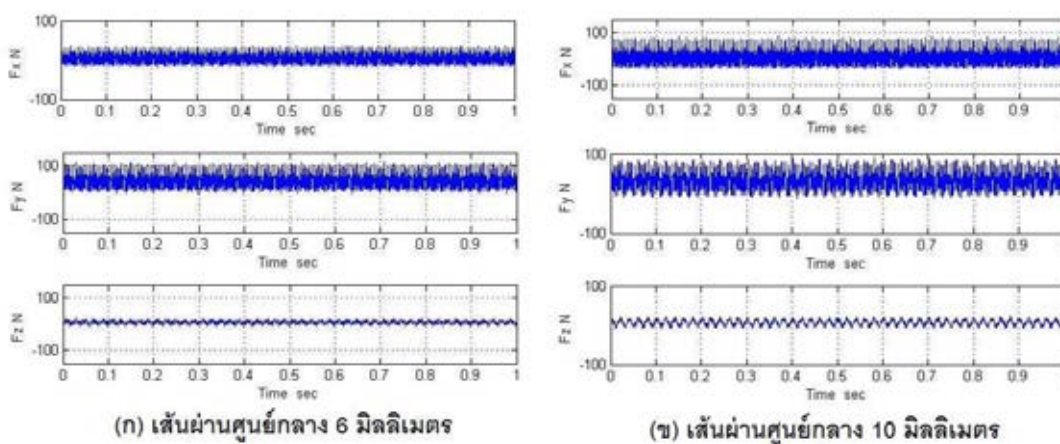


รูปที่ 4.32 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดและอัตราส่วนแรงตัด



รูปที่ 4.33 ตัวอย่างผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดและอัตราส่วนแรงตัด

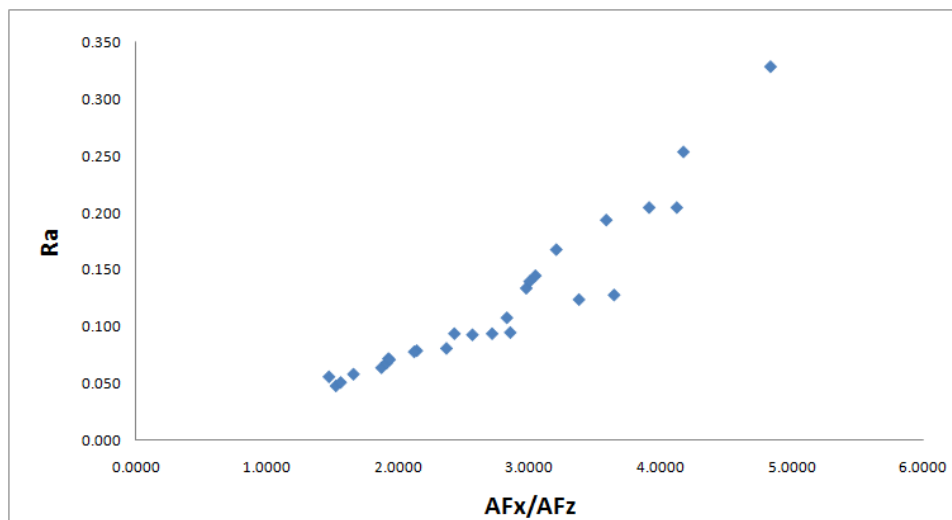
จากรูปที่ 4.31, 4.32 และ 4.33 พบว่าที่ความลึกตัด ความเร็วรอบ และอัตราป้อนเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดและชิ้นงานในการตัดเพิ่มขึ้น ชิ้นงานถูกตัดในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ใช้แรงในกระบวนการตัดเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาแรงตัดในโดเมนเวลาพบว่าแรงที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้ขนาดของแรงตามแนวแกนป้อน (F_x) มีค่าสูงขึ้นและสูงขึ้นมากกว่าแรงในแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน (F_z) ดังรูป 4.34 เนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นส่งผลการตัดในแนวแกนป้อนมากกว่า ดังนั้นจึงทำให้อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงมีค่าเพิ่มมากขึ้น



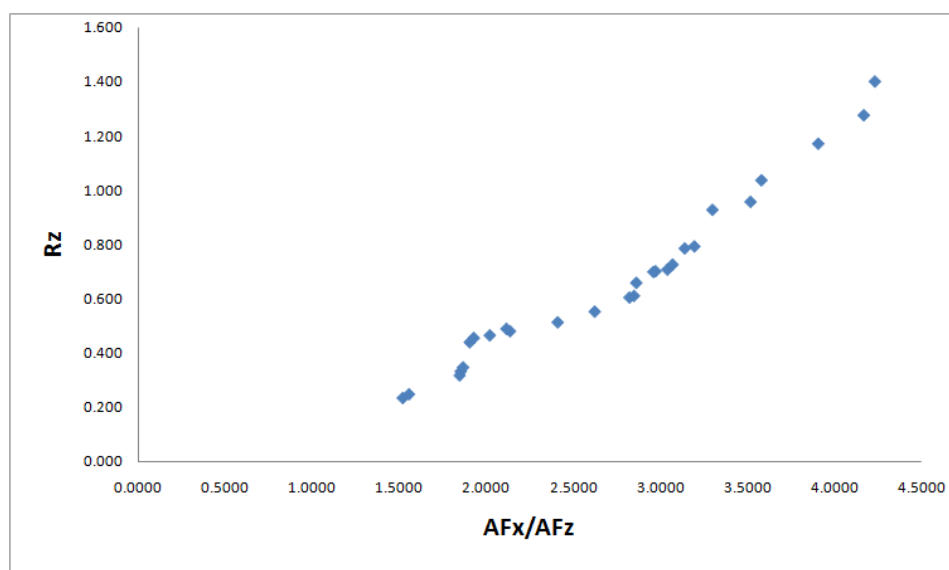
รูปที่ 4.34 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัด ที่ความลึกตัด 0.9 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และความเร็วรอบ 8000 รอบต่อนาที

จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตและเงื่อนไขการตัดข้างต้นพบว่าลักษณะกราฟสอดคล้องกับกราฟระหว่างความขรุขระผิวและเงื่อนไขการตัดต่างๆ กล่าวคือเมื่อความเร็วรอบ อัตราป้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดและความลึกตัดเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ดังนั้นเมื่อนำค่าความขรุขระผิวและอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟจะมีความสัมพันธ์แสดงความสัมพันธ์ดังรูป

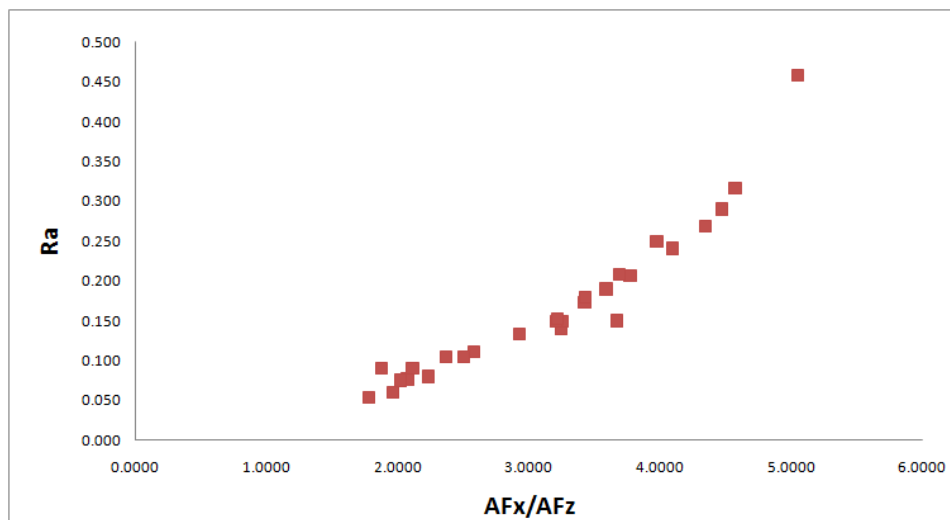


รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร

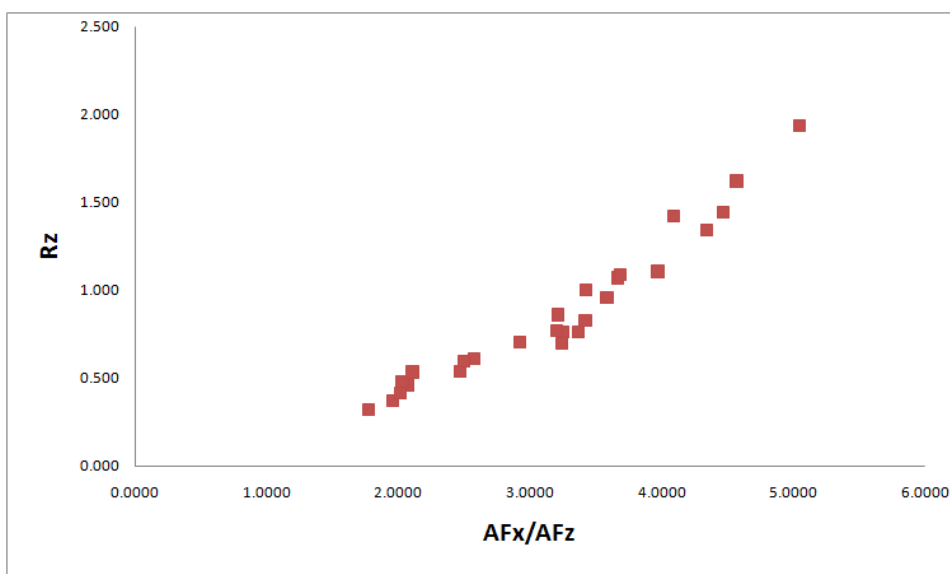


รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับค่าความขรุขระผิวสูงสุด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.35 และ 4.36 ระหว่างค่าอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตและค่าความขรุขระผิวที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรพบว่าค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวสูงสุดในทุกๆเงื่อนไขของการตัดแนวโน้มเป็นเส้นโค้งเดียวกันและมีลักษณะแปรผันตามค่าอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัต กล่าวคือเมื่ออัตราส่วนแรงตัดพลวัตเพิ่มขึ้น ค่าความขรุขระผิวก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน

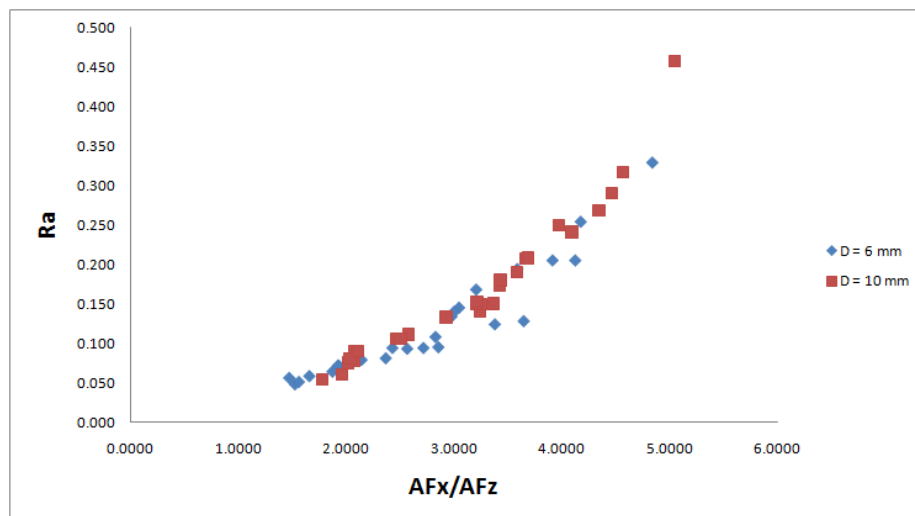


รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

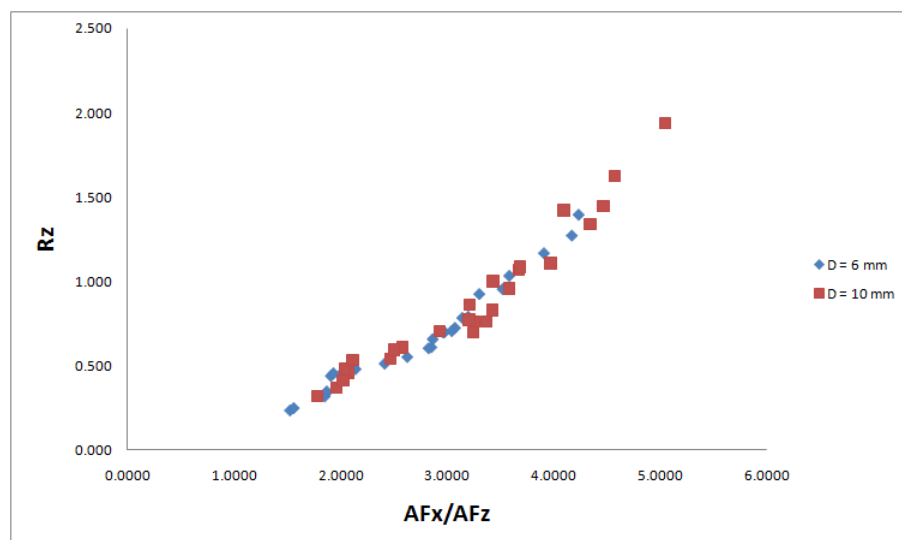


รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับค่าความขรุขระผิวสูงสุดใน ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.37 และ 4.38 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรพบว่า มีลักษณะเช่นเดียวกัน นั่นคือค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวสูงสุดในทุกๆเงื่อนไขของการตัดแนวโน้มเป็นเส้นโค้งเดียวกันและมีลักษณะแปรผันตามค่าอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัต กล่าวคือเมื่ออัตราส่วนแรงตัดพลวัตเพิ่มขึ้น ค่าความขรุขระผิวก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย



รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับค่าความขรุขระผิวสูงสุด

จากรูปที่ 4.39 และ 4.40 เมื่อนำอัตราส่วนแรงตัดกับค่าความขรุขระผิวที่ขนาดมีดตัดทั้งสองมาพล็อตลงในกราฟเดียวกันจะพบว่าค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวสูงสุดของขนาดมีดตัดทั้งสองขนาดมีแนวโน้มอยู่ในเส้นโค้งเดียวกัน และมีลักษณะแปรผันตามค่าอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัต กล่าวคือเมื่ออัตราส่วนแรงตัดพลวัตเพิ่มขึ้น ค่าความขรุขระผิวก็มีค่าเพิ่มขึ้น จากลักษณะกราฟดังกล่าวจึงพิสูจน์ได้ว่าค่าอัตราส่วนแรงตัดมีอิทธิพลพลวัตต่อค่าความขรุขระผิวและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังสามารถคาดคะเนได้ว่าสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวที่ได้ควรมีค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตที่มีค่าเป็นบวกเนื่องจากตัวแปรทั้งสองมีลักษณะแปรผันตามกัน

จากรูปที่ 4.39 และ 4.40 พบว่าสามารถใช้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตเพื่อเป็นตัวแปรในการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้โดยตรง อย่างไรก็ตามการเพิ่มเงื่อนไขการตัดอื่นๆในแบบจำลองจะทำให้การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวมีความละเอียดและแม่นยำขึ้น

4.6 การสร้างสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน

จากงานวิจัยในอดีตพบว่าค่าอัตราการป้อนตัด ความเร็วตัด ความลึกการตัด เส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด และอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตจะแปรผันอย่างไม่เป็นเส้นตรงกับความขรุขระผิวชิ้นงาน ดังนั้นสมการที่ใช้ในการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานจึงควรจะเป็นลักษณะเอกซ์โปเนนเชียลฟังก์ชันประกอบไปด้วยเงื่อนไขการตัดดังกล่าว

แบบจำลองที่ใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานชิ้นงานเฉลี่ยและค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการตัดแสดงดังสมการ

$$R_a = C_1 \cdot (V)^{a_1} \cdot (f)^{a_2} \cdot (d)^{a_3} \cdot (D)^{a_4} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{a_5} \quad (4.6-1)$$

$$R_z = C_2 \cdot (V)^{a_6} \cdot (f)^{a_7} \cdot (d)^{a_8} \cdot (D)^{a_9} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{a_{10}} \quad (4.6-2)$$

- โดยที่ ค่า R_a คือ ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยในหน่วยไมโครเมตร (μm)
 ค่า R_z คือ ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดในหน่วยไมโครเมตร (μm)
 ค่า V คือ ค่าความเร็วตัด ในหน่วย เมตร/นาที (m/min)
 ค่า f คือ อัตราการป้อนตัด ในหน่วยมิลลิเมตร/รอบ (mm/rev)
 ค่า d คือ ความลึกตัด ในหน่วยมิลลิเมตร (mm)
 ค่า D คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด ในหน่วยมิลลิเมตร (mm)
 ค่า AF_x/AF_z คือ อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัต
 ค่า $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, C_1$ และ C_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์

การถดถอยของสมการ

จากสมการแบบไม่เชิงเส้น (4.6-1) และ (4.6-2) สามารถแปลงให้อยู่ในรูปสมการถดถอยพหุคูณด้วยการใช้การแปลงลอการิทึมดังนี้

$$\ln R_a = \ln C_1 + a_1 \ln V + a_2 \ln f + a_3 \ln d + a_4 \ln D + a_5 \ln \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right) \quad (4.6-3)$$

$$\ln R_z = \ln C_2 + a_6 \ln V + a_7 \ln f + a_8 \ln d + a_9 \ln D + a_{10} \ln \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right) \quad (4.6-4)$$

จากการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายดังนี้

$$y_1 = \gamma_1 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 \quad (4.6-5)$$

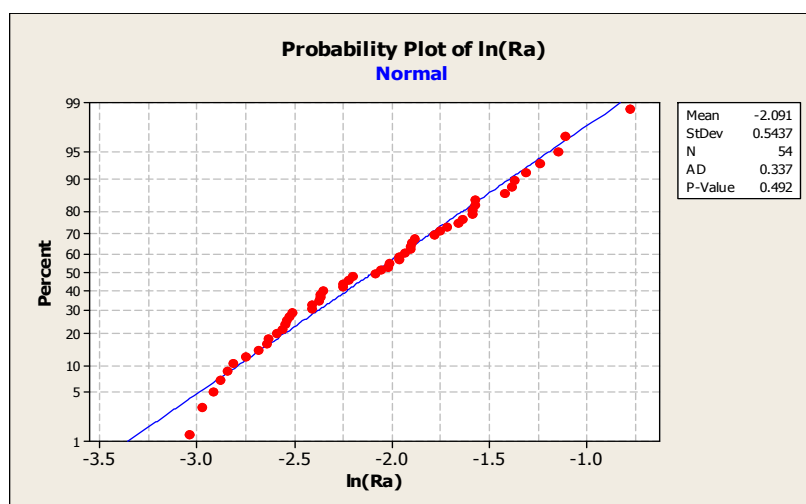
$$y_2 = \gamma_2 + \beta_6 x_6 + \beta_7 x_7 + \beta_8 x_8 + \beta_9 x_9 + \beta_{10} x_{10} \quad (4.6-6)$$

โดยที่ค่า y_1 แทนค่า $\ln R_a$, y_2 แทนค่า $\ln R_z$, ค่า $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9$ และ x_{10} แทนค่าการแปลงด้วยลอการิทึมของ $\ln V, \ln f, \ln d, \ln D$ และ $\ln \left(\frac{AF_x}{AF_z} \right)$, ค่า γ_1 และ γ_2 คือจุดตัดแกน y โดยที่ค่า $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8, \beta_9$ และ β_{10} คือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยโดยใช้การประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method)

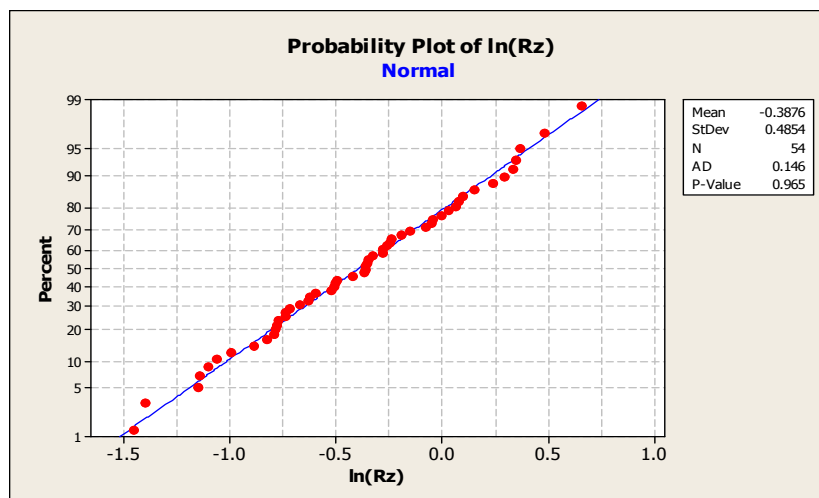
การวิเคราะห์ผลการทดลองของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จะต้องวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลก่อน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

4.6.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

ตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ของข้อมูลโดยการหาค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ มาสร้าง Normal Probability Plot โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้างได้ผลลัพธ์ดังนี้



รูปที่ 4.41 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย

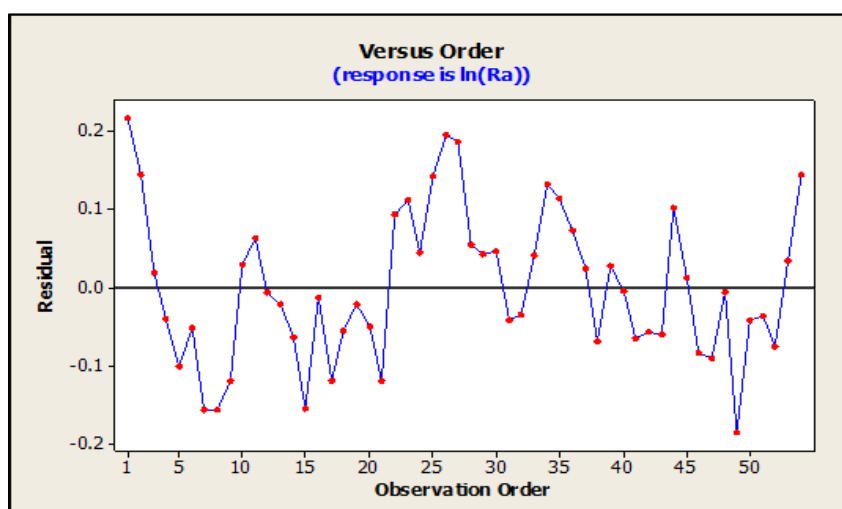


รูปที่ 4.42 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุด

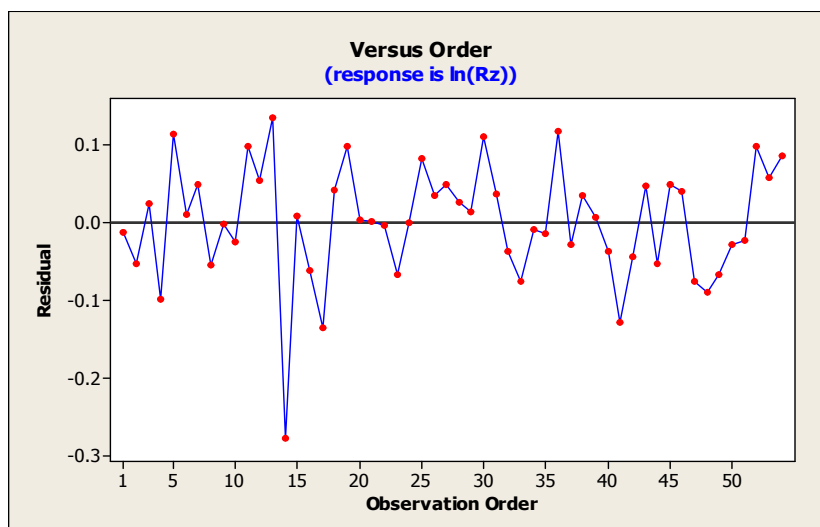
จากการทดสอบการกระจายแบบปกติของความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุด แสดงจากรูปที่ 4.41 และ 4.42 พบว่าค่าส่วนตกค้างของข้อมูลทั้งสองมีแนวโน้มอยู่ในแนวเส้นตรง เดียวกันและมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติและเป็น ข้อมูลที่เชื่อถือได้

4.6.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

ทดสอบความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระต่อกัน โดยค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และลำดับเวลา ของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน



รูปที่ 4.43 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย

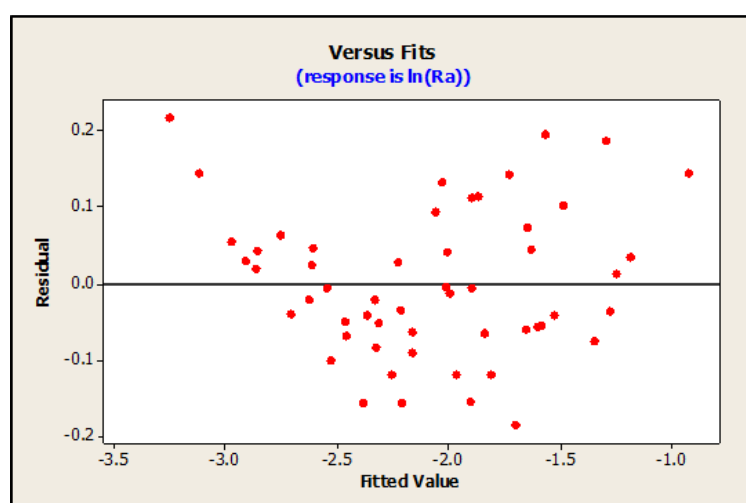


รูปที่ 4.44 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุด

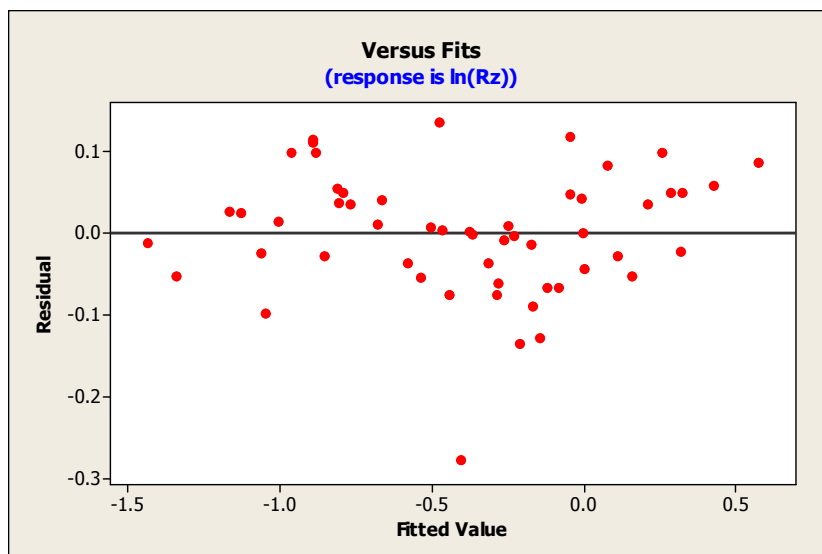
จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย และค่าความขรุขระผิวสูงสุด พบว่าข้อมูลค่าส่วนตกค้างไม่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

4.6.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิว

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งในงานวิจัยนี้คือค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน



รูปที่ 4.45 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ย



รูปที่ 4.46 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวสูงสุด

เมื่อพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุด พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวอย่างกระจัดกระจายไม่มีรูปแบบที่แน่นอน จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

4.7 การประมาณค่าความขรุขระผิวขึ้นงาน

ในการประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจากข้อมูลการตัดจริงจะได้แบบจำลองค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวสูงสุด ดังนี้

สมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย

$$\ln(Ra) = -6.93 + 0.58 \ln(v) + 0.54 \ln(f) + 0.75 \ln(d) + 0.46 \ln(D) + 0.600 \ln\left(\frac{AF_x}{AF_z}\right) \quad (4.7-1)$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	15.2323	3.0465	338.27	0.000
Residual Error	48	0.4323	0.0090		
Total	53	15.6646			

S = 0.0948998

R-Sq = 97.2%

R-Sq(adj) = 97.0%

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-6.9283	0.9490	-7.30	0.000
ln(Di)	0.45561	0.07140	6.38	0.000
ln(d)	0.7548	0.1192	6.33	0.000
ln(f)	0.54351	0.09206	5.90	0.000
ln(v)	0.5850	0.1342	4.36	0.000
ln(AFx/AFz)	0.6005	0.1665	3.61	0.001

รูปที่ 4.47 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณด้วยค่าแปลงลอการิทึมค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย

จากการวิเคราะห์ข้อมูลของการทดลองโดยการตั้งสมมติฐานทางสถิติคือ

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

Ha : มี μ อย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน

การทดลองนี้ทดสอบโดยใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% (α เท่ากับ 0.05) จากการคำนวณค่าโดยใช้ การวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า P-Value ของสมการพยากรณ์มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยที่เลือกมาใช้ในสมการมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ และจากคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) และ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่า (Adjusted R-squared) พบว่าค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันคือ 97.2% และ 97.0% แสดงว่าตัวแปรที่เลือกใช้ในสมการพยากรณ์มีความเหมาะสมดี

นำข้อมูลดังกล่าวมาทดสอบค่าสัมประสิทธิ์โดยตั้งสมมติฐานว่า

$$H_0: \beta_j = 0$$

$$H_a: \beta_j \neq 0$$

จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์พบว่าทุกปัจจัยมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบ, อัตราป้อนตัด, ความลึกตัดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยในสมการพยากรณ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวสูงสุด

$$\ln(Rz) = -4.05 + 0.40 \ln(v) + 0.34 \ln(f) + 0.64 \ln(d) + 0.26 \ln(D) + 0.806 \ln\left(\frac{AFx}{AFz}\right) \quad (4.7-2)$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	12.2625	2.4525	523.47	0.000
Residual Error	48	0.2249	0.0047		
Total	53	12.4874			

S = 0.0684479 R-Sq = 98.2% R-Sq(adj) = 98.0%

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-4.0545	0.6352	-6.38	0.000
ln(Di)	0.26492	0.05092	5.20	0.000
ln(d)	0.64029	0.09051	7.07	0.000
ln(f)	0.34053	0.06341	5.37	0.000
ln(v)	0.39884	0.08958	4.45	0.000
ln(AFx/AFz)	0.8061	0.1251	6.44	0.000

รูปที่ 4.48 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณด้วยค่าแปลงลอการิทึมค่าความขรุขระผิวสูงสุด

ในการทำงานเดียวกันการทดสอบค่าความขรุขระผิวสูงสุดโดยใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% (α เท่ากับ 0.05) จากการคำนวณค่าโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า P-Value ของสมการพยากรณ์มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยที่เลือกมาใช้ในสมการมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ และจากคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) และ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่า (Adjusted R-squared) พบว่าค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันคือ 98.2% และ 98.0% แสดงว่าตัวแปรที่เลือกใช้ในสมการพยากรณ์มีความเหมาะสมดี

นอกจากนั้นจากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์พบว่าทุกปัจจัยมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบ, อัตราป้อนตัด, ความลึกตัดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความขรุขระผิวสูงสุดในสมการพยากรณ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สมการที่ (4.7-1) และ (4.7-2) เป็นสมการที่ได้มาจากการแปลงรูปลอการิทึม จัดให้อยู่ในรูปสมการเอกซโพเนนเชียลดังเดิมดังสมการที่ (4.7-3) และ (4.7-4)

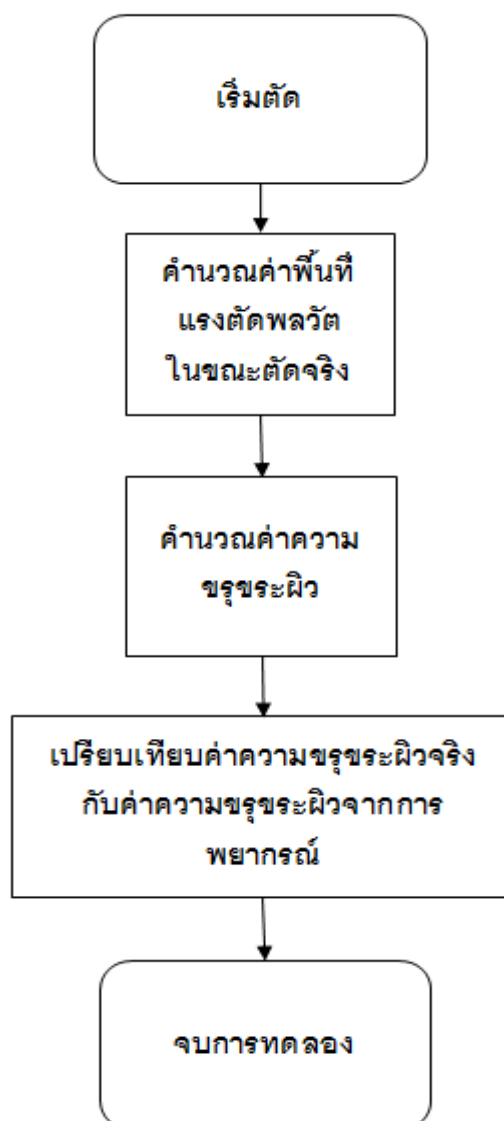
$$\hat{R}_a = e^{-6.93} \cdot (V)^{0.58} \cdot (f)^{0.54} \cdot (d)^{0.75} \cdot (D)^{0.46} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{0.600} \quad (4.7-3)$$

$$\hat{R}_z = e^{-4.05} \cdot (V)^{0.40} \cdot (f)^{0.34} \cdot (d)^{0.64} \cdot (D)^{0.26} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{0.806} \quad (4.7-4)$$

จากการทดลองจะได้แบบจำลองการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดด้วยความเชื่อมั่นที่ 95% นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเลขชี้กำลังของค่าตัวแปรต่างๆจะพบว่าตัวแปรทุกตัวมีเลขชี้กำลังเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าค่าความขรุขระผิวจะแปรผันตามค่าความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดและอัตราส่วนแรงตัดพลวัต ซึ่งตรงตามลักษณะกราฟที่สร้างขึ้นในหัวข้อที่ 4.5 และ 4.6 โดยค่าความลึกตัดและอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าเลขชี้กำลังสูงสุดแสดงว่าค่าความลึกตัดและอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อความขรุขระผิวมากที่สุด

4.8 การทดสอบความแม่นยำของสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน

ในการนำค่าแบบจำลองที่ได้ไปใช้ในงานจริงสามารถทำได้โดยการเก็บสัญญาณแรงตัดพลวัตที่ได้จากไดนาโมมิเตอร์ในขณะตัดที่เวลาใดๆมาหาอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟโดยการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยจะได้ค่าอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟในขณะช่วงเวลาที่ต้องการและนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความขรุขระผิว ทำให้ทราบค่าความขรุขระผิวในช่วงเวลานั้นๆได้



รูปที่ 4.49 ขั้นตอนการทดสอบความแม่นยำของสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน

การคำนวณความแม่นยำของสมการ สามารถคำนวณจากค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามสมการที่ 4.8-1 และ 4.8-2 ดังนี้

$$\text{ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย} = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|f_t - a_t|}{a_t} \quad (4.8-1)$$

$$\text{ค่าความแม่นยำของสมการพยากรณ์} = 100 - \left(\frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|f_t - a_t|}{a_t} \right) \quad (4.8-2)$$

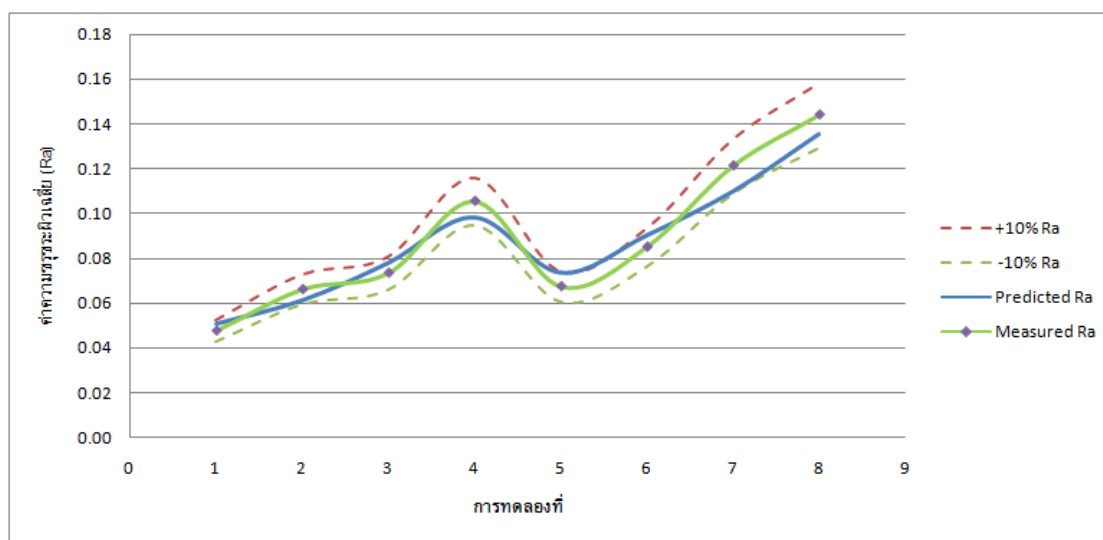
โดยที่ f คือ ความขรุขระผิวที่ได้จากสมการทำนายความขรุขระผิว a คือ ค่าความขรุขระผิวจริงที่ได้จากการวัด และ t คือ ข้อมูลที่ 1 ถึง n

4.8.1 การทดสอบที่อยู่ในขอบเขตการพยากรณ์

จากผลการทดลองพบว่าสมการที่ได้มีความแม่นยำโดยทำการตัดด้วยเงื่อนไขการตัดดังนี้

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการตัดใหม่ในขอบเขตและค่าที่ได้จากการทดลอง

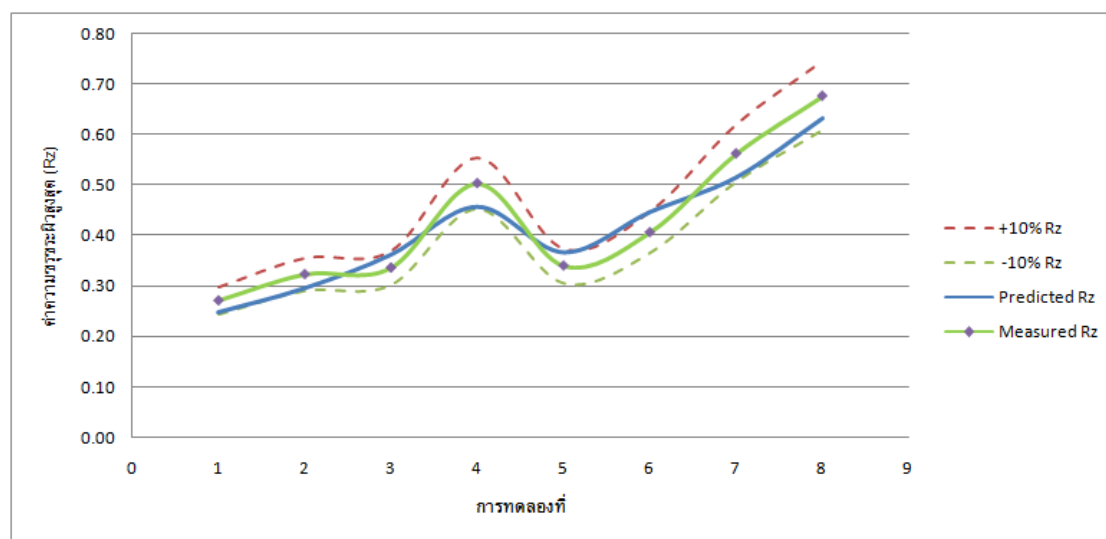
Test no.	D	d	f	v	AFx/AFz	Predicted Ra	Measured Ra
1	8	0.6	0.03	9000	0.9850	0.051	0.048
2	8	0.6	0.03	11000	1.1111	0.061	0.066
3	8	0.6	0.05	9000	1.2730	0.078	0.074
4	8	0.6	0.05	11000	1.5406	0.099	0.106
5	8	0.8	0.03	9000	1.2771	0.074	0.068
6	8	0.8	0.03	11000	1.4781	0.090	0.085
7	8	0.8	0.05	9000	1.5727	0.110	0.121
8	8	0.8	0.05	11000	1.8364	0.136	0.144



รูปที่ 4.50 กราฟแสดงค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองด้วยเงื่อนไขใหม่
เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ในขอบเขต

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขการตัดใหม่ในขอบเขตและค่าที่ได้จากการทดลอง

Test no.	D	d	f	v	AFx/AFz	Predicted Rz	Measured Rz
1	8	0.6	0.03	9000	0.9850	0.247	0.272
2	8	0.6	0.03	11000	1.1111	0.295	0.324
3	8	0.6	0.05	9000	1.2730	0.361	0.337
4	8	0.6	0.05	11000	1.5406	0.456	0.504
5	8	0.8	0.03	9000	1.2771	0.366	0.341
6	8	0.8	0.03	11000	1.4781	0.446	0.407
7	8	0.8	0.05	9000	1.5727	0.515	0.563
8	8	0.8	0.05	11000	1.8364	0.632	0.677



รูปที่ 4.51 กราฟแสดงค่าความขรุขระผิวสูงสุดที่ได้จากการทดลองด้วยเงื่อนไขใหม่
เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ในขอบเขต

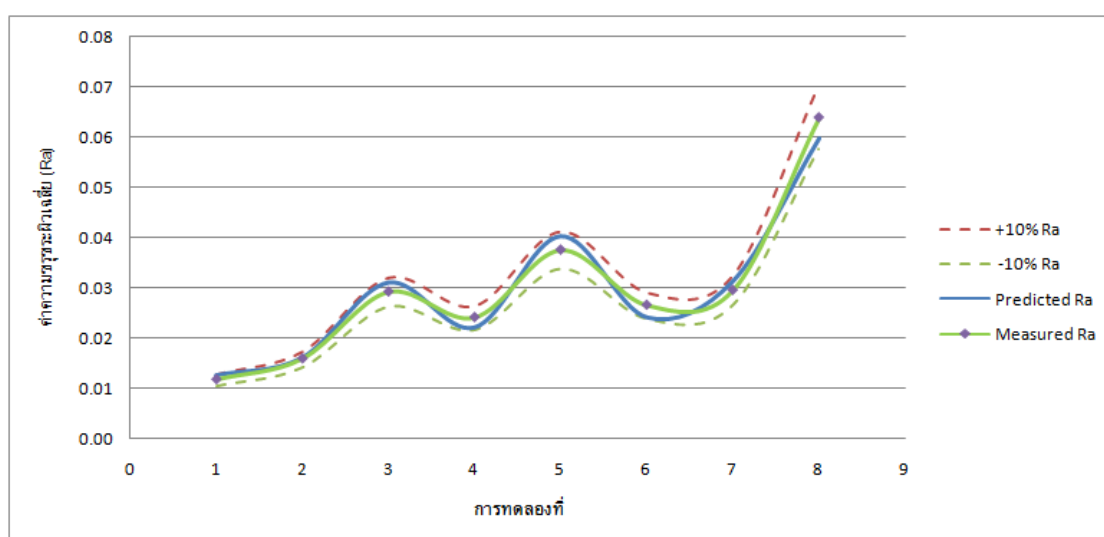
การตัดที่เงื่อนไขใหม่จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 ทำให้ได้ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการพยากรณ์เทียบกับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการวัดจริงโดยแสดงในรูปที่ 4.50 และ 4.51 ซึ่งค่าพยากรณ์ยังอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำ และได้ความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย เท่ากับ 92.86% และค่าความขรุขระผิวสูงสุด เท่ากับ 91.64% ตามลำดับ

4.8.2 การทดสอบที่อยู่นอกขอบเขตการพยากรณ์

งานวิจัยนี้ได้ทดลองนำแบบจำลองที่ได้ทดสอบตัดที่เงื่อนไขการตัดเดียวกับในงานวิจัยก่อนหน้าซึ่งใช้อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดสถิต [11] โดยมีเงื่อนไขการตัดอยู่นอกขอบเขตการตัดเดิม ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 เงื่อนไขการตัดใหม่ นอกขอบเขตและค่าที่ได้จากการทดลอง

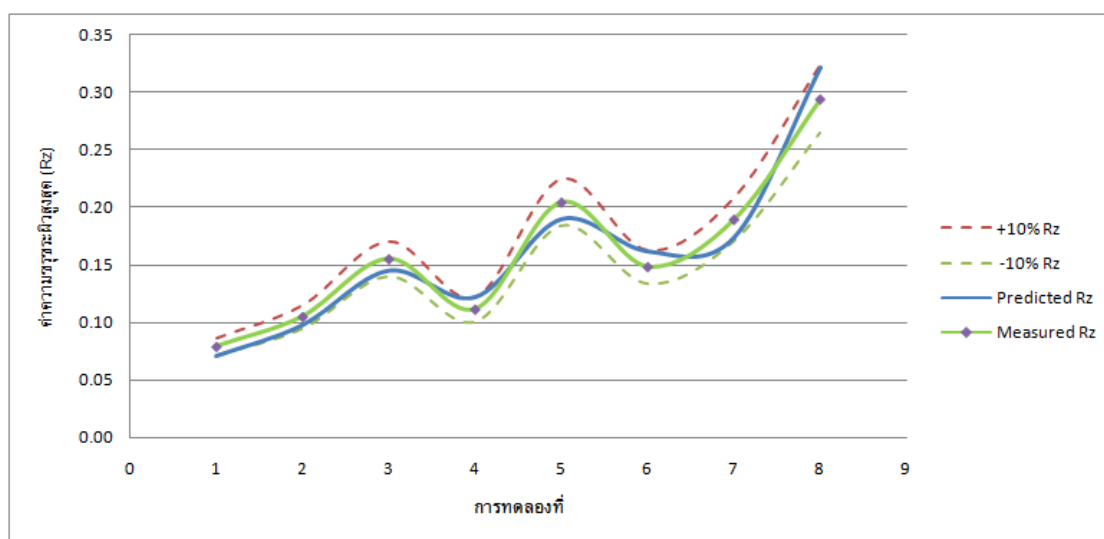
Test no.	D	d	f	v	AFx/AFz	Predicted Ra	Measured Ra
1	8	0.3	0.01	8000	0.6161	0.012	0.013
2	8	0.3	0.01	10000	0.8201	0.016	0.016
3	8	0.3	0.03	10000	0.8398	0.029	0.031
4	8	0.3	0.03	8000	0.7577	0.024	0.022
5	8	0.3	0.03	12000	1.0696	0.038	0.040
6	8	0.5	0.01	10000	1.0177	0.027	0.024
7	8	0.5	0.01	12000	1.0180	0.030	0.032
8	8	0.5	0.03	12000	1.3683	0.064	0.060



รูปที่ 4.52 กราฟแสดงค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองด้วยเงื่อนไขใหม่
เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์นอกขอบเขต

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขการตัดใหม่นอกขอบเขตและค่าที่ได้จากการทดลอง

Test no.	D	d	f	v	AFx/AFz	Predicted Rz	Measured Rz
1	8	0.3	0.01	8000	0.6161	0.071	0.079
2	8	0.3	0.01	10000	0.8201	0.098	0.105
3	8	0.3	0.03	10000	0.8398	0.145	0.155
4	8	0.3	0.03	8000	0.7577	0.122	0.111
5	8	0.3	0.03	12000	1.0696	0.190	0.204
6	8	0.5	0.01	10000	1.0177	0.162	0.148
7	8	0.5	0.01	12000	1.0180	0.174	0.189
8	8	0.5	0.03	12000	1.3683	0.321	0.294



รูปที่ 4.53 กราฟแสดงค่าความขรุขระผิวสูงสุดที่ได้จากการทดลองด้วยเงื่อนไขใหม่
เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์นอกขอบเขต

จากการตัดที่เงื่อนไขใหม่จากตาราง 4.3 และ 4.4 ทำให้ได้ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการพยากรณ์เทียบกับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการวัดจริง ซึ่งค่าพยากรณ์ยังอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ และให้ความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย เท่ากับ 93.21% และค่าความขรุขระผิวสูงสุดเท่ากับ 91.75% ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าอัตราป้อนและความลึกตัดบางค่าที่นำมาใช้ในการทดสอบอยู่นอกช่วง

ของค่าที่นำมาสร้างสมการพยากรณ์ อย่างไรก็ตามจะพบว่าสมการพยากรณ์ที่สร้างขึ้นยังคงสามารถพยากรณ์ค่าได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้ประยุกต์ใช้สัดส่วนแรงตัดพลวัตซึ่งเป็นตัวแปรที่กำจัดอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัดและช่วยปรับค่าการพยากรณ์ความขรุขระผิวให้เข้าสู่ค่าที่ถูกต้อง

นอกจากนี้เมื่อเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าโดยใช้เงื่อนไขการตัดทดสอบเดียวกัน ซึ่งใช้อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดสถิตดังสมการที่ 4.8-3

$$\hat{R}_a = 7.5 \cdot 10^{-6} \cdot v^{0.964} \cdot f^{0.195} \cdot D^{2.69} \cdot d^{0.917} \cdot \left(\frac{F_x}{F_z}\right)^{-2.6} \quad (4.8-3)$$

พบว่าความแม่นยำจากการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยโดยใช้อัตราส่วนแรงตัดสถิตเท่ากับ 88.73% และการพยากรณ์ค่าโดยใช้อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัต เท่ากับ 93.21% ซึ่งพบว่าสมการพยากรณ์ค่าโดยใช้แรงตัดพลวัตจะทำให้ได้ค่าความแม่นยำที่สูงขึ้น

4.9 การสร้างแบบจำลองแยก

เนื่องจากในกระบวนการตัดส่วนใหญ่ มักใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดเดียวกันตลอดกระบวนการ ดังนั้นการสร้างแบบจำลองแยกในแต่ละเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดจึงอาจเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการผลิตอย่างแท้จริง ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำแบบจำลองแยกสำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดขนาด 6 และ 10 มิลลิเมตร ดังนี้

4.9.1 การสร้างสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน

แบบจำลองที่ใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานชิ้นงานเฉลี่ยและค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัดแสดงดังสมการ

$$R_a = C_3 \cdot (V)^{a_{11}} \cdot (f)^{a_{12}} \cdot (d)^{a_{13}} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{a_{14}} \quad (4.9-1)$$

$$R_z = C_4 \cdot (V)^{a_{15}} \cdot (f)^{a_{16}} \cdot (d)^{a_{17}} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{a_{18}} \quad (4.9-2)$$

โดยที่ ค่า R_a คือ ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยในหน่วยไมโครเมตร (μm)

ค่า R_z คือ ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดในหน่วยไมโครเมตร (μm)

ค่า V คือ ค่าความเร็วตัด ในหน่วย เมตร/นาที (m/min)

ค่า f คือ อัตราการป้อนตัด ในหน่วยมิลลิเมตร/รอบ (mm/rev)

ค่า d คือ ความลึกตัด ในหน่วยมิลลิเมตร (mm)

ค่า AF_x/AF_z คือ พื้นที่อัตราส่วนแรงตัดพลวัต

ค่า $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}, a_{16}, a_{17}, a_{18}, C_3$ และ C_4 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการ

จากสมการแบบไม่เชิงเส้น (4.9-1) และ (4.9-2) สามารถแปลงให้อยู่ในรูปสมการถดถอยพหุคูณด้วยการใช้การแปลงลอการิทึมดังนี้

$$\ln R_a = \ln C_3 + a_{11} \ln V + a_{12} \ln f + a_{13} \ln d + a_{14} \ln \left(\frac{AF_x}{AF_z} \right) \quad (4.9-3)$$

$$\ln R_z = \ln C_4 + a_{15} \ln V + a_{16} \ln f + a_{17} \ln d + a_{18} \ln \left(\frac{AF_x}{AF_z} \right) \quad (4.9-4)$$

จากการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายดังนี้

$$y_3 = \gamma_3 + \beta_{11}x_{11} + \beta_{12}x_{12} + \beta_{13}x_{13} + \beta_{14}x_{14} \quad (4.9-5)$$

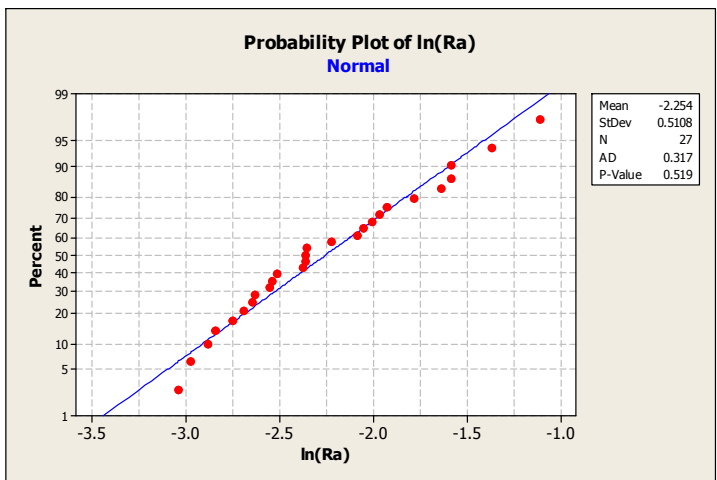
$$y_4 = \gamma_4 + \beta_{15}x_{15} + \beta_{16}x_{16} + \beta_{17}x_{17} + \beta_{18}x_{18} \quad (4.9-6)$$

โดยที่ค่า y_3 แทนค่า $\ln R_a$, y_4 แทนค่า $\ln R_z$, ค่า $x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}$ และ x_{18} แทนค่าการแปลงด้วยลอการิทึมของ $\ln V, \ln f, \ln d$ และ $\ln \left(\frac{AF_x}{AF_z} \right)$, ค่า γ_3 และ γ_4 คือ จุดตัดแกน y โดยที่ค่า $\beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{14}, \beta_{15}, \beta_{16}, \beta_{17}$ และ β_{18} คือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยโดยใช้การประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method)

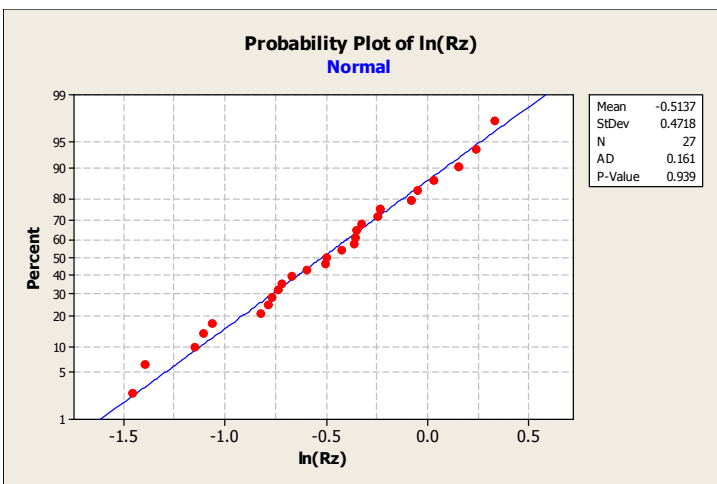
การวิเคราะห์ผลการทดลองของความขรุขระผิวชิ้นงานด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จะต้องวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลก่อน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

4.9.1.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

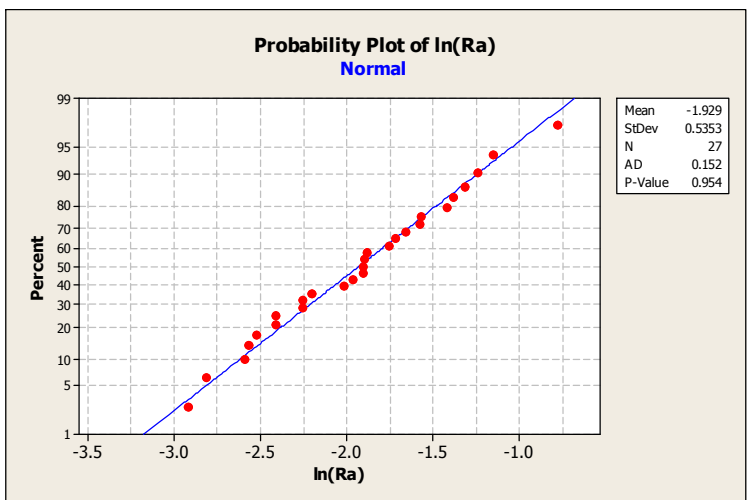
ตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ของข้อมูลโดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ มาสร้าง Normal Probability Plot โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้างได้ผลลัพธ์ดังนี้



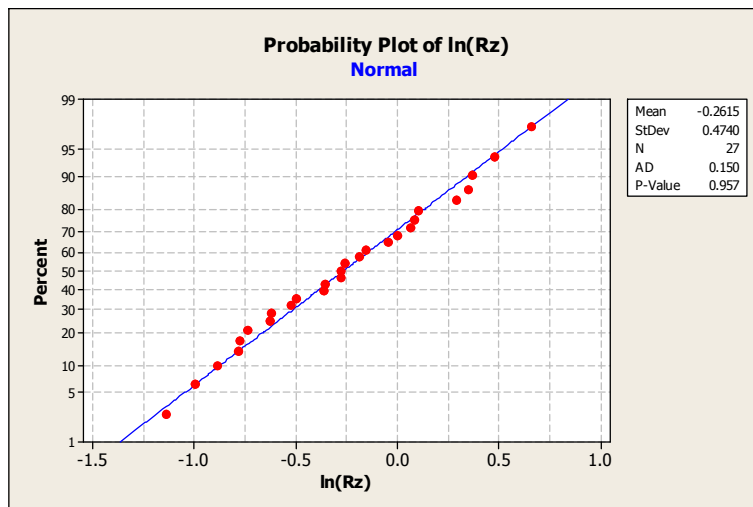
รูปที่ 4.54 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ขนาด 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.55 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุดที่ขนาด 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.56 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ขนาด 10 มิลลิเมตร

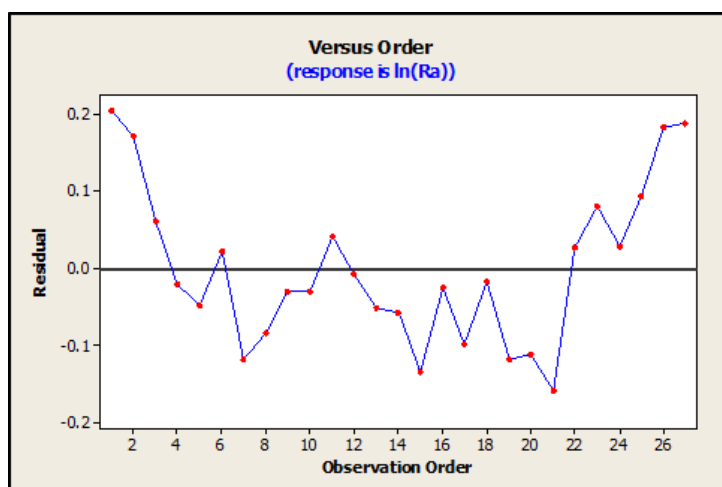


รูปที่ 4.57 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุดที่ขนาด 10 มิลลิเมตร

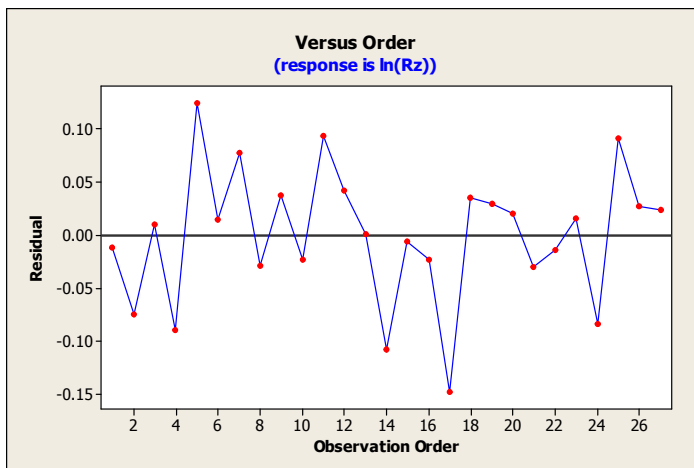
จากการทดสอบการกระจายแบบปกติของความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุด พบว่าค่าส่วนตกค้างของข้อมูลทั้งสองมีแนวโน้มอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันและมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติและเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้

4.9.1.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

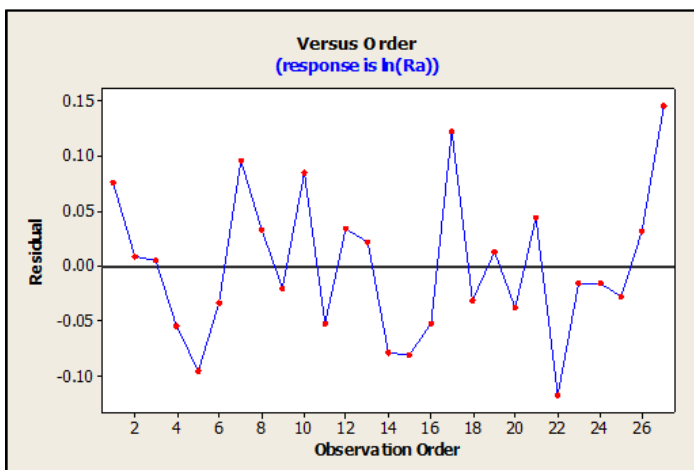
ทดสอบความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน โดยค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน



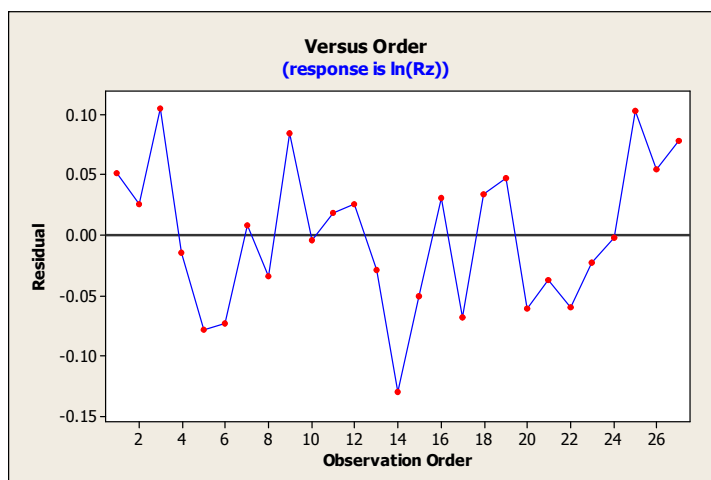
รูปที่ 4.58 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ขนาด 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.59 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุดที่ขนาด 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.60 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ขนาด 10 มิลลิเมตร

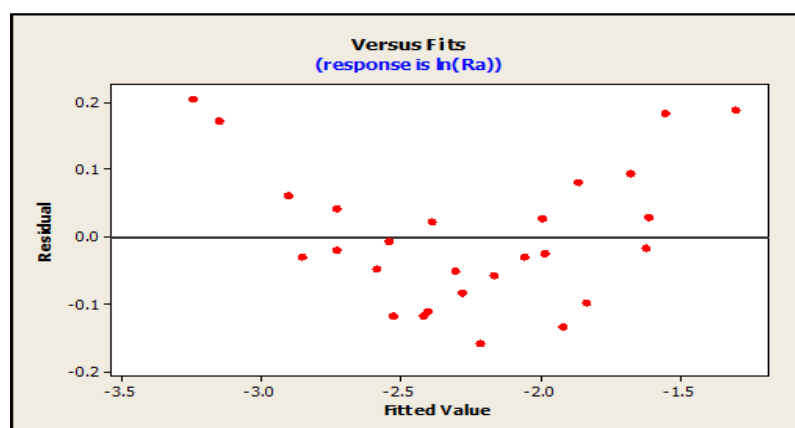


รูปที่ 4.61 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุดที่ขนาด 10 มิลลิเมตร

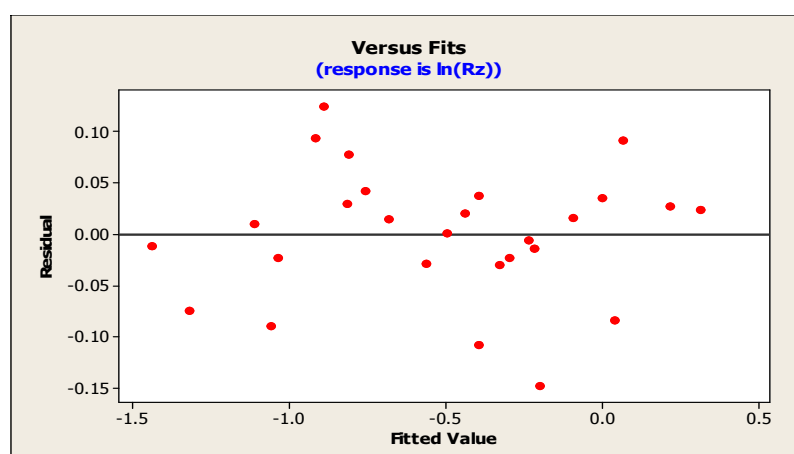
จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย และค่าความขรุขระผิวสูงสุด พบว่าข้อมูลค่าส่วนตกค้างไม่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

4.9.1.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิว

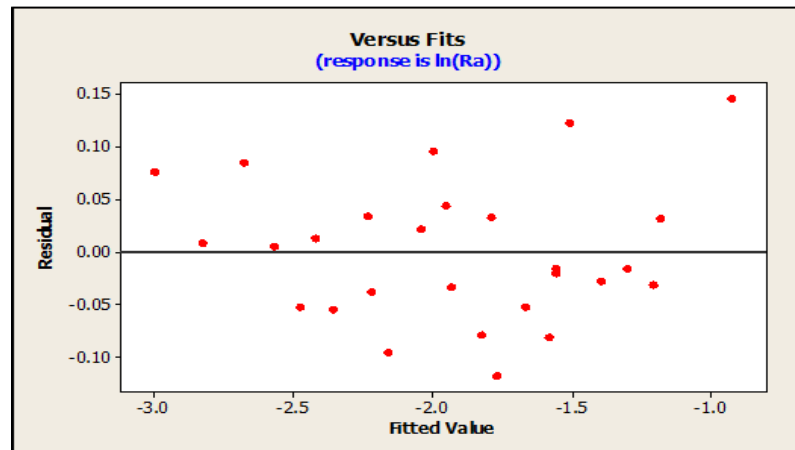
เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งในงานวิจัยนี้คือค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน



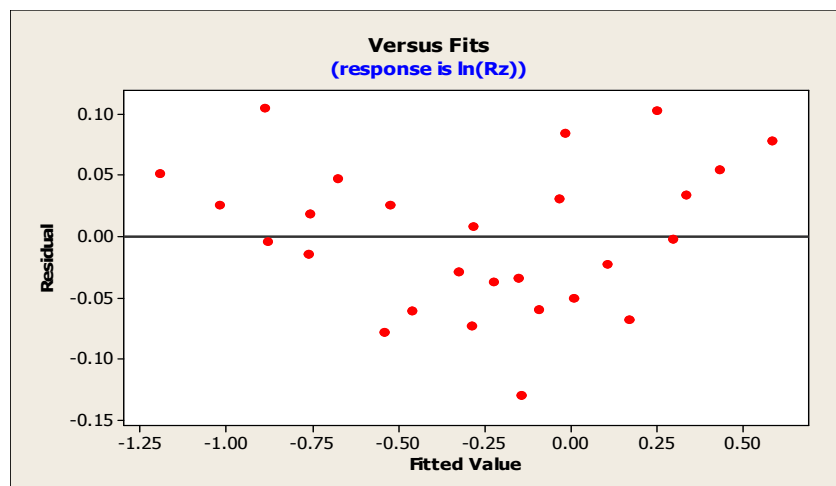
รูปที่ 4.62 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ขนาด 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.63 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวสูงสุดที่ขนาด 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.64 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน
ของความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ขนาด 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.65 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน
ของความขรุขระผิวสูงสุดที่ขนาด 10 มิลลิเมตร

เมื่อพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและความขรุขระผิวสูงสุด พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวอย่างจัดกระจายไม่มีรูปแบบที่แน่นอน จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

4.9.2 การประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน

การประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจากข้อมูลการตัดจริงจะได้แบบจำลองค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรดังสมการ (4.9-7), (4.9-8) และเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรดังสมการ (4.9-9), (4.9-10)

สมการพยากรณ์สำหรับขนาดมีดตัด 6 มิลลิเมตร

$$\ln(Ra) = -5.26 + 0.49 \ln(v) + 0.51 \ln(f) + 0.85 \ln(d) + 0.534 \ln\left(\frac{AFx}{AFz}\right) \quad (4.9-7)$$

$$\ln(Rz) = -4.02 + 0.47 \ln(v) + 0.36 \ln(f) + 0.78 \ln(d) + 0.690 \ln\left(\frac{AFx}{AFz}\right) \quad (4.9-8)$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	6.5312	1.6328	142.90	0.000
Residual Error	22	0.2514	0.0114		
Total	26	6.7826			

S = 0.106892 R-Sq = 96.3% R-Sq(adj) = 95.6%

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-5.262	1.403	-3.75	0.001
ln(d)	0.8453	0.2028	4.17	0.000
ln(f)	0.5127	0.1360	3.77	0.001
ln(v)	0.4921	0.2074	2.37	0.027
ln(AFx/AFz)	0.5344	0.2442	2.19	0.040

รูปที่ 4.66 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณด้วยค่าแปลงลอการิทึมของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	5.6827	1.4207	301.75	0.000
Residual Error	22	0.1036	0.0047		

S = 0.0686154 R-Sq = 98.2% R-Sq(adj) = 97.9%

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-4.0170	0.8149	-4.93	0.000
ln(d)	0.7843	0.1628	4.82	0.000
ln(f)	0.35897	0.08951	4.01	0.001
ln(v)	0.4712	0.1237	3.81	0.001
ln(AFx/AFz)	0.6896	0.1958	3.52	0.002

รูปที่ 4.67 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณด้วยค่าแปลงลอการิทึมของค่าความขรุขระผิวสูงสุดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร

การทดลองนี้ทดสอบโดยใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% (α เท่ากับ 0.05) จากการคำนวณค่าโดยใช้ การวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า P-Value ของสมการพยากรณ์มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยที่เลือกมาใช้ในสมการมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ และจากคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) และ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่า (Adjusted R-squared) พบว่าค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันคือ 96.3% และ 95.6% สำหรับค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและ 98.2% และ 97.9% สำหรับค่าความขรุขระผิวสูงสุด แสดงว่าตัวแปรที่เลือกใช้ในสมการพยากรณ์มีความเหมาะสมดี

จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์พบว่าทุกปัจจัยมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วรอบ, อัตราป้อนตัด, ความลึกตัดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความขรุขระผิวในสมการพยากรณ์ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สมการพยากรณ์สำหรับขนาดมีดตัด 10 มิลลิเมตร

$$\ln(Ra) = -6.87 + 0.70 \ln(v) + 0.59 \ln(f) + 0.70 \ln(d) + 0.628 \ln\left(\frac{AFx}{AFz}\right) \quad (4.9-9)$$

$$\ln(Rz) = -3.87 + 0.53 \ln(v) + 0.50 \ln(f) + 0.71 \ln(d) + 0.566 \ln\left(\frac{AFx}{AFz}\right) \quad (4.9-10)$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	7.3520	1.8380	408.79	0.000
Residual Error	22	0.0989	0.0045		
Total	26	7.4509			

S = 0.0670534 | R-Sq = 98.7% | R-Sq(adj) = 98.4%

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-6.8711	0.9464	-7.26	0.000
ln(d)	0.6997	0.1281	5.46	0.000
ln(f)	0.5947	0.1201	4.95	0.000
ln(v)	0.7057	0.1602	4.40	0.000
ln(AFx/AFz)	0.6276	0.2216	2.83	0.010

รูปที่ 4.68 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณด้วยค่าแปลงลอการิทึมของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	5.7481	1.4370	336.56	0.000
Residual Error	22	0.0939	0.0043		
Total	26	5.8421			

S = 0.0653436 R-Sq = 98.4% R-Sq(adj) = 98.1%

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-3.8730	0.9223	-4.20	0.000
ln(d)	0.7134	0.1249	5.71	0.000
ln(f)	0.4987	0.1171	4.26	0.000
ln(v)	0.5343	0.1561	3.42	0.002
ln(AFx/AFz)	0.5663	0.2160	2.62	0.016

รูปที่ 4.69 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณด้วยค่าแปลงลอการิทึม
ของค่าความขรุขระผิวสูงสุดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

ในการทำงานเดียวกันการทดสอบโดยใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% (α เท่ากับ 0.05) จากการค้า
คำนวณค่าโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า P-Value ของสมการพยากรณ์มีค่าน้อยกว่า
0.05 แสดงว่าปัจจัยที่เลือกมาใช้ในสมการมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ และจาก
คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) และ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับค่า
(Adjusted R-squared) พบว่าค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันคือ 98.7% และ 98.4% สำหรับค่า
ความขรุขระผิวเฉลี่ยและ 98.4% และ 98.1% สำหรับค่าความขรุขระผิวสูงสุด แสดงว่าตัวแปรที่
เลือกใช้ในสมการพยากรณ์มีความเหมาะสมดี

จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์พบว่าทุกปัจจัยมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่า
ความเร็วรอบ, อัตราป้อนตัด, ความลึกตัดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดส่งผลอย่างมี
นัยสำคัญต่อค่าความขรุขระผิวในสมการพยากรณ์ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรที่ระดับ
ความเชื่อมั่น 95%

สมการที่ (4.9-7), (4.9-8), (4.9-9) และ (4.9-10) เป็นสมการที่ได้มาจากการแปลงรูป
ลอการิทึม จัดให้อยู่ในรูปสมการเอกซ์โปเนนเชียลดั้งเดิมดังสมการที่ (4.7-11), (4.7-12), (4.7-13)
และ (4.7-14) ตามลำดับ

สมการพยากรณ์สำหรับขนาดมิดตัด 6 มิลลิเมตร

$$\hat{R}_a = e^{-5.26} \cdot (V)^{0.49} \cdot (f)^{0.51} \cdot (d)^{0.85} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{0.534} \quad (4.9-11)$$

$$\hat{R}_z = e^{-4.02} \cdot (V)^{0.47} \cdot (f)^{0.36} \cdot (d)^{0.78} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{0.690} \quad (4.9-12)$$

สมการพยากรณ์สำหรับขนาดมิดตัด 10 มิลลิเมตร

$$\hat{R}_a = e^{-6.87} \cdot (V)^{0.70} \cdot (f)^{0.59} \cdot (d)^{0.70} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{0.628} \quad (4.9-13)$$

$$\hat{R}_z = e^{-3.87} \cdot (V)^{0.53} \cdot (f)^{0.50} \cdot (d)^{0.71} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{0.566} \quad (4.9-14)$$

เมื่อพิจารณาเลขชี้กำลังของค่าตัวแปรต่างๆจะพบว่าตัวแปรทุกตัวมีเลขชี้กำลังเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าค่าความขรุขระผิวจะแปรผันตามค่าความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมิดตัดและอัตราส่วนแรงตัดพลวัต โดยค่าความลึกตัดและสัดส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าเลขชี้กำลังสูงสุดสอดคล้องกับสมการพยากรณ์แบบรวมในสมการที่ 4.7-3 และ 4.7-4 ซึ่งแสดงว่าค่าความลึกตัดและอัตราส่วนแรงตัดพลวัตที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อความขรุขระผิวมากที่สุด

4.9.3 การเปรียบเทียบแบบจำลอง

นำสมการพยากรณ์แบบแยกและรวมที่ได้มาทดสอบโดยการตัดใหม่เพื่อเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวจริงกับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการพยากรณ์ดังนี้

สมการพยากรณ์รวม

$$\hat{R}_a = e^{-6.93} \cdot (V)^{0.58} \cdot (f)^{0.54} \cdot (d)^{0.75} \cdot (D)^{0.46} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{0.600}$$

$$\hat{R}_z = e^{-4.05} \cdot (V)^{0.40} \cdot (f)^{0.34} \cdot (d)^{0.64} \cdot (D)^{0.26} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{0.806}$$

สมการพยากรณ์สำหรับขนาดมิดตัด 6 มิลลิเมตร

$$\hat{R}_a = e^{-5.26} \cdot (V)^{0.49} \cdot (f)^{0.51} \cdot (d)^{0.85} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{0.534}$$

$$\hat{R}_z = e^{-4.02} \cdot (V)^{0.47} \cdot (f)^{0.36} \cdot (d)^{0.78} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{0.690}$$

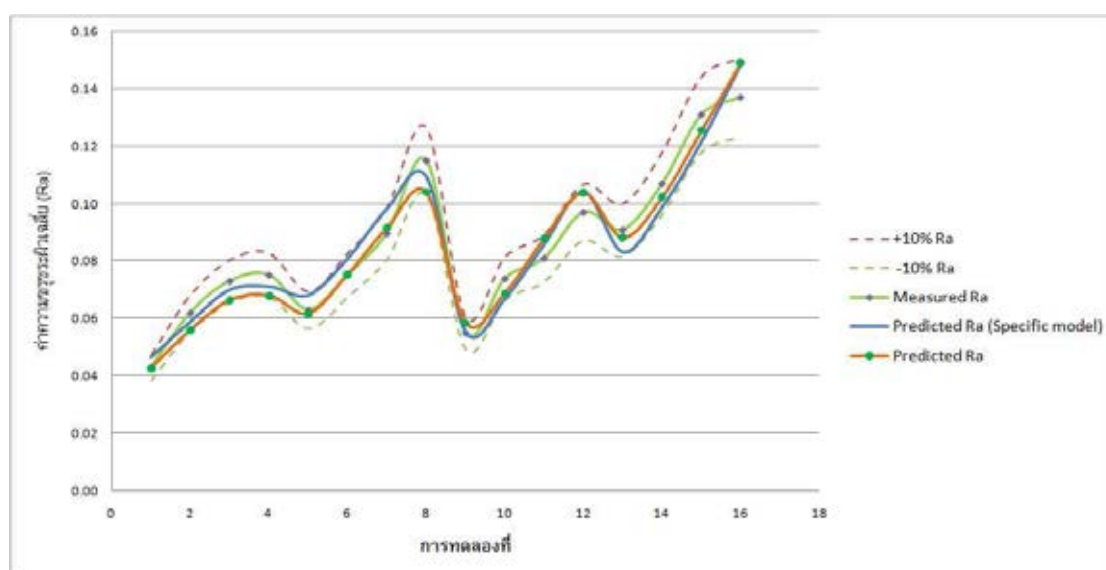
สมการพยากรณ์สำหรับขนาดมิดตัด 10 มิลลิเมตร

$$\hat{R}_a = e^{-6.87} \cdot (V)^{0.70} \cdot (f)^{0.59} \cdot (d)^{0.70} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{0.628}$$

$$\hat{R}_z = e^{-3.87} \cdot (V)^{0.53} \cdot (f)^{0.50} \cdot (d)^{0.71} \cdot \left(\frac{AF_x}{AF_z}\right)^{0.566}$$

ตารางที่ 4.6 เงื่อนไขการตัดใหม่และค่าที่ได้จากการทดลอง

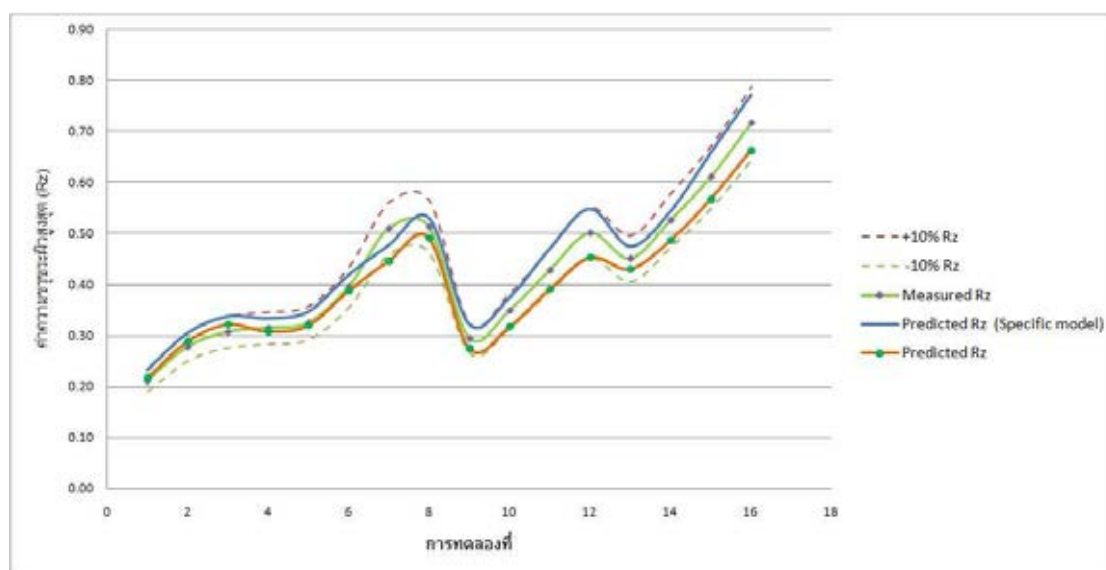
Test no.	D	d	f	v	AFx/AFz	Measured Ra	Predicted Ra (แยก)	Predicted Ra (รวม)
1	6	0.6	0.03	9000	0.9165	0.043	0.047	0.043
2	6	0.6	0.03	11000	1.1871	0.062	0.059	0.056
3	6	0.6	0.05	9000	1.2087	0.073	0.070	0.066
4	6	0.6	0.05	11000	1.0371	0.075	0.071	0.068
5	6	0.8	0.03	9000	1.1843	0.063	0.068	0.062
6	6	0.8	0.03	11000	1.3592	0.075	0.081	0.075
7	6	0.8	0.05	9000	1.4423	0.090	0.098	0.092
8	6	0.8	0.05	11000	1.4686	0.115	0.109	0.104
9	10	0.6	0.03	9000	1.0465	0.055	0.055	0.058
10	10	0.6	0.03	11000	1.1324	0.074	0.067	0.069
11	10	0.6	0.05	9000	1.3032	0.081	0.086	0.088
12	10	0.6	0.05	11000	1.4186	0.097	0.104	0.104
13	10	0.8	0.03	9000	1.4513	0.091	0.083	0.088
14	10	0.8	0.03	11000	1.5290	0.107	0.099	0.102
15	10	0.8	0.05	9000	1.6481	0.131	0.122	0.126
16	10	0.8	0.05	11000	1.8100	0.137	0.149	0.149



รูปที่ 4.70 กราฟแสดงค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองด้วยเงื่อนไขใหม่
เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ในสมการรวมและแยก

ตารางที่ 4.7 เงื่อนไขการตัดใหม่และค่าที่ได้จากการทดลอง

Test no.	D	d	f	v	AFx/AFz	Measured Rz	Predicted Rz (แยก)	Predicted Rz (รวม)
1	6	0.6	0.03	9000	0.9165	0.211	0.232	0.216
2	6	0.6	0.03	11000	1.1871	0.278	0.305	0.289
3	6	0.6	0.05	9000	1.2087	0.307	0.337	0.321
4	6	0.6	0.05	11000	1.0371	0.315	0.333	0.308
5	6	0.8	0.03	9000	1.1843	0.325	0.346	0.320
6	6	0.8	0.03	11000	1.3592	0.395	0.419	0.387
7	6	0.8	0.05	9000	1.4423	0.510	0.477	0.446
8	6	0.8	0.05	11000	1.4686	0.513	0.531	0.490
9	10	0.6	0.03	9000	1.0465	0.295	0.322	0.275
10	10	0.6	0.03	11000	1.1324	0.349	0.374	0.317
11	10	0.6	0.05	9000	1.3032	0.428	0.470	0.390
12	10	0.6	0.05	11000	1.4186	0.501	0.548	0.453
13	10	0.8	0.03	9000	1.4513	0.451	0.475	0.430
14	10	0.8	0.03	11000	1.5290	0.526	0.544	0.486
15	10	0.8	0.05	9000	1.6481	0.611	0.658	0.567
16	10	0.8	0.05	11000	1.8100	0.716	0.772	0.662



รูปที่ 4.71 กราฟแสดงค่าความขรุขระผิวสูงสุดที่ได้จากการทดลองด้วยเงื่อนไขใหม่
เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ในสมการรวมและแยก

จากเงื่อนไขการตัดใหม่แสดงดังตารางที่ 4.6 และ 4.7 จะได้ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการพยากรณ์เทียบกับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการวัดจริงโดยแสดงในรูปที่ 4.70 และ 4.71 ซึ่งค่าพยากรณ์ยังอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ โดยสมการพยากรณ์รวมให้ค่าความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยเท่ากับ 93.90% และค่าความขรุขระผิวสูงสุดเท่ากับ 94.24% ในขณะที่สมการพยากรณ์แยกให้ค่าความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย เท่ากับ 93.26% และค่าความขรุขระผิวสูงสุดเท่ากับ 92.73%

จากการทดสอบพบว่า การรวมและการแยกแบบจำลองให้การพยากรณ์ที่ใกล้เคียงกันโดยการพยากรณ์โดยใช้แบบจำลองรวมให้ค่าความแม่นยำสูงกว่าเล็กน้อยซึ่งอาจเป็นผลมาจากแบบจำลองนี้ได้มากกว่าจำนวนการทดลองที่มากกว่าทำให้มีความละเอียดแม่นยำมากกว่า

นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบโดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรในตารางที่ 4.2 พบว่าในการทดสอบโดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 และ 10 มิลลิเมตรให้ค่าความแม่นยำที่สูงกว่าเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามค่าความแม่นยำที่ได้ก็ยังคงมีค่ามากและสามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์ได้จริงแม้ว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมีตัดจะเปลี่ยนแปลงไป

ดังนั้นการประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตทำให้แบบจำลองรวมที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ในทุกกรณีโดยไม่ต้องคำนึงถึงขนาดมีตัด แต่ในขณะที่การแยกแบบจำลองต้องทำการทดลองใหม่เพื่อหาแบบจำลองอื่น ๆ ทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางมีตัด การใช้แบบจำลองรวมจึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้มากกว่า นอกจากนี้เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีตัดเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งมีผลต่อแรงตัดที่เกิดขึ้น การกำหนดปัจจัยนี้เป็นปัจจัยคงที่และตัดออกจากสมการพยากรณ์จึงมีผลให้ความสามารถในการพยากรณ์มีค่าน้อยลง

ค่าความแม่นยำที่ได้จากเงื่อนไขการทดสอบต่างๆสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.8 และ 4.9

ตารางที่ 4.8 การตัดทดสอบในและนอกขอบเขตโดยใช้ขนาดมีตัด 8 มิลลิเมตร

เงื่อนไขการตัด	สมการแรงตัดพลวัต(รวม)		สมการแรงตัดสถิต
	Ra	Rz	Ra
ค่าความแม่นยำของการตัดในขอบเขต	92.86%	91.64%	-
ค่าความแม่นยำของการตัดนอกขอบเขต	93.21%	91.74%	88.73%
ความแตกต่างของการพยากรณ์	การตัดในขอบเขตและนอกขอบเขตให้ค่าความแม่นยำใกล้เคียงกัน		สมการแรงตัดสถิตให้ค่าแม่นยำน้อยกว่าสมการแรงตัดพลวัต

ตารางที่ 4.9 การตัดทดสอบโดยใช้สมการรวมและแยกที่มีดัด 6 และ 10 มิลลิเมตร

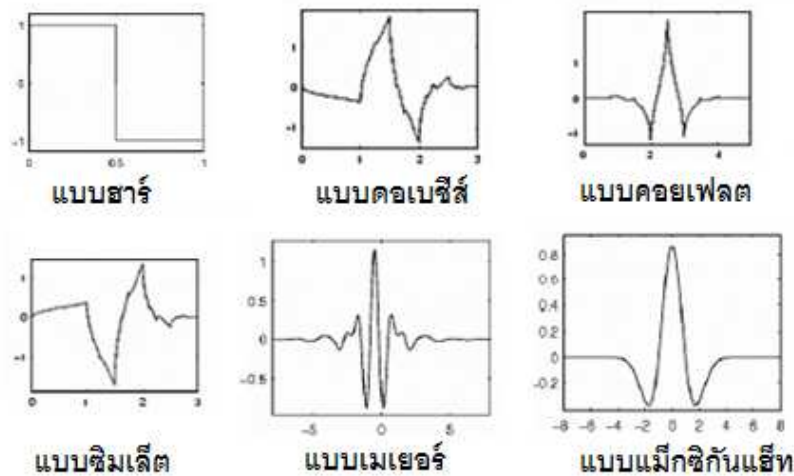
เงื่อนไขการตัด	สมการรวมตัดพลวัต(รวม)		สมการรวมตัดพลวัต(แยก)	
	Ra	Rz	Ra	Rz
ค่าความแม่นยำ	93.90%	94.24%	93.26%	92.73%
ความแตกต่างของการพยากรณ์	การตัดในขอบเขตและนอกขอบเขตให้ค่าความแม่นยำใกล้เคียงกัน		สมการรวมและแยกให้ค่าความแม่นยำใกล้เคียงกัน	

4.9 การวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้การแปลงแบบเวฟเล็ต

จากการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวโดยใช้สัญญาณแรงตัดพลวัตพบว่าให้ค่าความแม่นยำสูงกว่าการใช้แรงตัดสถิต ทั้งนี้เนื่องจากการใช้พื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตเป็นการวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดในทุกๆจุด ทำให้ได้ค่าละเอียดกว่าการใช้แรงตัดสถิตซึ่งเป็นค่าเฉลี่ย นอกจากนี้หากสามารถตัดสัญญาณรบกวนจากแรงตัดก่อนนำไปวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการพยากรณ์ได้ อาจจะทำให้ผลการพยากรณ์มีความแม่นยำมากขึ้น การตัดสัญญาณรบกวนดังกล่าวอาจทำได้โดยการใช้การแปลงสัญญาณแบบเวฟเล็ต ซึ่งมีข้อดีคือสามารถวิเคราะห์สัญญาณที่เกิดขึ้นได้ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ได้ไปพร้อมกัน

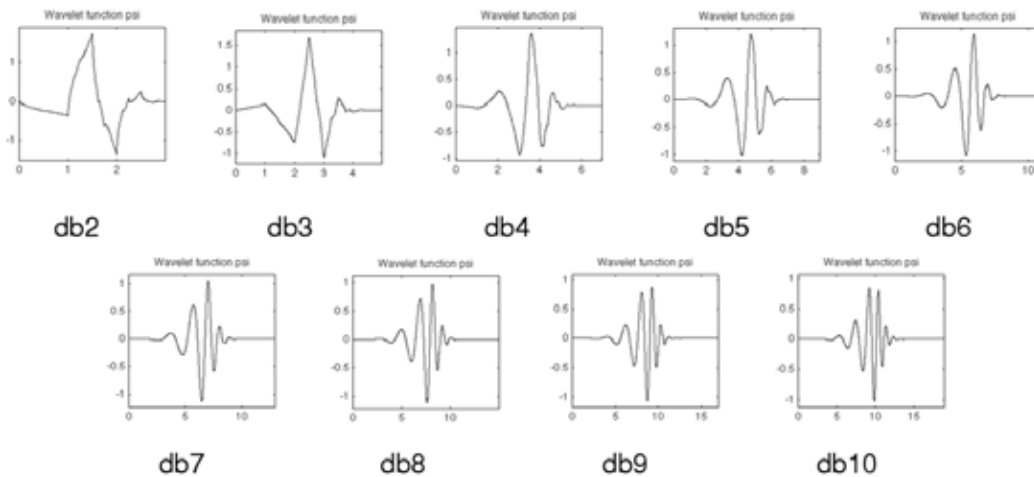
การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) เป็นการแปลงสัญญาณเพื่อใช้สำหรับโครงสร้างของระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยสัญญาณหลายๆสัญญาณมารวมกันเป็นสัญญาณหนึ่ง โดยเวฟเล็ตคือสัญญาณเฉพาะที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นเล็กๆ ซึ่งจะเป็นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง และขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์อย่างรวดเร็ว โดยเวฟเล็ตถูกแบบออกเป็นหลายลักษณะ ซึ่งเรียกลักษณะต่างๆเหล่านี้ว่า แฟมิลี (Family) ซึ่งแต่ละแฟมิลีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป เช่น คลื่นเวฟเล็ตแบบฮาร์, คลื่นเวฟเล็ตแบบเมเยอร์, คลื่นเวฟเล็ตแบบดอบเชชีส์ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.72

เวฟเล็ตที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายแบ่งเป็นหลายประเภทโดยขึ้นอยู่กับชนิดของแฟมิลีซึ่งบอกลักษณะรูปคลื่นและค่าหน่วยสัมประสิทธิ์ (Scale coefficient) ซึ่งบอกถึงความละเอียดของรูปคลื่นในแต่ละแฟมิลีที่แตกต่างกันไป เช่น db4 โดยค่า db หมายถึง แฟมิลีของเวฟเล็ตคือเวฟเล็ตแบบดอบเชชีส์ และ 4 หมายถึงค่าหน่วยสัมประสิทธิ์หรือความละเอียดของรูปคลื่นในระดับ 4 ดังนั้นในการทดลองจึงควรเลือกใช้แฟมิลีและหน่วยสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมกับสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ให้มากที่สุด โดยลักษณะของแฟมิลีต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.72



รูปที่ 4.72 ลักษณะของเวฟเล็ตที่แฟมิลีต่างๆ [22]

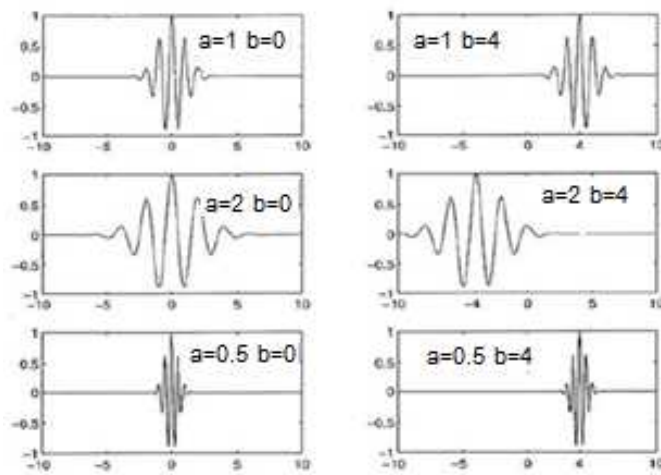
ในอดีตมีงานวิจัยซึ่งเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้เวฟเล็ตโดยใช้รูปแบบสัญญาณแบบคอบเบชีส์เนื่องจากมีความละเอียดของรูปคลื่นหลายระดับดังแสดงในรูปที่ 4.73



รูปที่ 4.73 ลักษณะของเวฟเล็ตแบบคอบเบชีส์ที่ความละเอียดของรูปคลื่นต่างๆ [22]

อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่าเวฟเล็ตเมเยอร์มีรูปแบบสัญญาณที่ใกล้เคียงกับลักษณะสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นและมีความละเอียดของสัญญาณมากกว่าลักษณะคลื่นในแฟมิลีอื่นโดยไม่จำเป็นต้องใช้หน่วยสัมประสิทธิ์ในการแบ่งลักษณะของความละเอียดทำให้สะดวกแก่การนำไปใช้งาน ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้เวฟเล็ตเมเยอร์ในการแยกแยะระดับสัญญาณที่เกิดขึ้น

การแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณจะแสดงในรูปของผลรวมสัญญาณองค์ประกอบความถี่ต่ำ (Approximated Version) และองค์ประกอบความถี่สูง (Detailed Version) ในระดับต่างๆ โดยจะมีค่าสัมประสิทธิ์เวฟเล็ตทำหน้าที่เป็นค่านำหนักขององค์ประกอบความถี่แต่ละระดับ ดังนั้นในการอธิบายสัญญาณใดๆด้วยการแปลงเวฟเล็ตจึงทำได้โดยนำกลุ่มของเวฟเล็ตที่มีโครงสร้างแบบฟังก์ชันเดียวกันเป็นตัวอธิบาย ซึ่งฟังก์ชันนี้จะเป็นฟังก์ชันต้นกำเนิดที่เรียกว่า เวฟเล็ตแม่ (Mother Wavelet) โดยที่คลื่นเวฟเล็ตแต่ละอันในกลุ่มจะเกิดจากการปรับสเกล (Scale ; a) หรือการแสดงการยืดหรือหดตัวของเวฟเล็ตแม่ ส่วนการเลื่อนตำแหน่ง (Translation or Shifting ; b) จะเป็นการแสดงตำแหน่งบนแกนเวลา ดังแสดงในรูป 4.74 โดยสัญญาณที่ถูกแยกออกมาในระดับที่ต่ำจะมีค่าความถี่ที่สูงกว่าในระดับสูงเนื่องจากระดับที่สูงขึ้นจะแยกความละเอียดของเวฟเล็ตแม่ได้มากขึ้นทำให้คลื่นความถี่ต่ำปรากฏขึ้นที่เวฟเล็ตระดับสูง



รูปที่ 4.74 ลักษณะของเวฟเล็ต ที่ค่า a และ b ต่างๆกัน [22]

โดยจะสามารถเขียนสมการของเวฟเล็ตได้ดังนี้

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

- เมื่อ $\psi(t)$ คือ ฟังก์ชันของเวฟเล็ตแม่ที่มีการปรับสเกล
a คือ พารามิเตอร์ของการปรับสเกล (Scaling)
b คือ พารามิเตอร์การเลื่อนตำแหน่ง (Shifting)

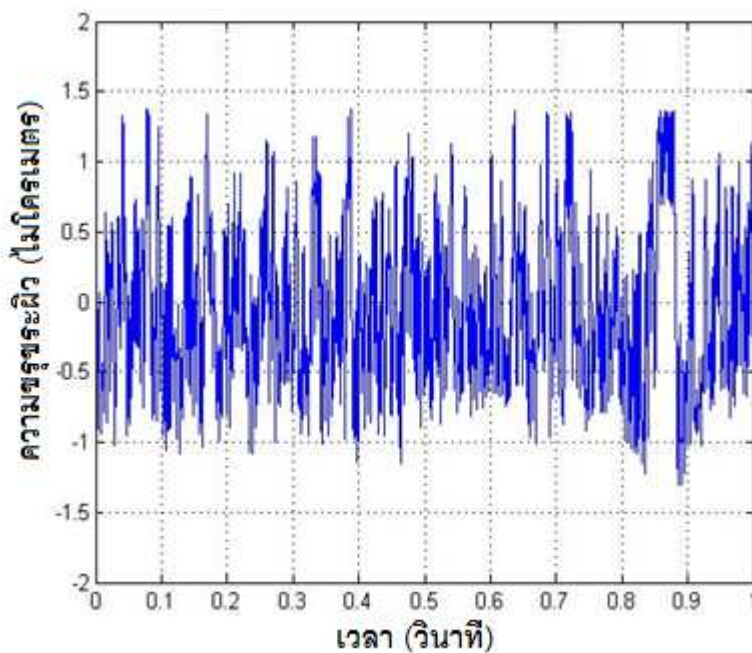
สมการมีการปรับค่าเพื่อให้สัญญาณที่ได้หลังจากปรับสเกลแล้วมีพลังงานเท่ากับเวฟเล็ต
แม่เสมอด้วย $\frac{1}{\sqrt{a}}$

รูปแบบของการแปลงเวฟเล็ตโดยทั่วไปนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform) และการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วย (Discrete Wavelet Transform) การวิเคราะห์เวฟเล็ตแบบต่อเนื่องจะมีความแม่นยำทางด้านเวลาและความถี่มากกว่า แต่กระบวนการในการวิเคราะห์ต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ค่อนข้างมากและข้อมูลของผลลัพธ์ที่ได้ก็มีความซับซ้อนเกินความจำเป็น ด้วยเหตุผลดังกล่าวการแปลงเวฟเล็ตแบบเต็มหน่วยจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณแทน

ตัวอย่างการแปลงสัญญาณแรงตัดด้วยเวฟเล็ตเปรียบเทียบกับค่าความขรุขระผิวในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ โดยใช้ความเร็วตัด 12,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.9 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด 10 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 4.75 ถึง รูปที่ 4.78

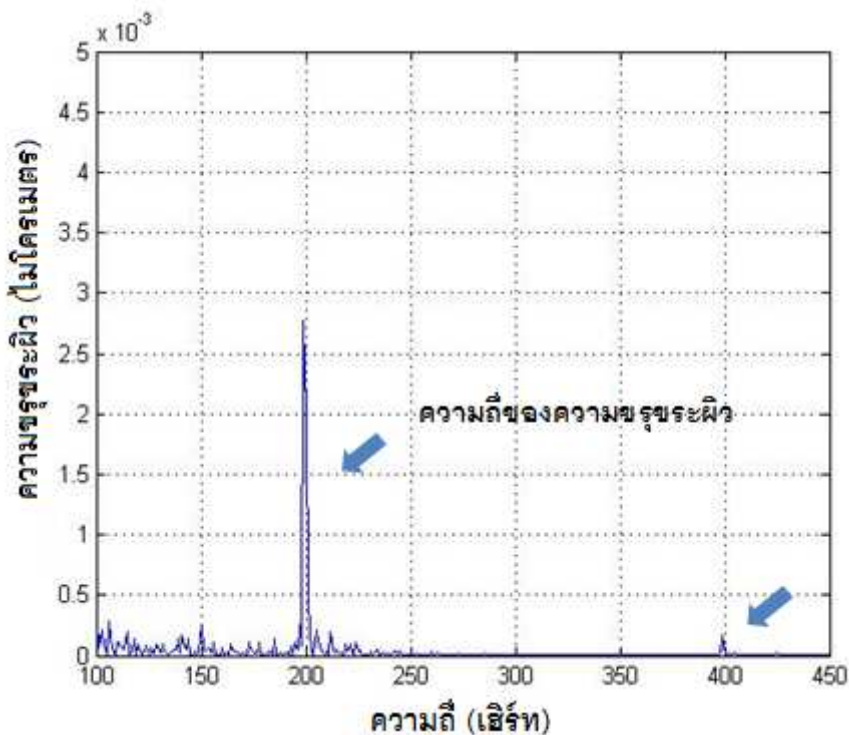
รูปที่ 4.77 และ รูปที่ 4.78 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์สัญญาณโดยการแปลงแบบเวฟเล็ตพบว่าสัญญาณแรงตัดที่เกิดจากฟันที่สองเกิดขึ้นในระดับ 4 ที่ความถี่ 400 เฮิรตซ์และสัญญาณแรงตัดที่เกิดจากฟันที่หนึ่งเกิดขึ้นในระดับ 5 ที่ความถี่ 200 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณความถี่ของความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นที่ความถี่ 200 เฮิรตซ์และความถี่ 400 เฮิรตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.75 และ รูปที่ 4.76 จึงสามารถนำสัญญาณแรงตัดพลวัตในระดับดังกล่าวไปวิเคราะห์หาอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟเพื่อใช้ในการสร้างสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวต่อไป โดยจะเห็นได้ว่าการแปลงสัญญาณด้วยเวฟเล็ตในการสร้างสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวขึ้นงาน ช่วยแยกสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณแรงตัดได้ จึงอาจช่วยให้การพยากรณ์มีความละเอียดแม่นยำมากขึ้น ซึ่งควรถูกนำไปพัฒนาต่อไปในงานวิจัยในอนาคต

สัญญาณความถี่ในโดเมนเวลา



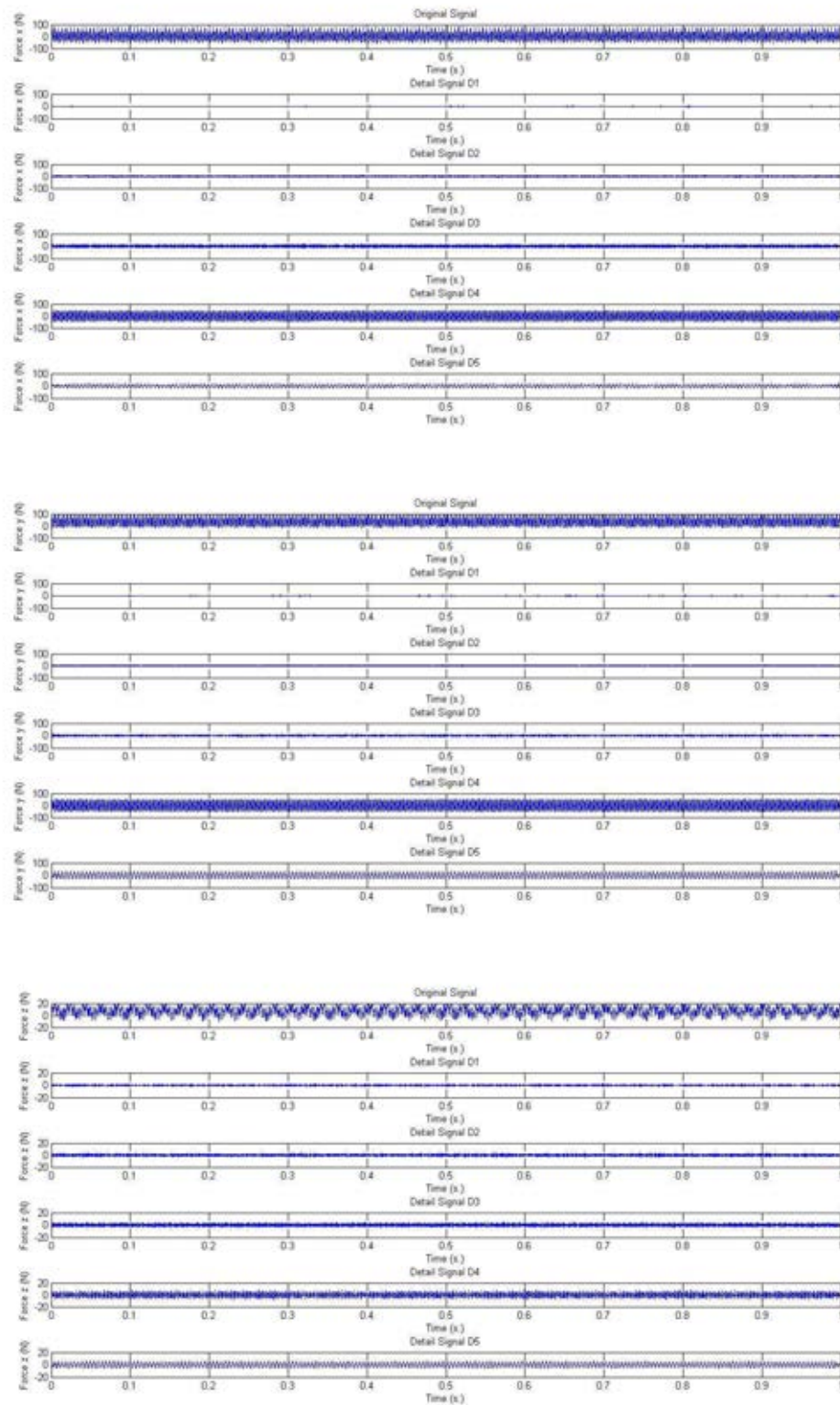
รูปที่ 4.75 แสดงค่าความถี่ที่ได้จากการทดลองในโดเมนเวลา

สัญญาณความถี่ในโดเมนความถี่



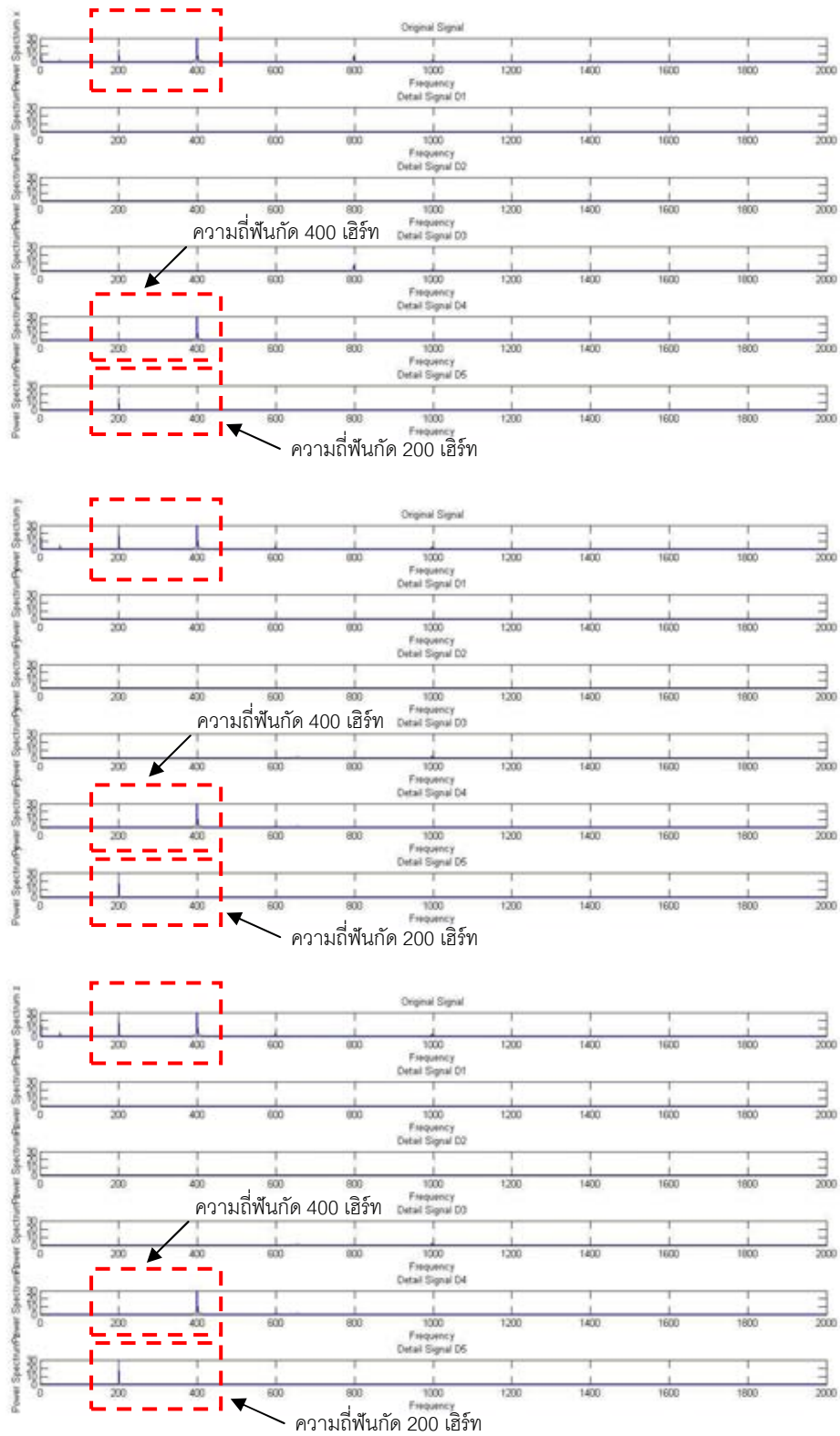
รูปที่ 4.76 แสดงค่าความถี่ที่ได้จากการทดลองในโดเมนความถี่

สัญญาณแรงตัดในโดเมนเวลาโดยแปลงสัญญาณด้วยเวฟเล็ต



รูปที่ 4.77 แสดงค่าแรงตัดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบเวฟเล็ตในโดเมนเวลา

สัญญาณแรงตัดในโดเมนความถี่โดยแปลงสัญญาณด้วยเวฟเล็ต



รูปที่ 4.78 แสดงค่าแรงตัดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบเวฟเล็ตในโดเมนความถี่

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดในกระบวนการกัดแบบหัวบอลโดยการใช้อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงตัดพลวัตในแนวการป้อนต่อพื้นที่ของแรงในแนวตั้งฉากกับชิ้นงานในหน่วยเวลาใดๆและการศึกษาเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ที่มีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัดและเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ในแบบจำลอง ด้วยการใช้สมการฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล เพื่อพยากรณ์ค่าความขรุขระชิ้นงานเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริงในขณะตัด โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูเพื่อหาพื้นที่ของแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา

วิธีการหาความสัมพันธ์ถดถอยพหุคูณถูกนำมาใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลองความขรุขระชิ้นงานในขณะตัดด้วยการใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยใช้วิธีวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ที่ผ่านการแปลงแบบจำลองให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันลอการิทึม แล้วจึงแปลงค่ากลับเป็นฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลให้แบบจำลองที่ใช้ในการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานอยู่ในรูปแบบทั่วไป

จากการทดลองพบว่าความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด เส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัดและอัตราส่วนพื้นที่ได้แรงตัดพลวัตที่เปลี่ยนแปลงมากขึ้นส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวมากขึ้นเนื่องจากแรงและการสั่นสะเทือนที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าเลขชี้กำลังที่ได้ในแบบจำลองมีค่าเป็นบวกและจากค่าเลขชี้กำลังของแบบจำลองพบว่าค่าความลึกตัดและค่าอัตราส่วนแรงตัดพลวัตมีค่าเลขชี้กำลังมากที่สุดซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้งสองมีผลต่อค่าความขรุขระผิวมากที่สุด

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัดในขอบเขตเพื่อทดสอบค่าความแม่นยำของแบบจำลองพบว่าแบบจำลองสามารถใช้พยากรณ์ความขรุขระผิวในระหว่างการตัดชิ้นงานได้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และให้ค่าความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยเท่ากับ 92.86% และค่าความขรุขระผิวสูงสุดเท่ากับ 91.64% ตามลำดับ

การตัดทดสอบนอกขอบเขตพบว่าแบบจำลองยังคงสามารถใช้พยากรณ์ความขรุขระผิวในระหว่างการตัดชิ้นงานได้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และให้ค่าความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยเท่ากับ 93.21% และค่าความขรุขระผิวสูงสุดเท่ากับ 91.74% ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียง

กับการทดสอบการตัดในขอบเขต เนื่องจากการใช้ประยุกติใช้สัดส่วนแรงตัดพลวัตซึ่งเป็นตัวแปรที่
ก่าจัดอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัดและช่วยปรับค่าการพยากรณ์ความขรุขระผิวให้เข้าสู่ค่าที่ถูกต้อง

นอกจากนี้การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวโดยใช้แรงตัด
สถิตและสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวโดยใช้แรงตัดพลวัตพบว่าการพยากรณ์ค่าความขรุขระ
ผิวโดยใช้แรงตัดพลวัตให้ค่าความแม่นยำที่สูงกว่าโดยการที่ใช้แรงตัดสถิตให้ค่าความแม่นยำของ
ค่าความขรุขระเฉลี่ยเท่ากับ 88.73% และการใช้แรงตัดพลวัตให้ค่าความแม่นยำเท่ากับ 93.2%

การแยกแบบจำลองและตัดทดสอบพบว่าการรวมและการแยกแบบจำลองให้การ
พยากรณ์ที่ใกล้เคียงกันโดยสมการพยากรณ์รวมให้ค่าความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย
เท่ากับ 93.90% และค่าความขรุขระผิวสูงสุดเท่ากับ 94.24% ในขณะที่สมการพยากรณ์แยกให้
ค่าความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย เท่ากับ 93.26% และค่าความขรุขระผิวสูงสุด เท่ากับ
92.73% แต่เนื่องจากแบบจำลองรวมประยุกติใช้อัตราส่วนแรงตัดพลวัตทำให้แบบจำลองที่ได้
สามารถนำไปใช้ได้ในทุกกรณีโดยไม่ต้องคำนึงถึงขนาดมีดตัด แต่ในขณะที่การแยกแบบจำลอง
ต้องทำการทดลองใหม่เพื่อหาแบบจำลองอื่นๆเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด การ
ใช้แบบจำลองรวมจึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้มากกว่า

จากผลการทดลองพบว่าการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวโดยใช้อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรง
ตัดพลวัตมีประโยชน์กว่าการใช้วิธีการอื่นๆ เนื่องจากลักษณะรูปคลื่นในโดเมนเวลาและความถี่ใน
โดเมนความถี่ของแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับค่าความขรุขระผิวที่ได้ จึงทำให้
สามารถพยากรณ์ค่าได้อย่างแม่นยำกว่าการใช้แรงตัดสถิต

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

1. จากผลการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดโดยการใช้อัตราส่วนพื้นที่ได้
กราฟแรงตัดพลวัต พบว่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์เกิดขึ้นอาจเกิดอิทธิพลจากปัจจัย
อื่นๆ เช่น ความแน่นของการจับยึดมีดตัดซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อแรงสั่นสะเทือนที่ตามมา หรือการจัดวาง
แท่นยึดจับชิ้นงานไม่ตรงทำให้แนวของการกัดเบี่ยงเล็กน้อย ทำให้อาจเกิดความผิดพลาดในการ
ลากหัววัด เมื่อนำชิ้นงานไปวัดค่าความขรุขระผิวซึ่งอาจไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า

2. การวิเคราะห์ค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาอาจต้องวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง
พื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตกับพื้นที่ของความขรุขระผิวก่อน แต่จากการทดลองพบว่าพื้นที่ของ
ความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับความขรุขระผิวในทุกเงื่อนไขของการตัดจึงเป็นการ
ประหยัดเวลาที่จะต้องทำการแปลงฟูเรียร์ก่อนที่จะหาความสัมพันธ์

5.3 อุปสรรคในการวิจัย

1. เนื่องจากชิ้นงานและมีดตัดมีราคาต่อหน่วยสูงทำให้เงื่อนไขของการตัดที่เลือกมาในงานวิจัยนี้อาจไม่ครอบคลุมการตัดในบางเงื่อนไข รวมถึงเครื่องมือที่มีขั้นตอนการใช้ที่ซับซ้อนทำให้ต้องอาศัยการฝึกฝนและความระมัดระวังในการทดลองมาก
2. ปัญหาของการติดตั้งเครื่องมือในการทดลองเนื่องจากเซนเซอร์วัดแรงและเครื่องขยายสัญญาณมีผู้ใช้งานหลายงานวิจัยทำให้จำเป็นต้องมีการถอดออกและทำการติดตั้งใหม่ทุกครั้ง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่ติดตั้งและอาจเกิดความเสียหายจากการสั่นสะเทือนในการขนย้ายอุปกรณ์ทำให้ต้องสูญเสียเวลาในการรื้อซ่อมแซมเครื่อง
3. แทนที่ยึดจับชิ้นงานเดิมของเครื่องวัดความขรุขระผิวไม่สามารถยึดจับชิ้นงานได้เนื่องจากแทนยึดมีขนาดเล็กเกินไปจึงต้องทำแทนยึดจับชิ้นงานชิ้นใหม่

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. นอกจากการตรวจจับแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะกัดโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์แล้ว ยังสามารถตรวจจับสัญญาณแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในขณะกัดโดยใช้เซนเซอร์วัดความเร่งหรือการสั่นสะเทือน และอาจนำค่าที่ได้มาสร้างสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในขณะตัดได้ แต่อย่างไรก็ตามการใช้วิธีดังกล่าวมีข้อจำกัดคือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นอาจตรงกับช่วงของค่าความถี่ธรรมชาติของระบบหรือเซตเตอร์ซึ่งทำให้ค่าที่วัดได้ในช่วงดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้พยากรณ์ได้
2. ควรทำการทดลองในแต่ละเงื่อนไขของการตัดอื่นให้หลากหลายมากขึ้นเพื่อให้ยืนยันผลการทดลองให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นและควรทดลองเปลี่ยนชิ้นงานเป็นวัสดุอื่นๆ เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนที่ความแข็งอื่นๆ เพื่อจะทำให้ได้การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ครอบคลุมและใช้งานได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้อาจมีการเพิ่มปัจจัยอื่นๆ ด้วย เช่น จำนวนฟันของมีดตัด และหน่วยของค่าอัตราป้อนควรเปลี่ยนเป็นมิลลิเมตรต่อฟันต่อรอบแทน เพื่อให้มีความสอดคล้องกับค่าความขรุขระผิวมากขึ้น
3. สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้แรงตัดในการพยากรณ์ค่าอื่นๆในอนาคตควรทำการเก็บทั้งค่าแรงตัดสถิตและแรงตัดพลวัตภายใต้ปัจจัยควบคุมเดียวกันมาใช้ในการสร้างสมการพยากรณ์ ทั้งนี้ทำให้สามารถนำค่าความแม่นยำที่ได้จากผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันได้อย่างถูกต้องมากขึ้นและทำให้สามารถพิสูจน์ได้ว่าค่าความแม่นยำที่ได้มีค่ามากกว่ากันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่
4. ควรใช้วิธีการแปลงสัญญาณแบบเวฟเล็ตเพื่อช่วยแยกสัญญาณแรงตัดเพื่อให้ได้ค่าชัดเจนและละเอียดมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ. วิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [2] Tangjitsitcharoen, S., Rungruang, C., and Laiaddee, D. Cutting and applications of cutting fluid for ball-end milling. Asia Pacific Industrial Engineering & Management Society (2010): 242-250.
- [3] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และ ชาญรงค์ รุ่งเรือง. การตรวจติดตามการตัดแบบลมเป่าและแบบเปียกภายในกระบวนการกัดแบบหัวบอล ใน การประชุมวิชาการชายางาน วิศวกรรมอุตสาหการ, 20-21 ตุลาคม 2554 ณ โรงแรมแอมบาสเดอร์ซีดี จังหวัดชลบุรี.
- [4] Karunasawat, K., and Tangjitsitcharoen, S. Surface roughness prediction in ball-end milling process for aluminum by using air blow cutting. Advanced Materials Research 418-420 (2012): 1428-1434.
- [5] Lou, S.J., and Chen, J.C. In-Process Surface Roughness Recognition System in End-Milling Operations. Advance Manufacturing Technology 15 (1999): 200-209.
- [6] Zhang, J.Z., and Chen, J.C. The development of an in-process surface roughness adaptive control system in end milling operations. Advance Manufacturing Technology 31 (2007): 877-887.
- [7] Benardos P.G., and Vosniakos G.C. Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 18 (2002): 343-354.
- [8] Colak, O., Kurbanoglu, C., and Kayacan, M.C. Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. Materials and Design 28 (2007): 657-666.

- [9] Tangjitsitcharoen, S. In-process monitoring and prediction of surface roughness in CNC turning process. Advanced Materials Research 199-200 (2011): 1958-1966.
- [10] Tangjitsitcharoen, S. Advanced prediction of surface roughness monitoring of dynamic cutting force in CNC turning process. Applied Mechanics and Materials 239-240 (2013): 661-669.
- [11] Tangjitsitcharoen, S., and Senjuntichai, A. Intelligent monitoring and Prediction of surface roughness in ball-end milling process. Applied mechanics and materials 121-126 (2011): 2059-2063.
- [12] Groover, M.P. Fundamentals of Modern Manufacturing. 2nd Edition, USA: John Wiley & Son, 2004.
- [13] Milfelner, A., Kopac, J., Cus, F., and Zuperl U. Genetic equation for the cutting force in ball-end milling. J Mater Process Tech 164(2005): 1554-1560.
- [14] Juneja, B.L., and Sekhon, G.S. Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tool. 1st Edition, India: Wiley Eastern, 1987.
- [15] Brevier, T.K. The Handbook for engineers and designer, German: 2004.
- [16] Ostwald, P., and Munoz, J. Manufacturing Process and System. 9th Edition, USA: John Wiley & Son, 1997.
- [17] Addison, P.S. The Illustrated Wavelet Transform Handbook, Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphi, 2002.
- [18] สุชาติ จันทร์จรมานิตย์. ระเบียบวิธีเชิงเลขสำหรับงานวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์คัมภีร์ไฟฟ้า, 2552.

- [19] ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [20] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพฑูริย์. การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป, 2545.
- [21] Flenner, S. เกณฑ์การออกแบบอุปกรณ์และเครื่องมือตามหลักสุขลักษณะ. European Hygienic Equipment Design Group, 2004.
- [22] Quintana, G., and Ciurana, J. Chatter in machining processes. A review International Journal of Machine Tools and Manufacture 51 (2011): 363-376.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
โปรแกรมการแปลงค่าจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่
และผลการแปลงค่า

```

% โปรแกรมการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่
clear;
samp = 10000;           %Sampling Frequency
fname1 = 'd18';        % ชื่อ ไฟล์ที่ต้องการเปิด
ext1 = '.txt';         % ชื่อ สกุลไฟล์
filename = [fname1,ext1]; % รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์
load (filename);       % เรียกไฟล์
eval(['data1=',fname1,','.']);
[N1,n1]=size(data1);   % เก็บค่าขนาดของข้อมูล
fname2 = 'f18';        % ชื่อ ไฟล์ที่ต้องการเปิด
ext2 = '.txt';         % ชื่อ สกุลไฟล์
filename = [fname2,ext2]; % รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์
load (filename);       % เรียกไฟล์
eval(['data2=',fname2,','.']);
[N2,n2]=size(data2);   % เก็บค่าขนาดของข้อมูล
t=1/samp;
tt=(0:t:(N2-1));      %Using plot graph __ time domain
f=(0:N1-1)/N1*samp;
freq=f(1:N1/2);       %Using plot graph __ frequency domain

FX=fft(data1(:,1))/(N1*2); % column 1 _ take FFT of Fx
absFX=abs(FX(1:N1/2));
PabsFX=absFX.^2;

FY=fft(data1(:,2))/(N1*2); % column 2 _ take FFT of Fy
absFY=abs(FY(1:N1/2));
PabsFY=absFY.^2;

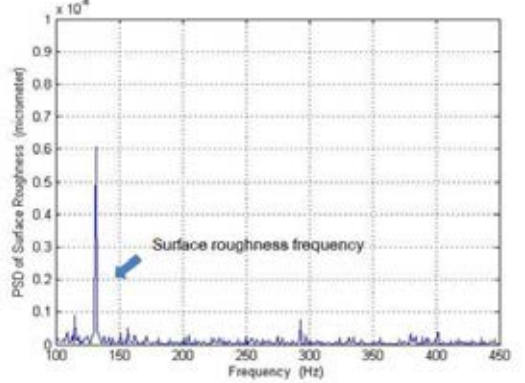
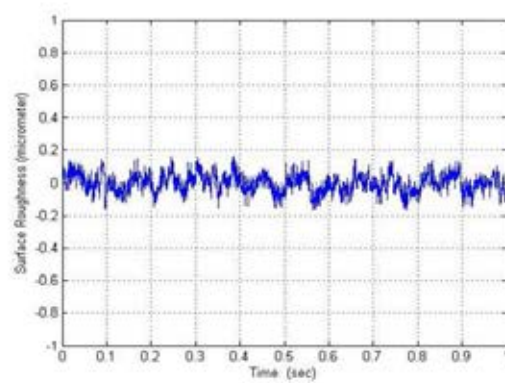
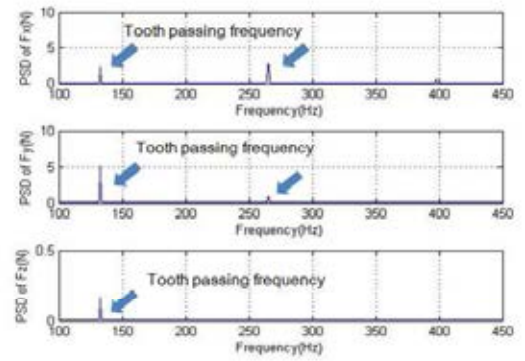
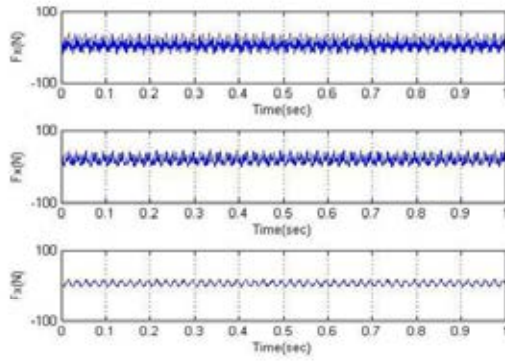
FZ=fft(data1(:,3))/(N1*2); % column 3 _ take FFT of Fz
absFZ=abs(FZ(1:N1/2));
PabsFZ=absFZ.^2;

```

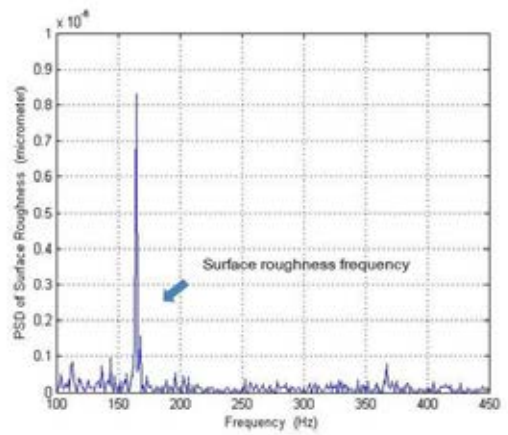
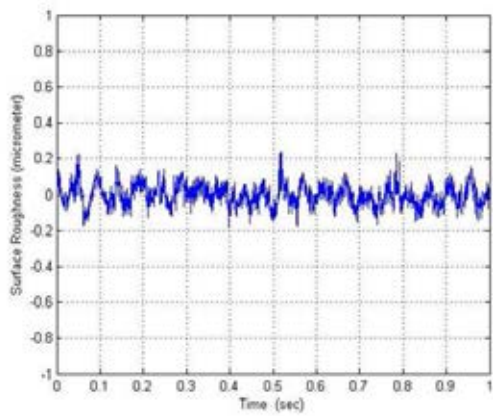
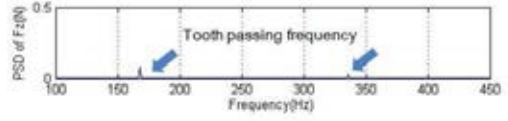
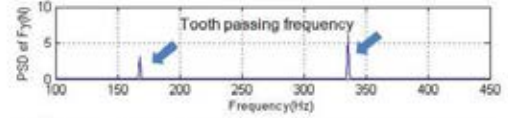
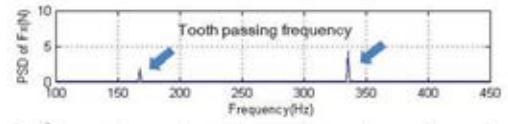
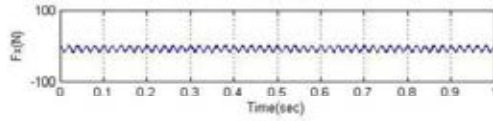
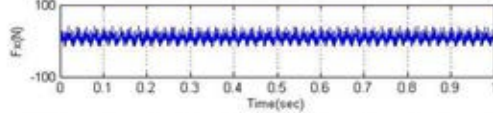
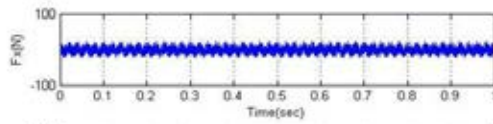
```
figure(102);  
subplot(3,1,1);plot(freq,PabsFX);grid;zoom on ;xlabel('Frequency(Hz)');ylabel('PSD of Fx(N)');  
axis([100 450 0 150])  
subplot(3,1,2);plot(freq,PabsFY);grid;zoom on ;xlabel('Frequency(Hz)');ylabel('PSD of Fy(N)');  
axis([100 450 0 150])  
subplot(3,1,3);plot(freq,PabsFZ);grid;zoom on ;xlabel('Frequency(Hz)');ylabel('PSD of Fz(N)');  
axis([100 450 0 1])
```

```
figure(103);  
subplot(3,1,1);plot(tt,data2(:,1));grid;zoom on ;xlabel('Time(sec)');ylabel('Fx(N)');  
set(subplot(3,1,1),'YLim',[-100 100],'XLim',[0 1]);set(subplot(3,1,1),'YTick',[-100 100]);  
subplot(3,1,2);plot(tt,data2(:,2));grid;zoom on ;xlabel('Time(sec)');ylabel('Fy(N)');  
set(subplot(3,1,2),'YLim',[-100 100],'XLim',[0 1]);set(subplot(3,1,2),'YTick',[-100 100]);  
subplot(3,1,3);plot(tt,data2(:,3));grid;zoom on ;xlabel('Time(sec)');ylabel('Fz(N)');  
set(subplot(3,1,3),'YLim',[-100 100],'XLim',[0 1]);set(subplot(3,1,3),'YTick',[-100 100]);
```

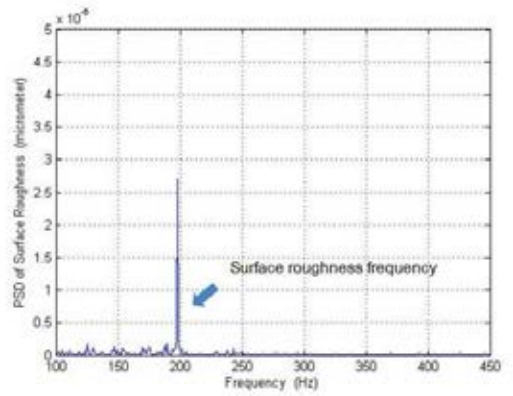
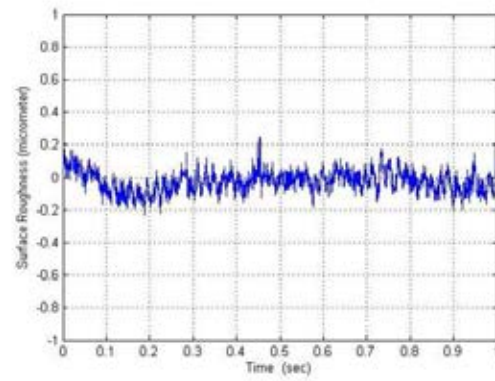
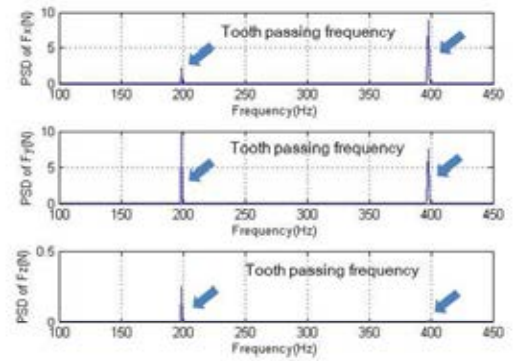
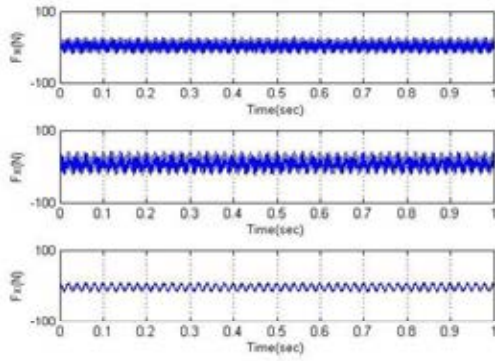
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบตัด
1	6	0.5	0.02	8000	160.00	2.67	2133



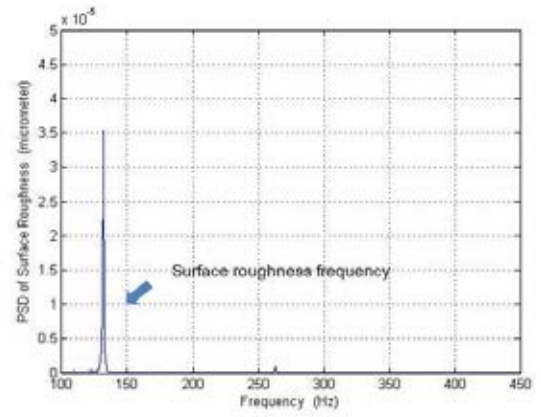
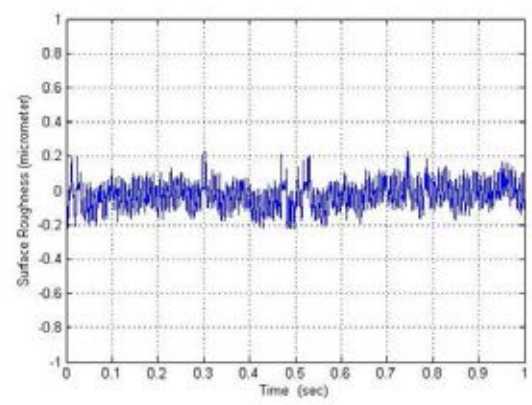
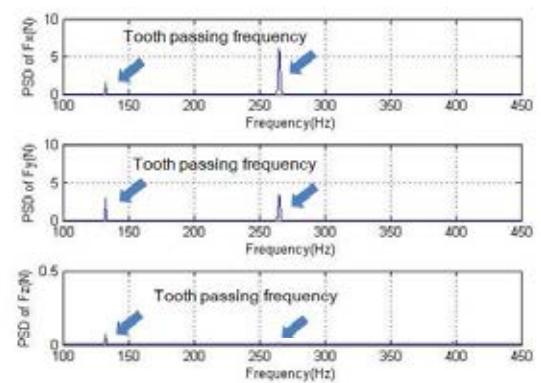
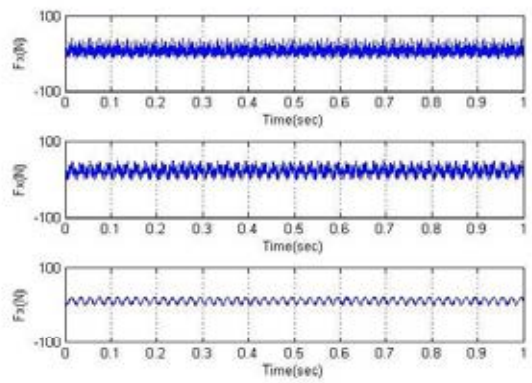
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
2	6	0.5	0.02	10000	200.00	3.33	2667



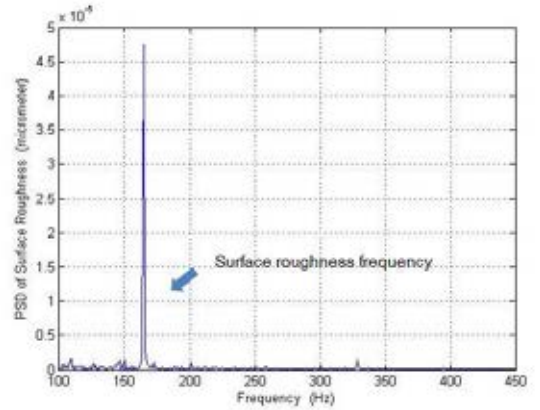
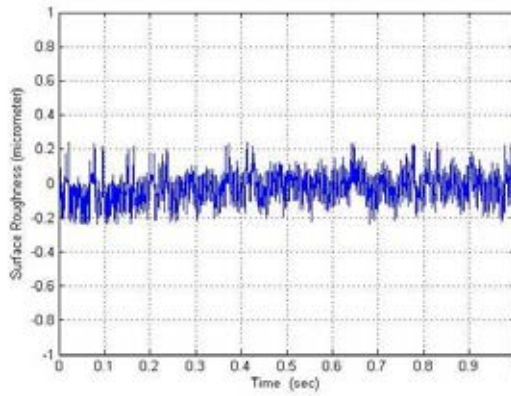
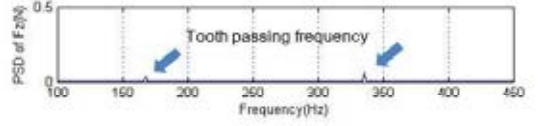
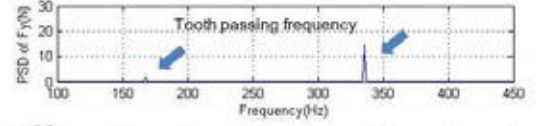
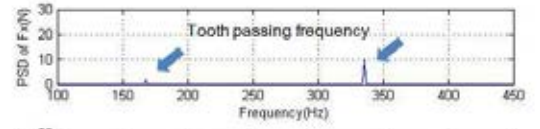
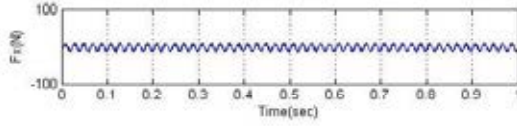
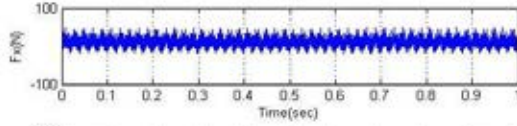
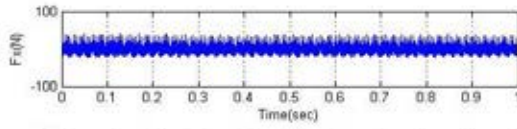
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบๆ
3	6	0.5	0.02	12000	240.00	4.00	3200



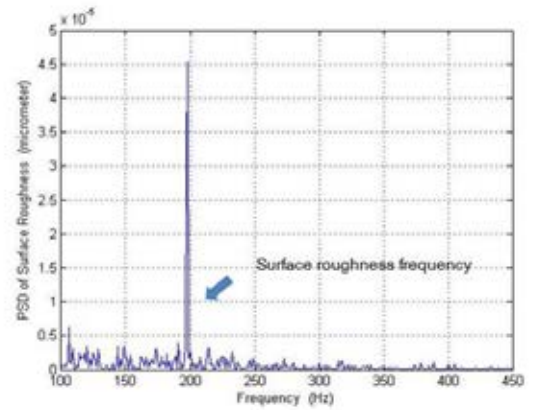
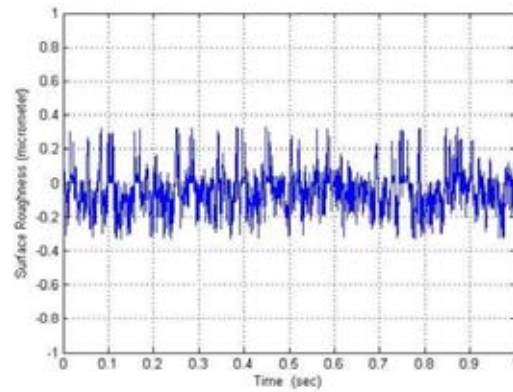
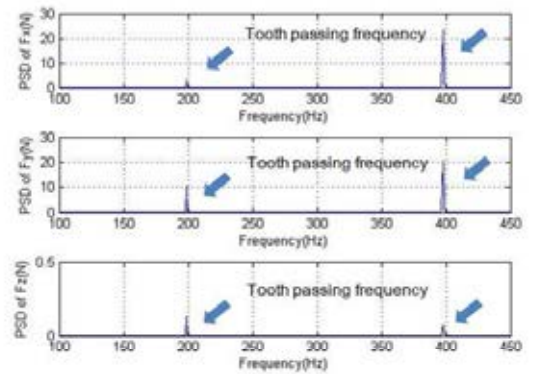
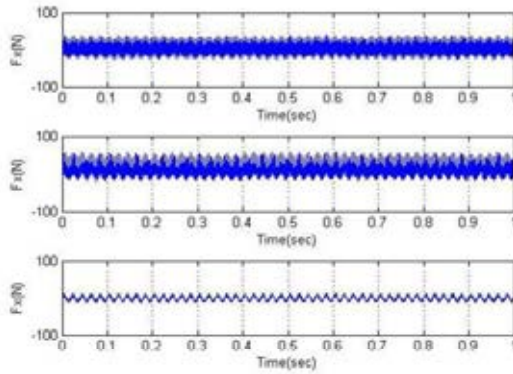
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบตัด
4	6	0.5	0.04	8000	320.00	5.33	4267



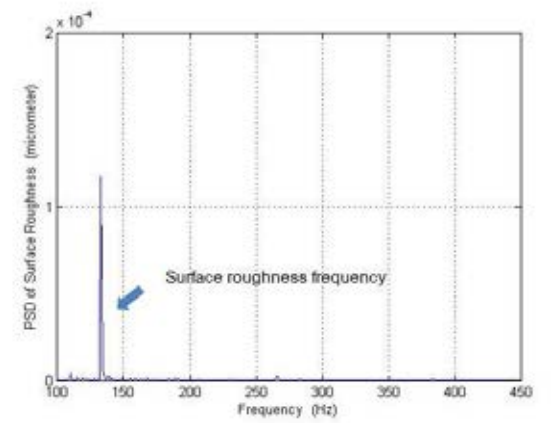
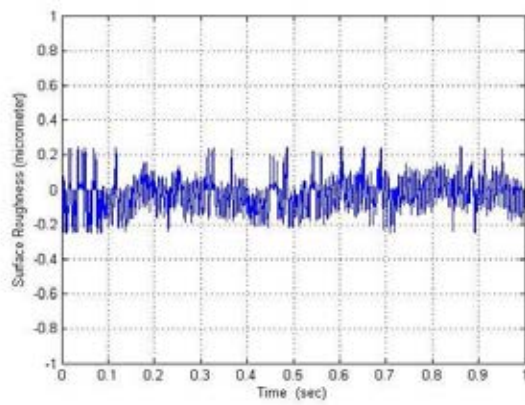
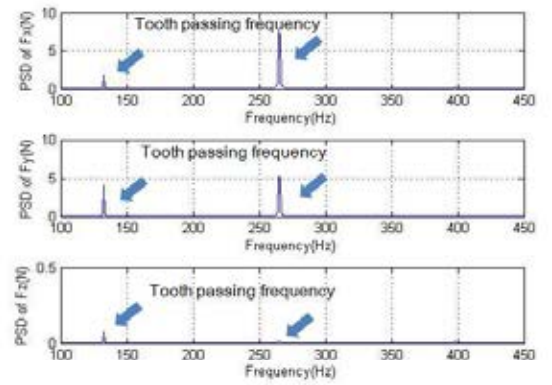
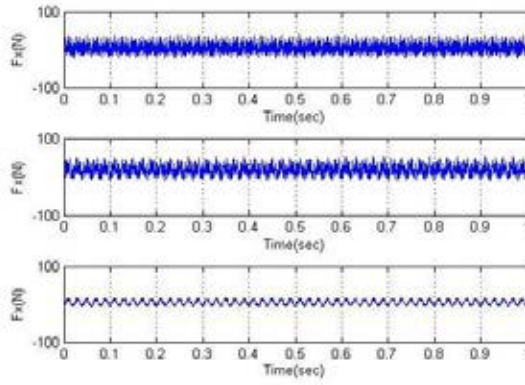
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบงาน
5	6	0.5	0.04	10000	400.00	6.67	5333



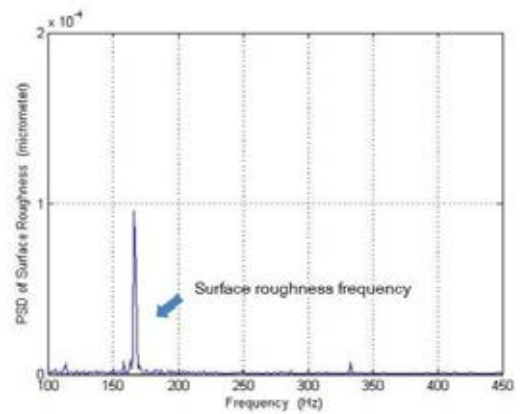
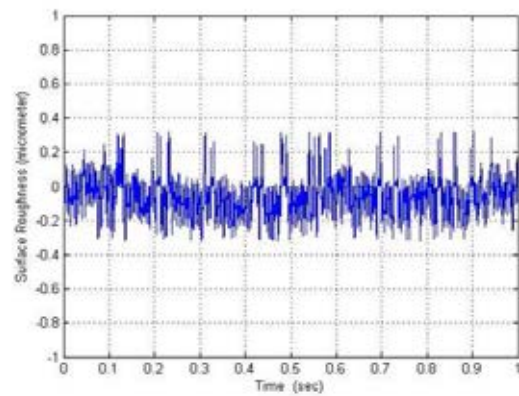
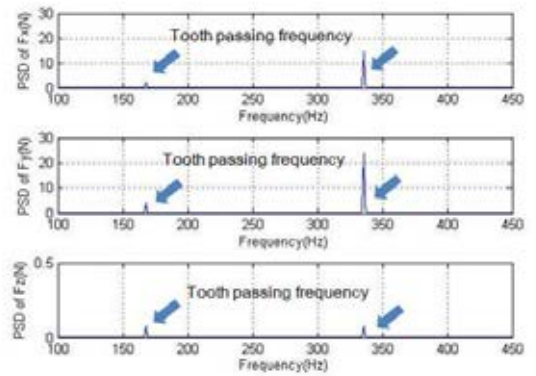
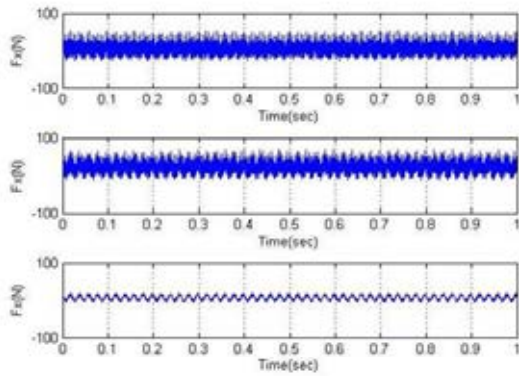
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบงาน
6	6	0.5	0.06	12000	720.00	12.00	9600



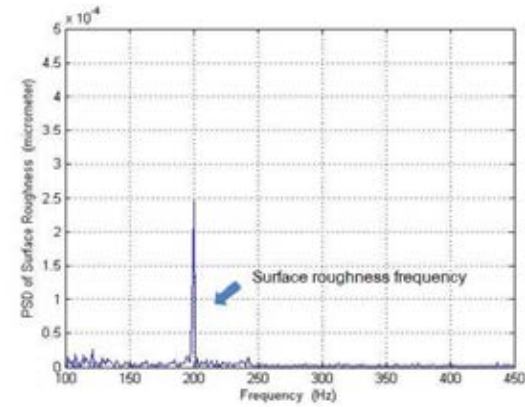
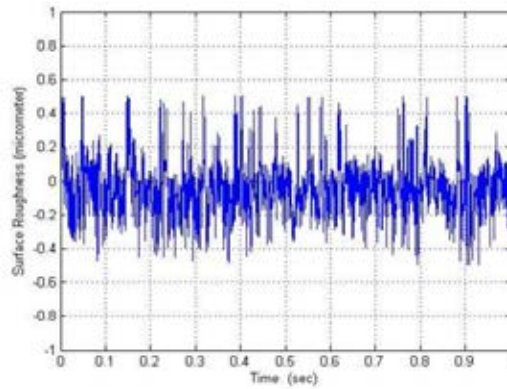
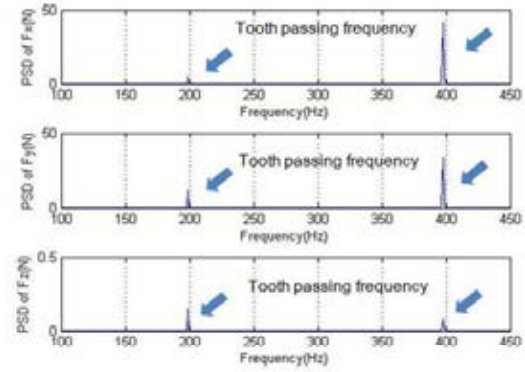
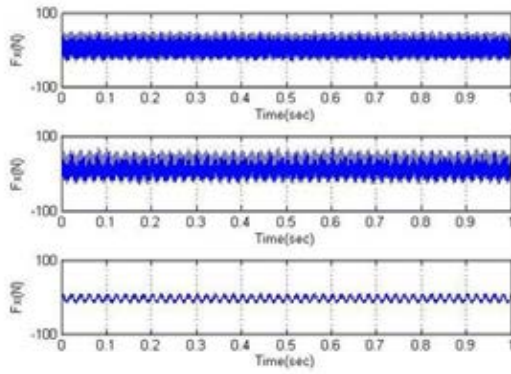
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
7	6	0.5	0.04	12000	480.00	8.00	6400



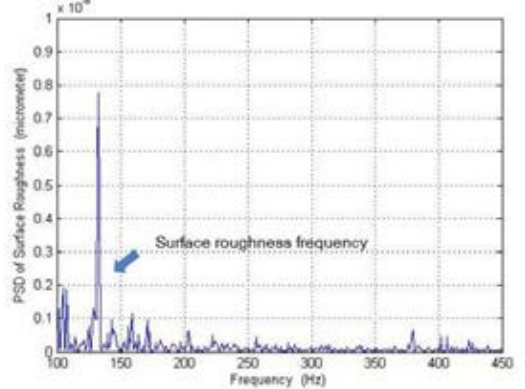
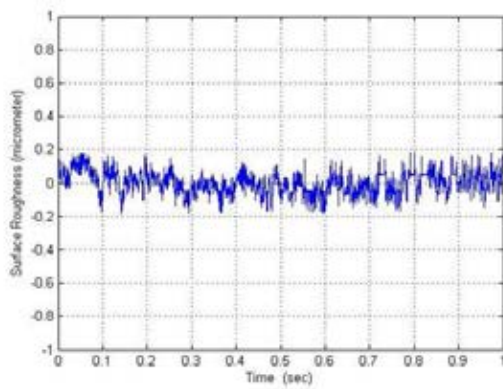
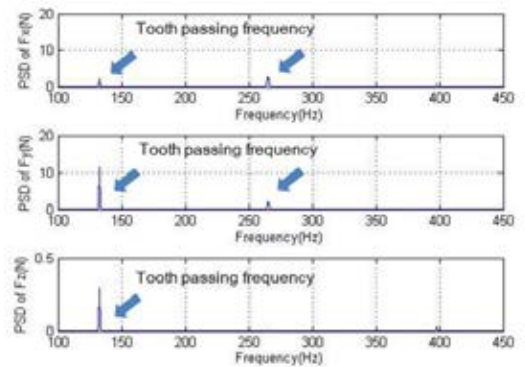
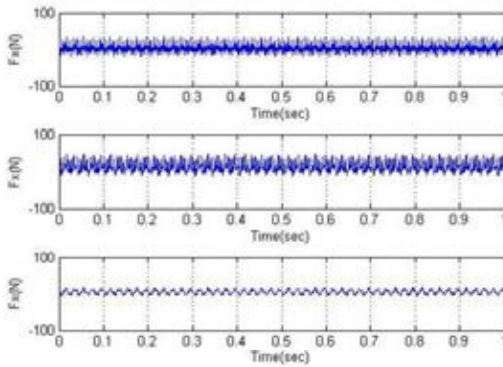
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบงาน
8	6	0.5	0.06	8000	480.00	8.00	6400



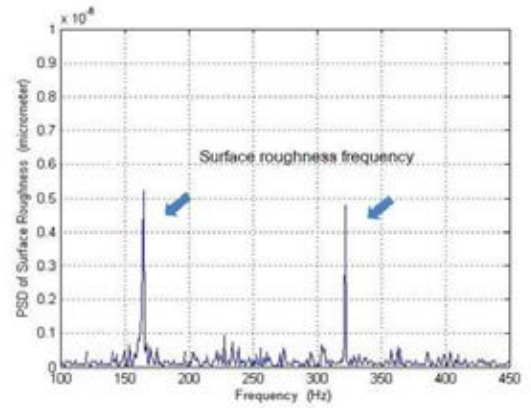
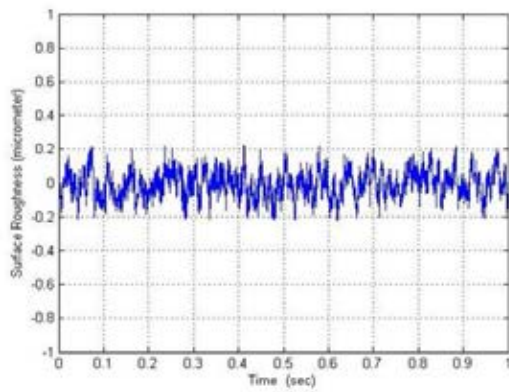
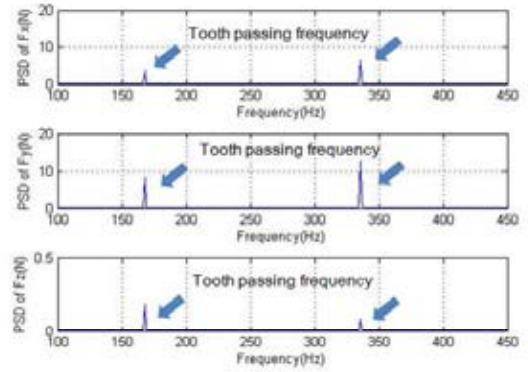
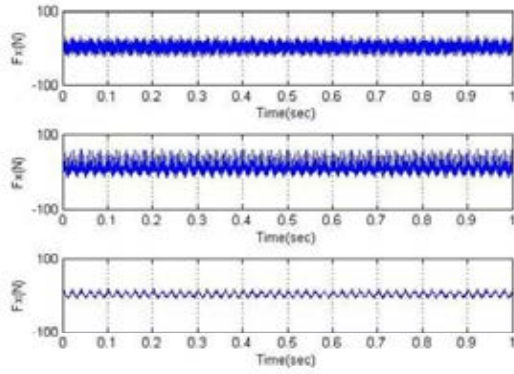
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
9	6	0.5	0.06	10000	600.00	10.00	8000



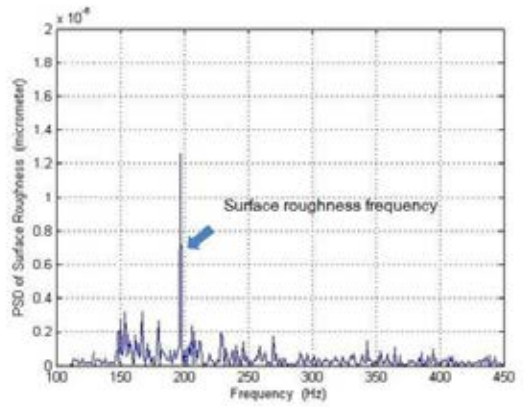
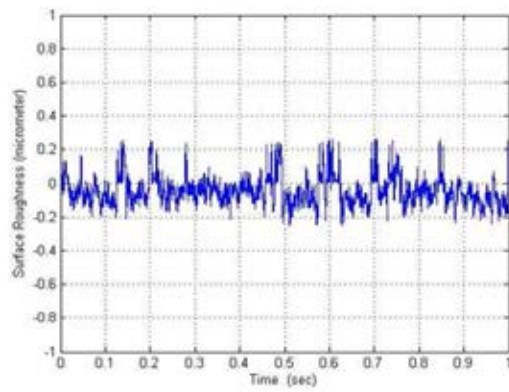
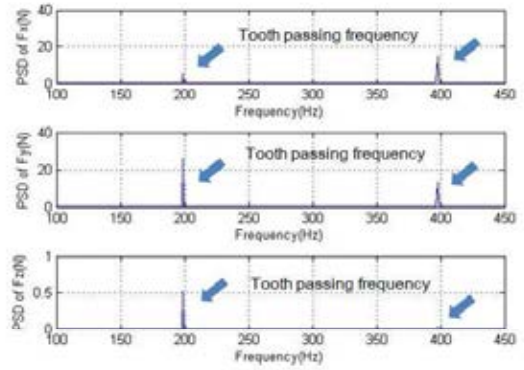
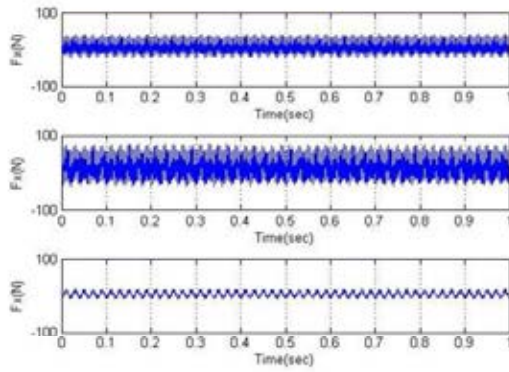
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
10	6	0.7	0.02	8000	160.00	2.67	2133



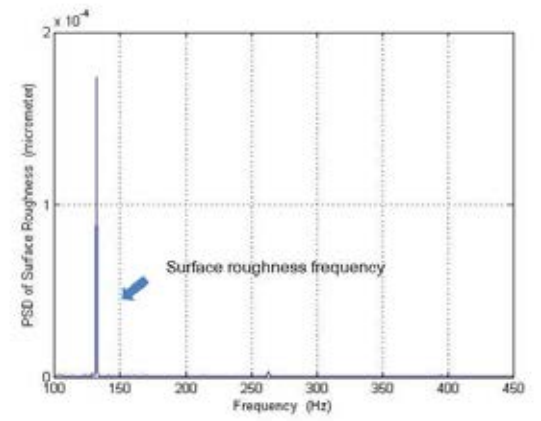
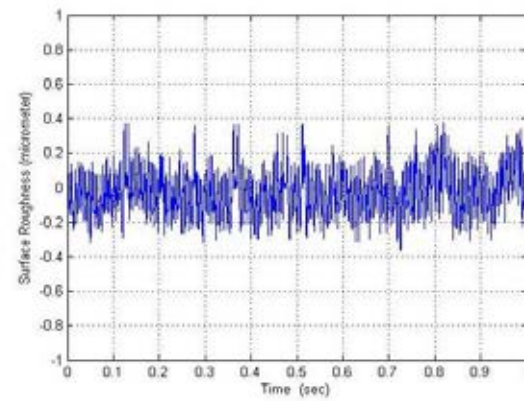
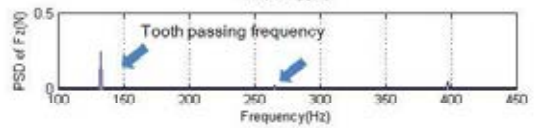
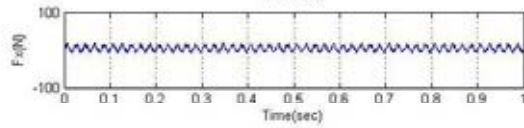
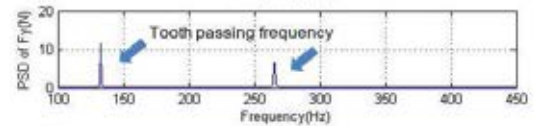
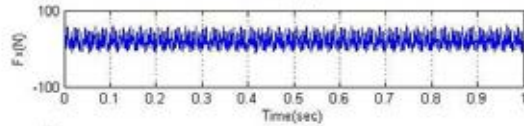
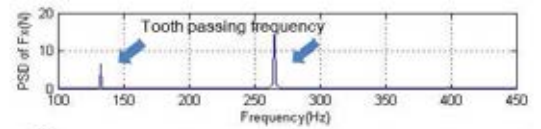
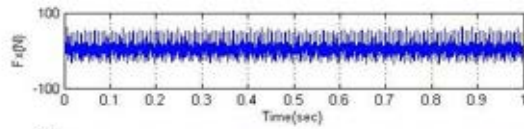
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
11	6	0.7	0.02	10000	200.00	3.33	2667



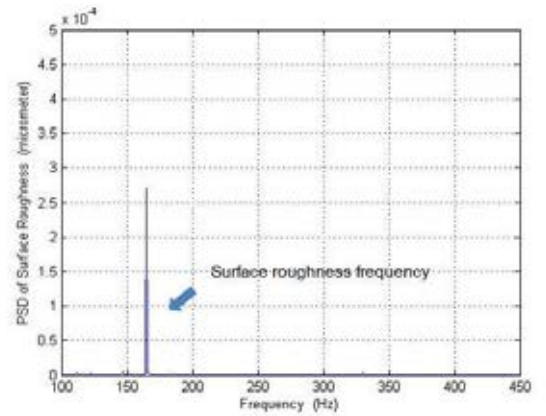
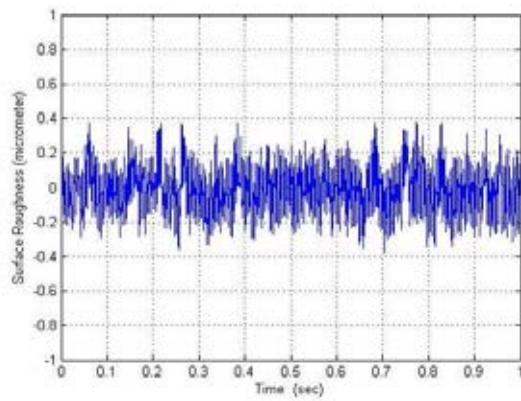
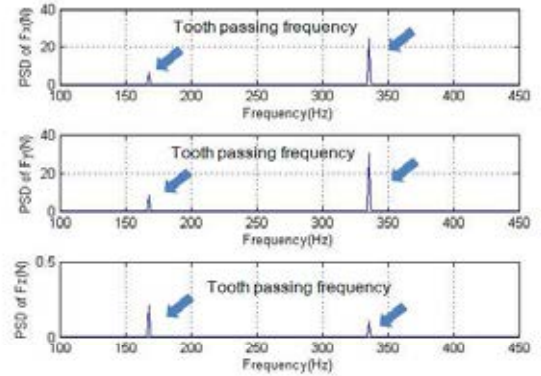
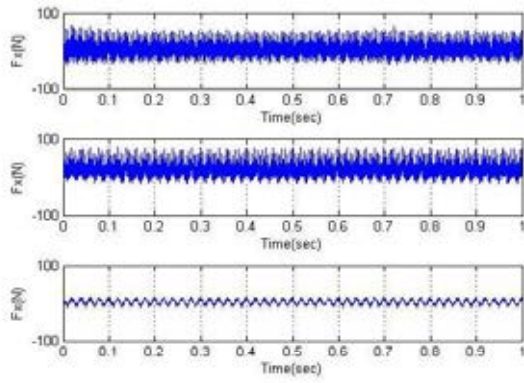
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบงาน
12	6	0.7	0.02	12000	240.00	4.00	3200



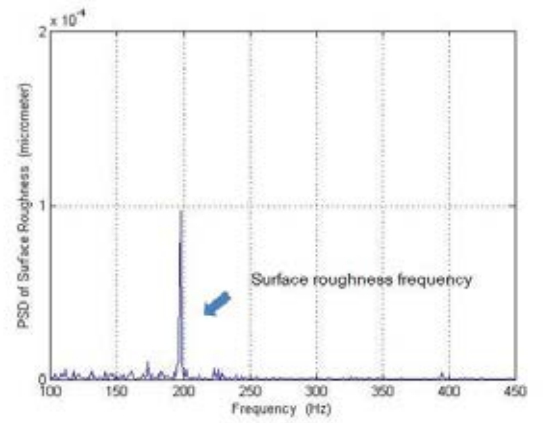
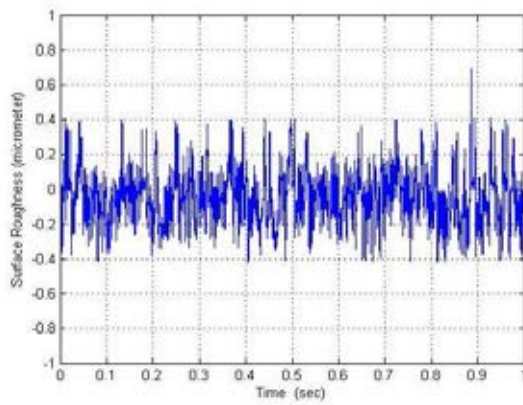
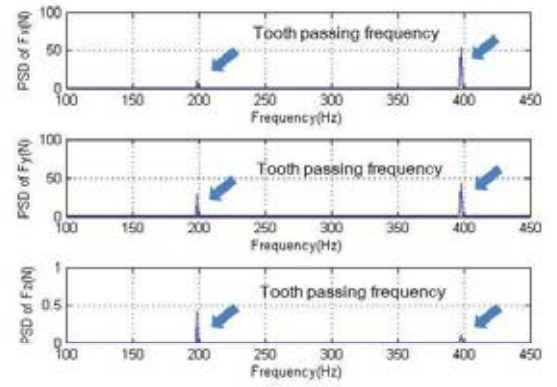
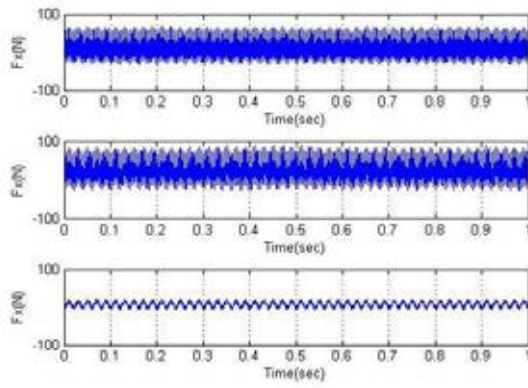
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
13	6	0.7	0.04	8000	320.00	5.33	4267



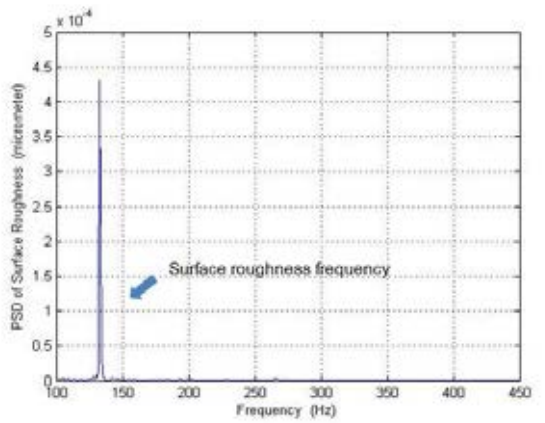
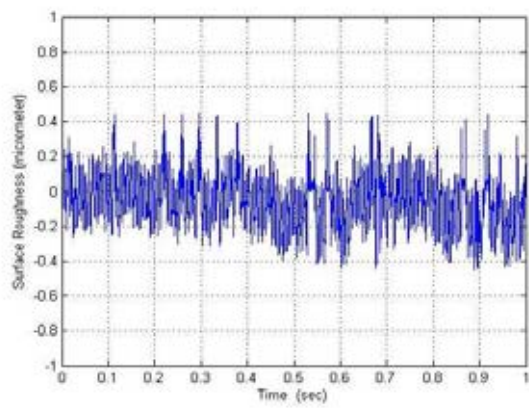
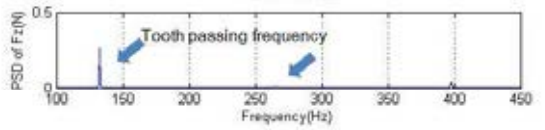
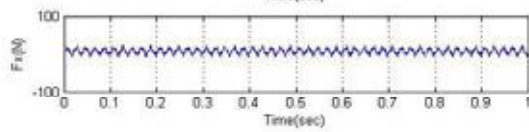
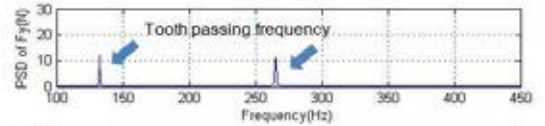
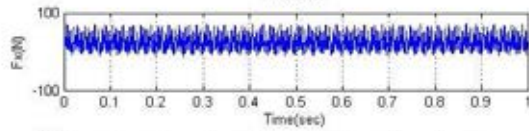
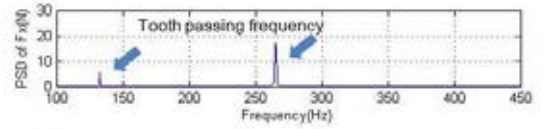
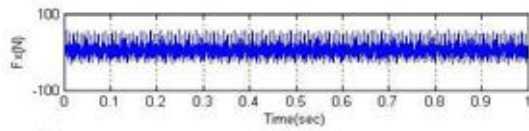
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบตัด
14	6	0.7	0.04	10000	400.00	6.67	5333



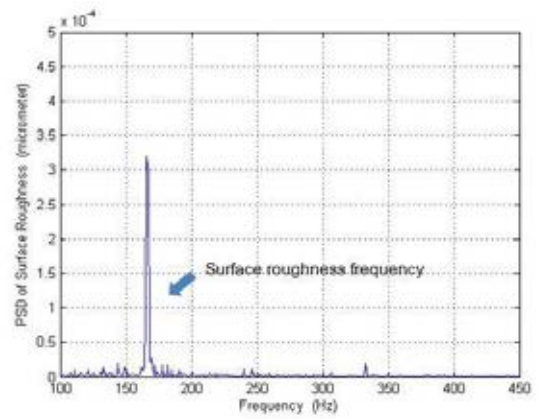
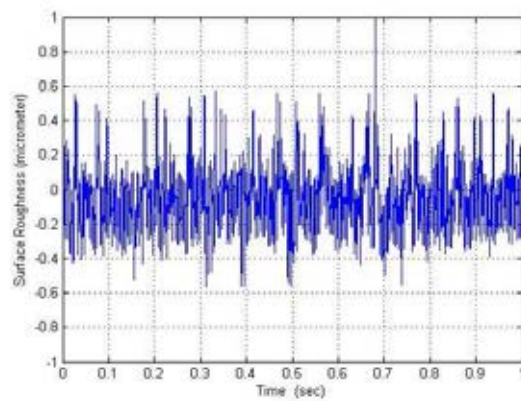
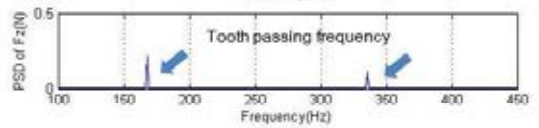
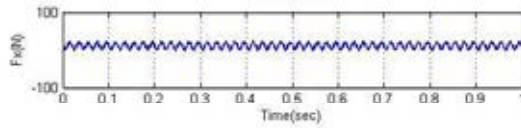
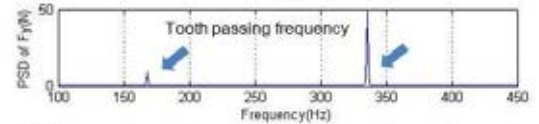
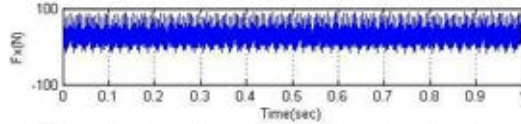
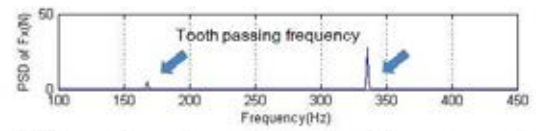
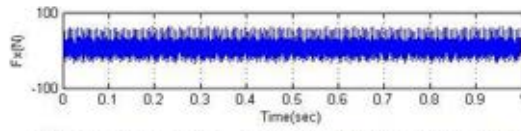
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
15	6	0.7	0.04	12000	480.00	8.00	6400



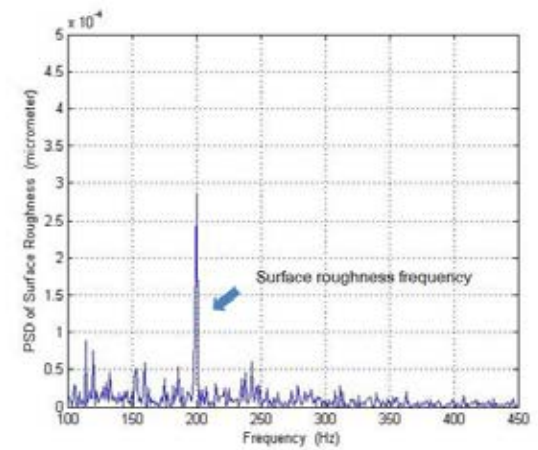
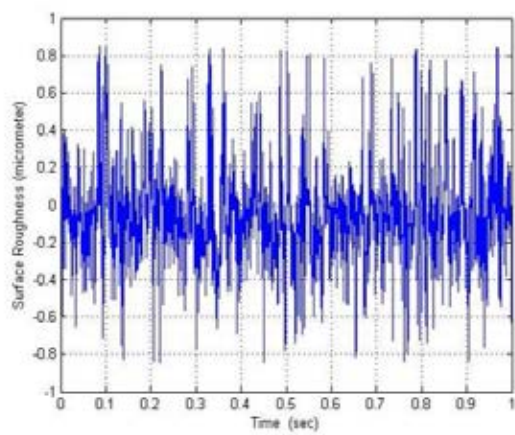
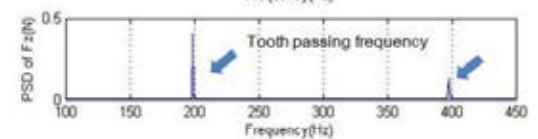
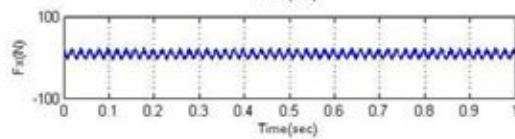
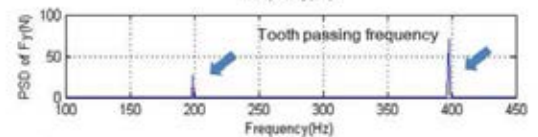
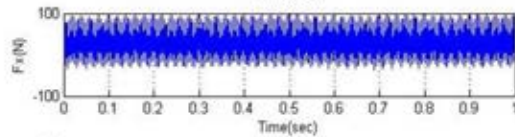
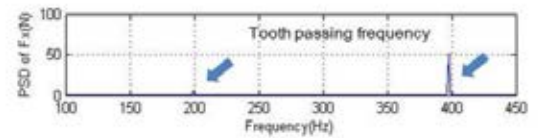
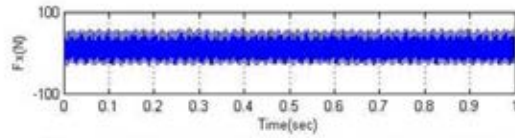
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบตัด
16	6	0.7	0.06	8000	480.00	8.00	6400



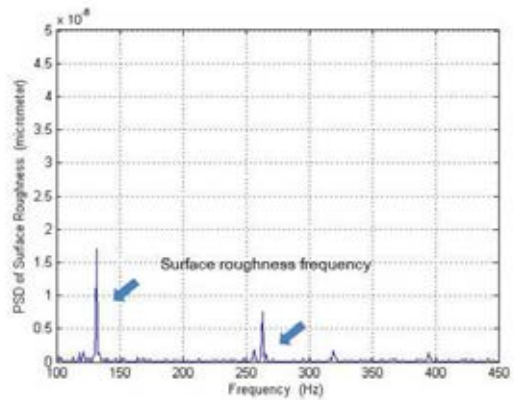
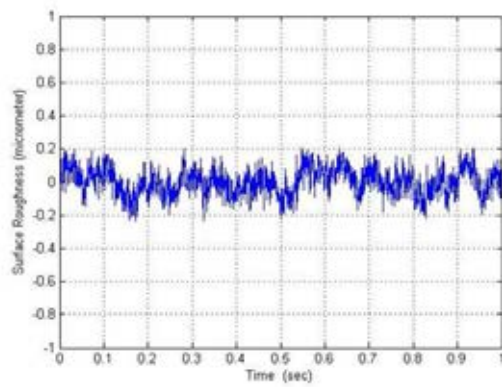
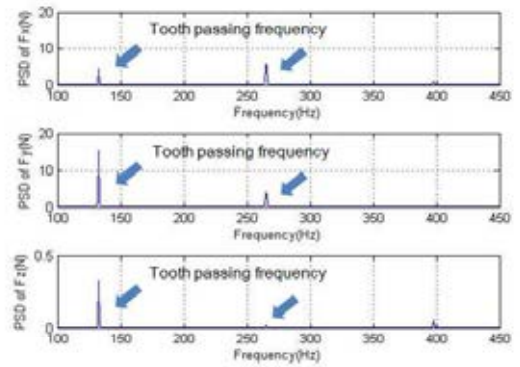
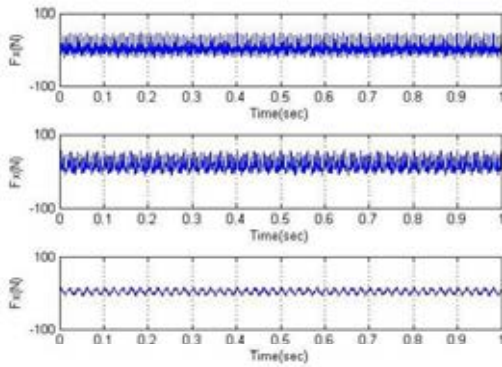
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
17	6	0.7	0.06	10000	600.00	10.00	8000



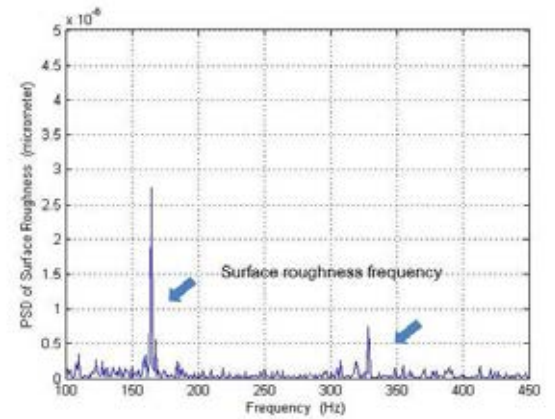
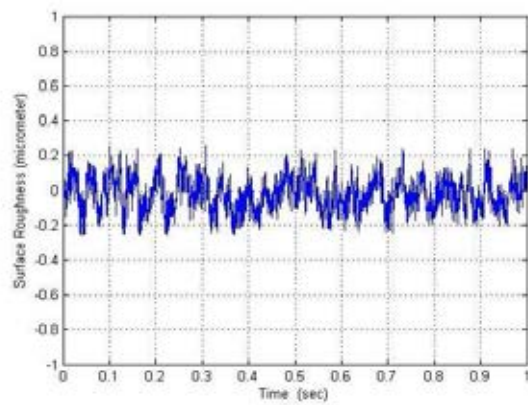
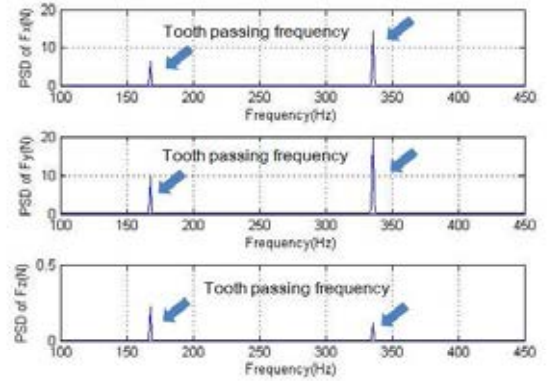
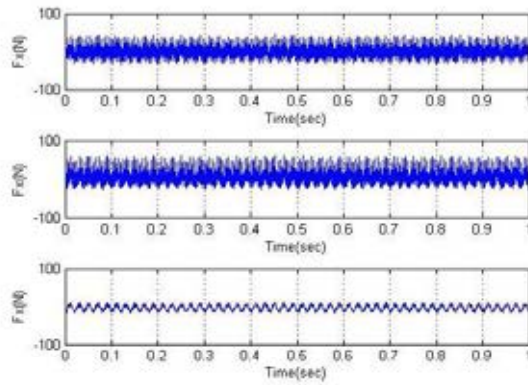
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
18	6	0.7	0.06	12000	720.00	12.00	9600



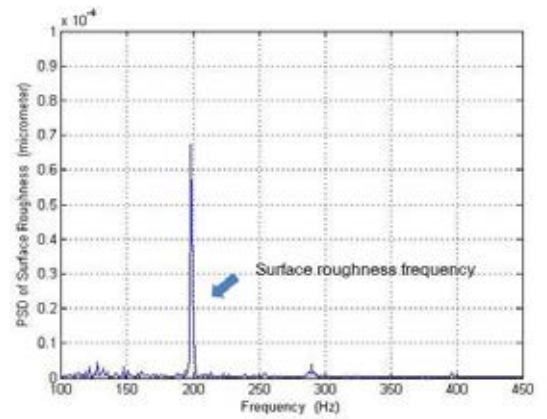
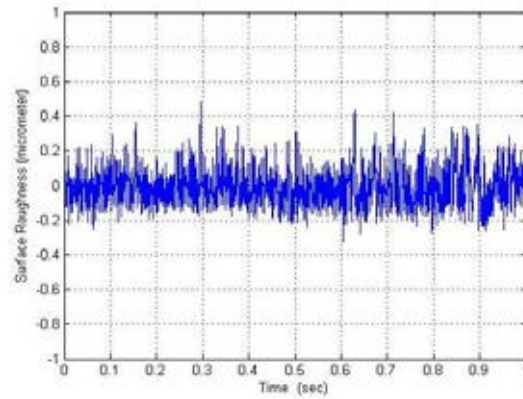
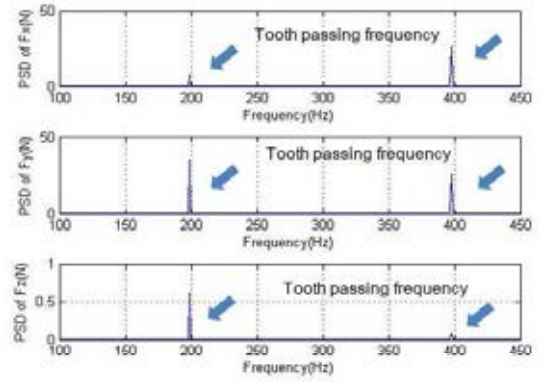
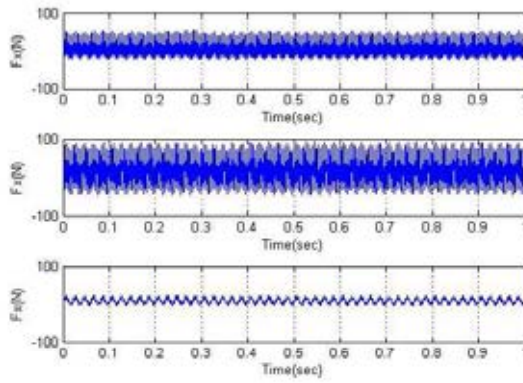
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกัด
19	6	0.9	0.02	8000	160.00	2.67	2133



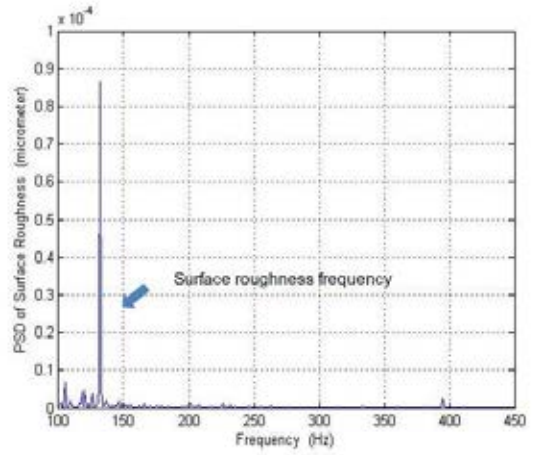
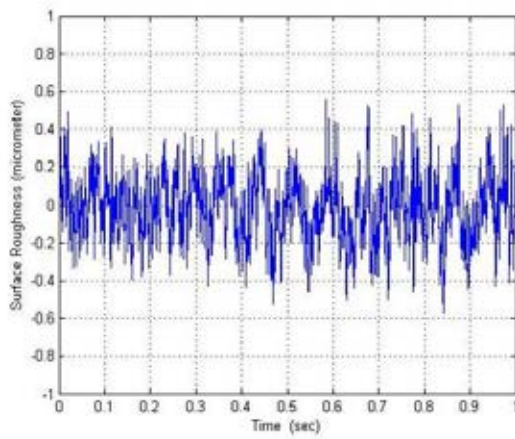
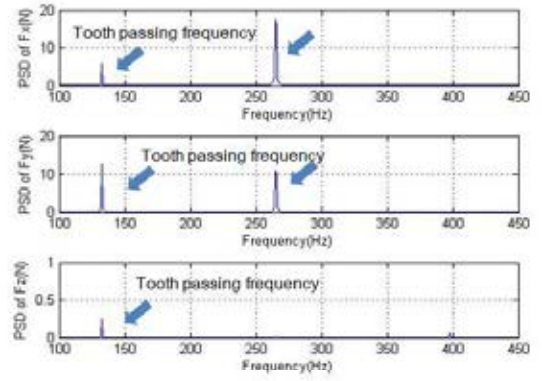
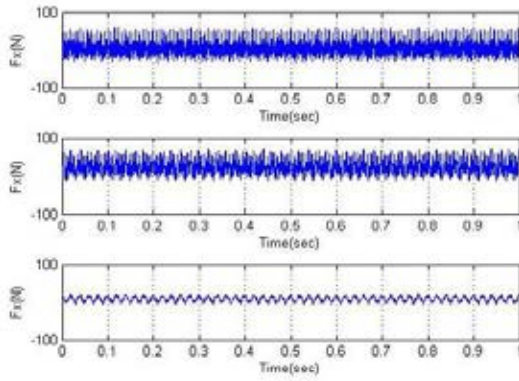
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
20	6	0.9	0.02	10000	200.00	3.33	2667



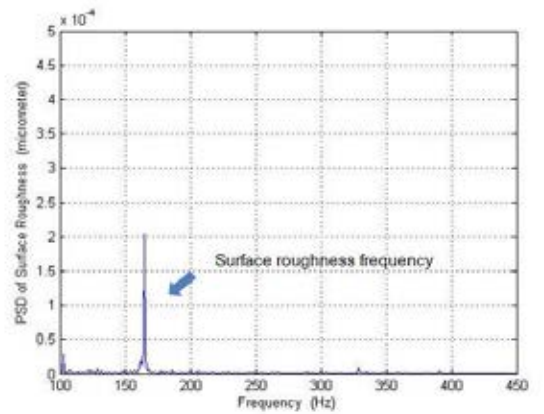
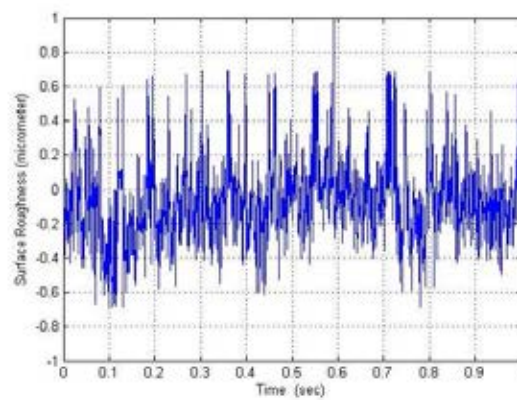
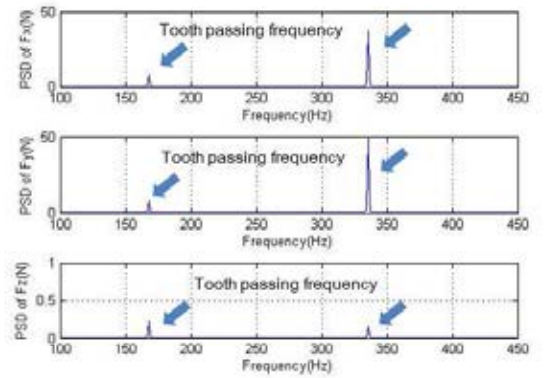
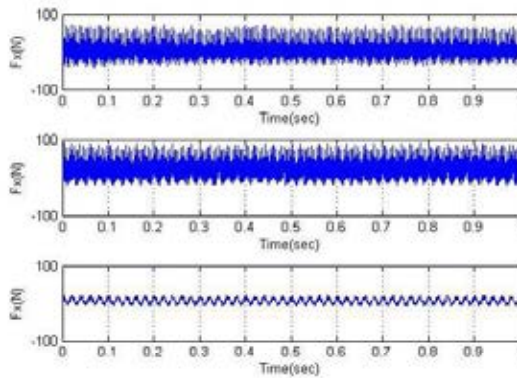
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
21	6	0.9	0.02	12000	240.00	4.00	3200



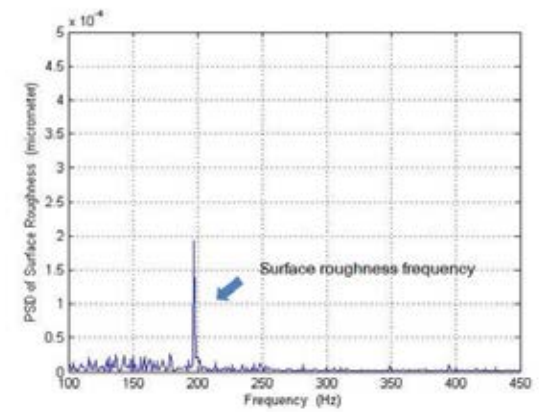
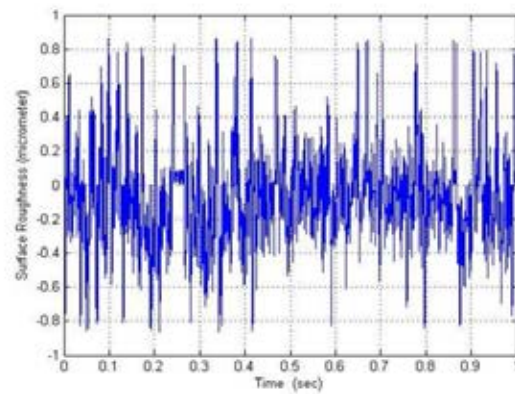
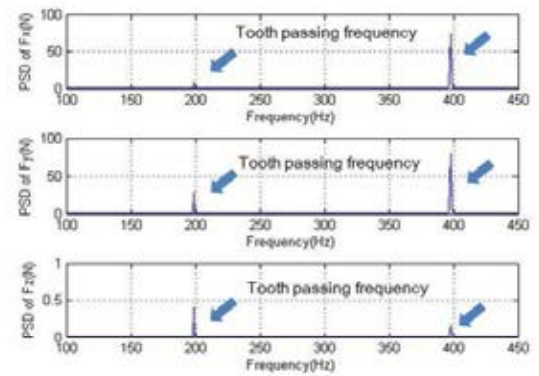
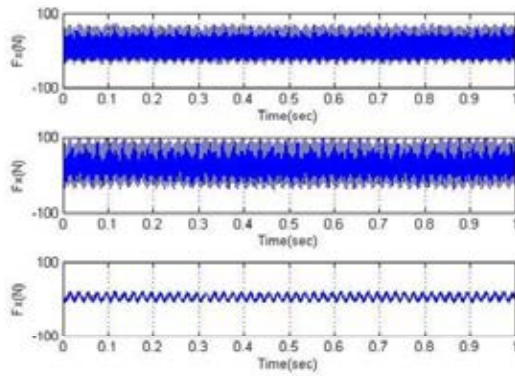
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
22	6	0.9	0.04	8000	320.00	5.33	4267



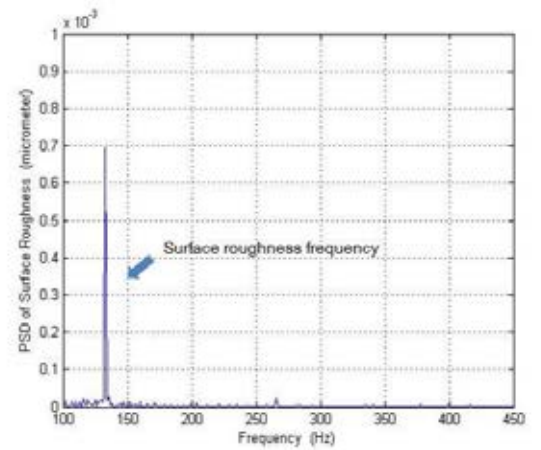
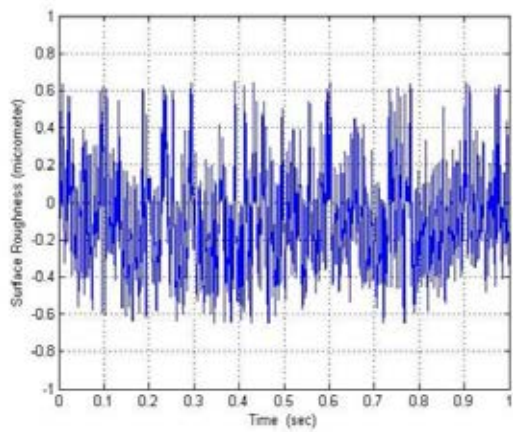
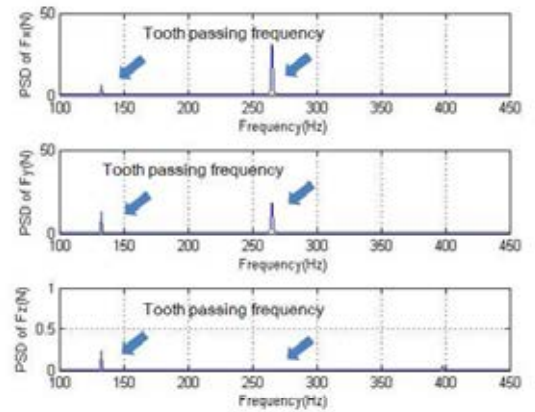
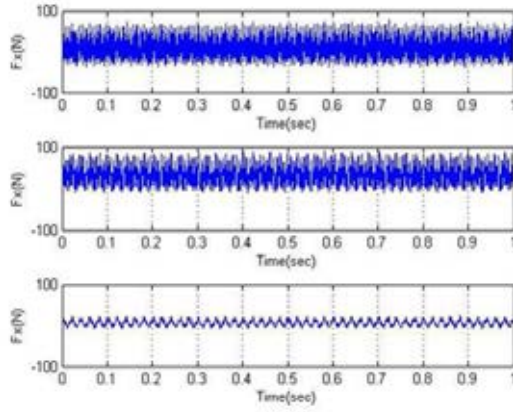
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
23	6	0.9	0.04	10000	400.00	6.67	5333



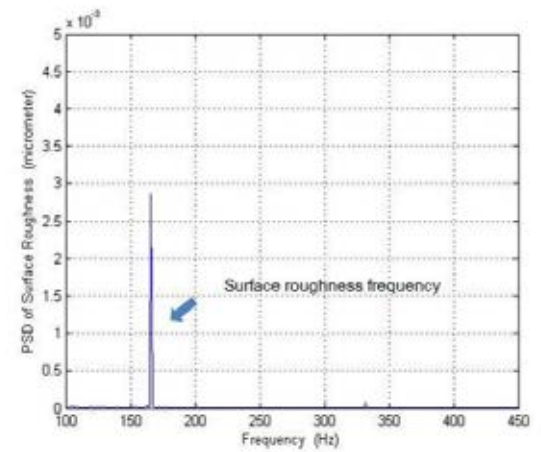
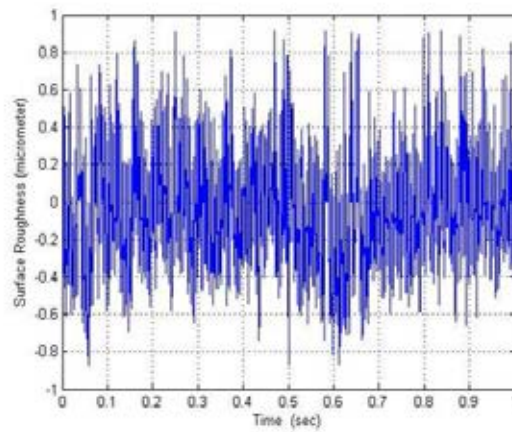
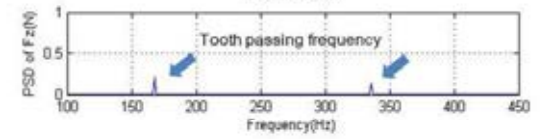
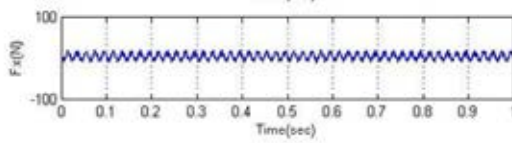
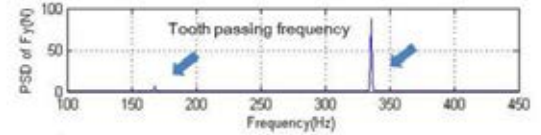
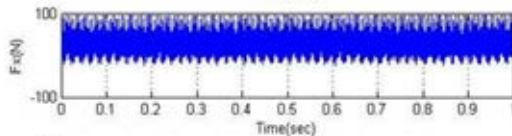
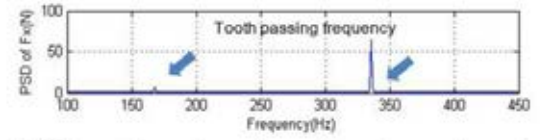
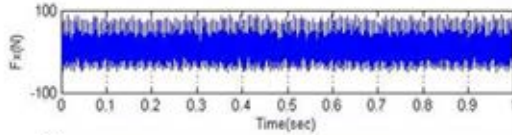
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
24	6	0.9	0.04	12000	480.00	8.00	6400



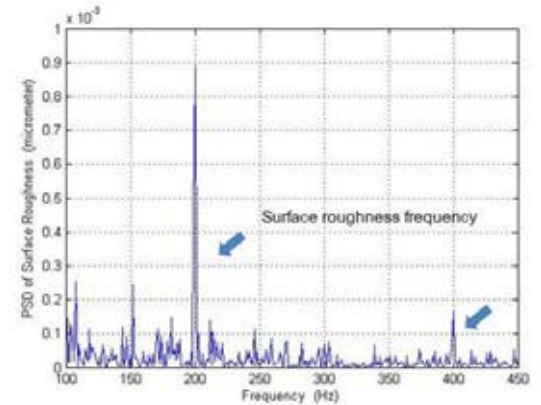
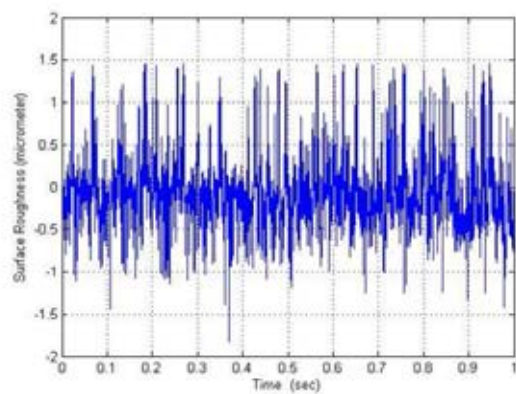
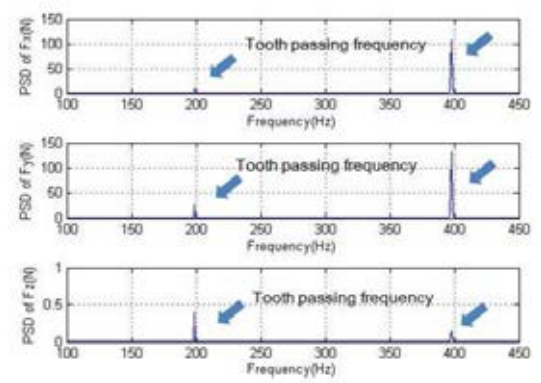
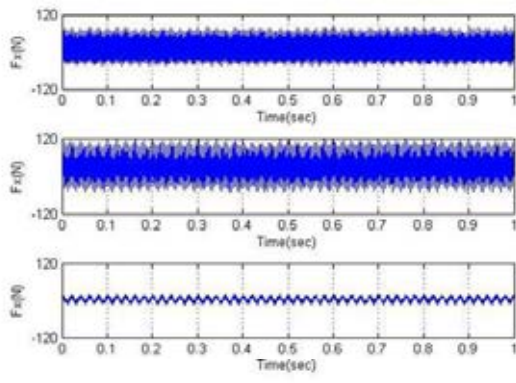
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	အညွှန်းအမှတ်
25	6	0.9	0.06	8000	480.00	8.00	6400



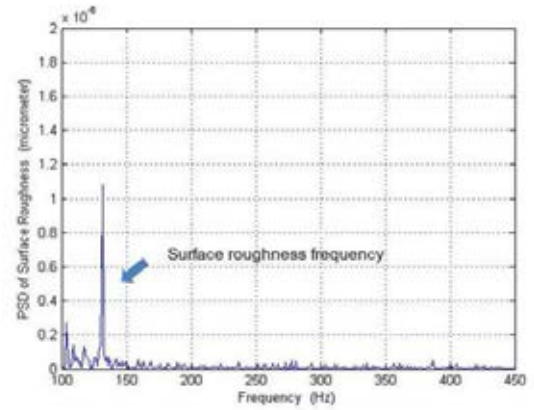
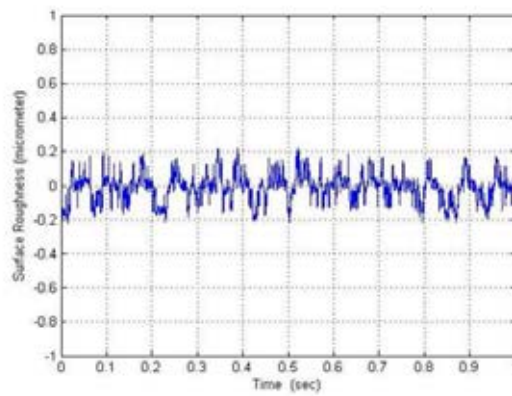
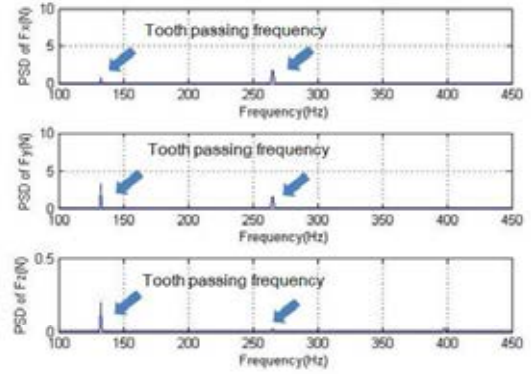
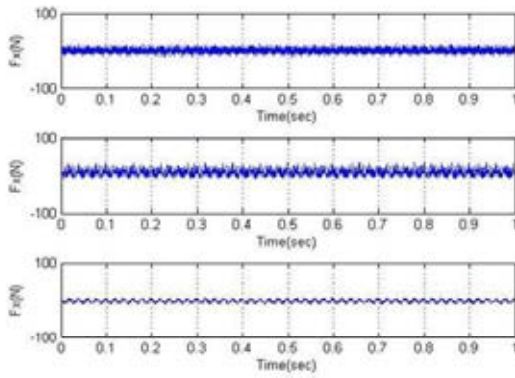
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
26	6	0.9	0.06	10000	600.00	10.00	8000



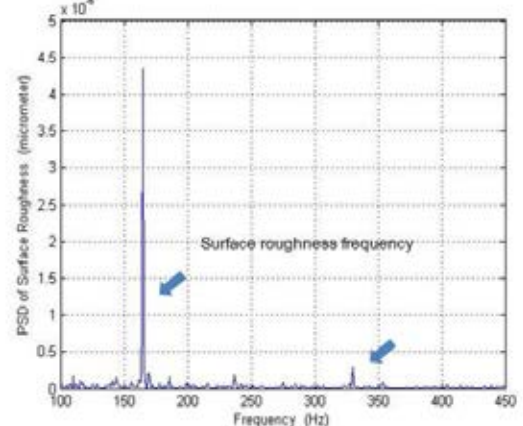
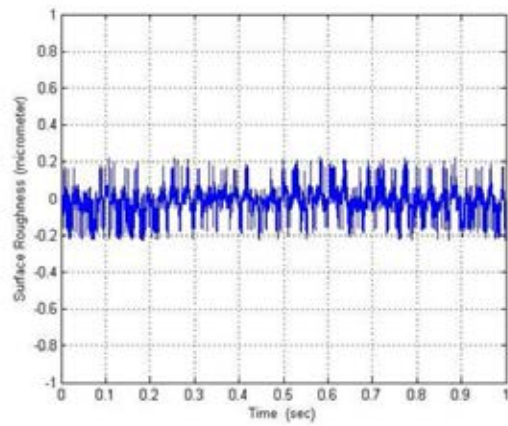
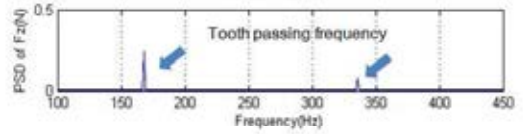
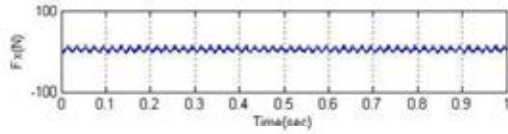
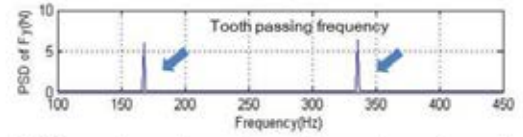
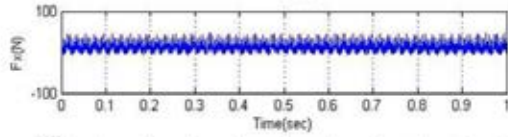
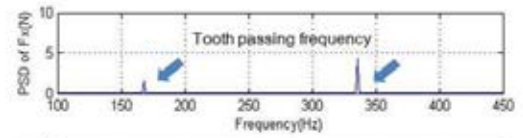
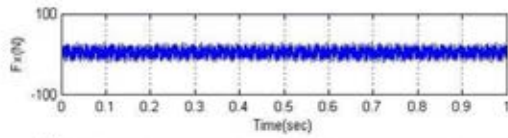
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
27	6	0.9	0.06	12000	720.00	12.00	9600



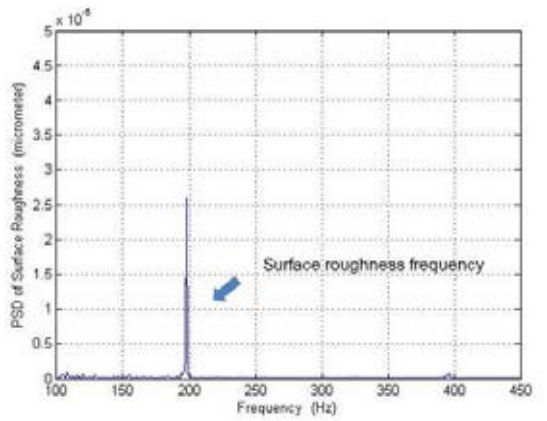
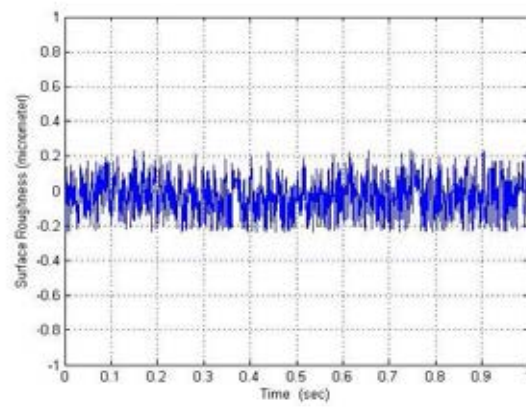
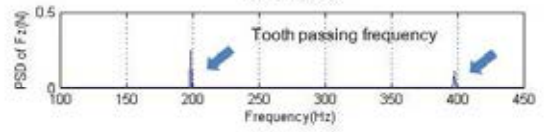
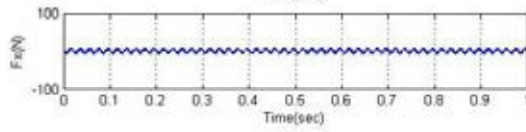
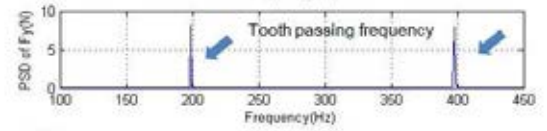
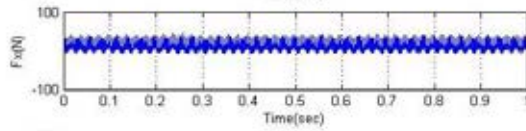
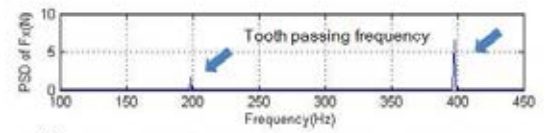
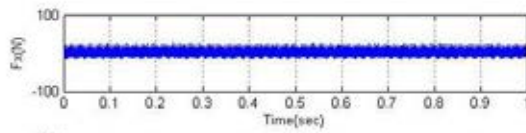
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
28	10	0.5	0.02	8000	160.00	2.67	2133



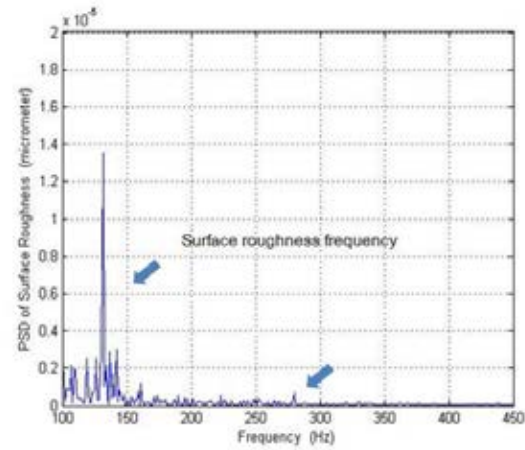
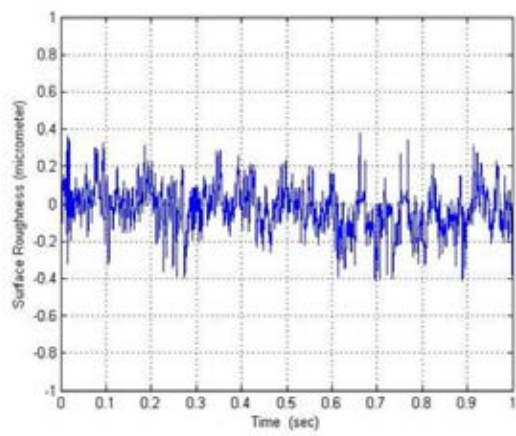
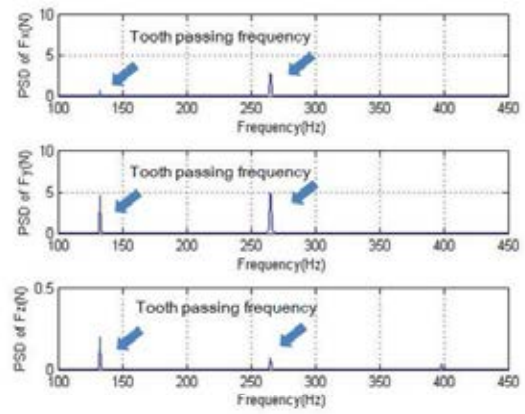
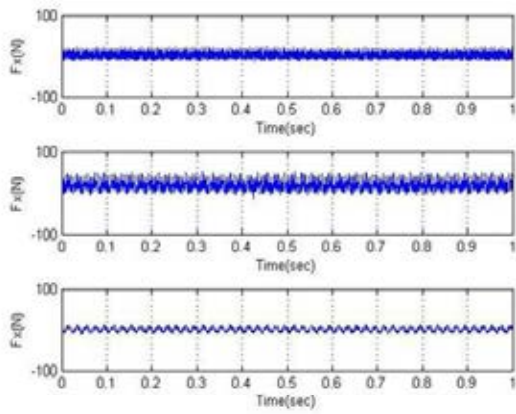
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
29	10	0.5	0.02	10000	200.00	3.33	2667



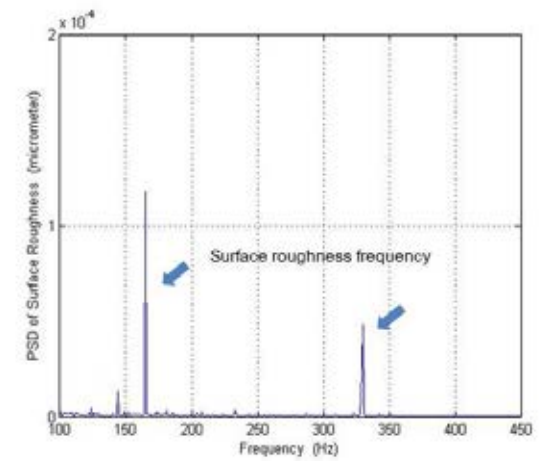
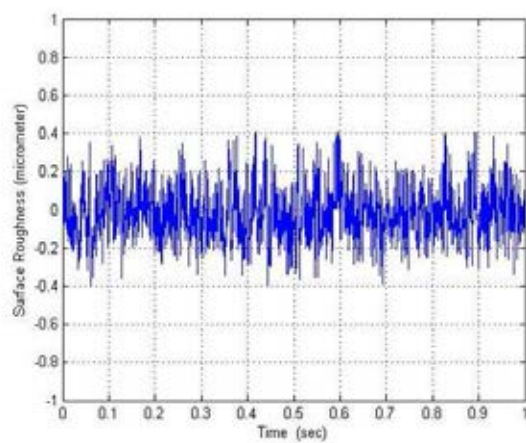
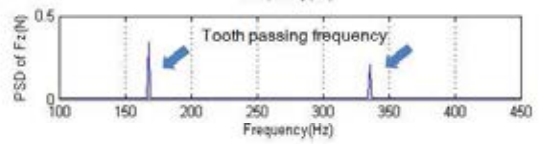
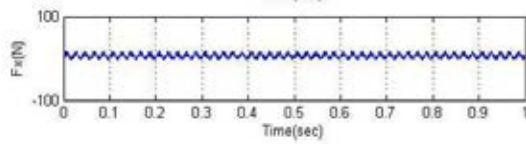
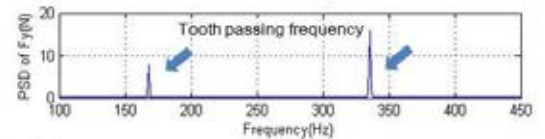
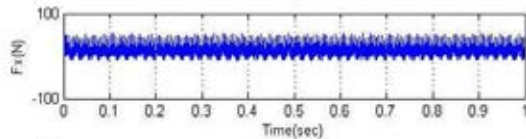
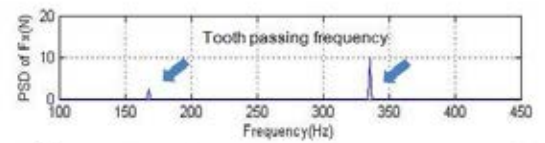
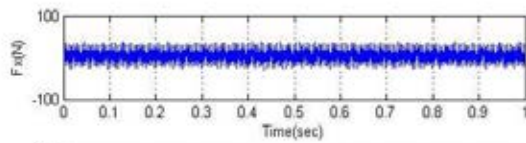
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบตัด
30	10	0.5	0.02	12000	240.00	4.00	3200



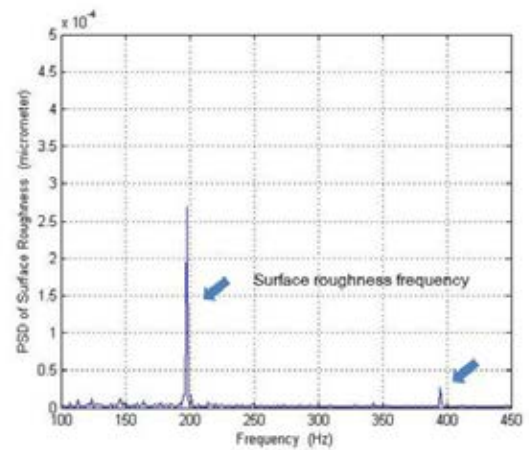
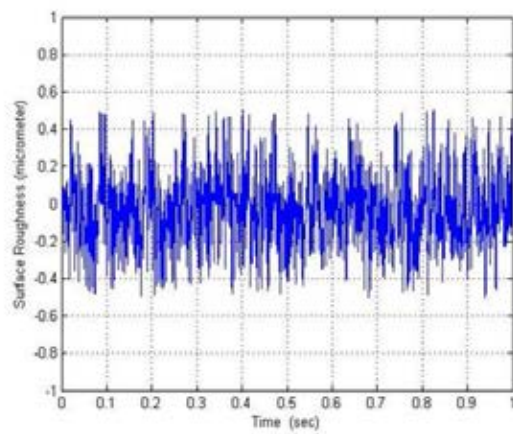
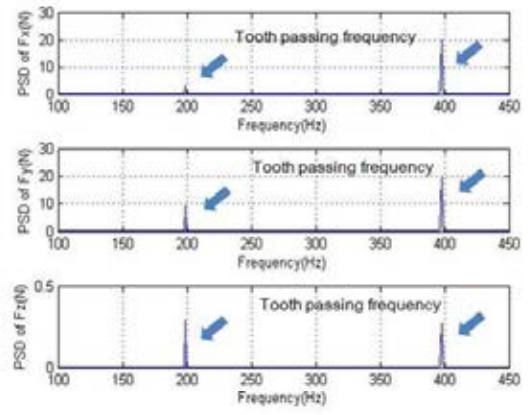
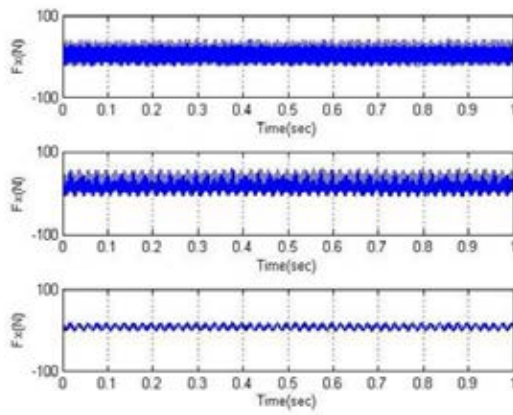
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
31	10	0.5	0.04	8000	320.00	5.33	4267



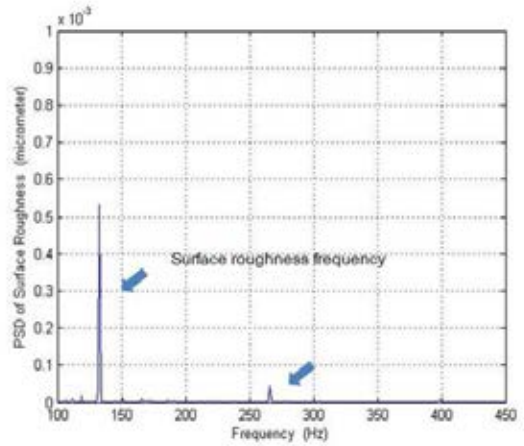
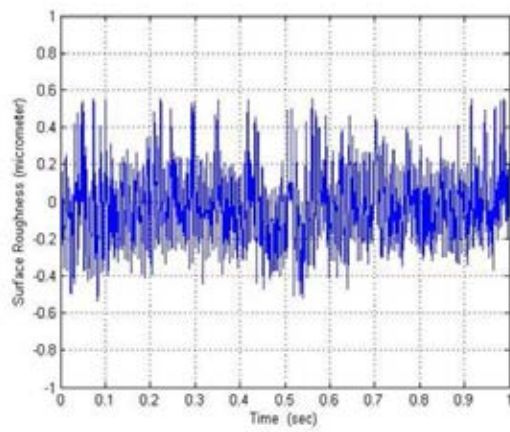
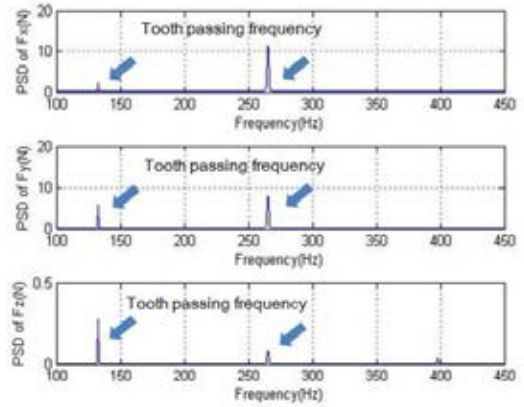
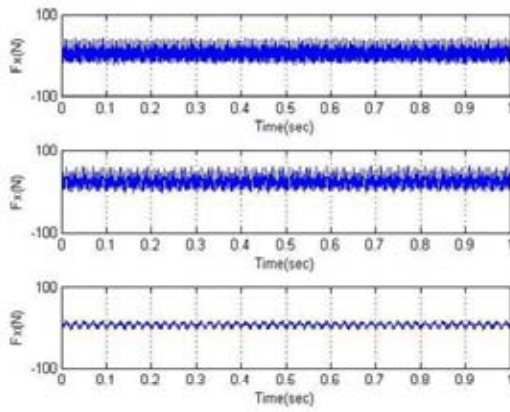
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
32	10	0.5	0.04	10000	400.00	6.67	5333



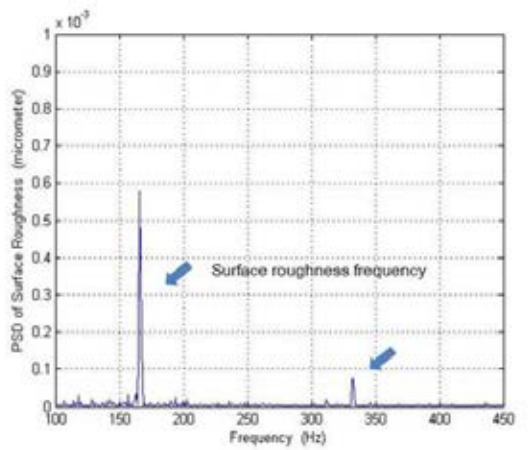
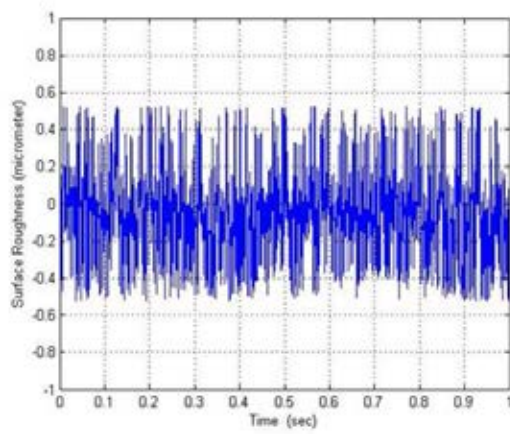
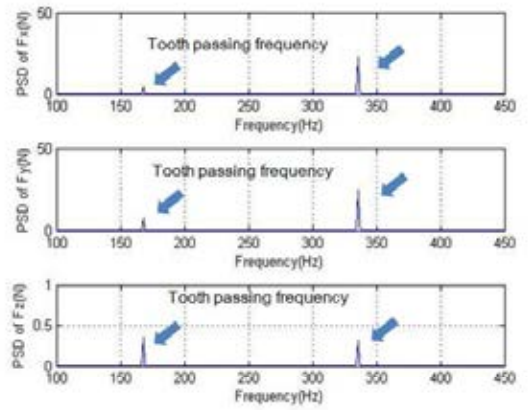
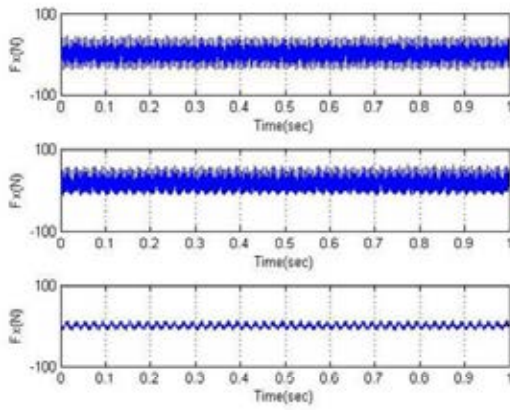
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
33	10	0.5	0.04	12000	480.00	8.00	6400



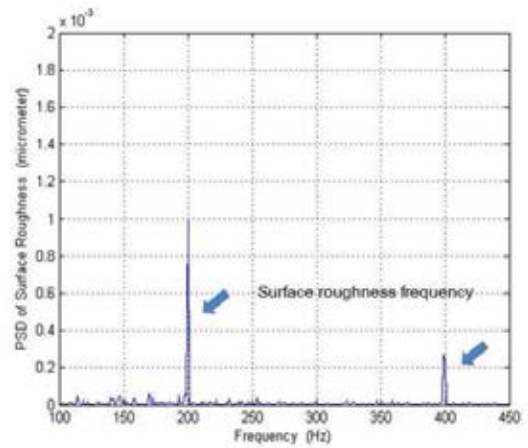
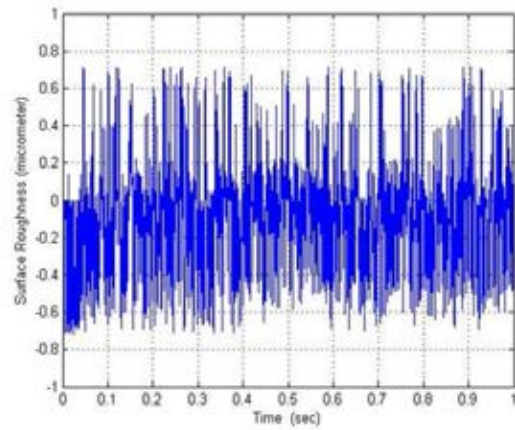
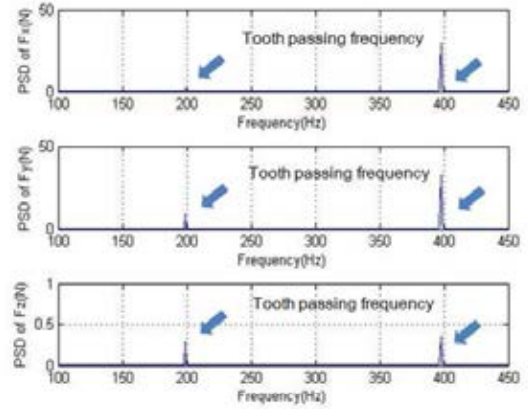
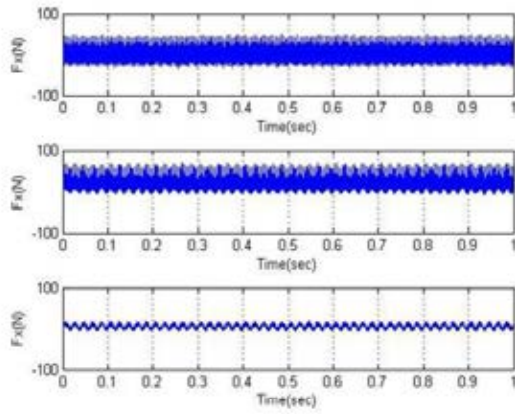
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
34	10	0.5	0.06	8000	480.00	8.00	6400



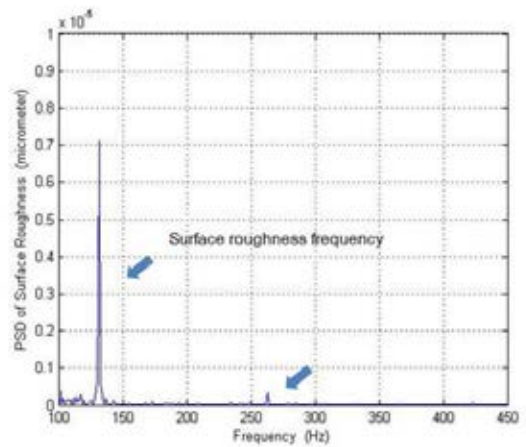
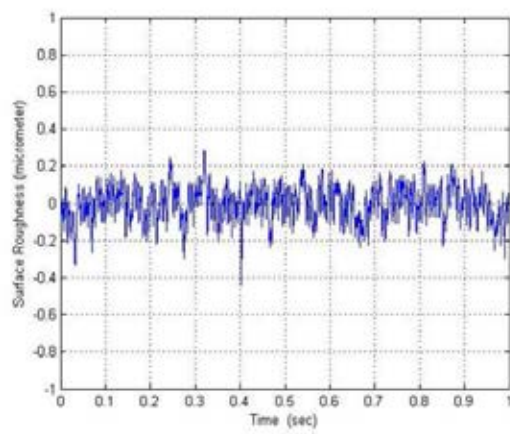
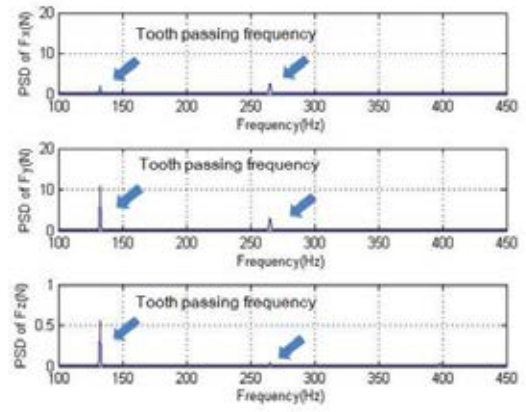
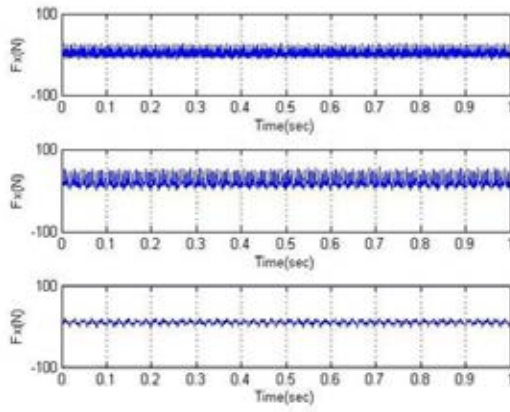
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
35	10	0.5	0.06	10000	600.00	10.00	8000



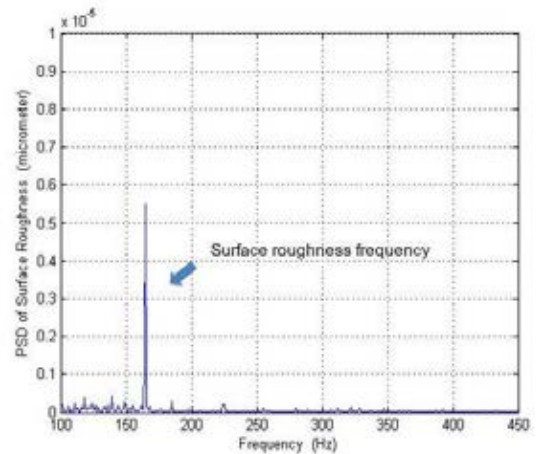
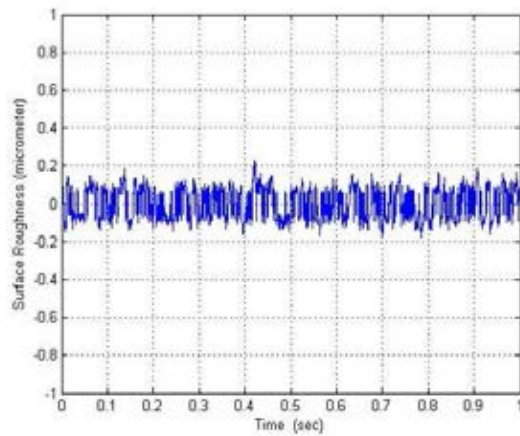
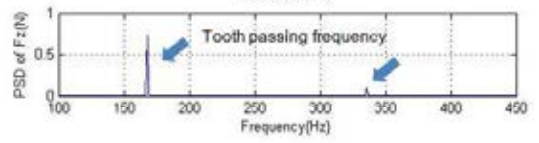
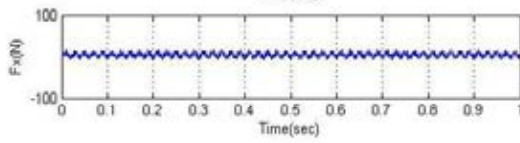
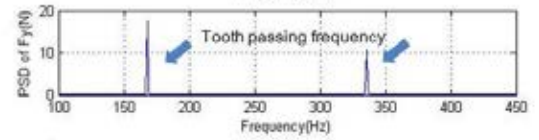
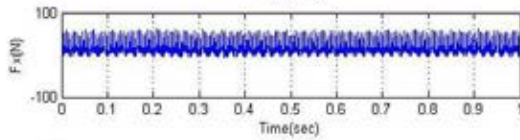
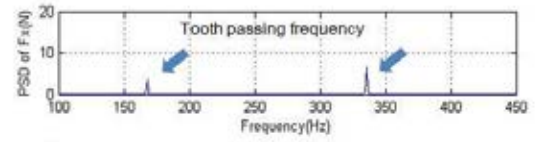
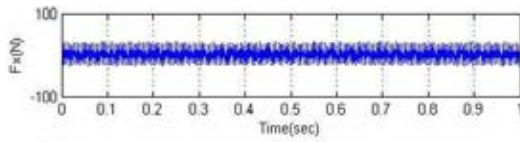
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
36	10	0.5	0.06	12000	720.00	12.00	9600



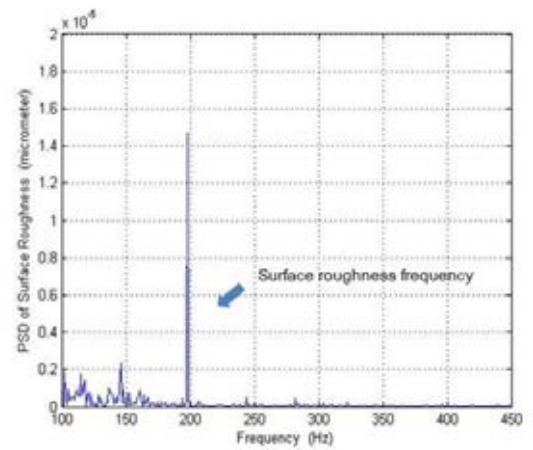
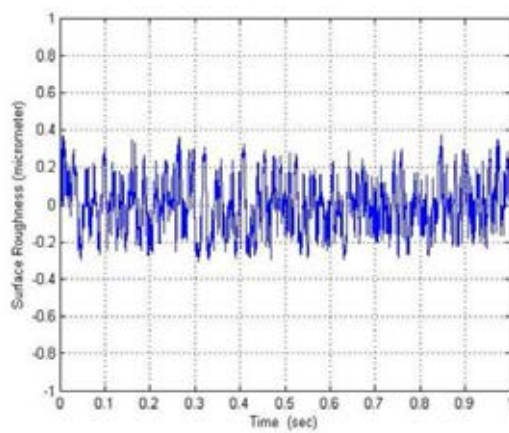
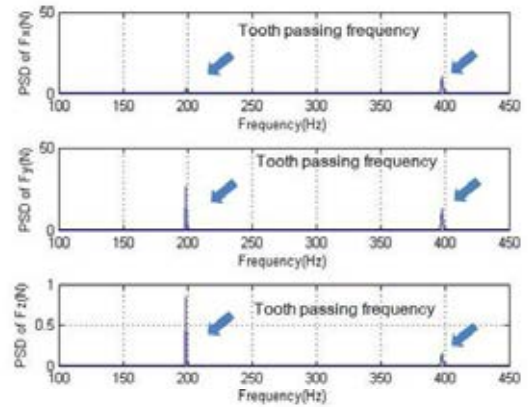
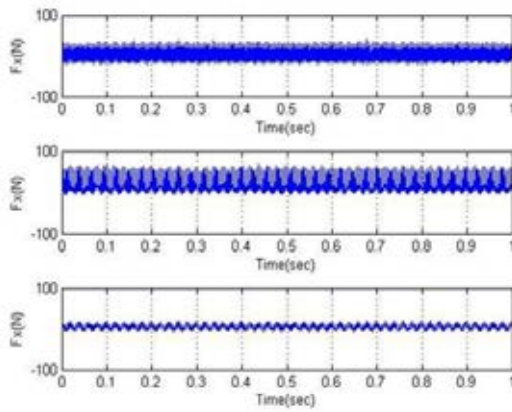
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
37	10	0.7	0.02	8000	160.00	2.67	2133



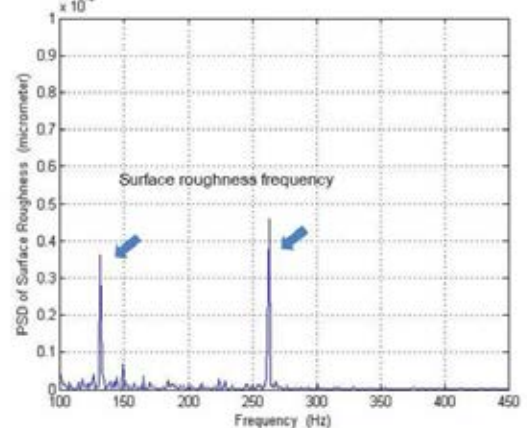
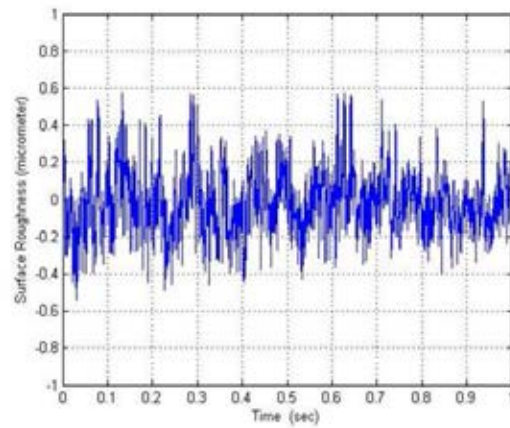
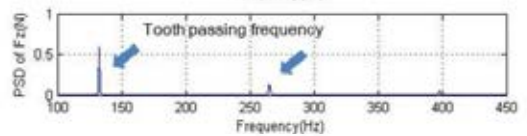
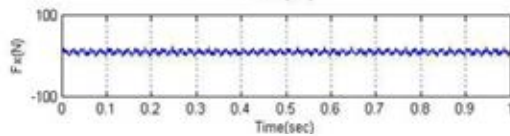
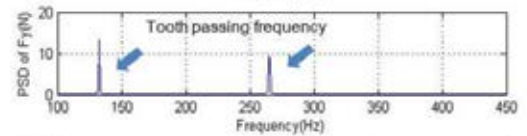
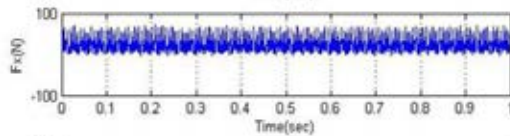
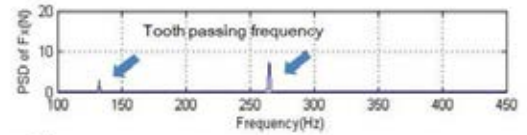
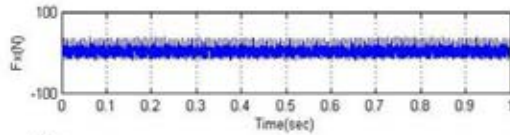
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
38	10	0.7	0.02	10000	200.00	3.33	2667



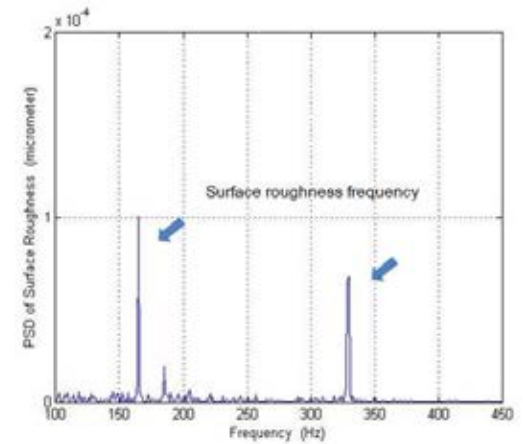
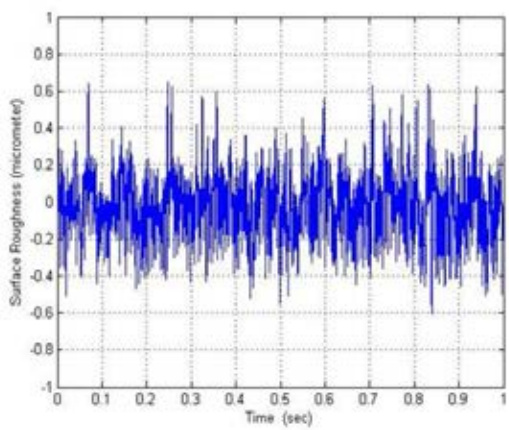
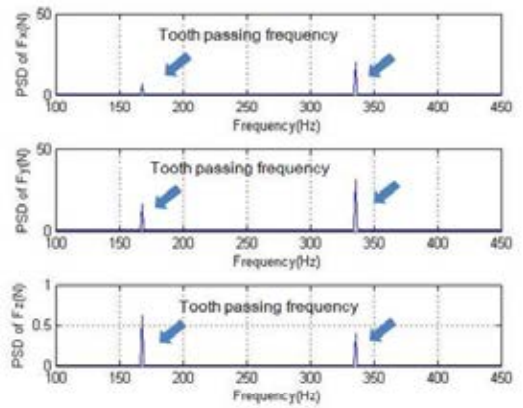
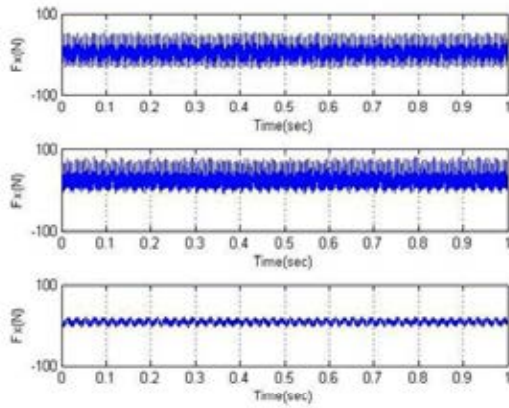
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
39	10	0.7	0.02	12000	240.00	4.00	3200



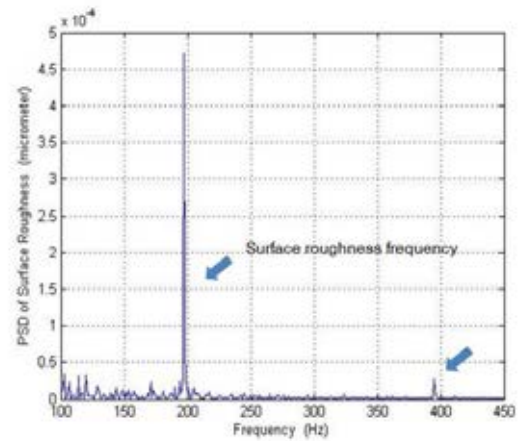
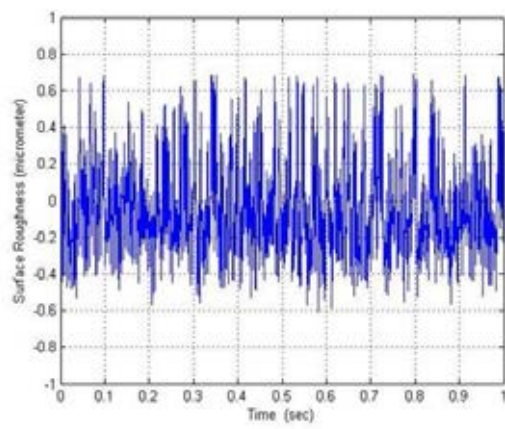
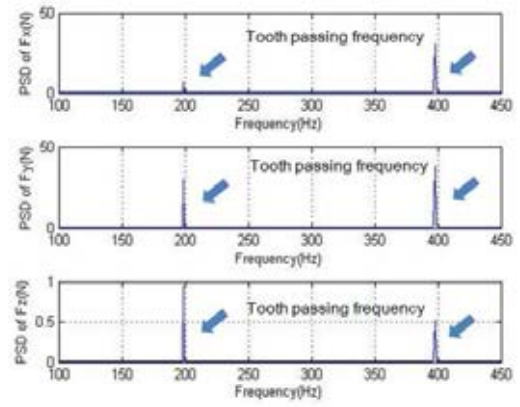
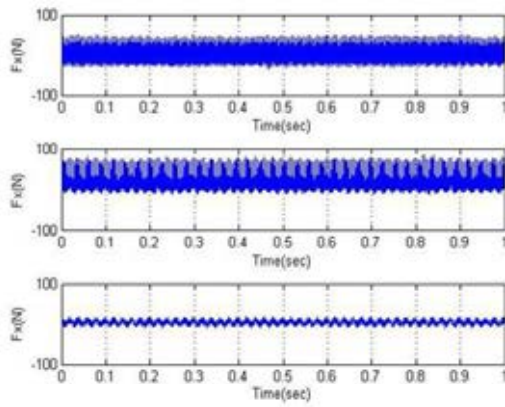
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบงาน
40	10	0.7	0.04	8000	320.00	5.33	4267



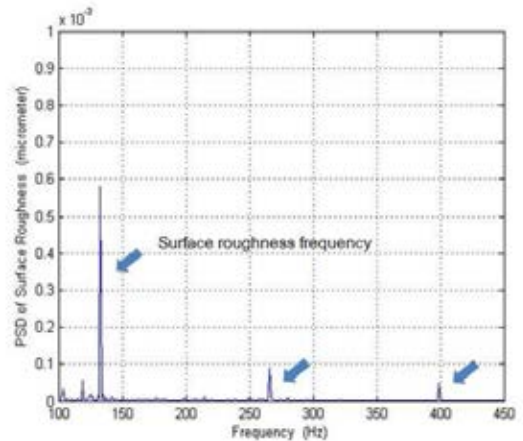
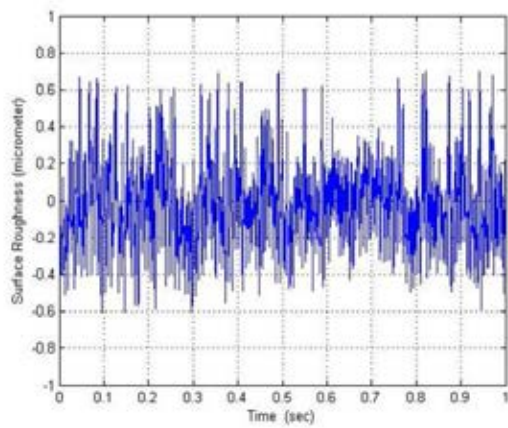
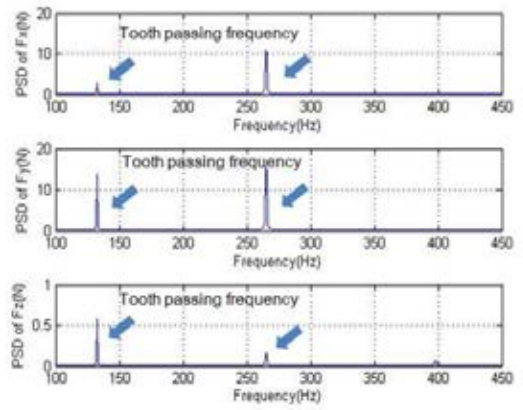
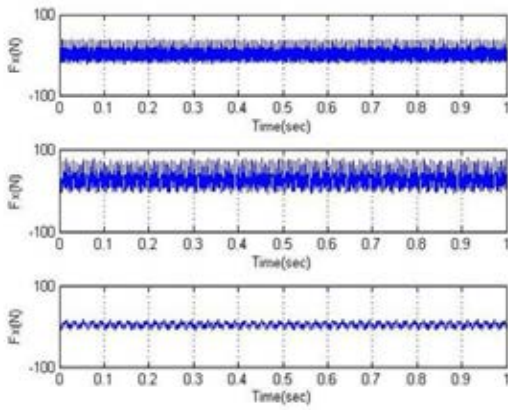
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
41	10	0.7	0.04	10000	400.00	6.67	5333



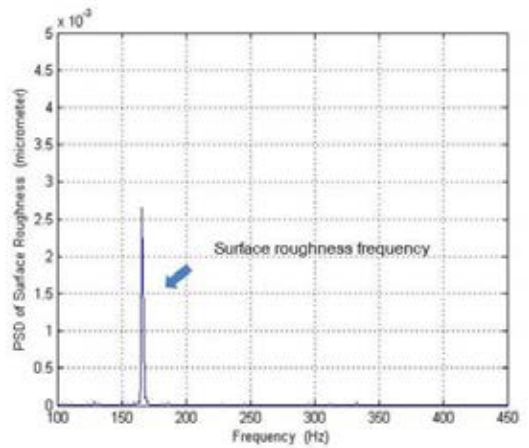
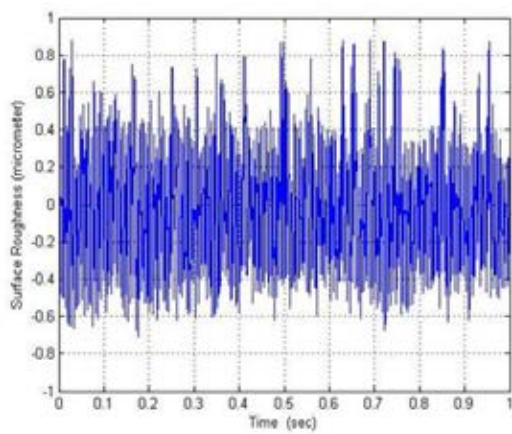
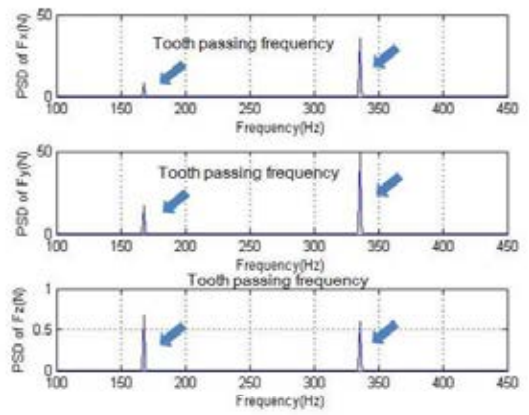
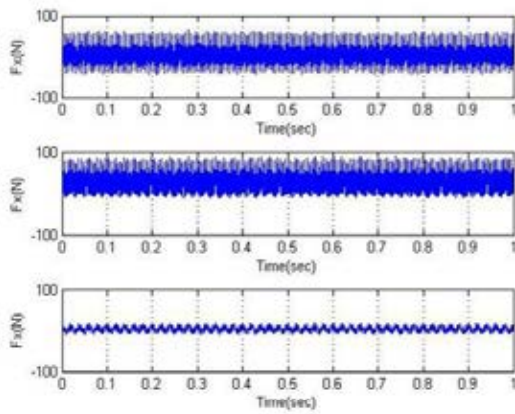
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
42	10	0.7	0.04	12000	480.00	8.00	6400



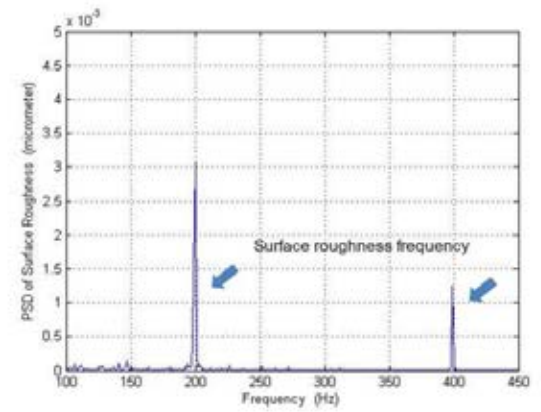
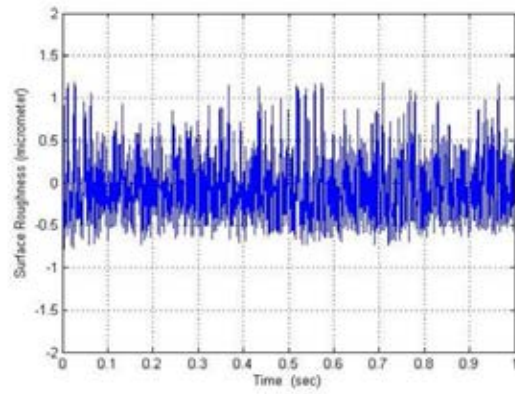
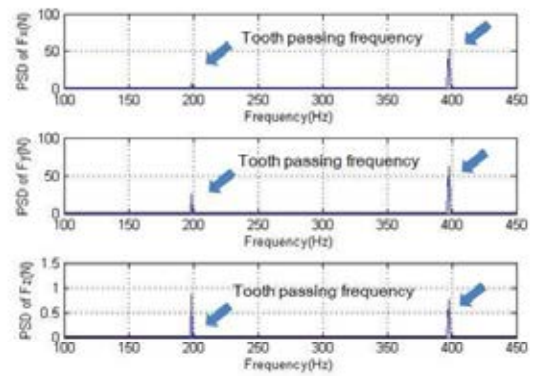
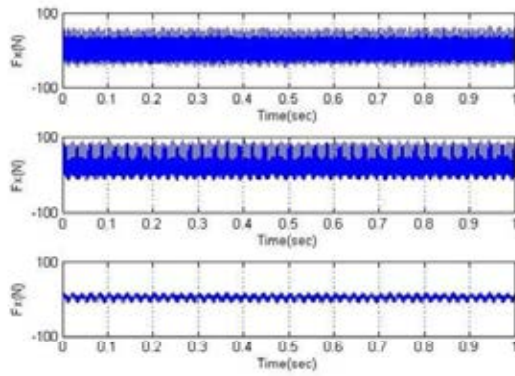
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบงาน
43	10	0.7	0.06	8000	480.00	8.00	6400



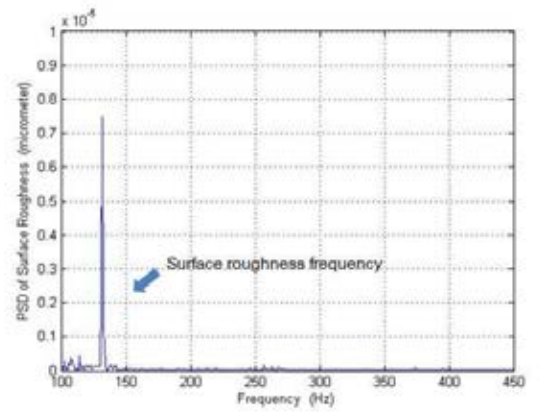
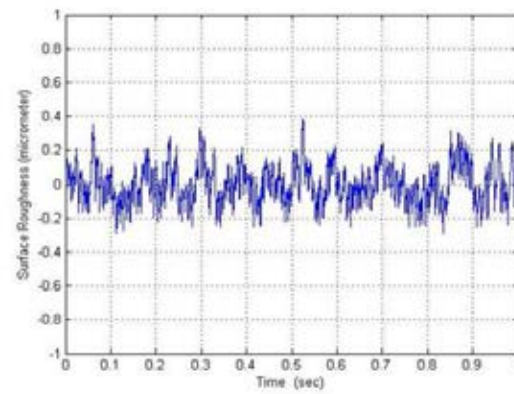
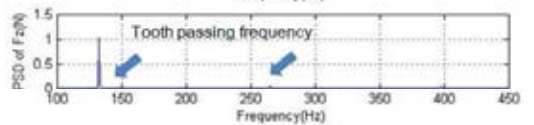
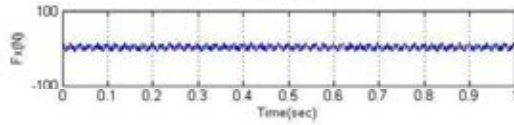
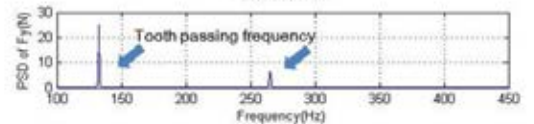
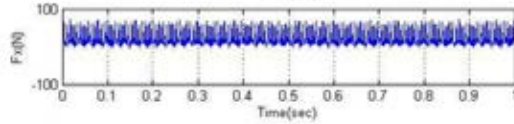
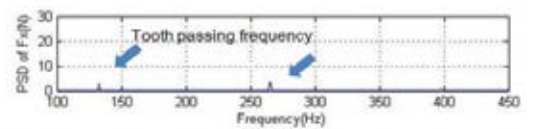
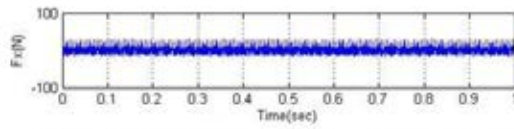
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
44	10	0.7	0.06	10000	600.00	10.00	8000



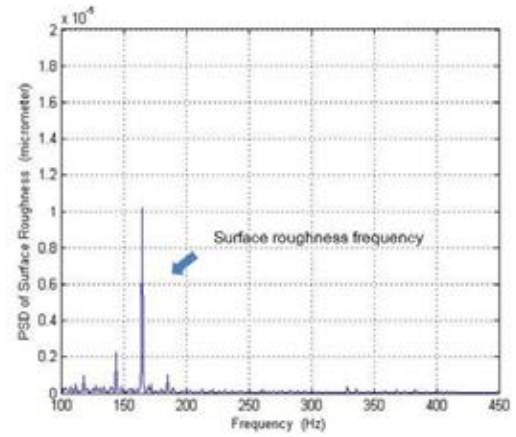
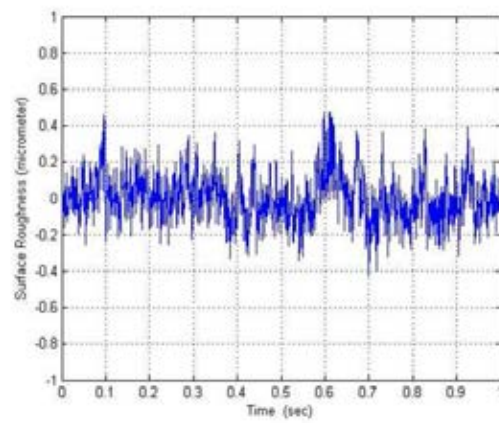
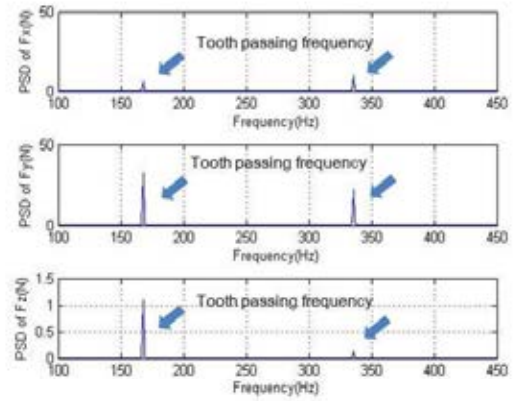
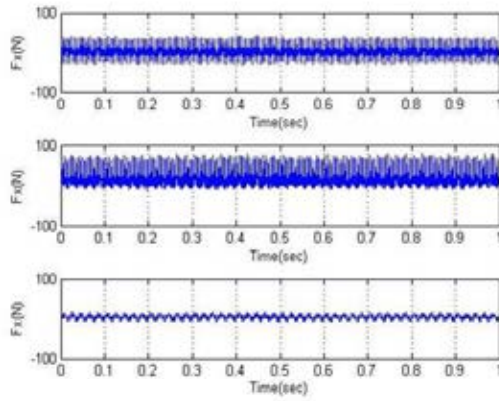
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบงาน
45	10	0.7	0.06	12000	720.00	12.00	9600



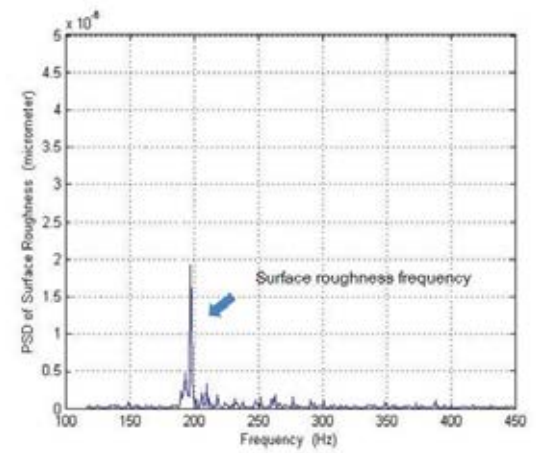
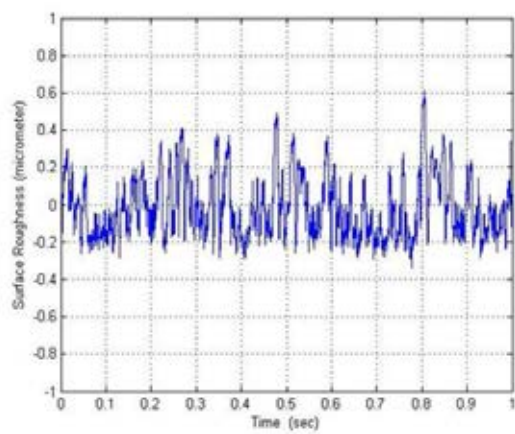
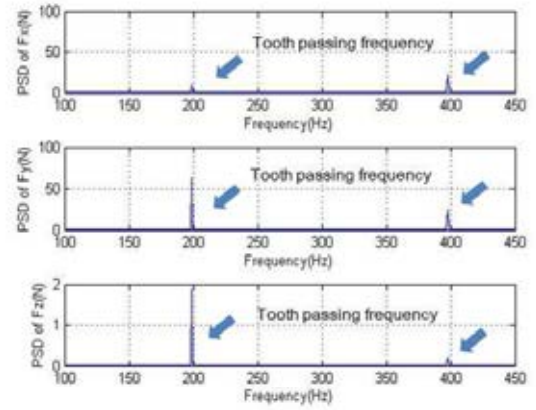
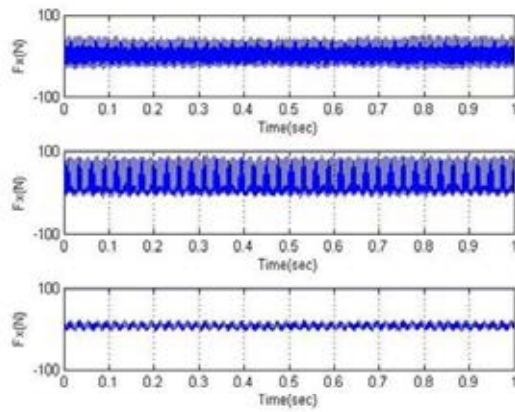
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบตอก
46	10	0.9	0.02	8000	160.00	2.67	2133



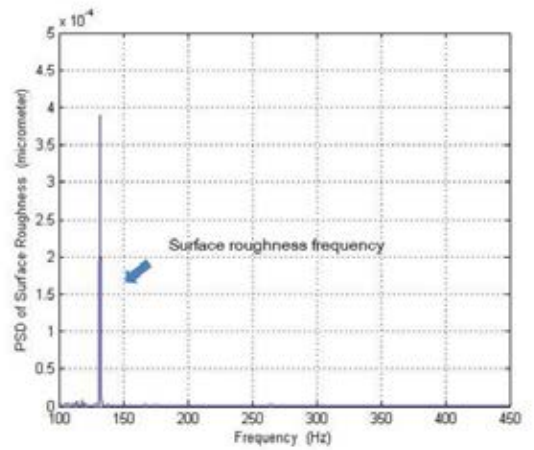
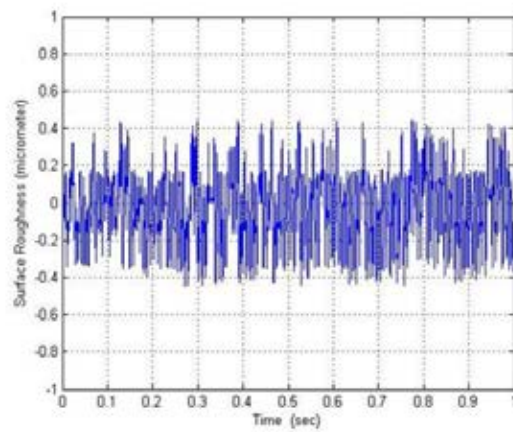
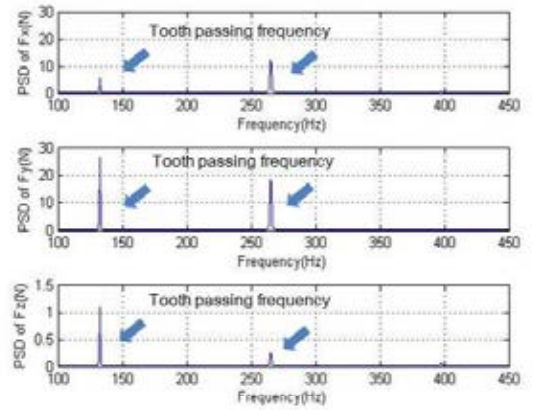
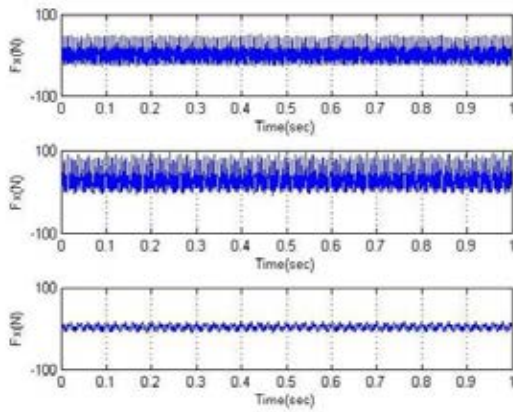
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
47	10	0.9	0.02	10000	200.00	3.33	2667



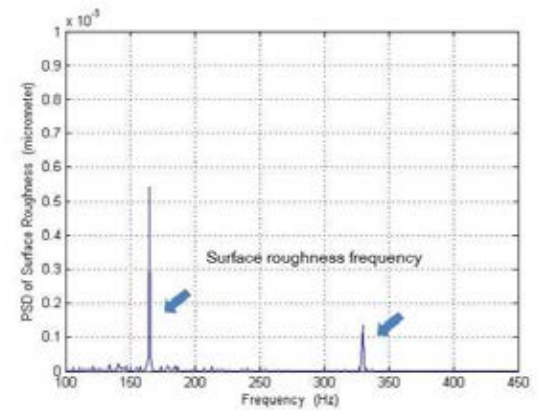
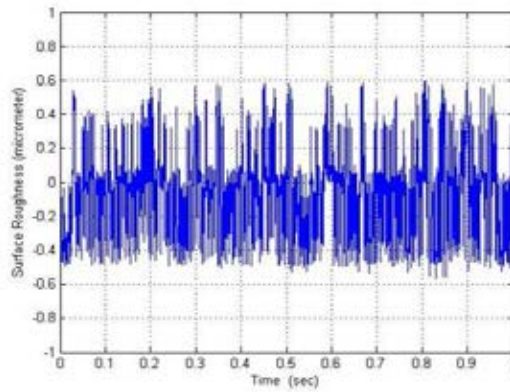
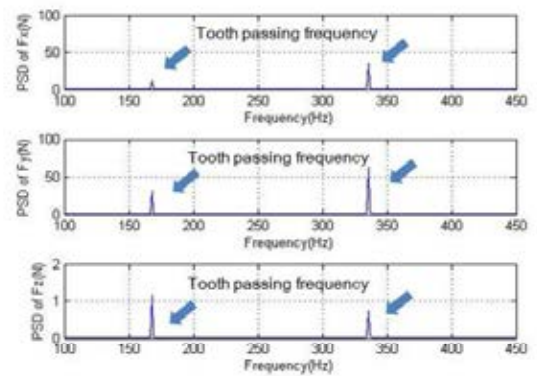
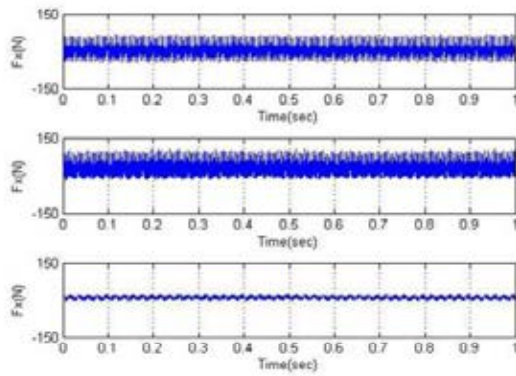
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
48	10	0.9	0.02	12000	240.00	4.00	3200



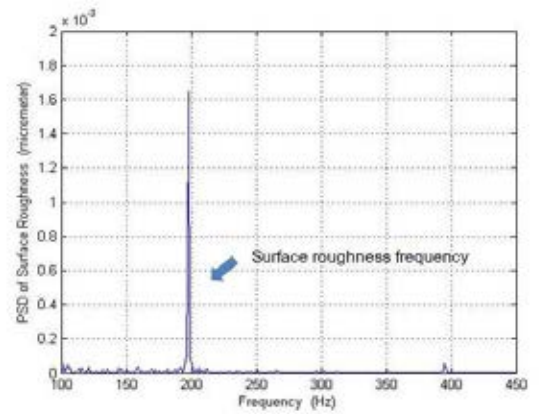
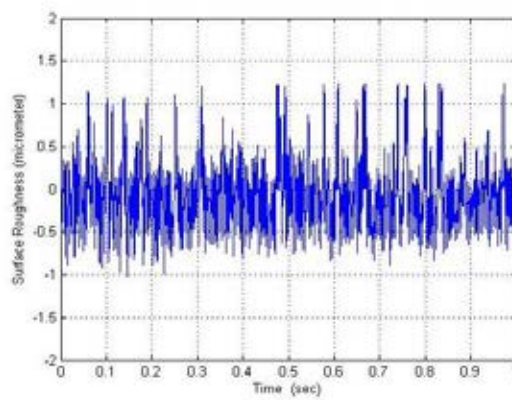
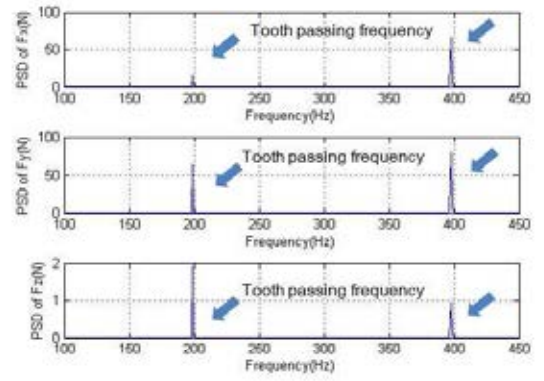
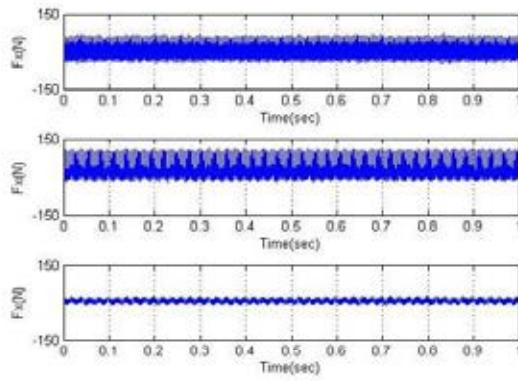
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
49	10	0.9	0.04	8000	320.00	5.33	4267



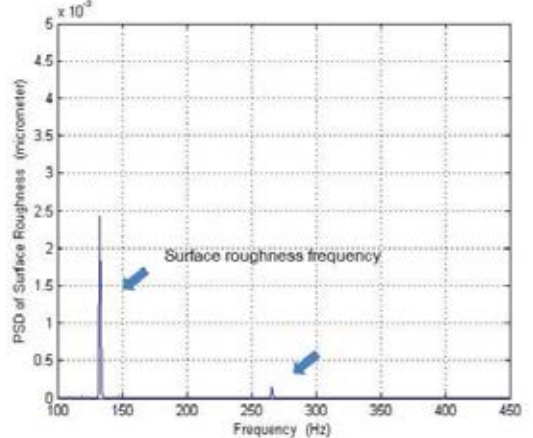
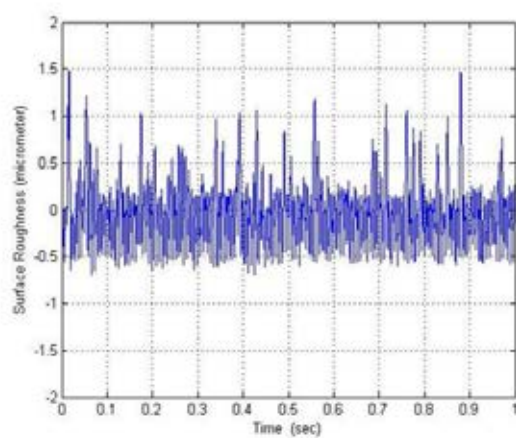
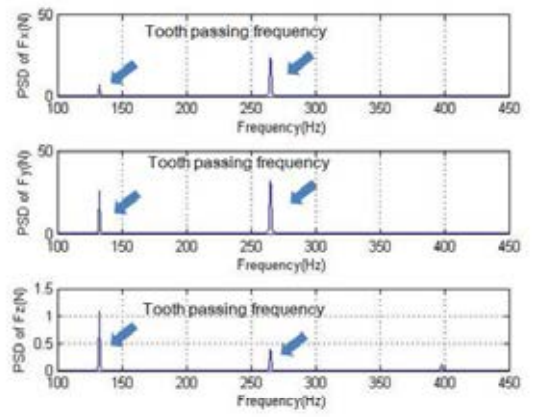
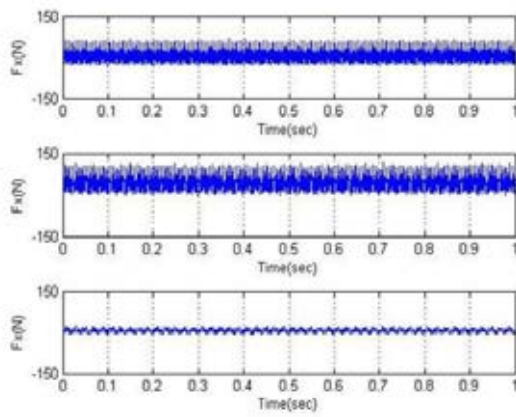
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบ
50	10	0.9	0.04	10000	400.00	6.67	5333



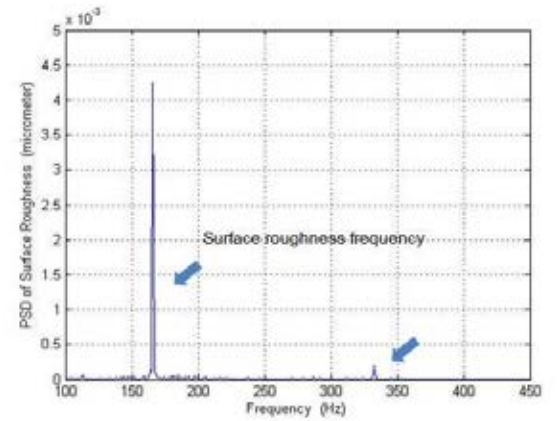
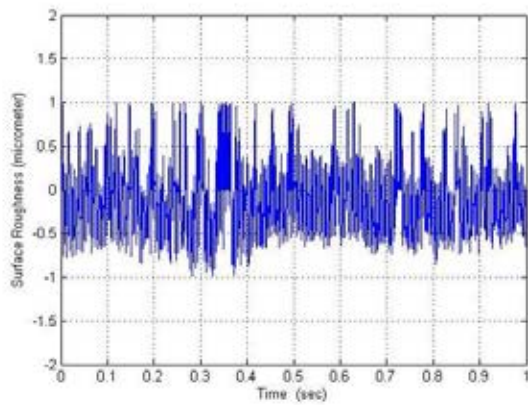
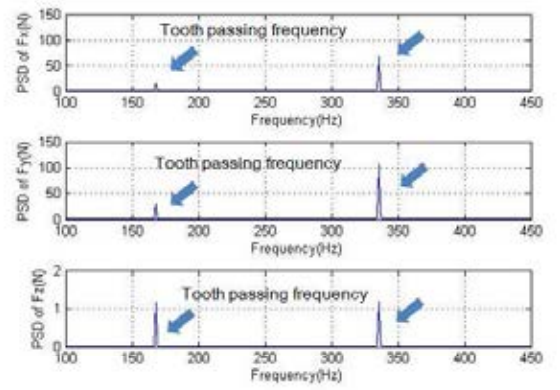
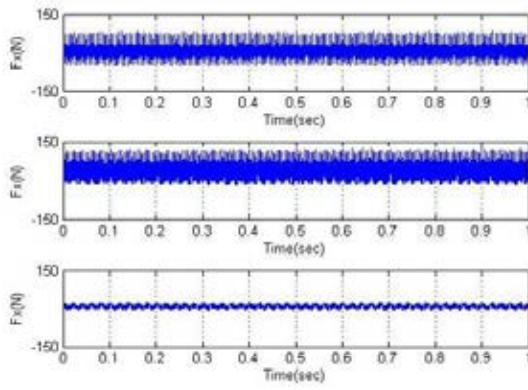
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
51	10	0.9	0.04	12000	480.00	8.00	6400



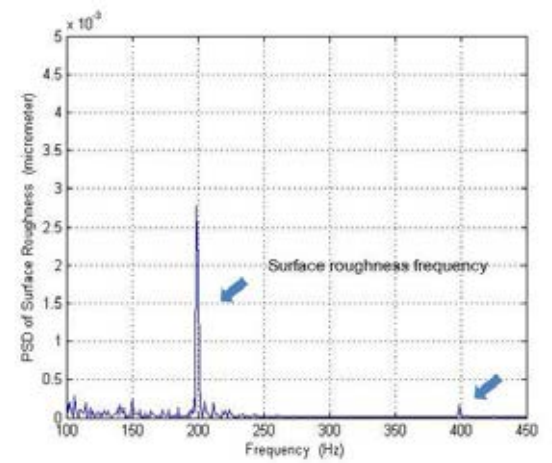
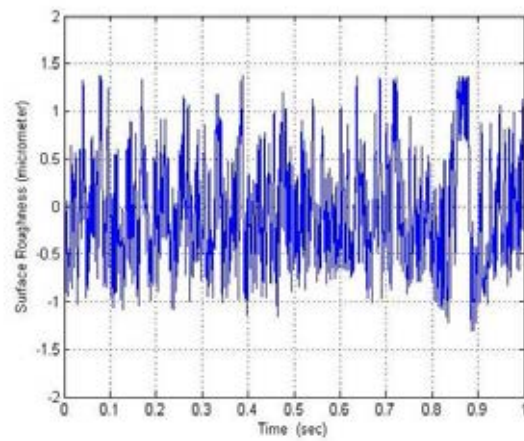
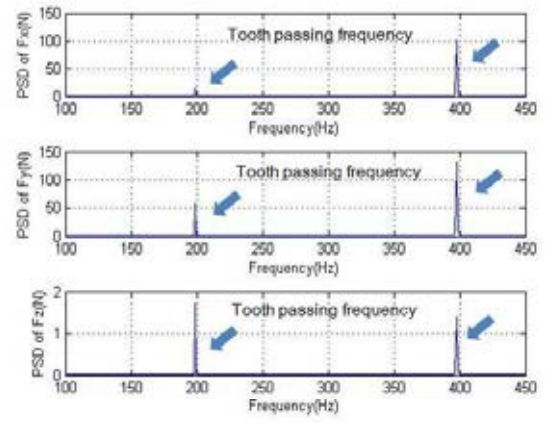
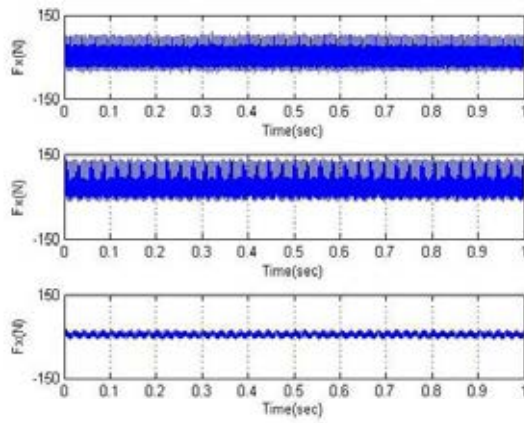
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
52	10	0.9	0.06	8000	480.00	8.00	6400



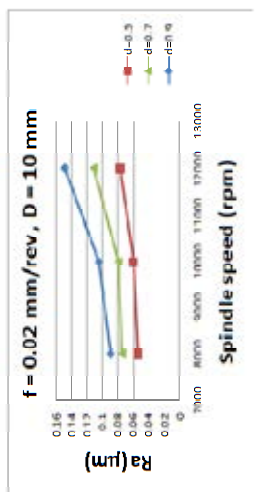
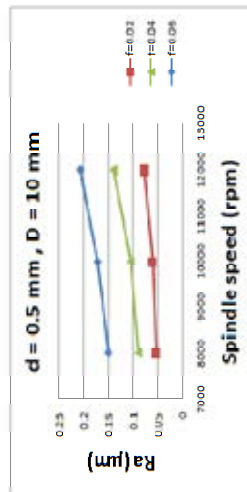
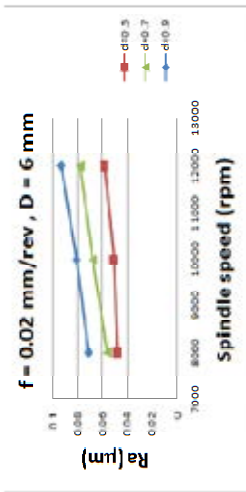
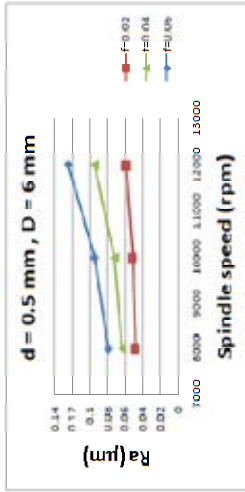
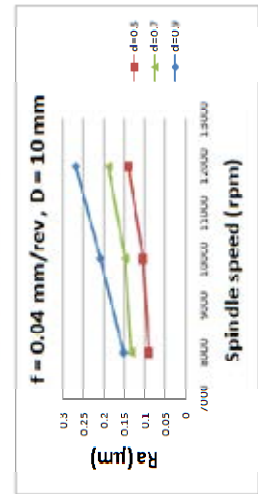
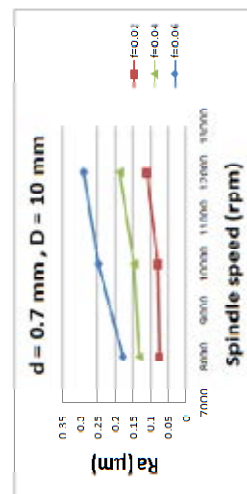
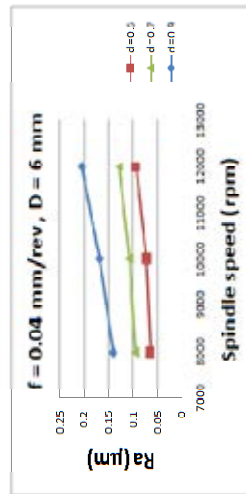
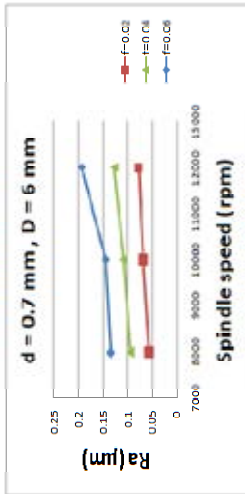
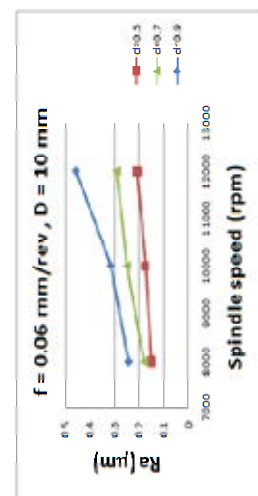
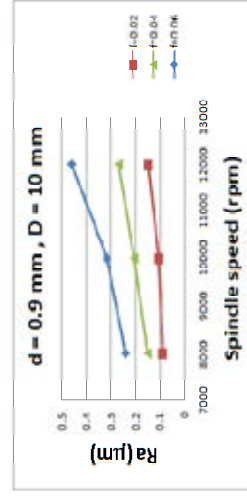
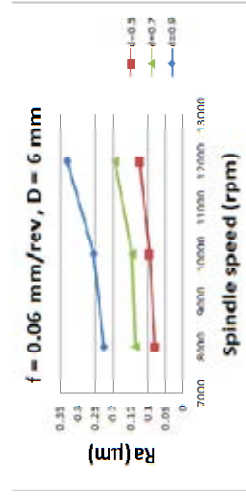
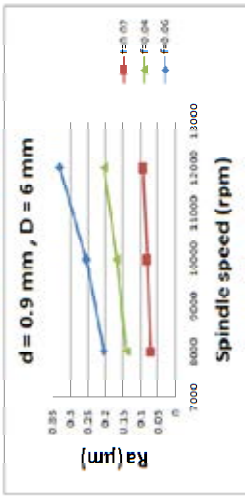
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
53	10	0.9	0.06	10000	600.00	10.00	8000

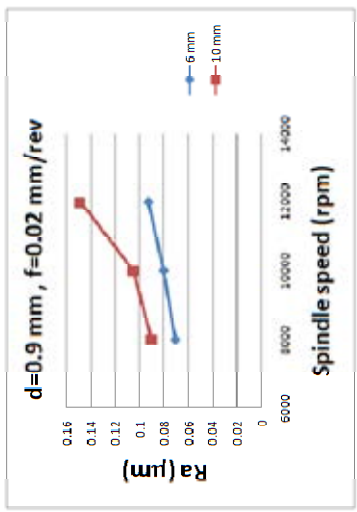
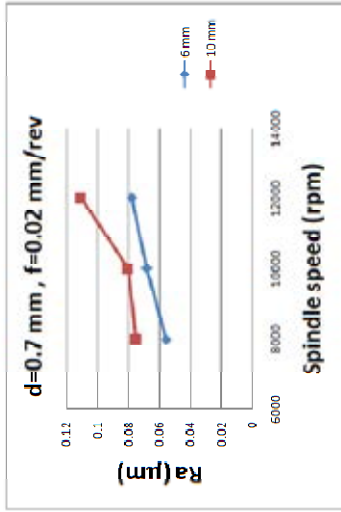
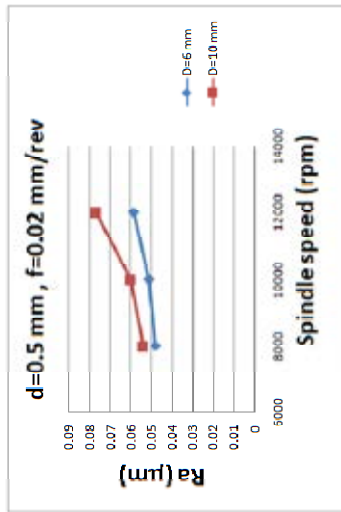
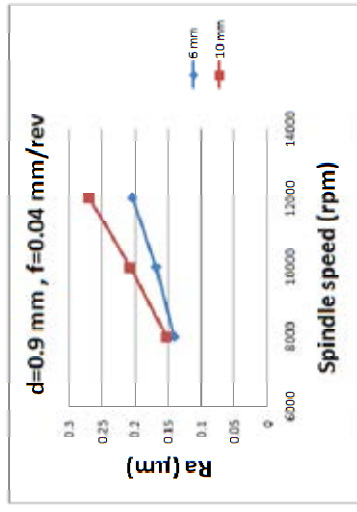
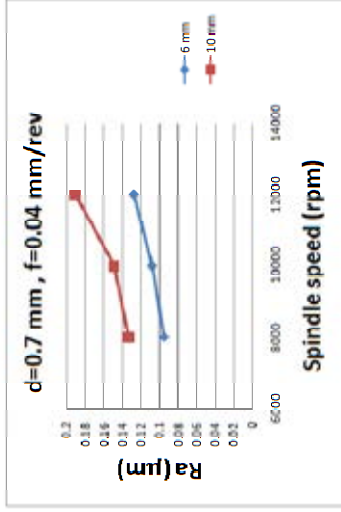
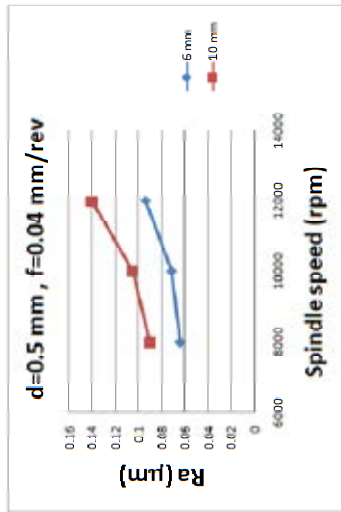
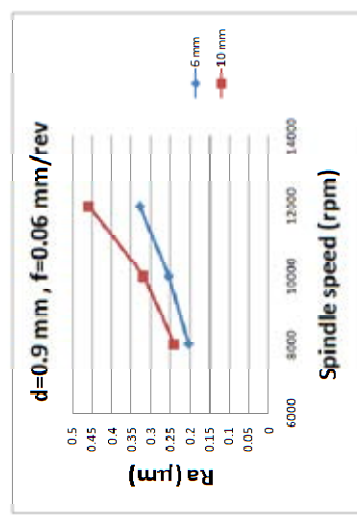
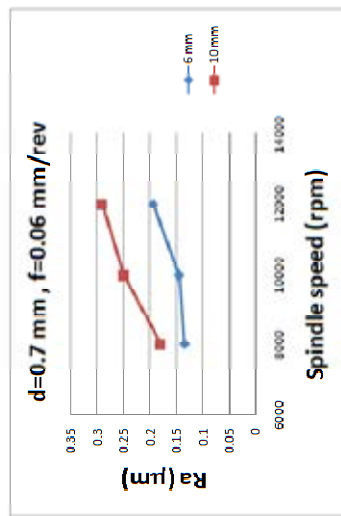
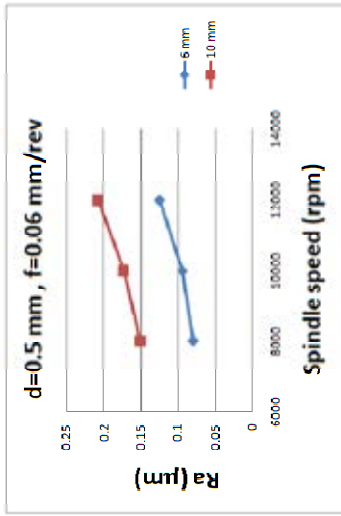


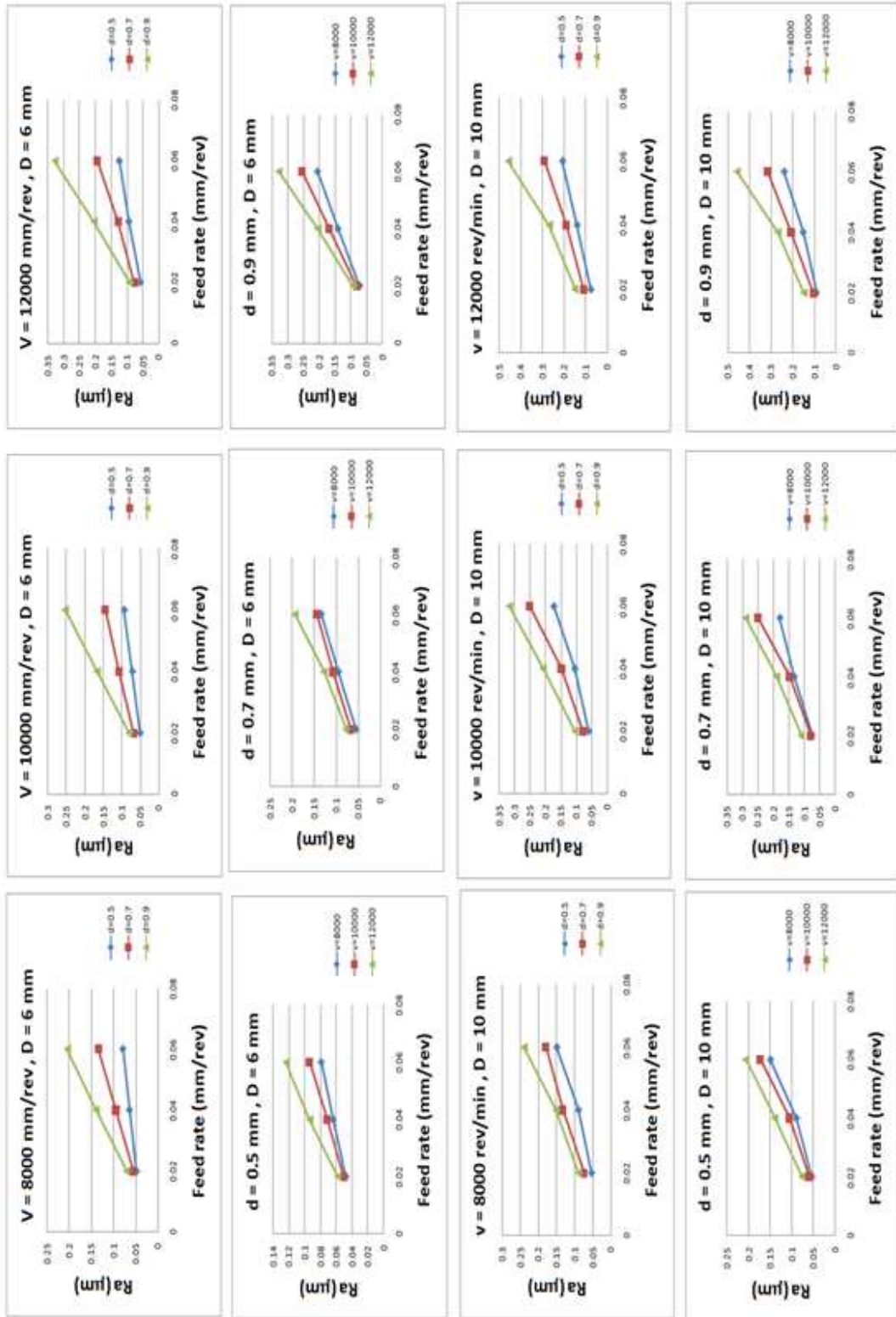
No.	Diameter	Depth of Cut (mm)	Feed Rate (mm/rev)	Cutting Speed (rev/min)	Vf (mm/min)	S (mm/sec)	จำนวนรอบกลึง
54	10	0.9	0.06	12000	720.00	12.00	9600

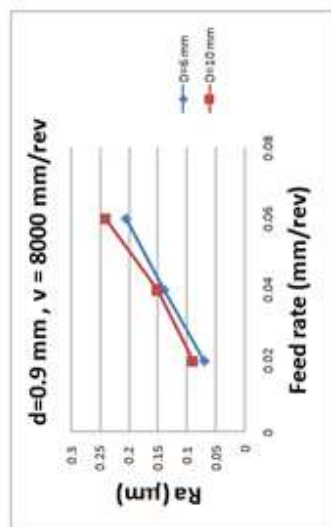
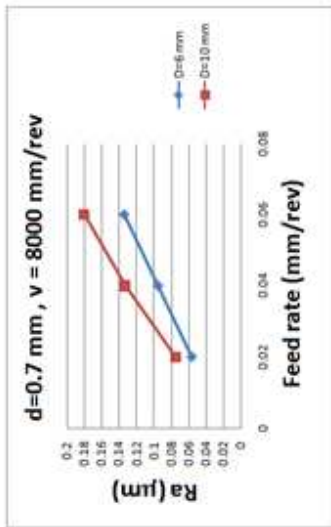
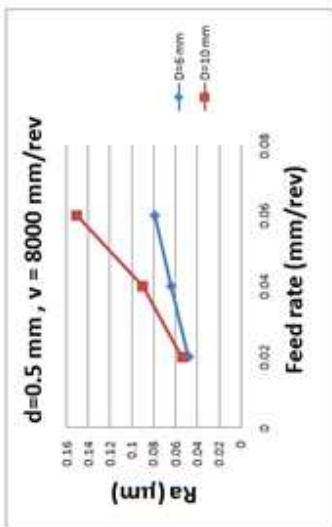
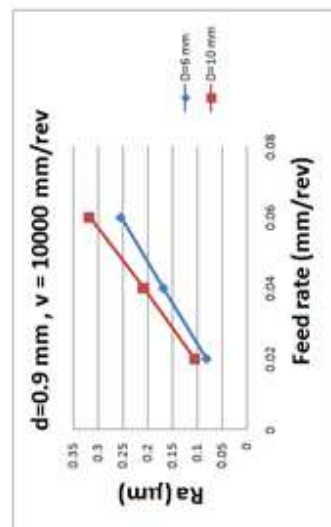
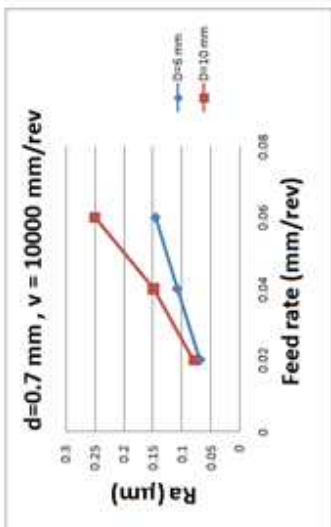
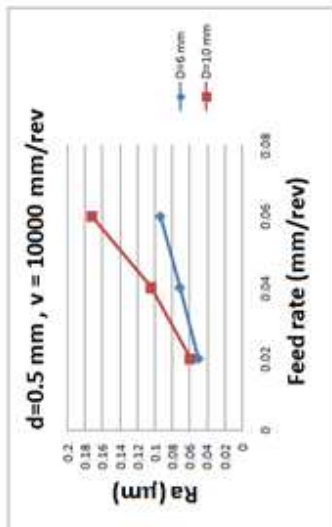
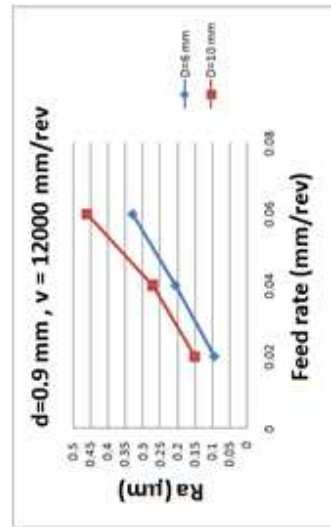
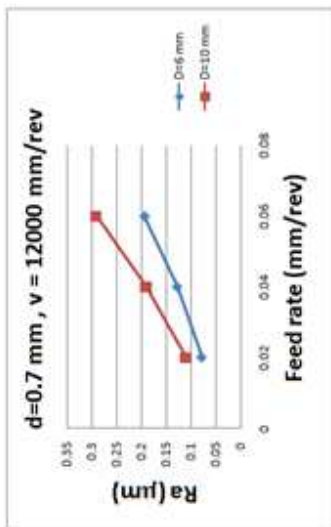
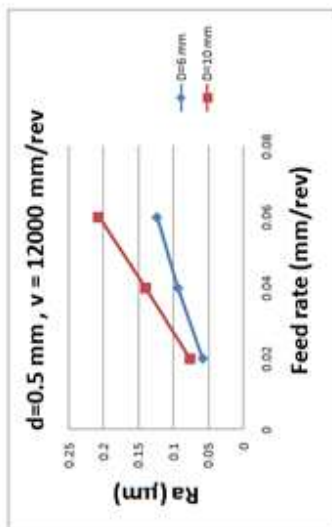


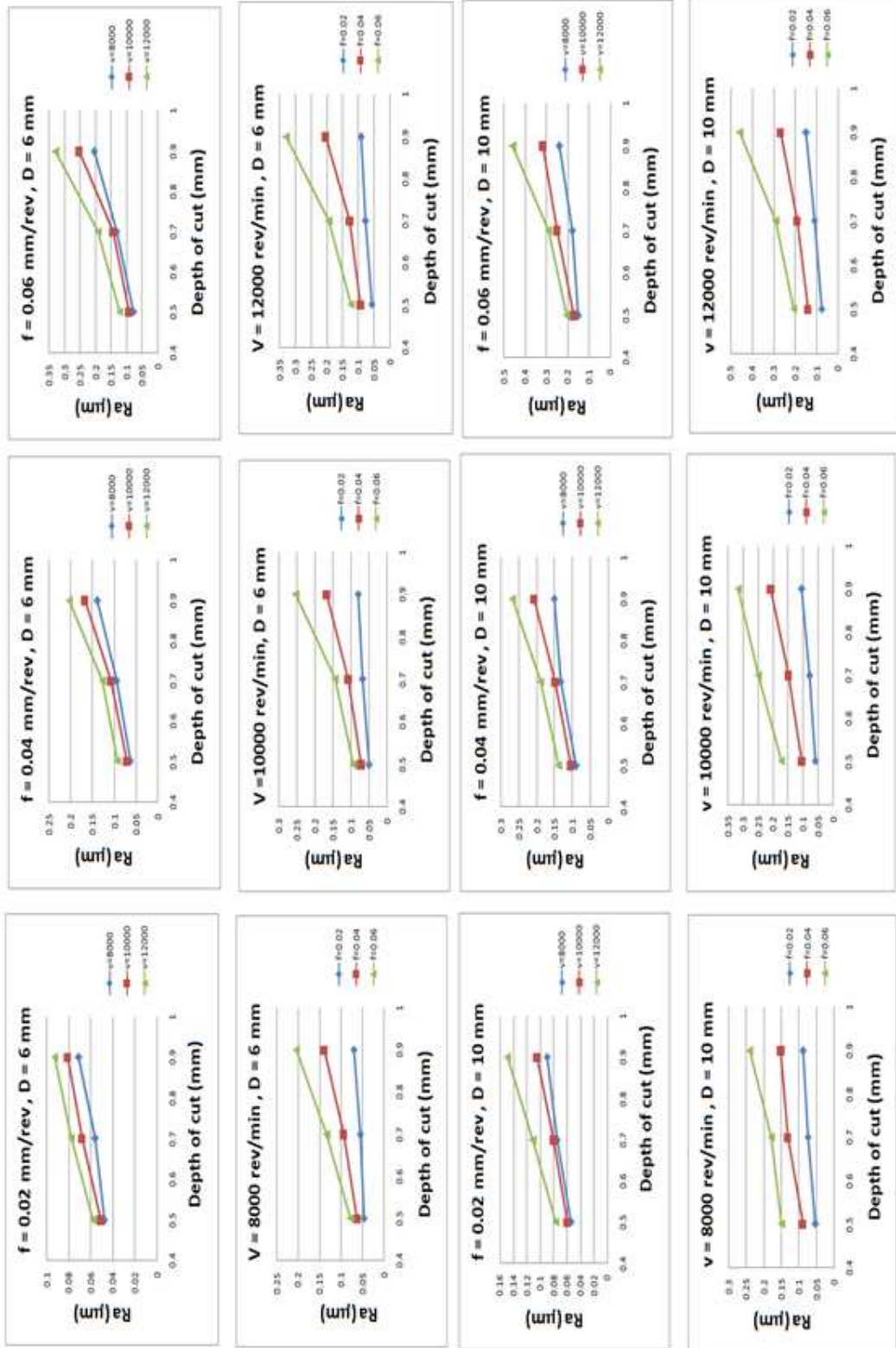
ภาคผนวก ข
กราฟแสดงเงื่อนไขการตัดต่างๆ

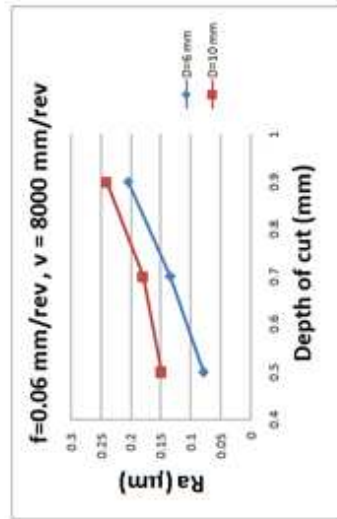
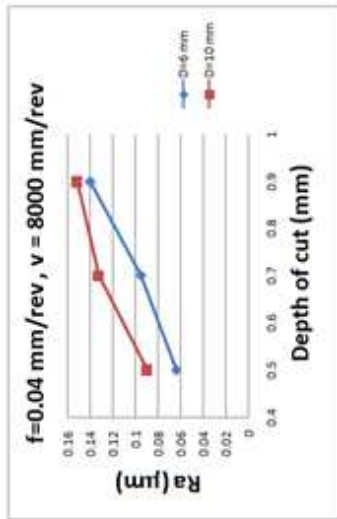
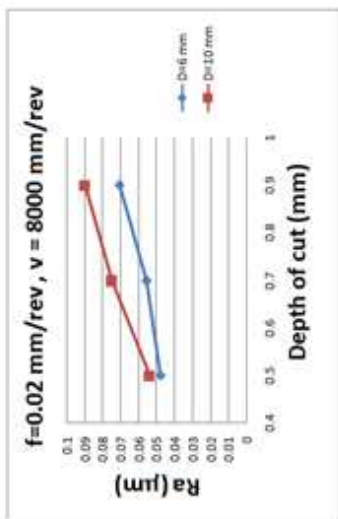
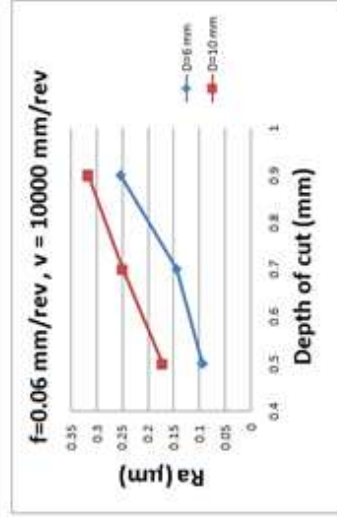
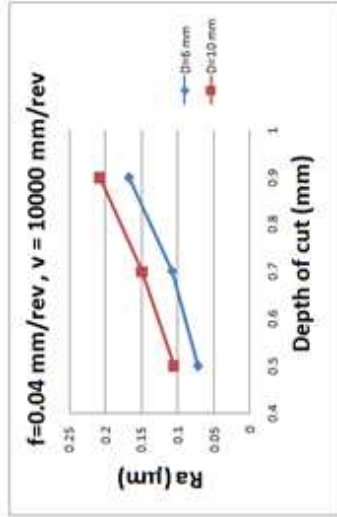
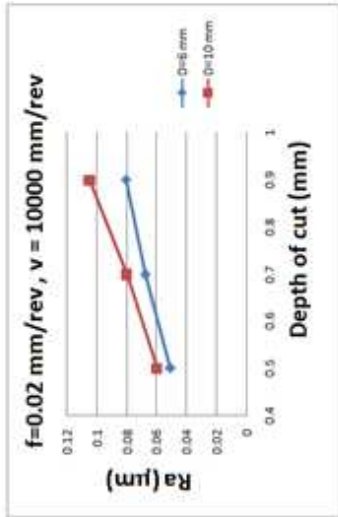
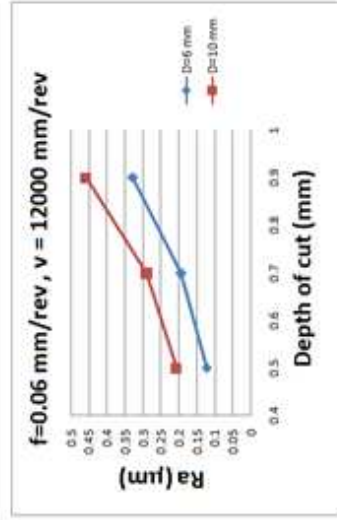
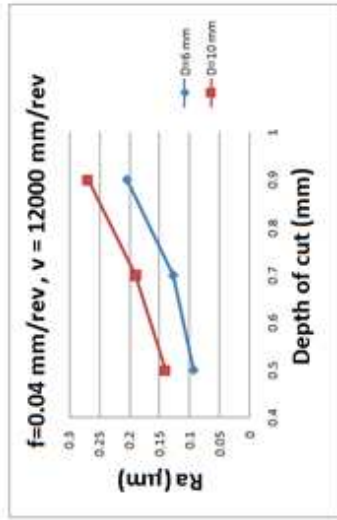
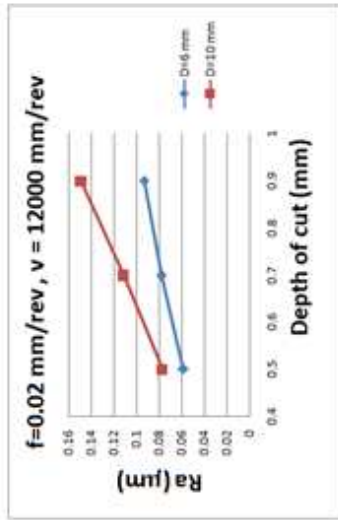


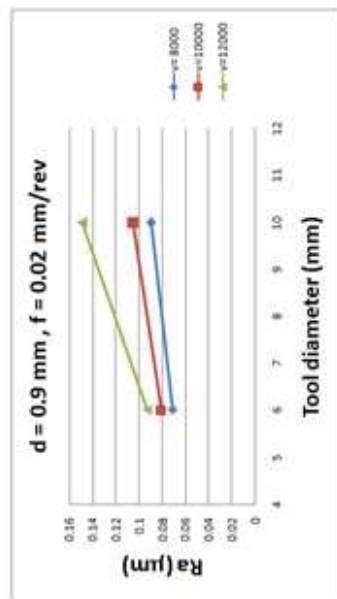
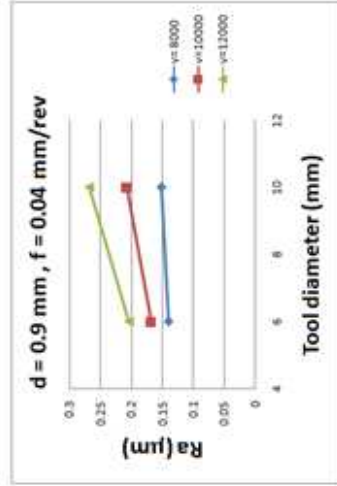
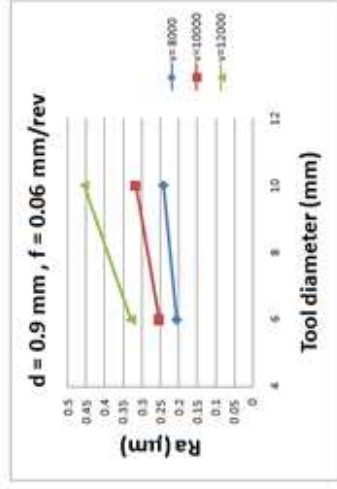
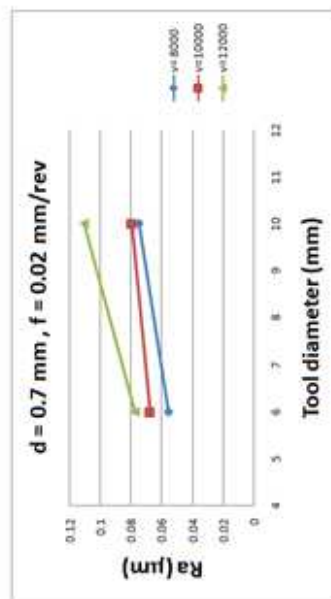
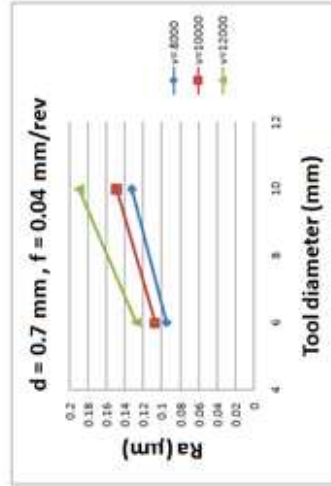
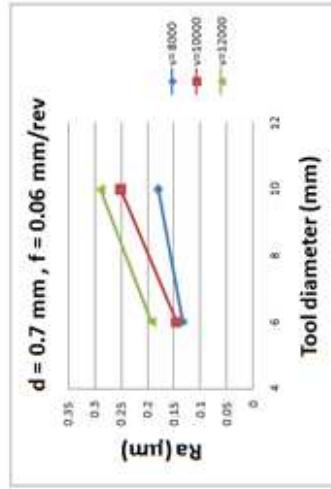
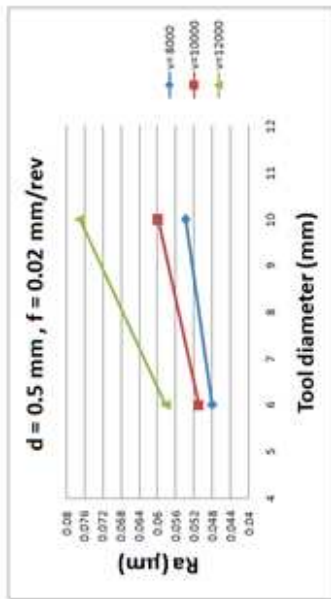
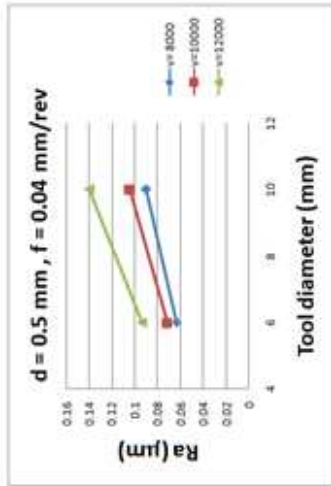
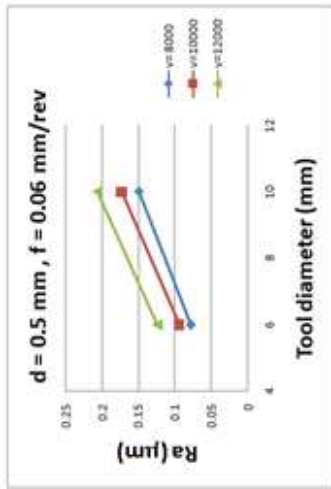


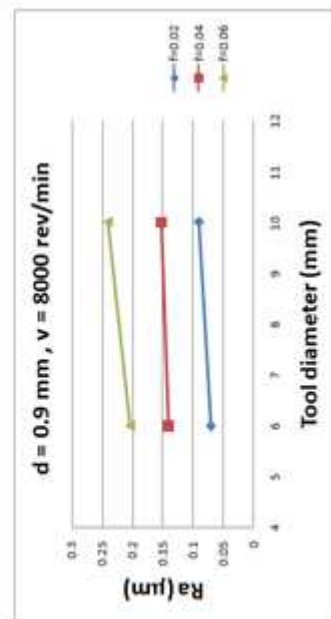
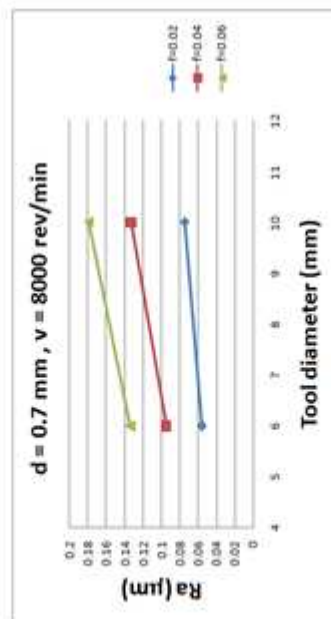
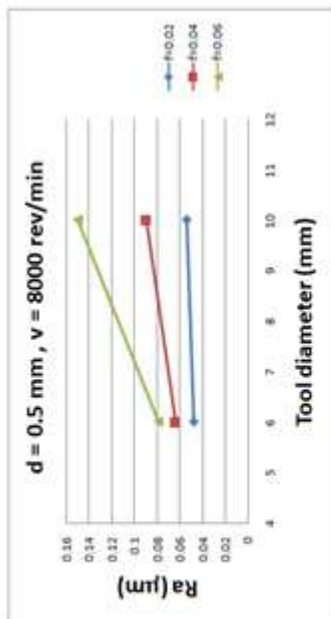
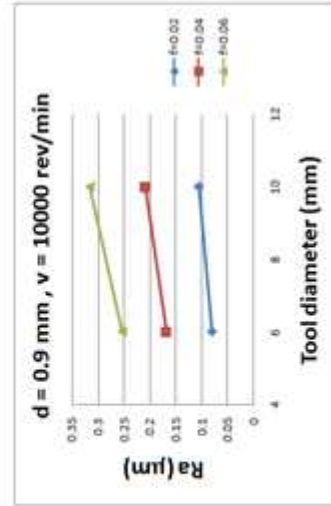
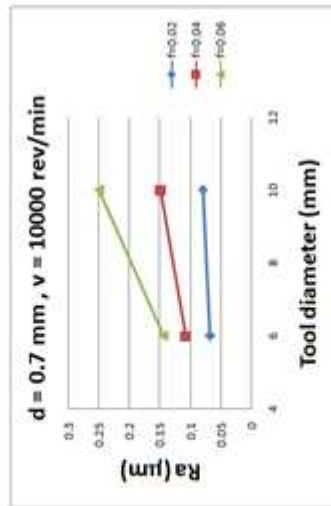
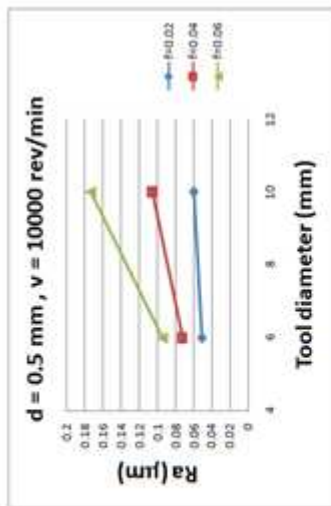
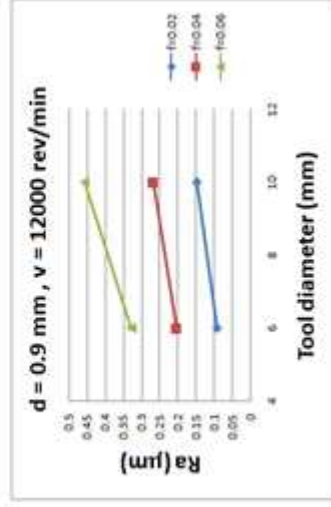
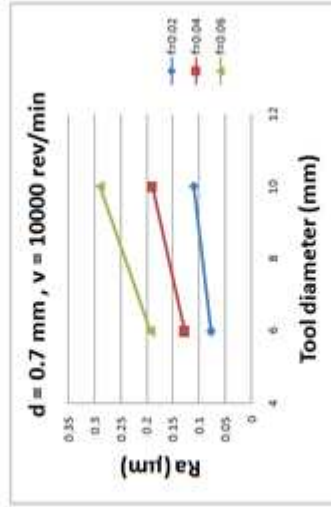
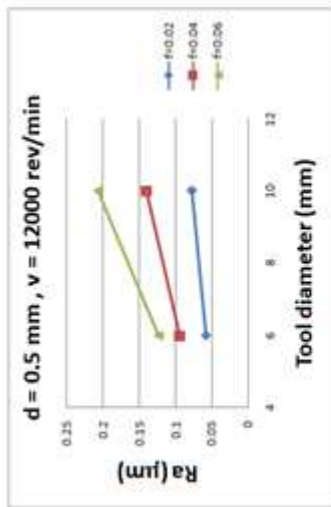


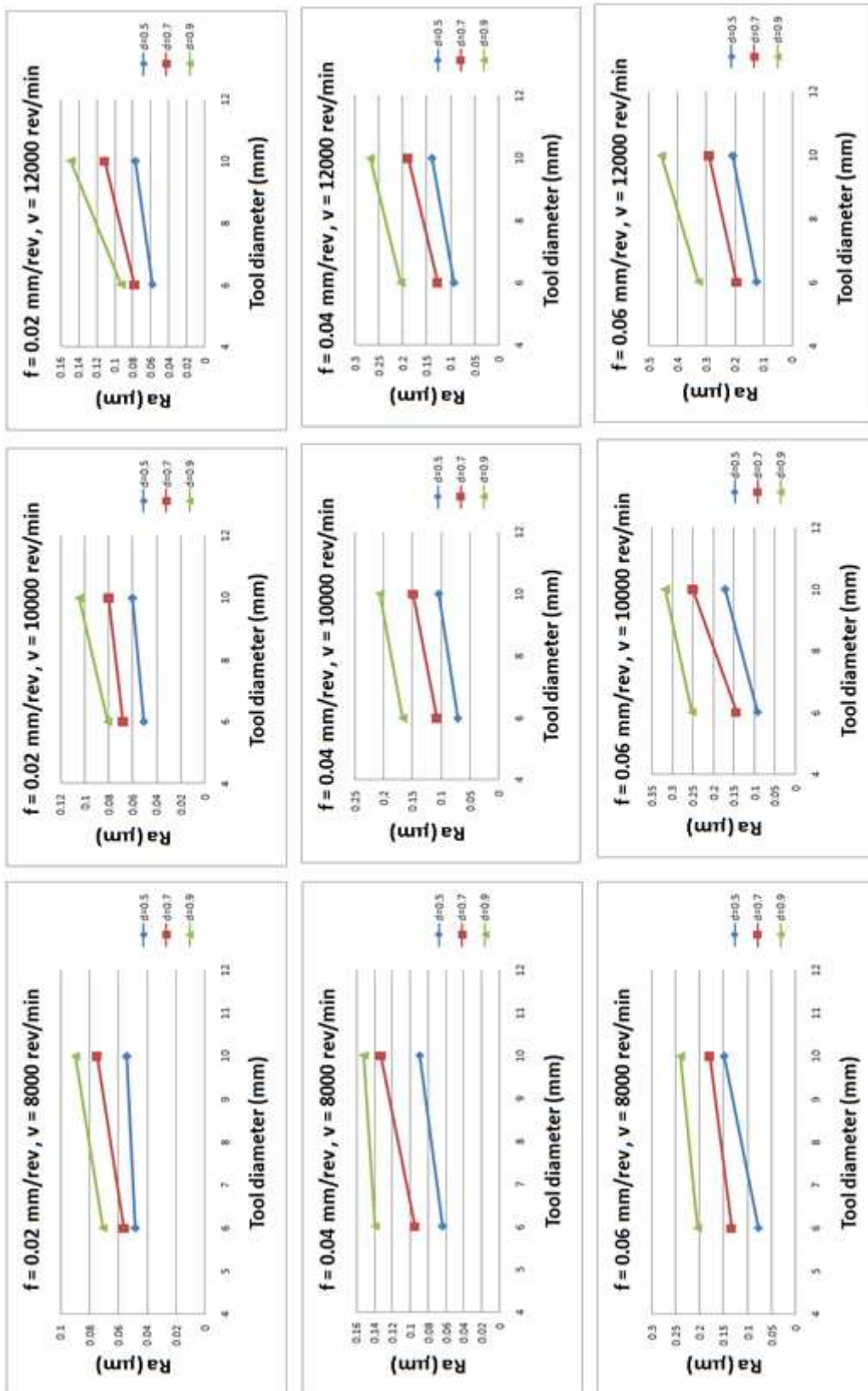


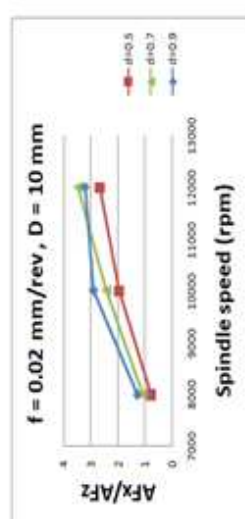
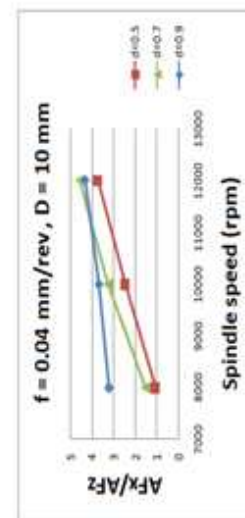
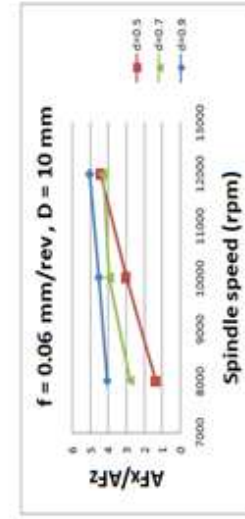
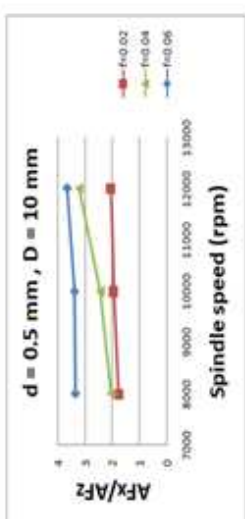
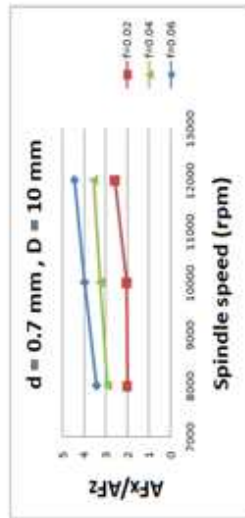
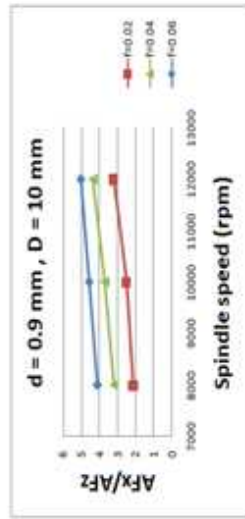
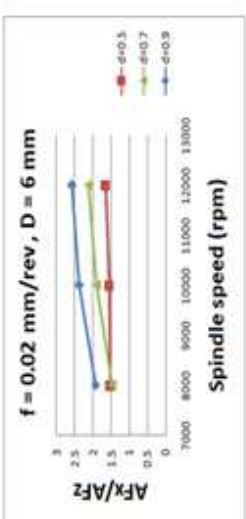
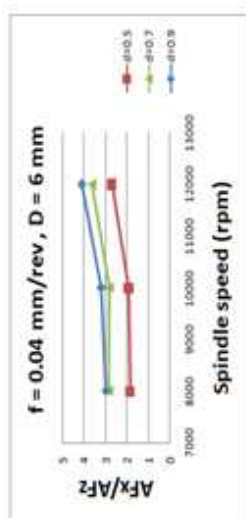
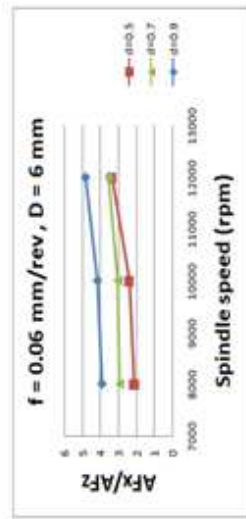
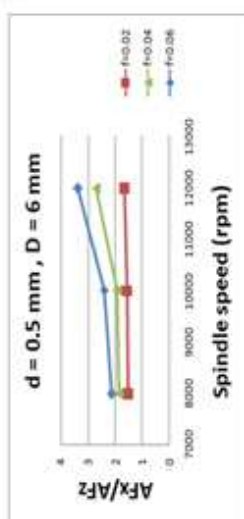
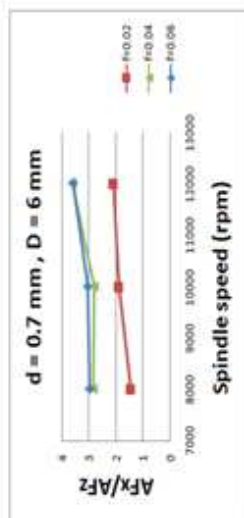
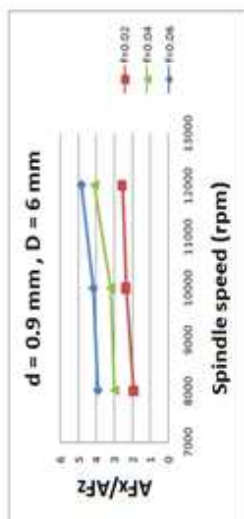


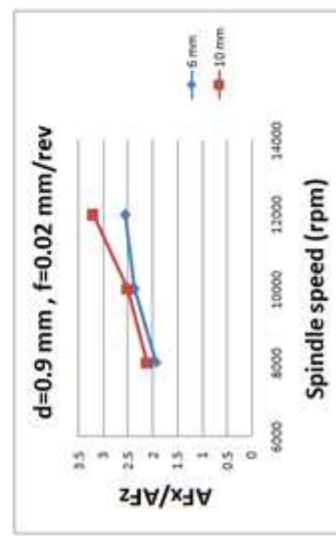
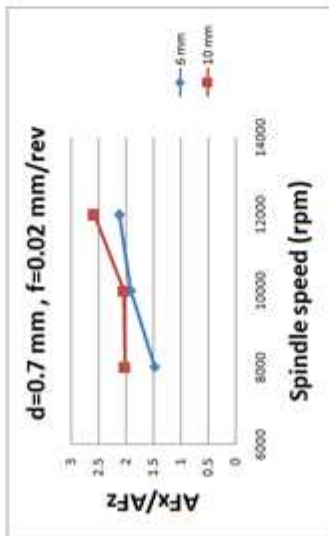
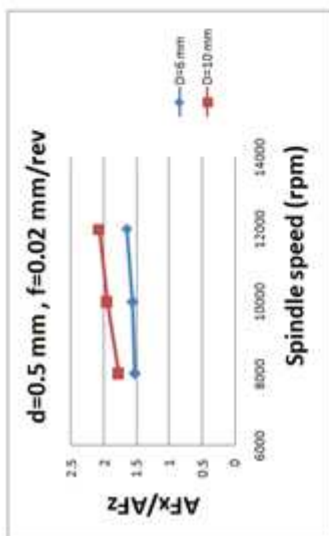
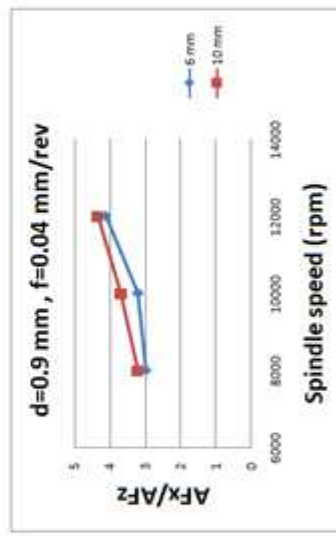
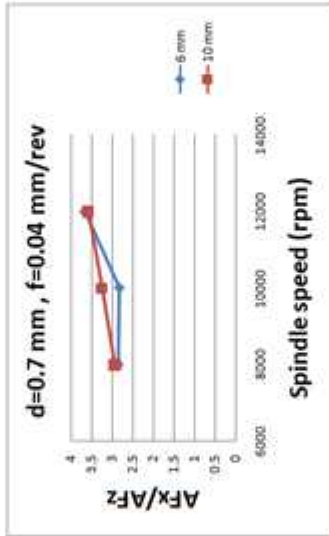
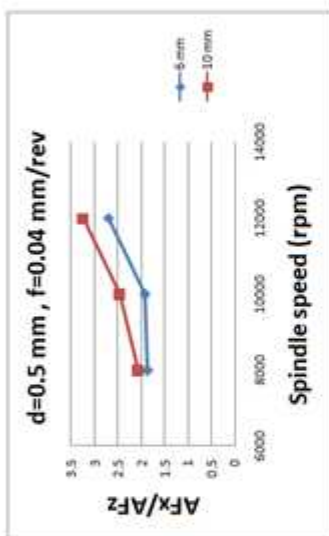
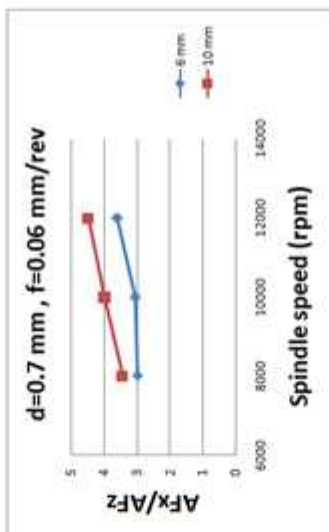
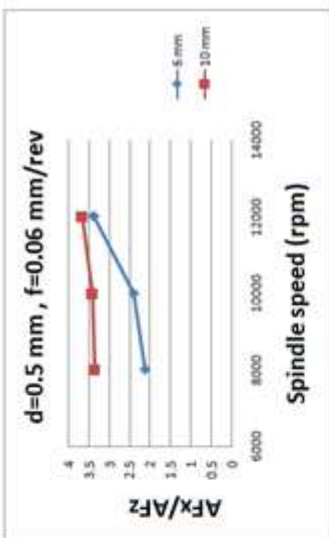


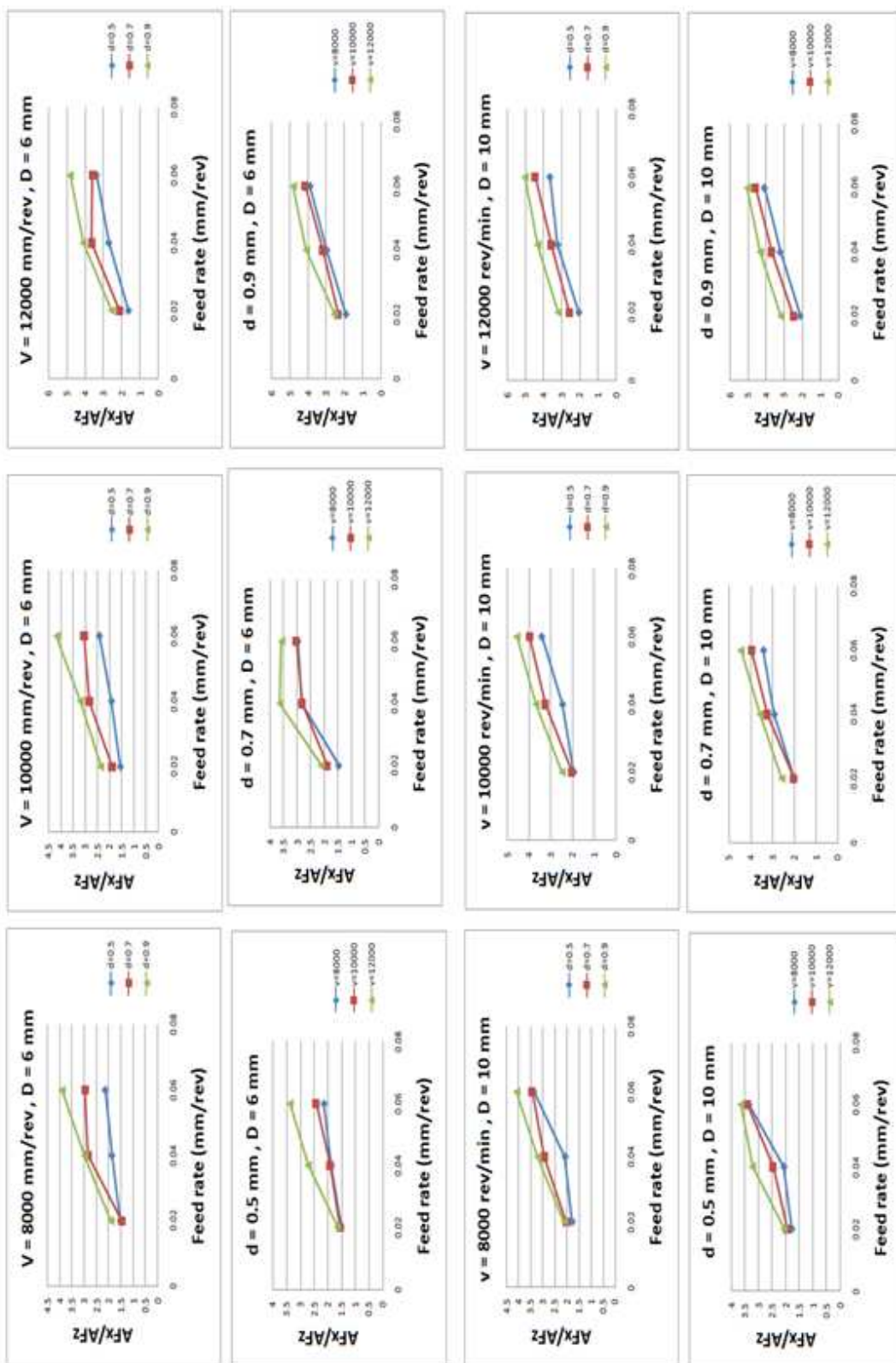


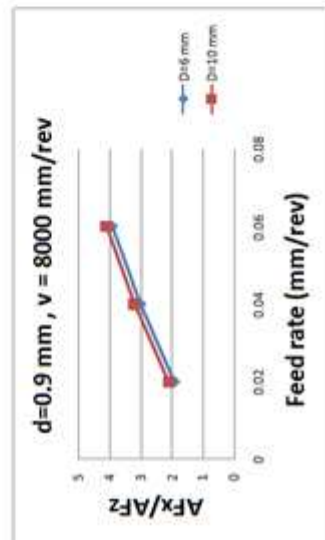
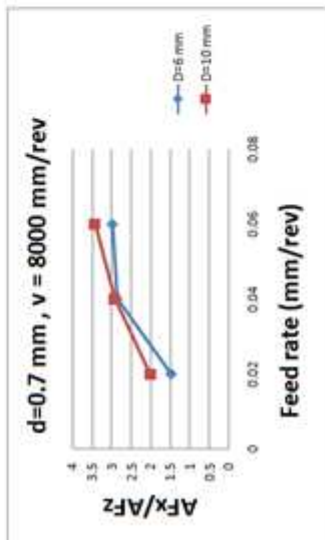
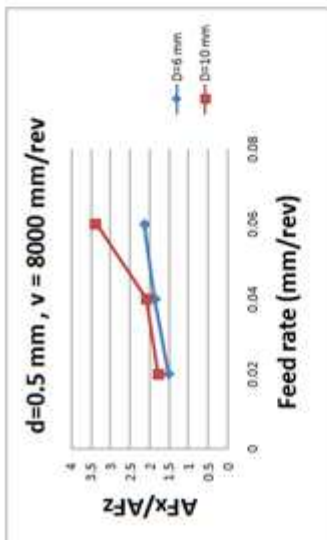
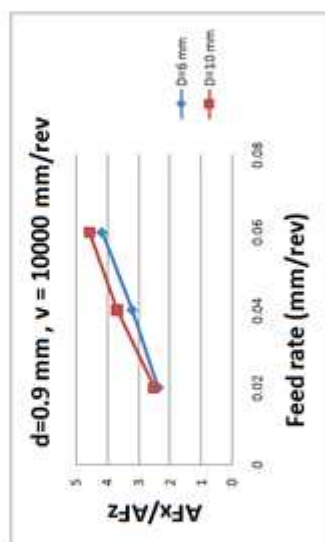
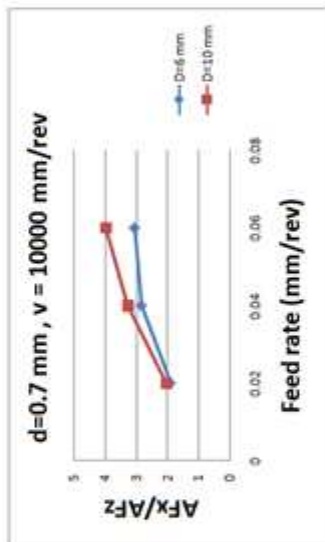
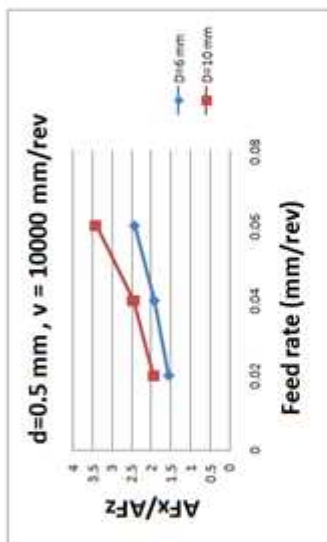
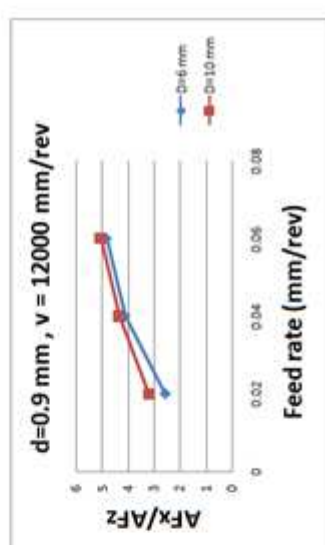
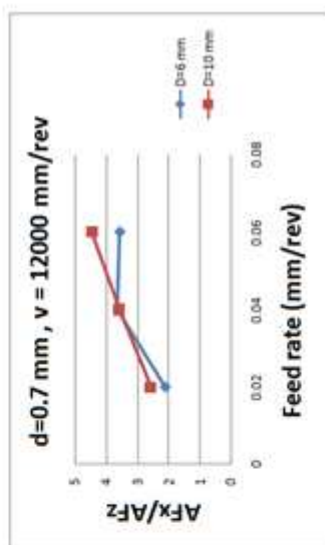
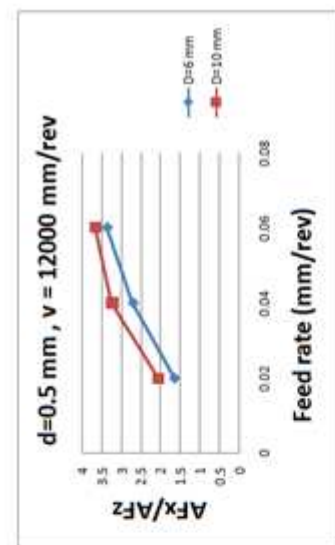


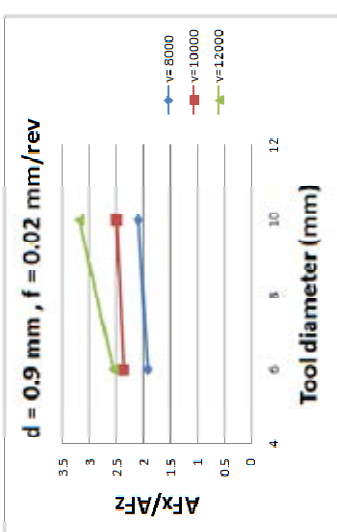
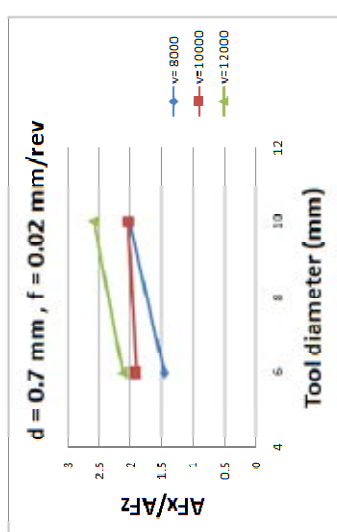
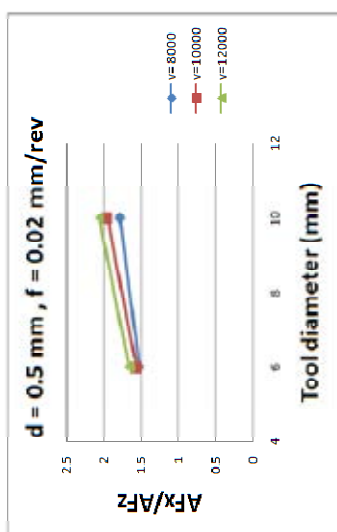
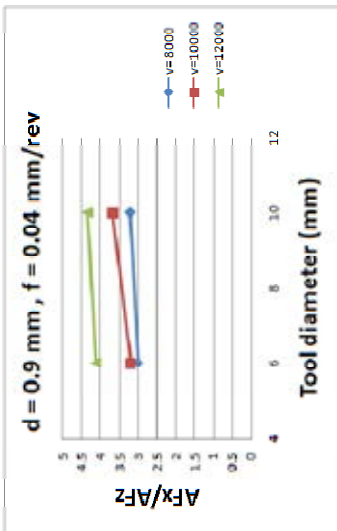
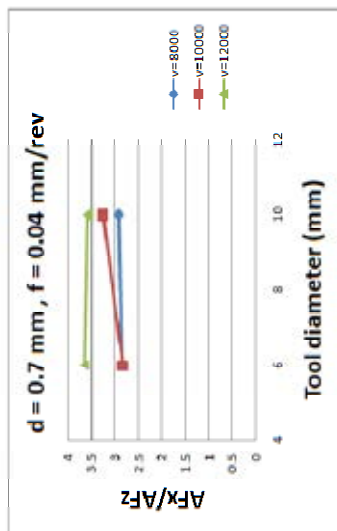
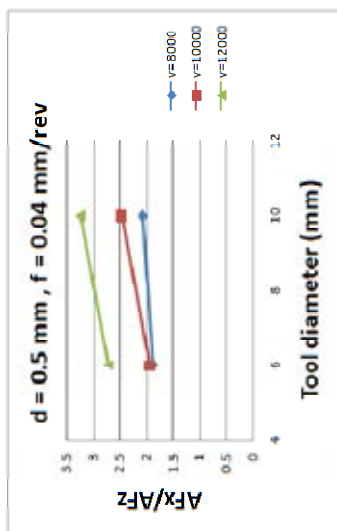
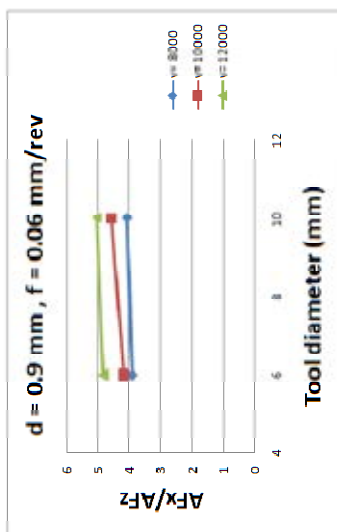
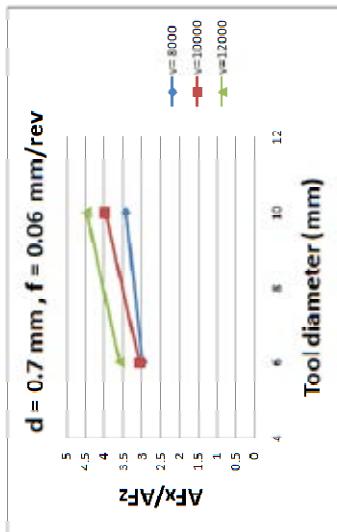
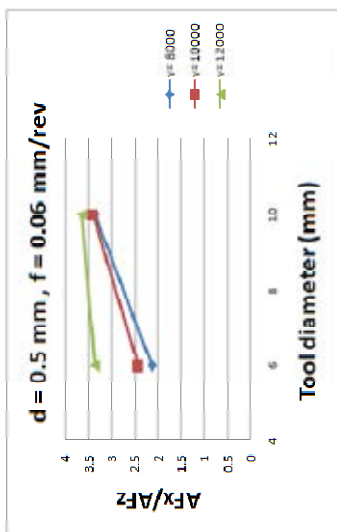


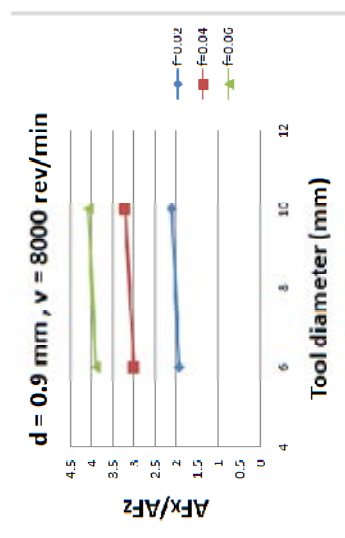
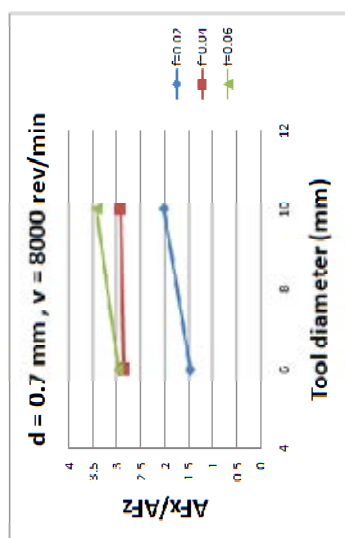
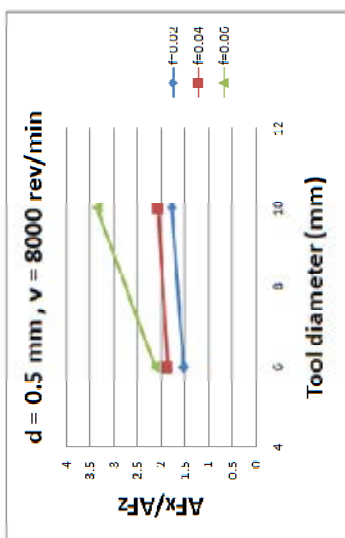
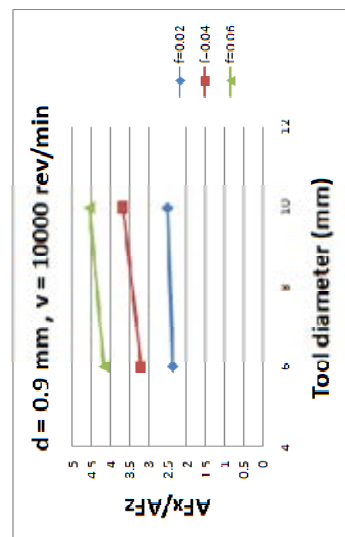
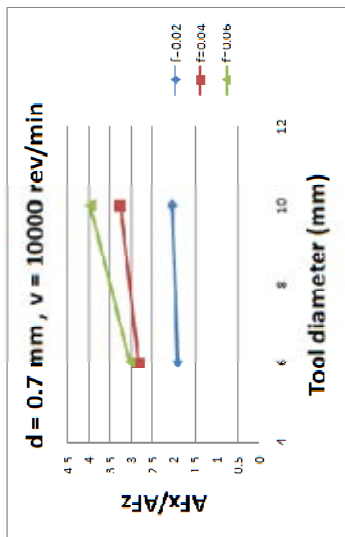
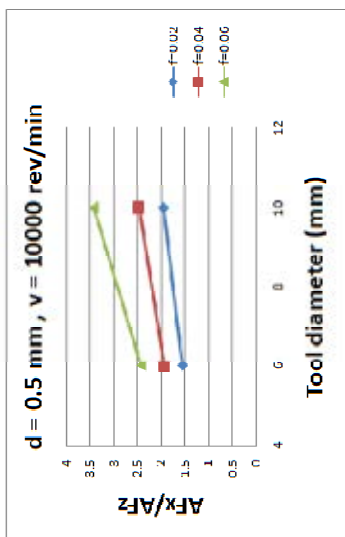
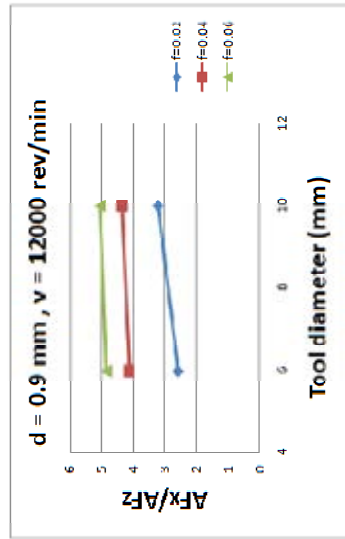
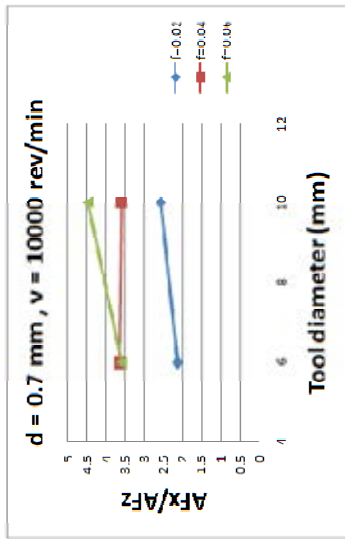
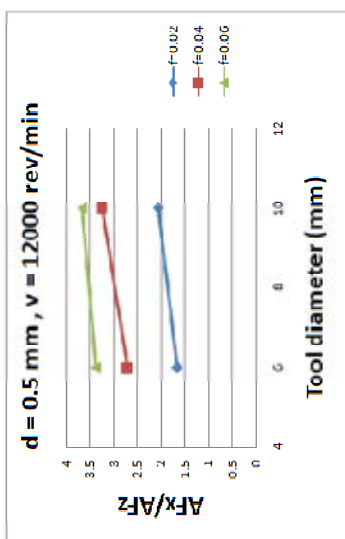


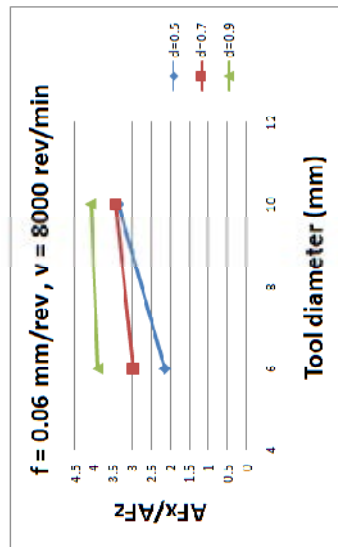
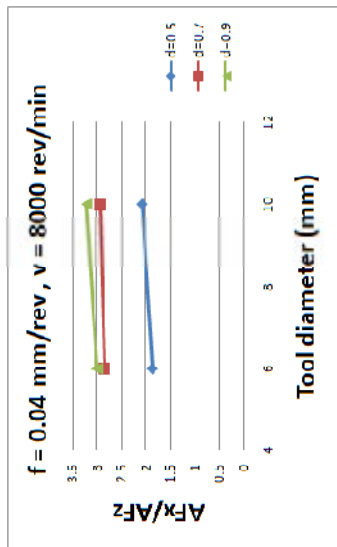
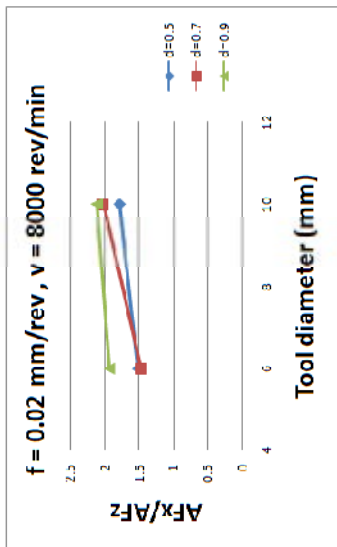
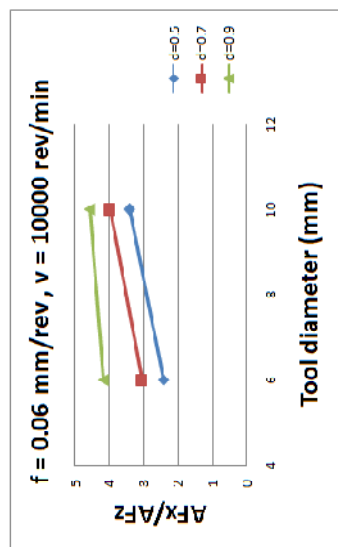
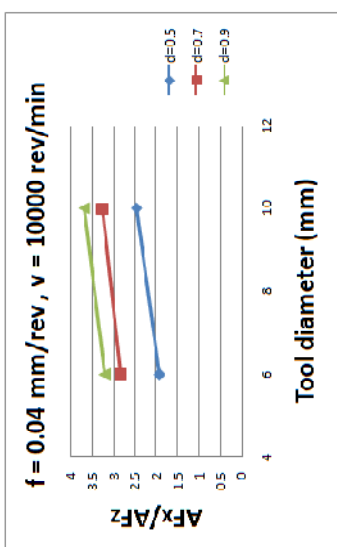
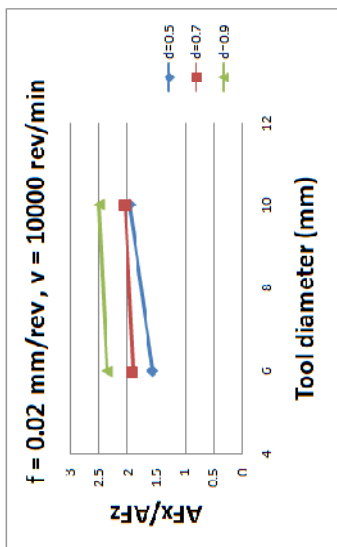
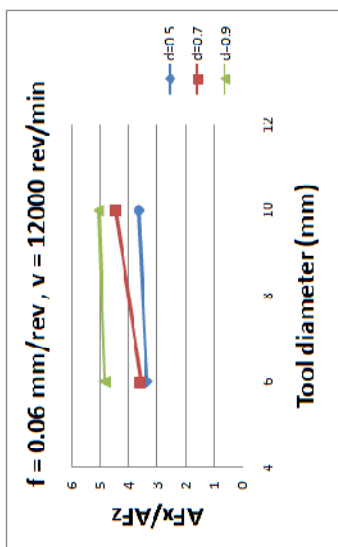
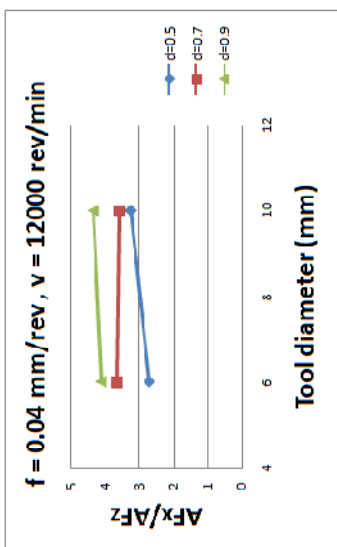
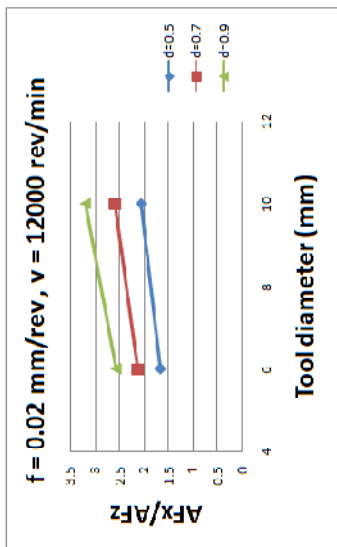


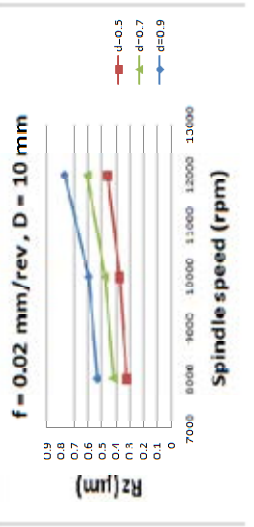
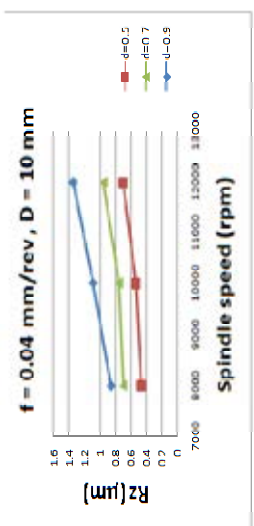
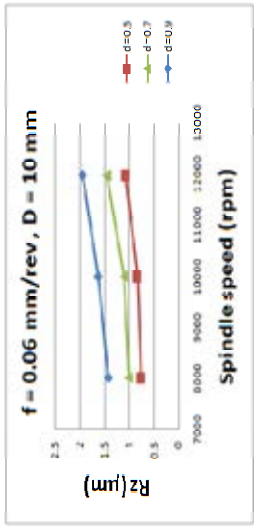
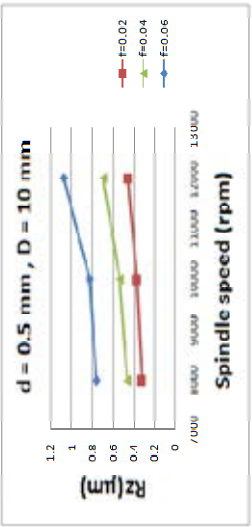
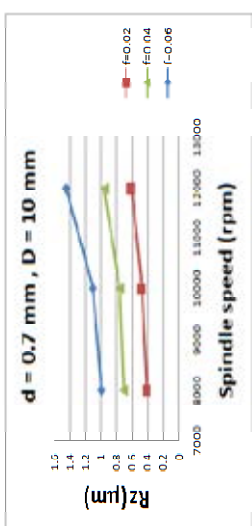
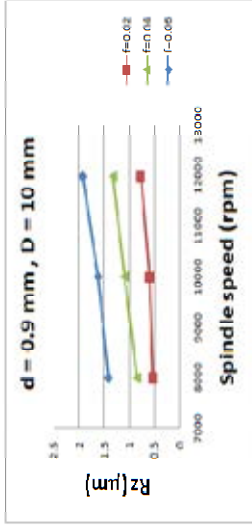
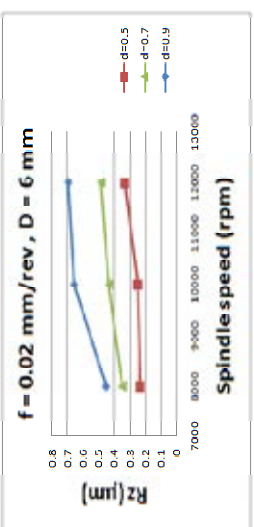
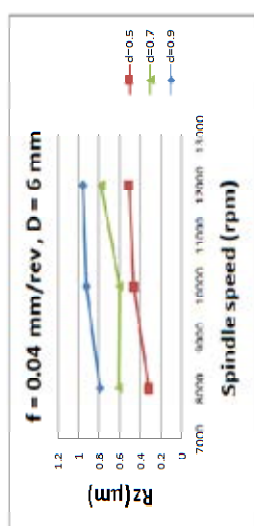
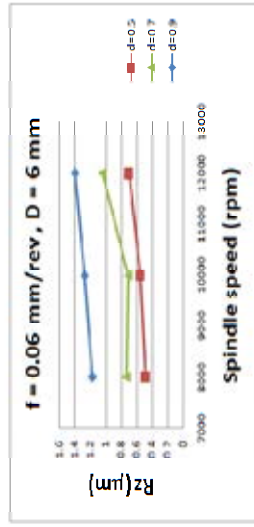
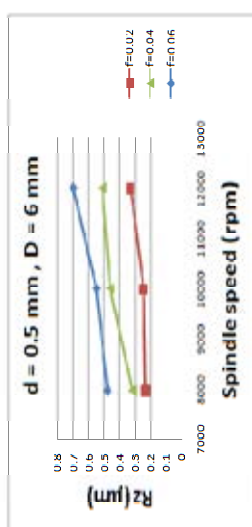
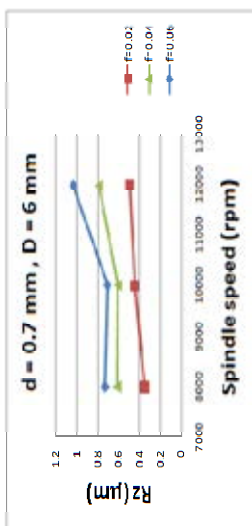
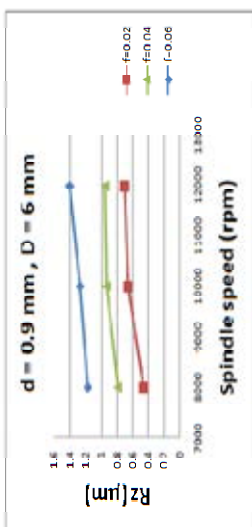


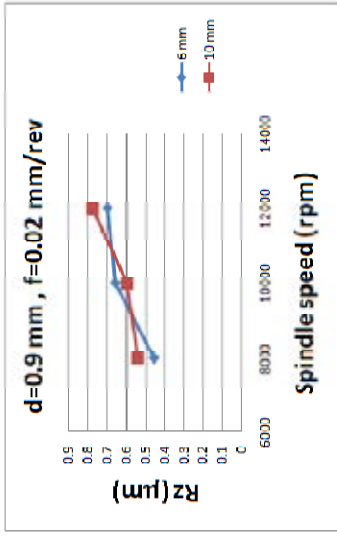
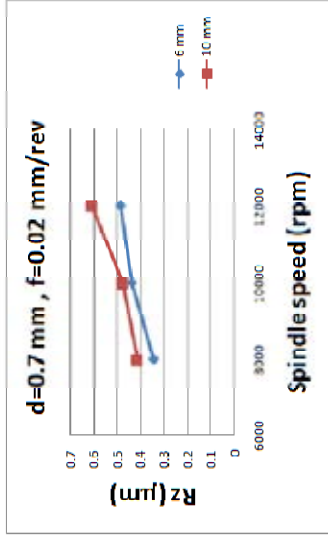
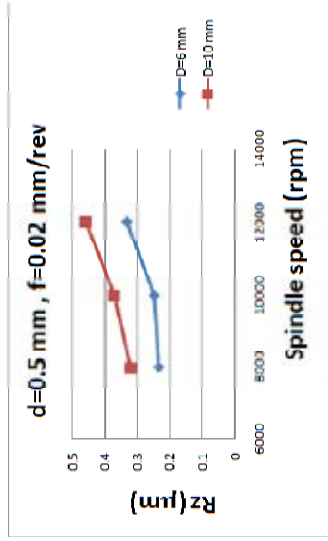
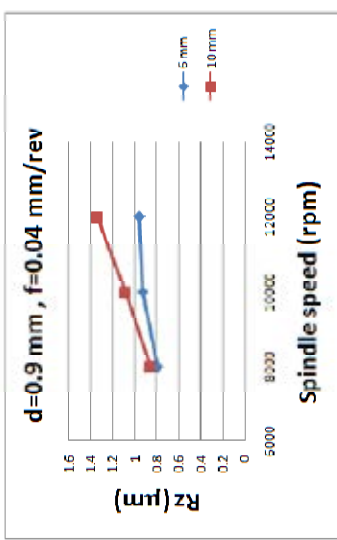
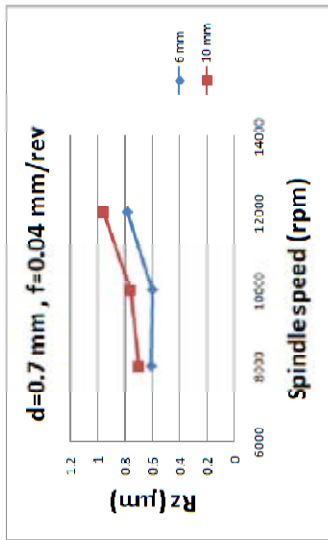
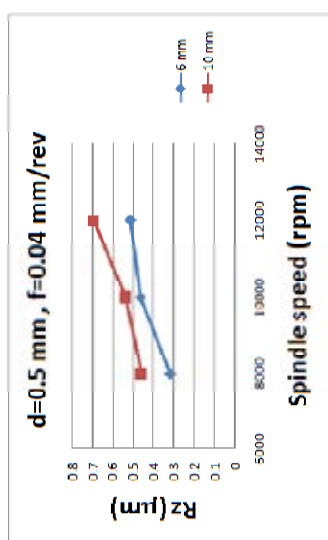
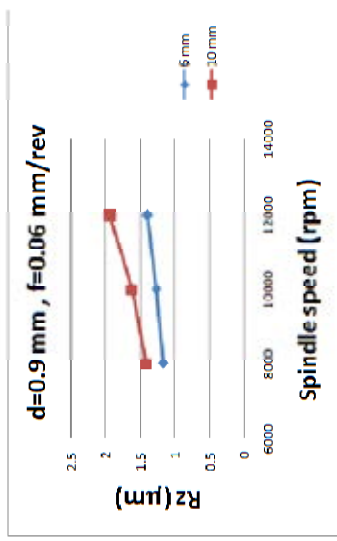
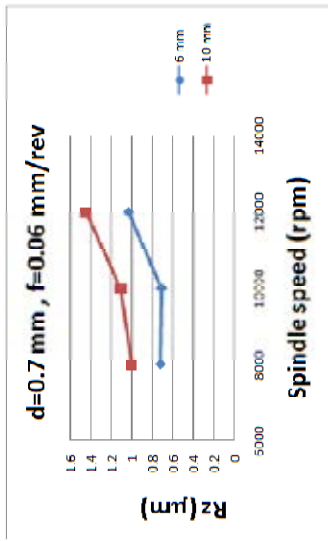
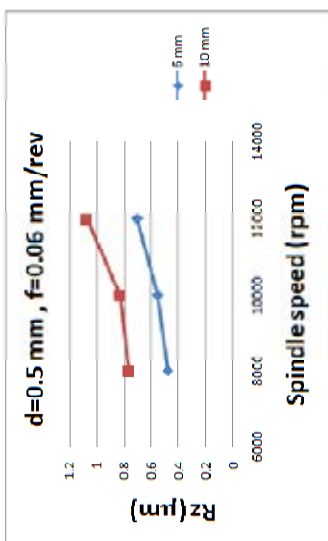


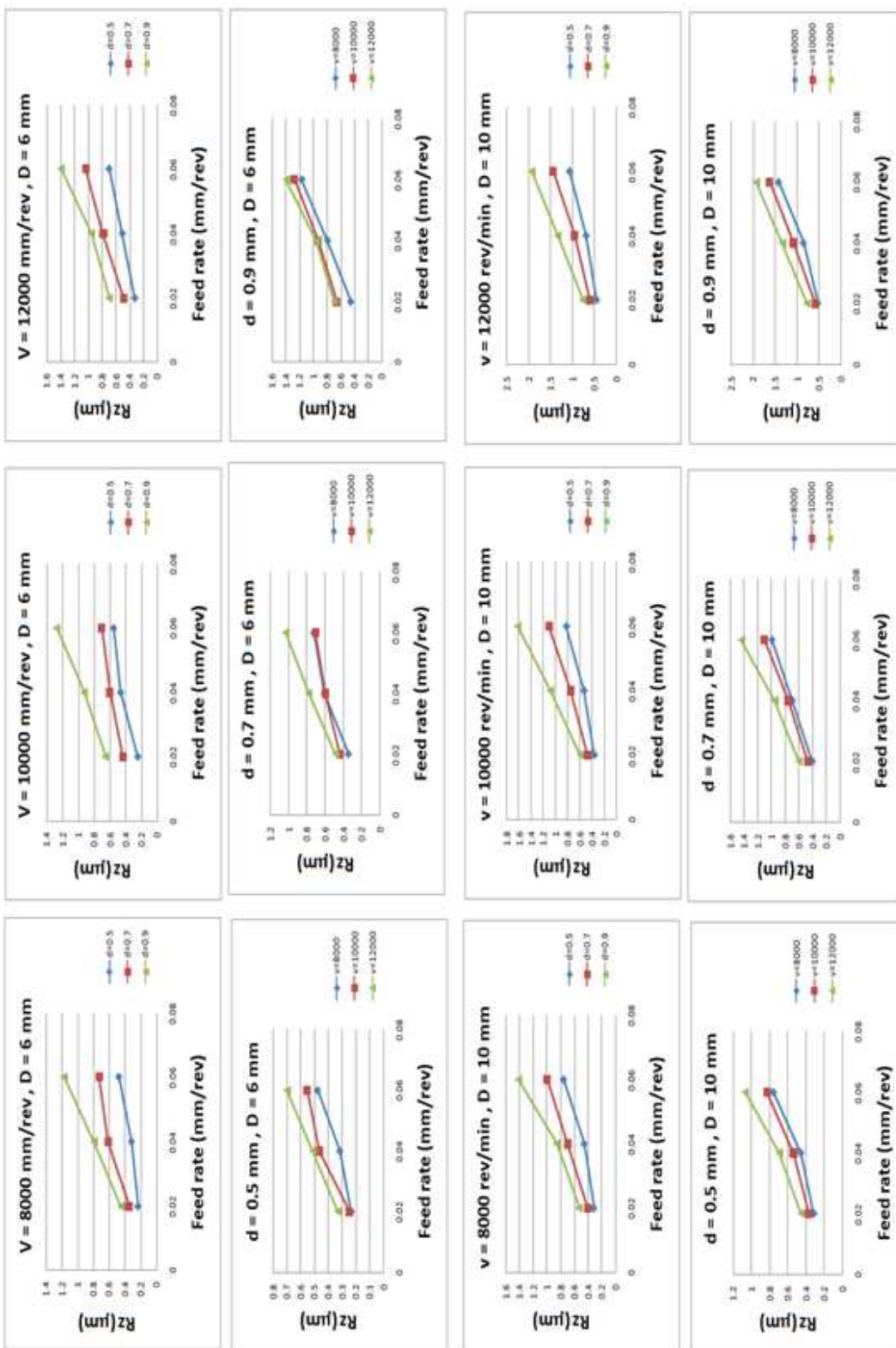


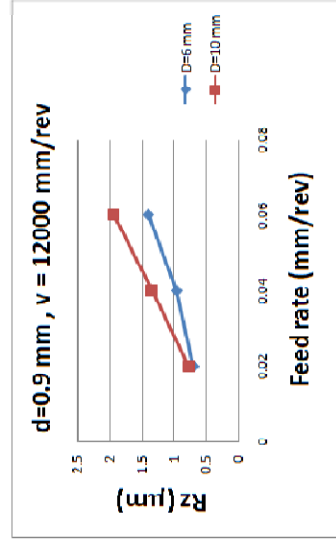
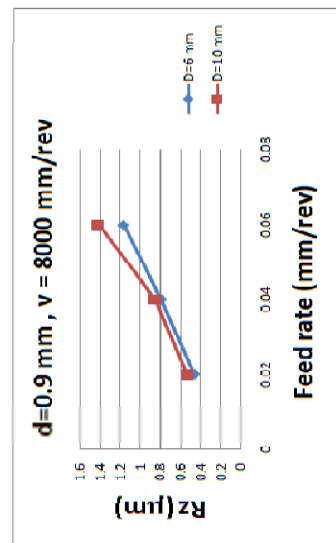
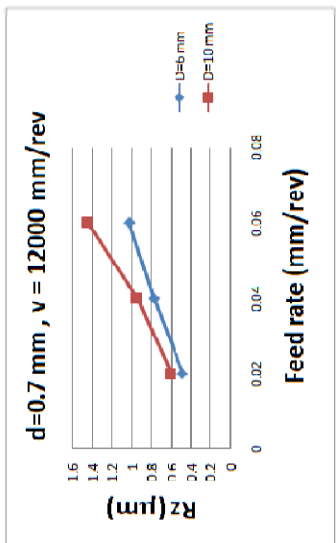
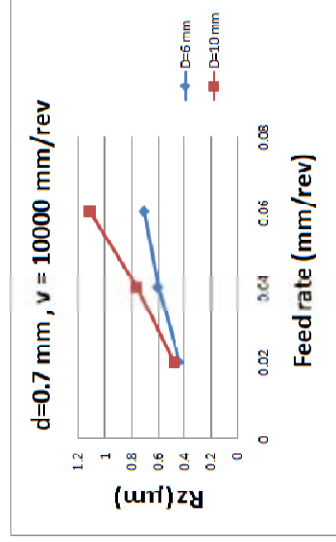
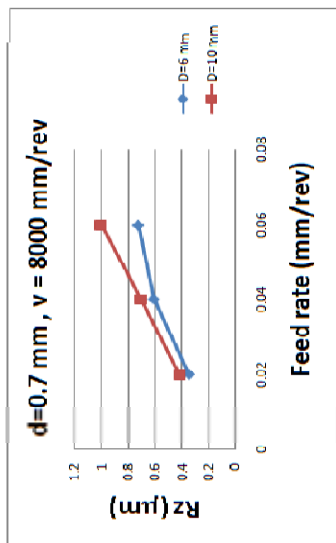
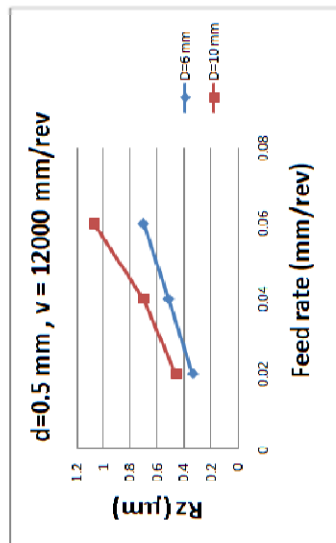
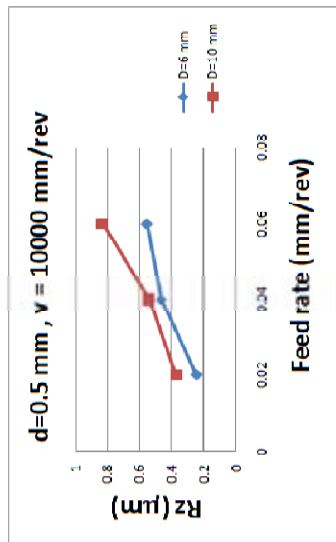
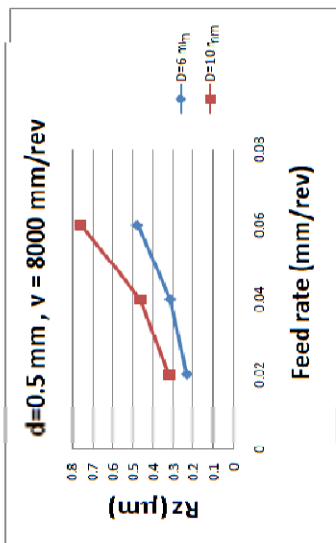


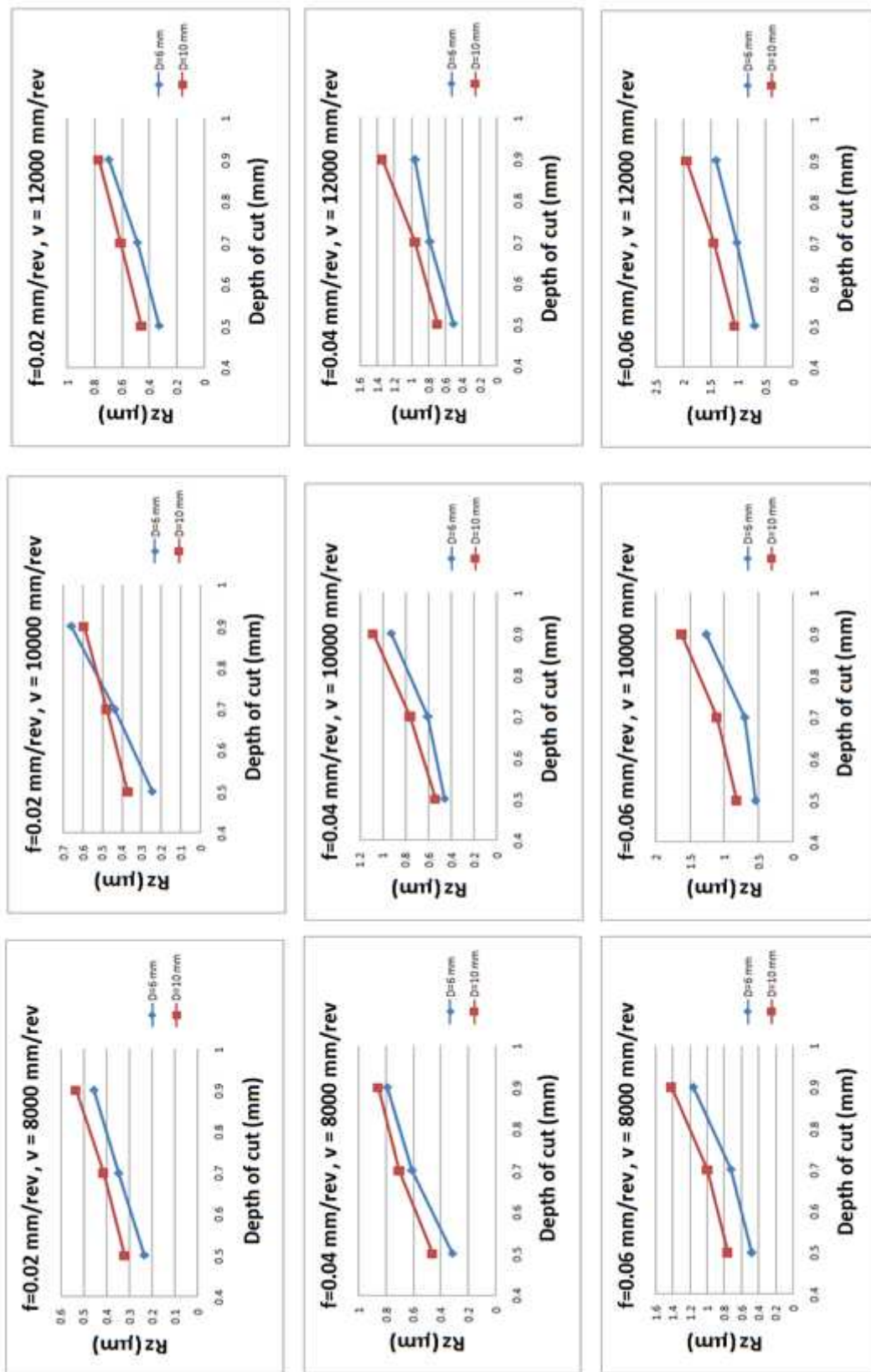


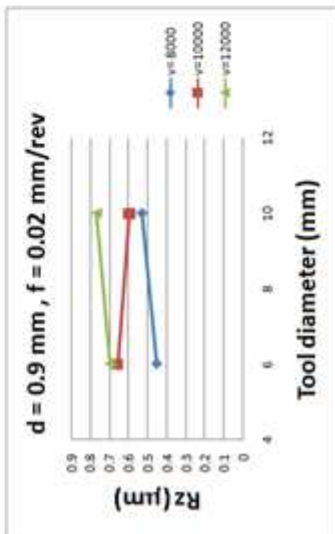
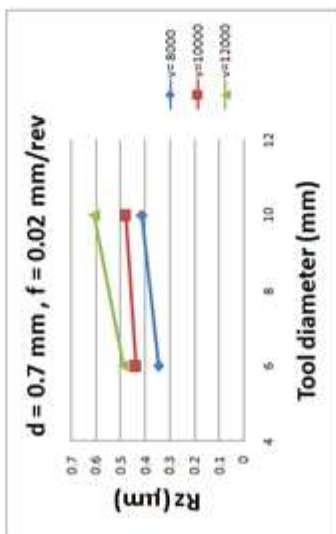
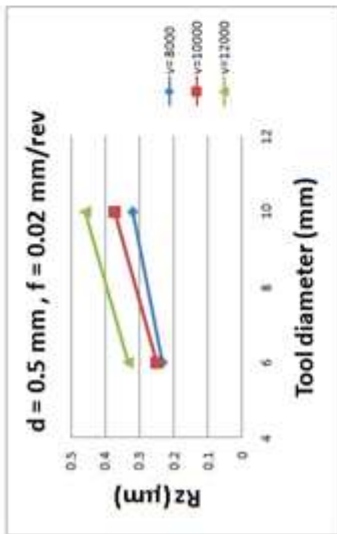
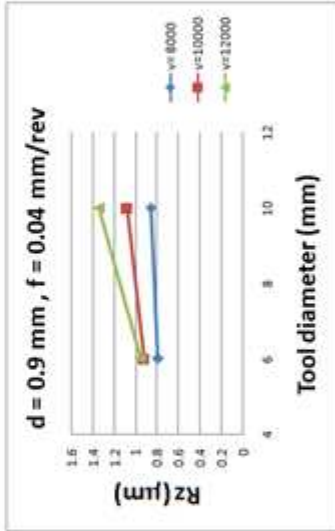
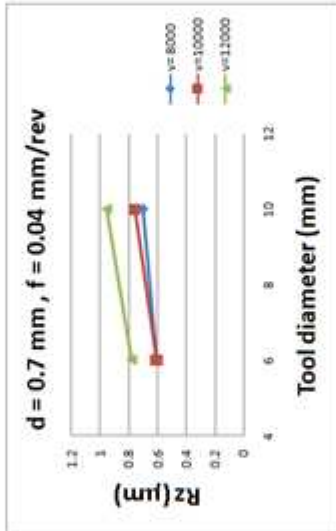
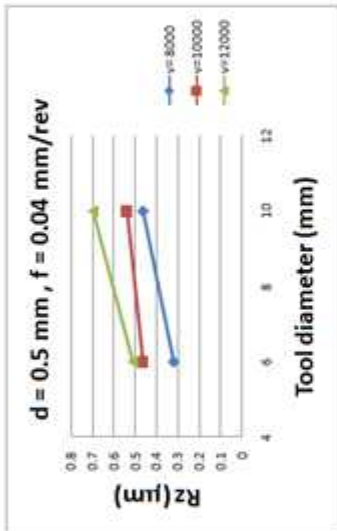
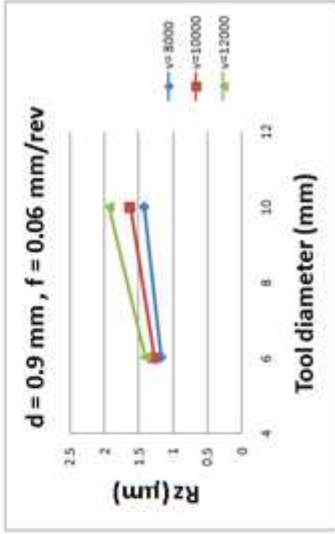
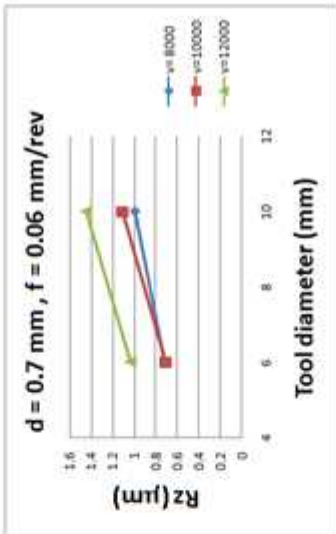
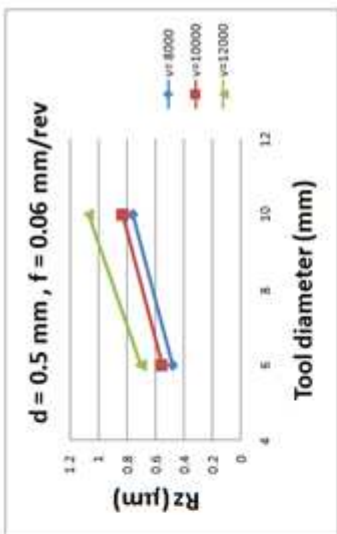


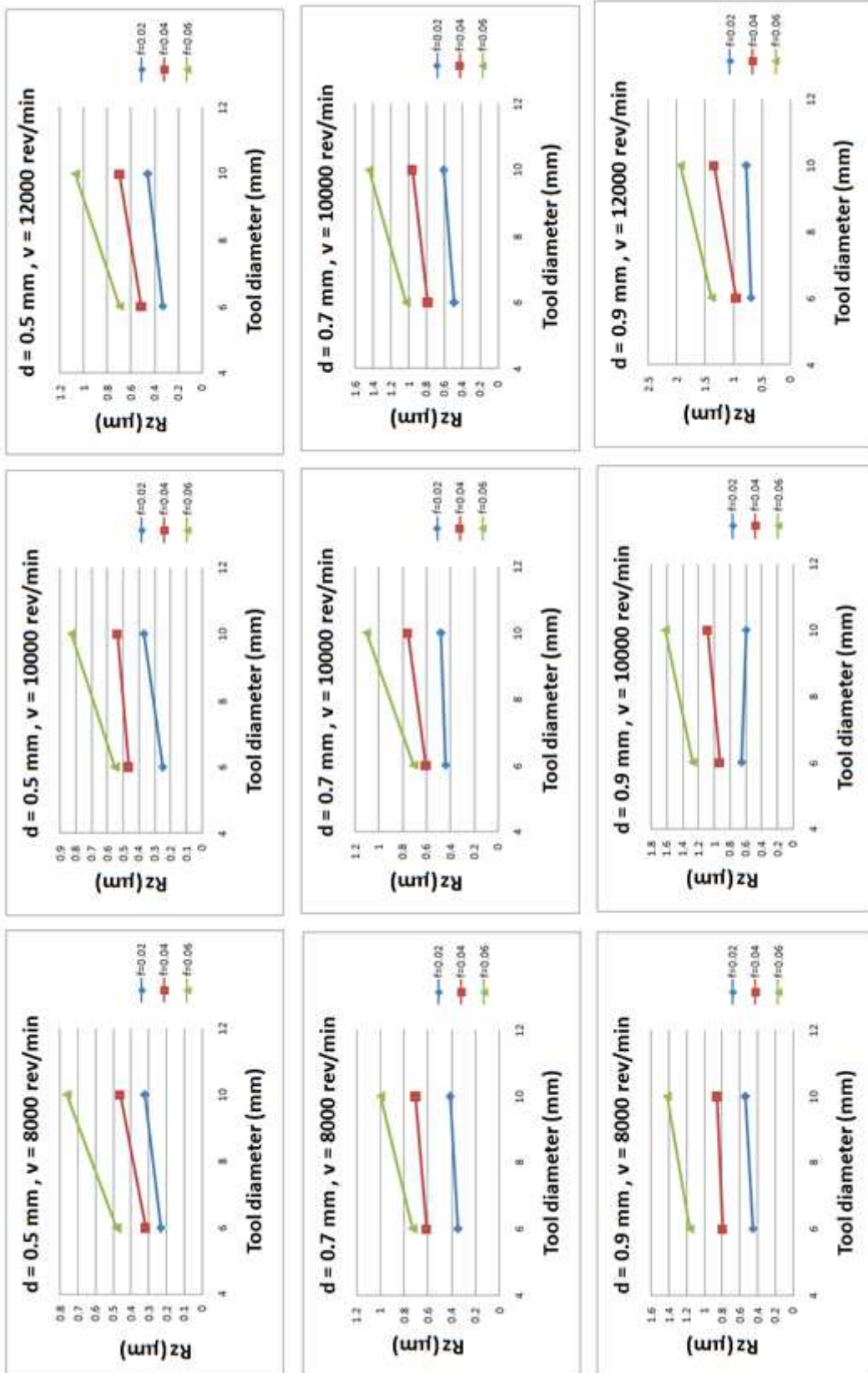


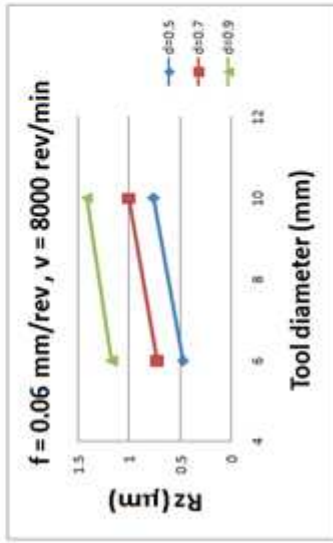
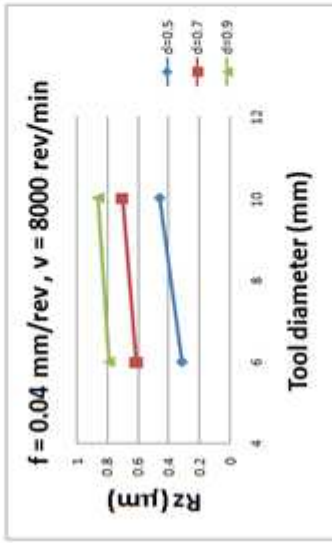
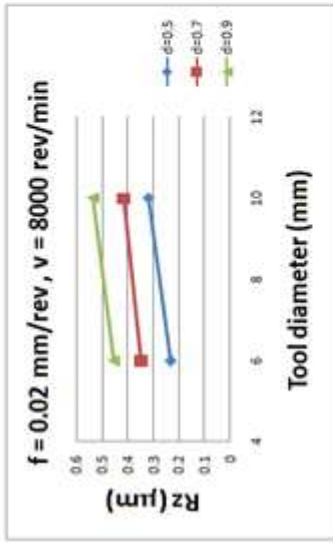
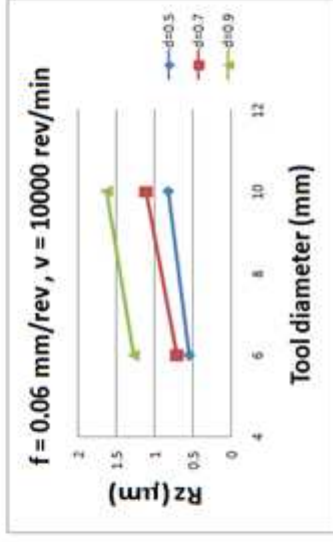
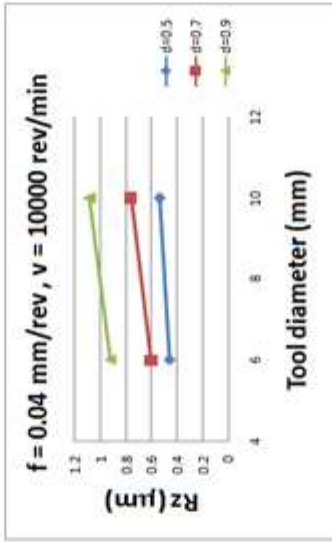
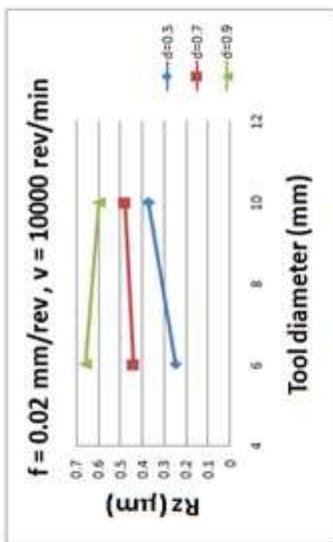
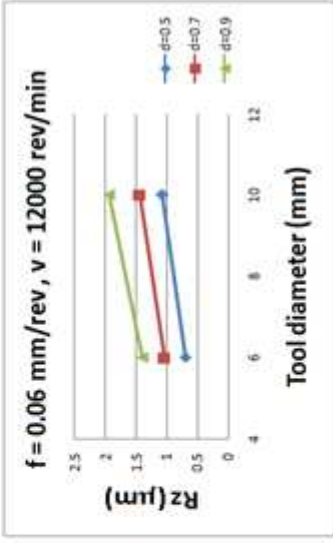
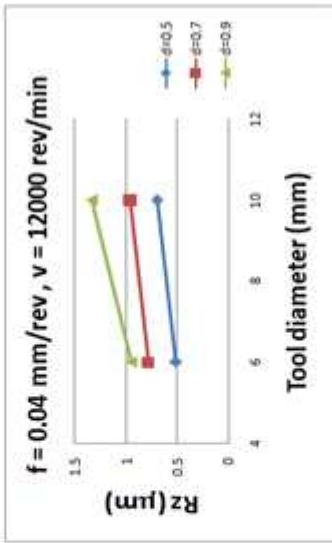
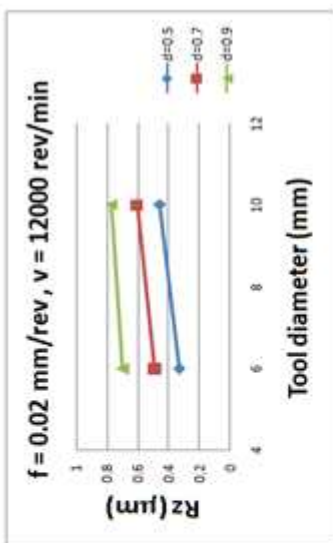










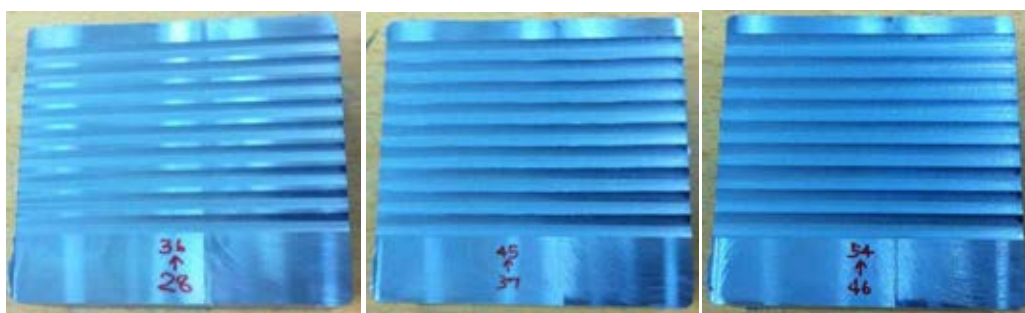


ภาคผนวก ค
ภาพชิ้นงานที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ

ภาพชิ้นงานที่เส้นใยการตัดที่ 1-27



ภาพชิ้นงานที่เส้นใยการตัดที่ 28-54



ภาคผนวก ง

โปรแกรมและตัวอย่างการแปลงสัญญาณแบบเวฟเล็ต

```

%%นำข้อมูลแรงตัดในแกน x,y,z เข้าสู่โปรแกรม
force = textread('f48.txt');
L_x1 = length(force);
fx = force(:,1); fy = force(:,2); fz = force(:,3);
[N,n]=size(force);
samp = N;
t=1/samp;
tt=(0:t*(N-1));
f=(0:N-1)/N*samp;
freq1 = f(1:N/2);

%%แปลงสัญญาณในรูป Discrete wavelet transform โดยใช้การแปลงแบบเมเยอร์
[cAx1,cDx1] = dwt(force(:,1),'dmey');
[cAy1,cDy1] = dwt(force(:,2),'dmey');
[cAz1,cDz1] = dwt(force(:,3),'dmey');

[cAx2,cDx2] = dwt(cAx1,'dmey');
[cAx3,cDx3] = dwt(cAx2,'dmey');
[cAx4,cDx4] = dwt(cAx3,'dmey');
[cAx5,cDx5] = dwt(cAx4,'dmey');

[cAy2,cDy2] = dwt(cAy1,'dmey');
[cAy3,cDy3] = dwt(cAy2,'dmey');
[cAy4,cDy4] = dwt(cAy3,'dmey');
[cAy5,cDy5] = dwt(cAy4,'dmey');

[cAz2,cDz2] = dwt(cAz1,'dmey');
[cAz3,cDz3] = dwt(cAz2,'dmey');
[cAz4,cDz4] = dwt(cAz3,'dmey');
[cAz5,cDz5] = dwt(cAz4,'dmey');

%%สร้างสัมประสิทธิ์ในแบบ Detail coefficients
Dx1 = upcoef('d',cDx1,'dmey',1,L_x1);
Dx2 = upcoef('d',cDx2,'dmey',2,L_x1);

```

```

Dx3 = upcoef('d',cDx3,'dmey',3,l_x1);
Dx4 = upcoef('d',cDx4,'dmey',4,l_x1);
Dx5 = upcoef('d',cDx5,'dmey',5,l_x1);

Dy1 = upcoef('d',cDy1,'dmey',1,l_x1);
Dy2 = upcoef('d',cDy2,'dmey',2,l_x1);
Dy3 = upcoef('d',cDy3,'dmey',3,l_x1);
Dy4 = upcoef('d',cDy4,'dmey',4,l_x1);
Dy5 = upcoef('d',cDy5,'dmey',5,l_x1);

Dz1 = upcoef('d',cDz1,'dmey',1,l_x1);
Dz2 = upcoef('d',cDz2,'dmey',2,l_x1);
Dz3 = upcoef('d',cDz3,'dmey',3,l_x1);
Dz4 = upcoef('d',cDz4,'dmey',4,l_x1);
Dz5 = upcoef('d',cDz5,'dmey',5,l_x1);

%%สร้างกราฟในโดเมนเวลา
time = 0.001:0.001:l_x1/1000;
t = 1/samp;
time = (0:t*(N-1));

figure(1);
subplot(6,1,1);
plot(time,force(:,1));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Original Signal');ylim([-100 100]);
subplot(6,1,2)
plot(time,Dx1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-100 100]);
subplot(6,1,3)
plot(time,Dx2)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-100 100]);
subplot(6,1,4)
plot(time,Dx3)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-100 100]);

```

```

subplot(6,1,5)
plot(time,Dx4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D4');ylim([-100 100]);
subplot(6,1,6)
plot(time,Dx5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D5');ylim([-100 100]);

figure(2);
subplot(6,1,1);
plot(time,force(:,2));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Original Signal');ylim([-100 100]);
subplot(6,1,2)
plot(time,Dy1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-100 100]);
subplot(6,1,3)
plot(time,Dy2)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-100 100]);
subplot(6,1,4)
plot(time,Dy3)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-100 100]);
subplot(6,1,5)
plot(time,Dy4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D4');ylim([-100 100]);
subplot(6,1,6)
plot(time,Dy5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D5');ylim([-100 100]);

figure(3);
subplot(6,1,1);
plot(time,force(:,3));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Original Signal'); ylim([-20 20]);
subplot(6,1,2)
plot(time,Dz1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-20 20]);

```

```

subplot(6,1,3)
plot(time,Dz2)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-20 20]);
subplot(6,1,4)
plot(time,Dz3)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-20 20]);
subplot(6,1,5)
plot(time,Dz4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D4'); ylim([-20 20]);
subplot(6,1,6)
plot(time,Dz5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D5'); ylim([-20 20]);

```

%%สร้างสัญญาณในรูปโดเมนความถี่

```

[N1,M1] = size(Dx1);
[N2,M2] = size(Dx2);
[N3,M3] = size(Dx3);
[N4,M4] = size(Dx4);
[N5,M5] = size(Dx5);

sample = N;
t = 1/sample;
tt = (0:t*(N-1));
f = (0:N-1)/N*sample;
freq = f(1:N/2);

fx0 = fft(force(:,1))/N*2;
fx1 = fft(Dx1)/N*2;
fx2 = fft(Dx2)/N*2;
fx3 = fft(Dx3)/N*2;
fx4 = fft(Dx4)/N*2;
fx5 = fft(Dx5)/N*2;

```

```
fx0abs = abs(fx0(1:N1/2));  
fx1abs = abs(fx1(1:N1/2));  
fx2abs = abs(fx2(1:N2/2));  
fx3abs = abs(fx3(1:N3/2));  
fx4abs = abs(fx4(1:N4/2));  
fx5abs = abs(fx5(1:N5/2));
```

```
fx0abs2 = fx0abs.^2;  
fx1abs2 = fx1abs.^2;  
fx2abs2 = fx2abs.^2;  
fx3abs2 = fx3abs.^2;  
fx4abs2 = fx4abs.^2;  
fx5abs2 = fx5abs.^2;
```

```
fy0 = fft(force(:,2))/N*2;  
fy1 = fft(Dy1)/N*2;  
fy2 = fft(Dy2)/N*2;  
fy3 = fft(Dy3)/N*2;  
fy4 = fft(Dy4)/N*2;  
fy5 = fft(Dy5)/N*2;
```

```
fy0abs = abs(fy0(1:N1/2));  
fy1abs = abs(fy1(1:N1/2));  
fy2abs = abs(fy2(1:N2/2));  
fy3abs = abs(fy3(1:N3/2));  
fy4abs = abs(fy4(1:N4/2));  
fy5abs = abs(fy5(1:N5/2));
```

```
fy0abs2 = fy0abs.^2;  
fy1abs2 = fy1abs.^2;  
fy2abs2 = fy2abs.^2;  
fy3abs2 = fy3abs.^2;  
fy4abs2 = fy4abs.^2;  
fy5abs2 = fy5abs.^2;
```

```
fz0 = fft(force(:,3))/N*2;
```

```
fz1 = fft(Dz1)/N*2;
```

```
fz2 = fft(Dz2)/N*2;
```

```
fz3 = fft(Dz3)/N*2;
```

```
fz4 = fft(Dz4)/N*2;
```

```
fz5 = fft(Dz5)/N*2;
```

```
fz0abs = abs(fz0(1:N1/2));
```

```
fz1abs = abs(fz1(1:N1/2));
```

```
fz2abs = abs(fz2(1:N2/2));
```

```
fz3abs = abs(fz3(1:N3/2));
```

```
fz4abs = abs(fz4(1:N4/2));
```

```
fz5abs = abs(fz5(1:N5/2));
```

```
fz0abs2 = fz0abs.^2;
```

```
fz1abs2 = fz1abs.^2;
```

```
fz2abs2 = fz2abs.^2;
```

```
fz3abs2 = fz3abs.^2;
```

```
fz4abs2 = fz4abs.^2;
```

```
fz5abs2 = fz5abs.^2;
```

```
%%สร้างกราฟในโดเมนความถี่
```

```
figure(4);
```

```
subplot(6,1,1);
```

```
plot(fz0abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Original Signal'); xlim([000 2000]);
```

```
ylim([0 30]);
```

```
subplot(6,1,2);
```

```
plot(fz1abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D1'); xlim([000 2000]);
```

```
ylim([0 30]);
```

```
subplot(6,1,3);
```

```
plot(fz2abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D2'); xlim([000 2000]);
```

```
ylim([0 30]);
```

```
subplot(6,1,4);
```



```
plot(fx3abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D3'); xlim([000 2000]);
ylim([0 30]);
subplot(6,1,5);
plot(fx4abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D4'); xlim([000 2000]);
ylim([0 30]);
subplot(6,1,6);
plot(fx5abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D5'); xlim([000 2000]);
ylim([0 30]);
```

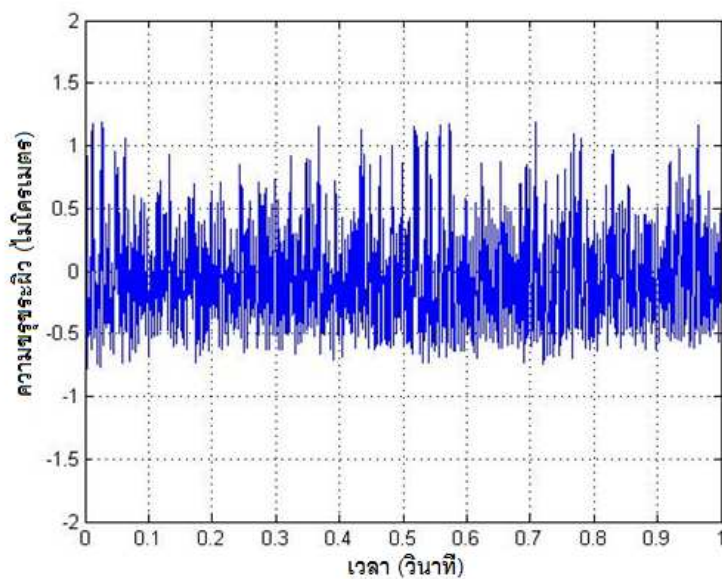
```
figure(5);
subplot(6,1,1);
plot(fy0abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Original Signal'); xlim([000 2000]);
ylim([0 30]);
subplot(6,1,2);
plot(fy1abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D1'); xlim([000 2000]);
ylim([0 30]);
subplot(6,1,3);
plot(fy2abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D2'); xlim([000 2000]);
ylim([0 30]);
subplot(6,1,4);
plot(fy3abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D3'); xlim([000 2000]);
ylim([0 30]);
subplot(6,1,5);
plot(fy4abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D4'); xlim([000 2000]);
ylim([0 30]);
subplot(6,1,6);
plot(fy5abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D5'); xlim([000 2000]);
ylim([0 30]);
```

```
figure(6);
subplot(6,1,1);
plot(fy0abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Original Signal'); xlim([000 2000]);
ylim([0 30]);
subplot(6,1,2);
```

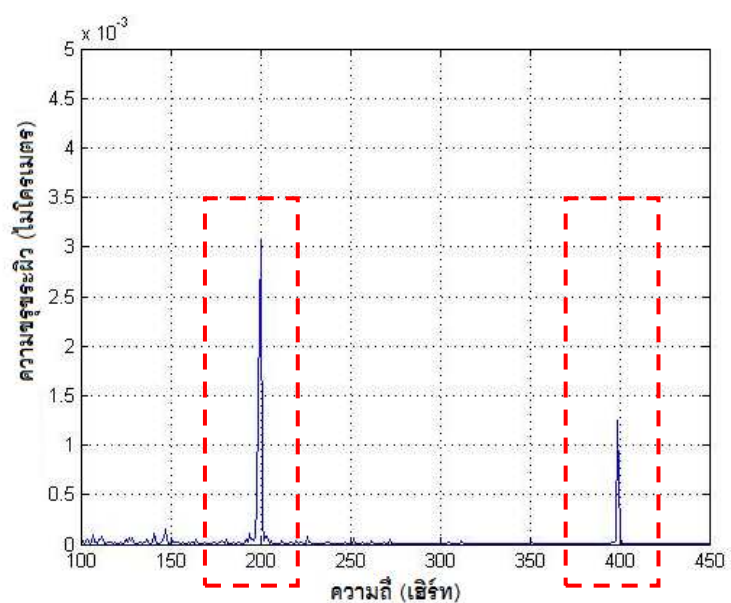
```
plot(fy1abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D1'); xlim([000 2000]);
ylim([0 30]);
subplot(6,1,3);
plot(fy2abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D2'); xlim([000 2000]);
ylim([0 30]);
subplot(6,1,4);
plot(fy3abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D3'); xlim([000 2000]);
ylim([0 30]);
subplot(6,1,5);
plot(fy4abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D4'); xlim([000 2000]);
ylim([0 30]);
subplot(6,1,6);
plot(fy5abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D5'); xlim([000 2000]);
ylim([0 30]);
```

ตัวอย่างการแปลงสัญญาณแรงตัดด้วยเวฟเล็ตเปรียบเทียบกับค่าความขรุขระผิวในโดเมนเวลา และโดเมนความถี่ โดยใช้ความเร็วตัด 12,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.04 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.9 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด 10 มิลลิเมตร

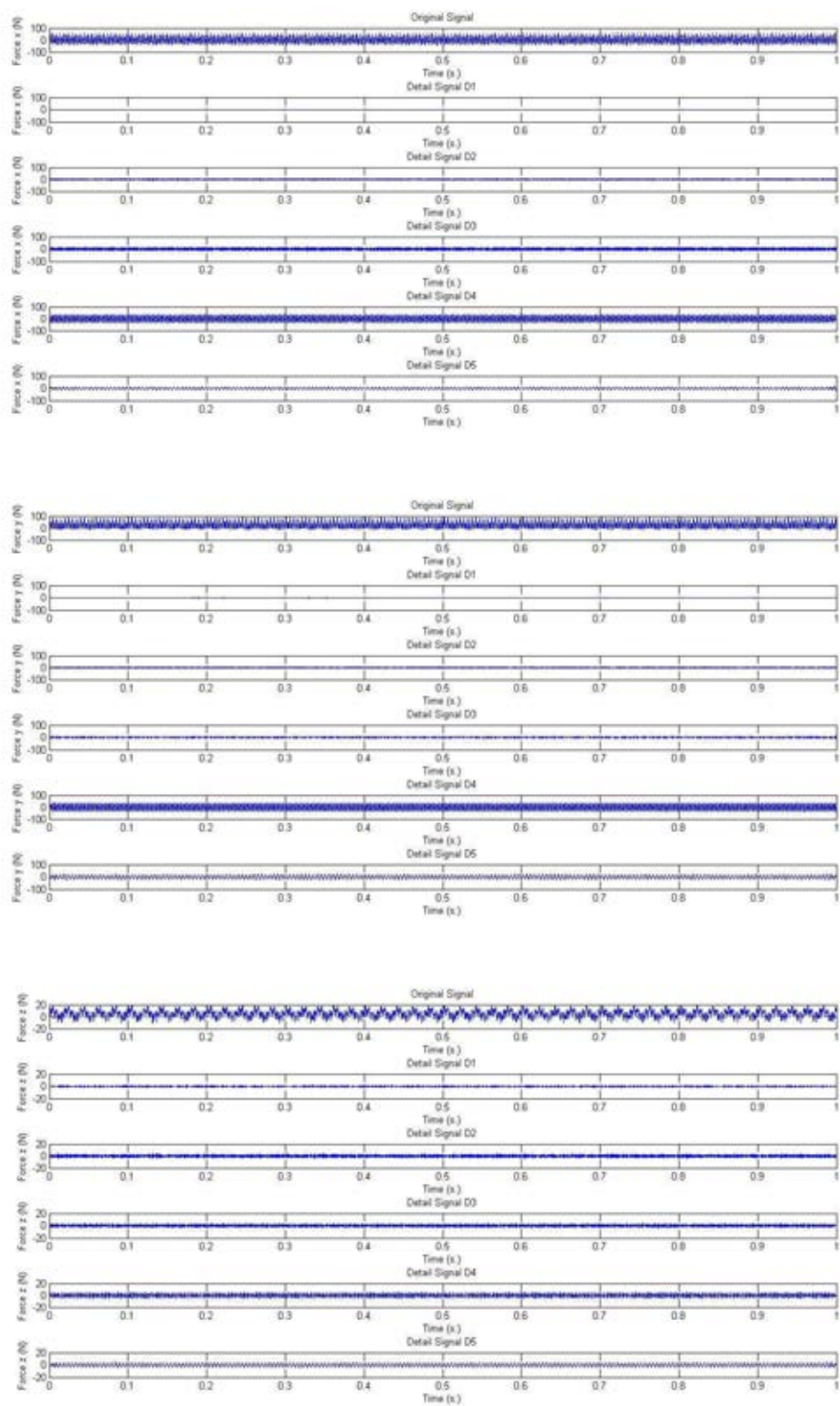
สัญญาณความขรุขระผิวในโดเมนเวลา



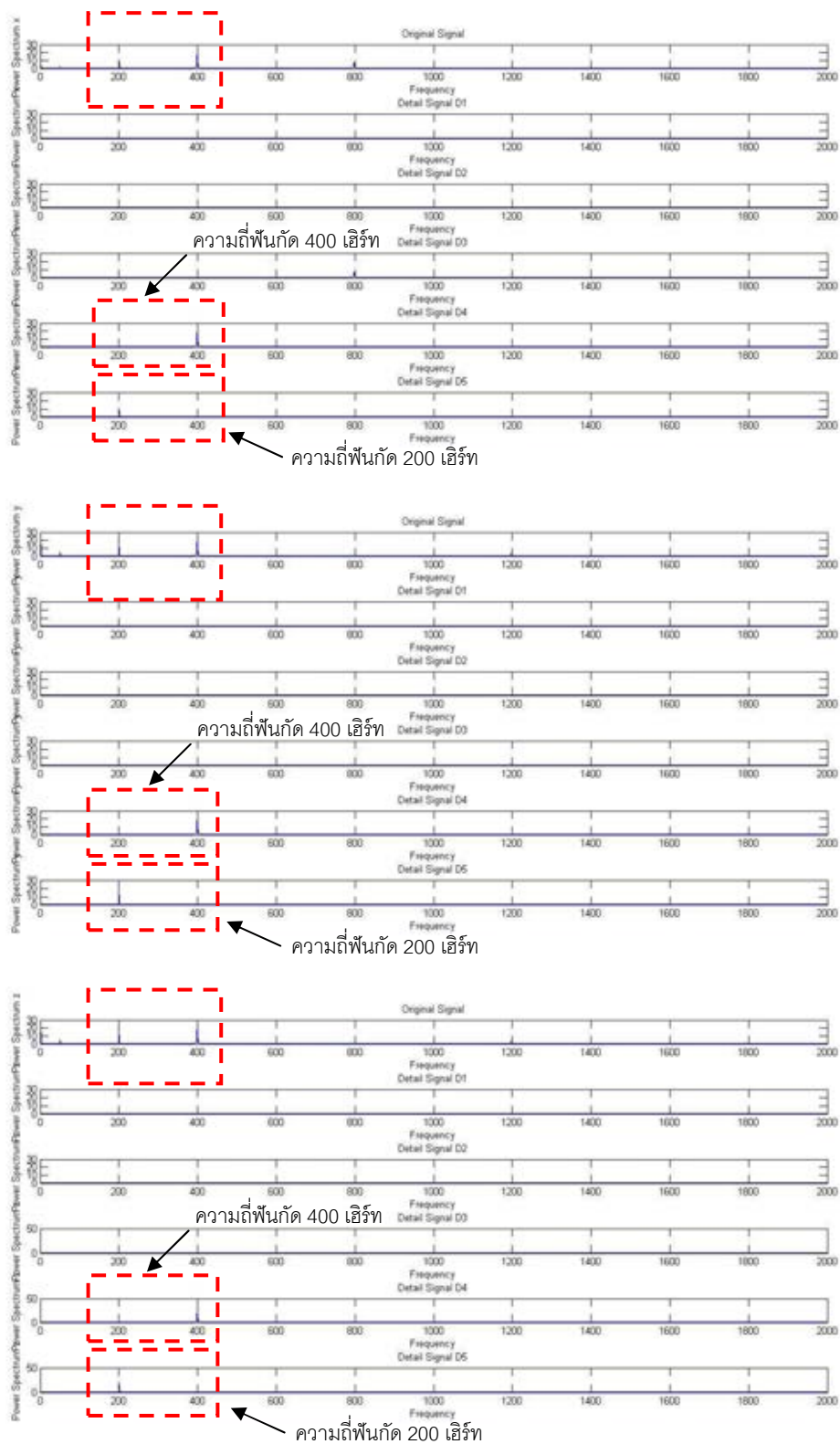
สัญญาณความขรุขระผิวในโดเมนความถี่



สัญญาณแรงตัดในโดเมนเวลาโดยแปลงสัญญาณด้วยเวฟเล็ต

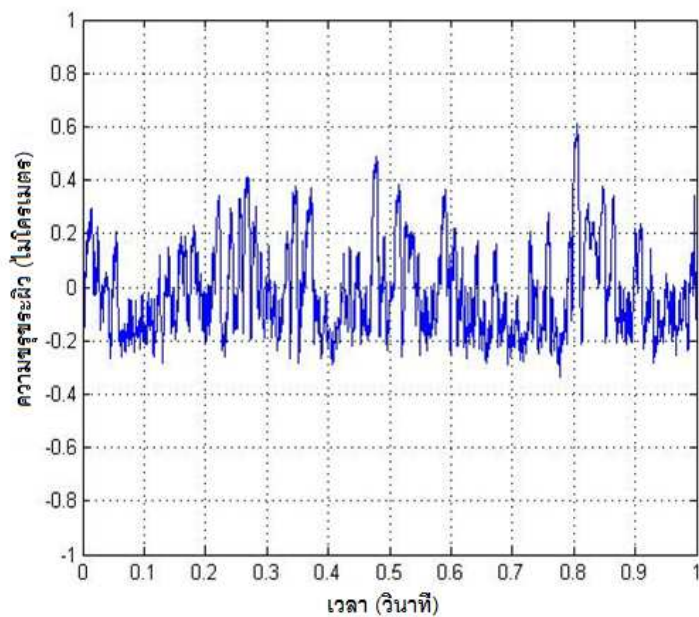


สัญญาณแรงตัดในโดเมนความถี่โดยแปลงสัญญาณด้วยเวฟเล็ต

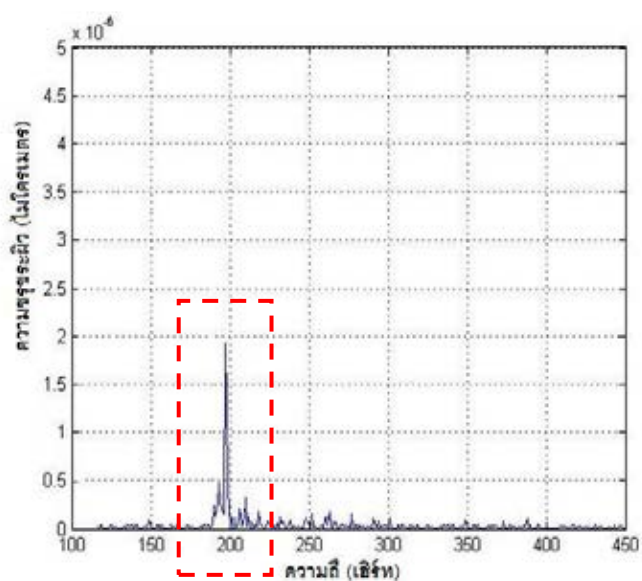


ตัวอย่างการแปลงสัญญาณแรงตัดด้วยเวฟเล็ตเปรียบเทียบกับค่าความขรุขระผิวในโดเมนเวลา และโดเมนความถี่ โดยใช้ความเร็วตัด 8,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.9 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด 10 มิลลิเมตร

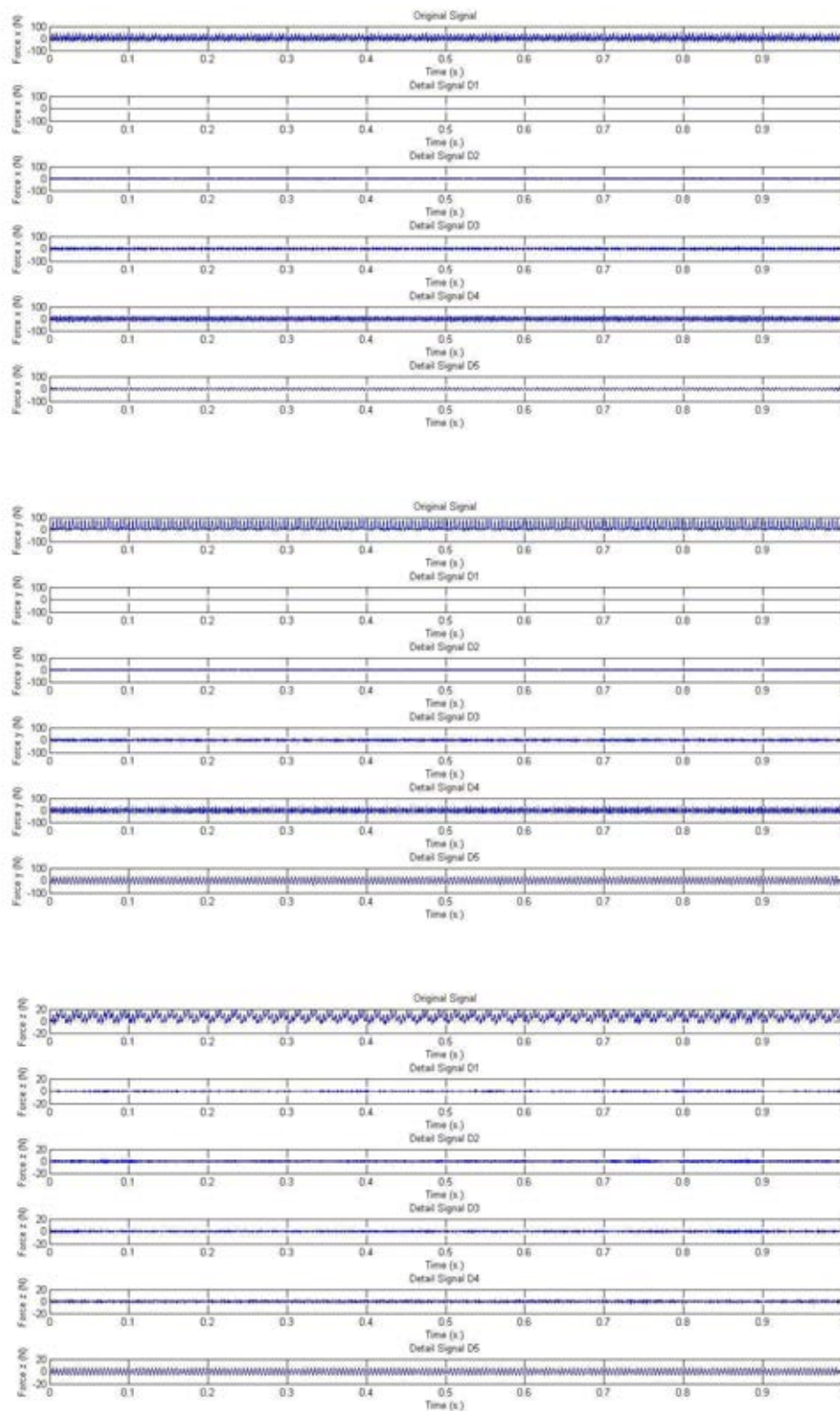
สัญญาณความขรุขระผิวในโดเมนเวลา



สัญญาณความขรุขระผิวในโดเมนความถี่



สัญญาณแรงตัดในโดเมนเวลาโดยแปลงสัญญาณด้วยเวฟเล็ต

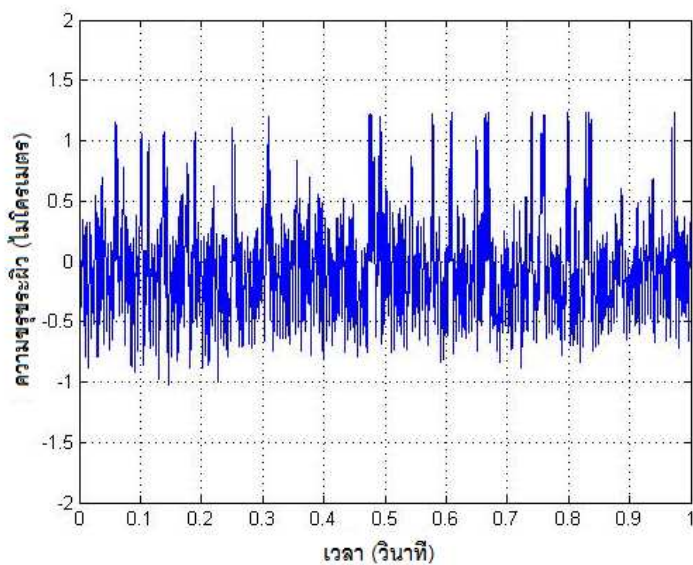


สัญญาณแรงตัดในโดเมนความถี่โดยแปลงสัญญาณด้วยเวฟเล็ต

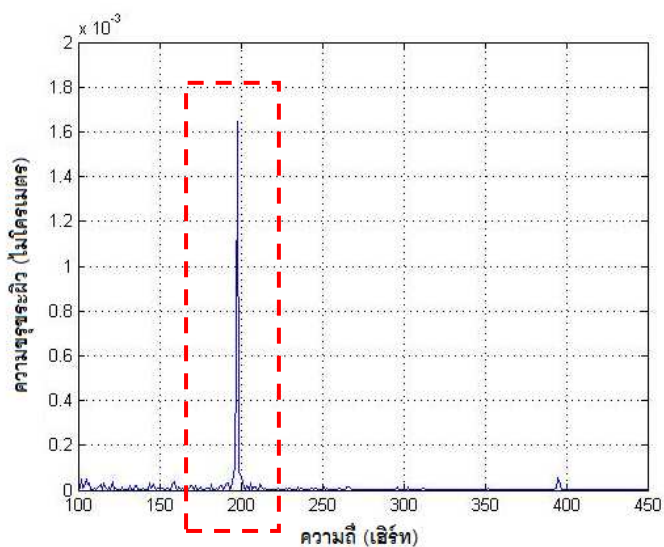


ตัวอย่างการแปลงสัญญาณแรงตัดด้วยเวฟเล็ตเปรียบเทียบกับค่าความขรุขระผิวในโดเมนเวลา และโดเมนความถี่ โดยใช้ความเร็วตัด 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.9 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด 10 มิลลิเมตร

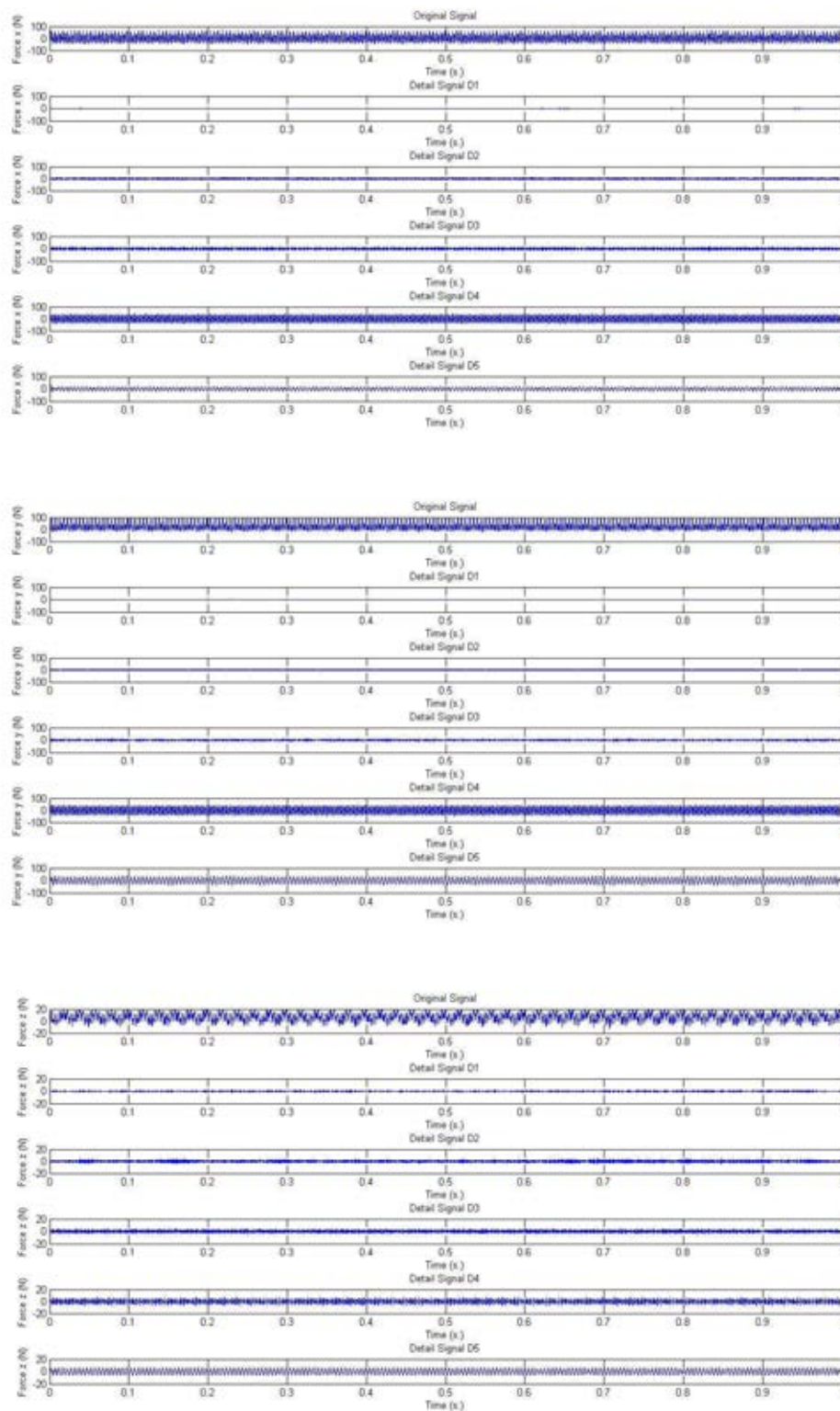
สัญญาณความขรุขระผิวในโดเมนเวลา



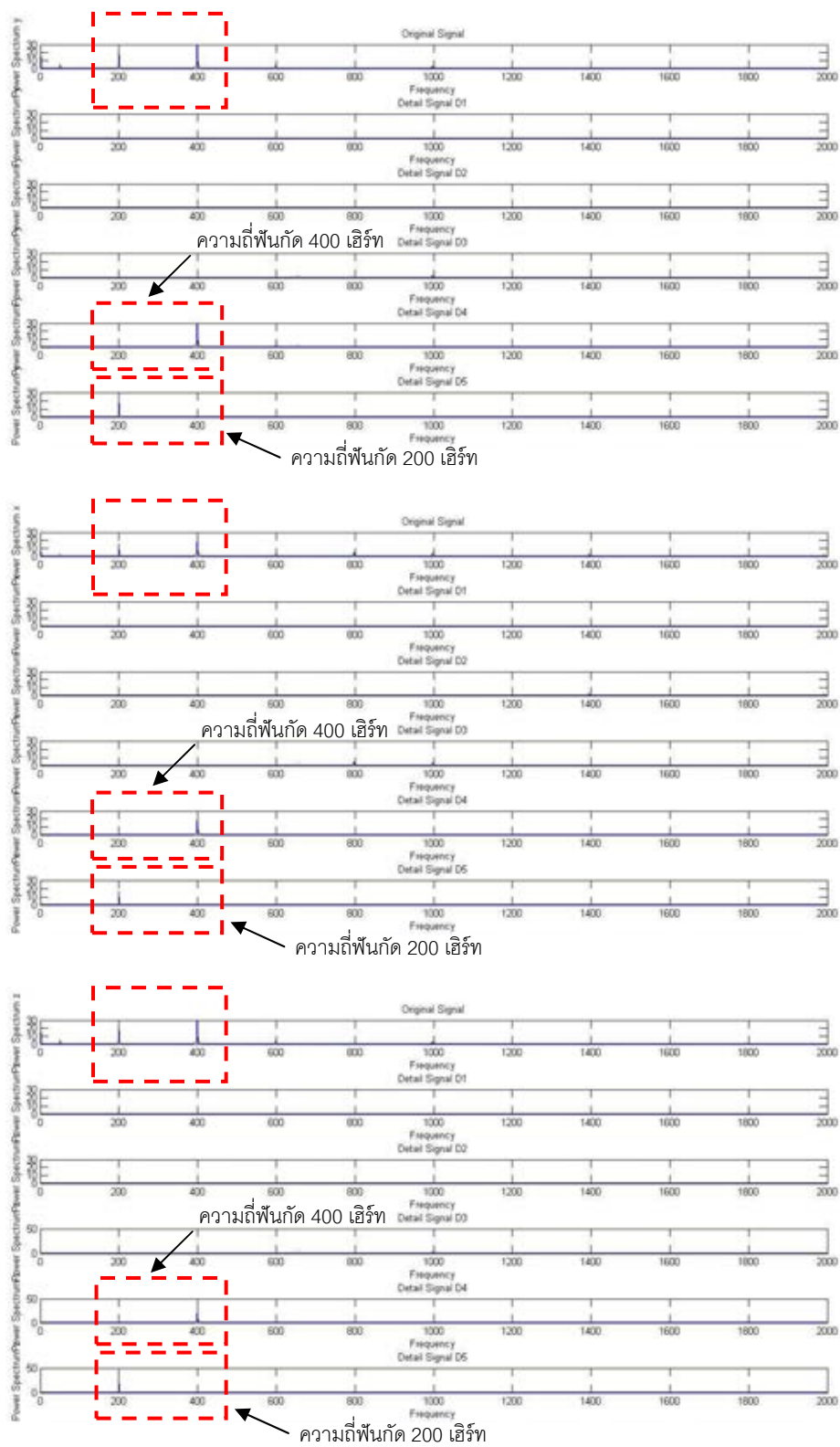
สัญญาณความขรุขระผิวในโดเมนความถี่



สัญญาณแรงตัดในโดเมนเวลาโดยแปลงสัญญาณด้วยเวฟเล็ต



สัญญาณแรงตัดในโดเมนความถี่โดยแปลงสัญญาณด้วยเวฟเล็ต



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวแพรว เทศนิยม เกิดวันที่ 3 กันยายน พ.ศ. 2527 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2554