

การทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการโดยการประยุกต์ใช้แรงตัดพลวัตในการกลึง
เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ด้วยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว

นางสาวกัญญาณต์ สมานมิตร

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 UTILIZING DYNAMIC
CUTTING FORCES IN TURNING OF CARBON STEEL GRADE S45C WITH COATED
CARBIDE INSERT

Miss Kanyakarn Samanmit

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

การทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการโดยการ
ประยุกต์ใช้แรงตัดพลวัตในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด
S45C ด้วยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว

โดย

นางสาวกัญญาณต์ สมานมิตร

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เชื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์ดีไชย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคี่ก)

กัณฑ์สมานมิตร : การทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการโดยการประยุกต์ใช้แรงตัดพลวัตในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ด้วยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว. (IN-PROCESS PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS UTILIZING DYNAMIC CUTTING FORCES IN TURNING OF CARBON STEEL GRADE S45C WITH COATED CARBIDE INSERT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, 218 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในระหว่างกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน ด้วยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัตบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี อัตราส่วนแรงตัดพลวัตถูกนำมาประยุกต์ใช้โดยการหาพื้นที่ใต้กราฟของแรงป้อนตัดพลวัตต่อแรงตัดหลักพลวัต เพื่อใช้ในการทำนายความขรุขระผิวขณะตัดโดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ไดนามิเตอร์ถูกติดตั้งบนชุดป้อนมีดของเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อตรวจจับแรงที่เกิดขึ้นขณะตัด ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวสามารถพิสูจน์ได้ในโดเมนความถี่ โดยที่แรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีความถี่ที่ตรงกัน ฟังก์ชันเอกโปเนนเชียลถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัด ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีความขรุขระผิว โดยมีพารามิเตอร์ คือ ความเร็วในการตัด 100-260 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.1-0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.2-0.8 มิลลิเมตร รัศมีจมูกมีด 0.4-0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา รวมถึงอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัต การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากผลการทดลองพบว่าสมการทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดที่พัฒนาขึ้น มีค่าความแม่นยำเท่ากับ 91.89% สำหรับสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย และ 91.97% สำหรับสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด

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

5470119321 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : TURNING / PREDICTION / SURFACE ROUGHNESS / DYNAMIC CUTTING FORCE

KANYAKARN SAMANMIT : IN-PROCESS PREDICTION OF SURFACE ROUGHNESS UTILIZING DYNAMIC CUTTING FORCES IN TURNING OF CARBON STEEL GRADE S45C WITH COATED CARBIDE INSERT. ADVISOR : ASSOC. PROF. SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, Ph.D., 218 pp.

This research presents a development of the in-process surface roughness prediction in the CNC turning process of the carbon steel with the coated carbide tool by utilizing the dynamic cutting force ratio. The aim of this research is to investigate the relation between the surface roughness and the dynamic cutting force ratio during the in-process cutting in CNC turning process. The dynamic cutting force ratio is proposed and calculated from the area of dynamic feed force to that of dynamic main force in order to predict the in-process surface roughness regardless of the cutting conditions. The relation between the dynamic cutting force and the surface roughness can be proved in the frequency domain, which have the same frequency. The exponential function is adopted for the sake of simplicity to develop the in-process surface roughness model which is similar to the theoretical surface roughness model. However, the proposed model consists of the cutting speed of 100-260 m/min, the feed rate of 0.1-0.3 mm/rev, the depth of cut of 0.2-0.8 mm, the tool nose radius of 0.4-0.8 mm, the rake angles $-6^\circ, 11^\circ$, and the dynamic cutting force ratio. The multiple regression analysis is utilized to obtain the regression coefficients by using the least square method at 95% confident level. The proposed model has been proved by the new cutting tests with the high accuracy of 91.89% for the average surface roughness and 91.79% for the average maximum height of the surface roughness by utilizing the dynamic cutting force ratio.

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

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

Academic Year :2013.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ต้องขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสถิตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่สละเวลาพร่ำสอน ให้แนวคิด คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งตรวจแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ จนกระทั่งสำเร็จออกมาเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์มิไชย และรองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคี่ก กรรมการสอบ ที่กรุณาให้คำแนะนำที่มีคุณค่ายิ่งในการแก้ไขข้อบกพร่อง ช่วย
ให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจน
สร้างแรงบันดาลใจในการใฝ่รู้ให้แก่ผู้วิจัย และขอขอบคุณนายศิริพงษ์ ดำรงค์ศักดิ์ ที่ได้ให้คำ
ชี้แนะ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือขณะทำวิจัยเป็นอย่างดี จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้
ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณพ่อ แม่ และครอบครัว ที่สนับสนุนและให้กำลังใจ
ตลอดมา รวมทั้งขอบคุณนิสิตปริญญาโทประจำ ณ ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตขั้นสูง
และวิศวกรรมเที่ยงตรงทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	10
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	10
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	11
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.1 กระบวนการตัดเงื่อนไข.....	12
2.2 กระบวนการกลิ้ง.....	13
2.3 การเกิดเศษโลหะ.....	17
2.4 ทฤษฎีความขรุขระผิว.....	23
2.5 แรงในการตัด.....	26
2.6 การประเมินผลสัมฤทธิ์.....	30
2.7 วิธีการประมาณด้วยสี่เหลี่ยมคางหมู.....	31
2.8 การวิเคราะห์ความถดถอย.....	33
2.9 การวิเคราะห์ผล.....	34
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	41
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	46
3.4 การพัฒนาสมการทำนายความชุกของโรคผิวหนังขณะตัด.....	52
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	53
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	55
4.1 ผลการทดลอง.....	55
4.2 การวิเคราะห์ความชุกของโรคผิวหนังและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่.....	62
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของแรงตัดพลวัตและลักษณะของเศษโลหะ.....	65
4.4 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา.....	68
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชุกของโรคผิวหนังและอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัต	70
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดและการเกิดเศษโลหะ.....	70
4.7 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความชุกของโรคผิวหนังกับอัตราส่วน พื้นที่ได้กราฟของแรงป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัด และเงื่อนไขการตัดอื่นๆบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี.....	74
4.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	84
4.9 สมการทำนายความชุกของโรคผิวหนัง.....	88
4.10 การทดสอบความแม่นยำของสมการ.....	94
4.11 การวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตด้วยการแปลงเวฟเล็ต.....	109
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปราย และข้อเสนอแนะ.....	115
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	115
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	116
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย.....	117
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	117
รายการอ้างอิง.....	118
ภาคผนวก.....	121
ภาคผนวก ก โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์ความชุกของ ผิว.....	122

ภาคผนวก ข	โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตขณะตัด.....	124
ภาคผนวก ค	การวิเคราะห์ FFT สำหรับเงื่อนไขการตัดต่างๆ.....	127
ภาคผนวก ง	เศษโลหะที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ.....	182
ภาคผนวก จ	โปรแกรมและตัวอย่างการวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตด้วยการแปลงเวฟเล็ต.....	196
ภาคผนวก ฉ	รูปทรงเรขาคณิตของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์ และค่าความไม่แน่นอนของอุปกรณ์การวัด.....	216
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	218

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	9
ตารางที่ 1.2 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง.....	10
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดลอง.....	48
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง.....	56
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย Ra.....	89
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย Rz.....	90
ตารางที่ 4.4 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ละตัว Ra.....	91
ตารางที่ 4.5 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ละตัว Rz.....	92
ตารางที่ 4.6 เงื่อนไขการตัดสำหรับทดสอบความแม่นยำของสมการ.....	94
ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำ.....	96
ตารางที่ 4.8 เงื่อนไขการตัดสำหรับทดสอบความแม่นยำของสมการ.....	98
ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำ.....	100
ตารางที่ 4.10 เงื่อนไขการตัดสำหรับทดสอบความแม่นยำของสมการ.....	102
ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำ.....	103
ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบความแม่นยำที่ได้จากงานวิจัยกับงานวิจัยก่อนหน้า.....	105
ตารางที่ 4.13 ความคลาดเคลื่อนของเงื่อนไขการตัดที่ใช้ทดสอบความแม่นยำของสมการ.....	106
ตารางที่ 4.14 การทดสอบความแตกต่างของความแปรปรวนของสองประชากร.....	108
ตารางที่ 4.15 การทดสอบความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย.....	109

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 รอยการป้อนระหว่างการกลึง	2
1.2 ลักษณะความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจริง.....	2
1.3 แรงตัดในแนวแกน 3 มิติ	4
1.4 กรอบแนวคิดงานวิจัย.....	5
1.5 การวิเคราะห์แรงตัดในโดเมนเวลา.....	7
1.6 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนเวลา.....	7
1.7 การวิเคราะห์แรงตัดในโดเมนความถี่.....	7
1.8 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนความถี่.....	8
2.1 รูปร่างชิ้นงานเกิดจากทิศทางการป้อนของเครื่องมือตัด.....	12
2.2 รูปร่างชิ้นงานเกิดจากรูปร่างของเครื่องมือตัด	13
2.3 กระบวนการกลึง.....	14
2.4 กระบวนการกลึงแบบต่างๆ.....	14
2.5 เงื่อนไขของการตัดในกระบวนการกลึง	14
2.6 มีดกลึงสำหรับงานทั่วไป	16
2.7 เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์	16
2.8 ส่วนประกอบด้ามมีดกลึง	16
2.9 แบบจำลองของการตัด.....	17
2.10 รูปแบบหลักของการเกิดเศษโลหะในการตัด.....	19
2.11 การเกิดเศษโลหะไม่ต่อเนื่อง.....	20
2.12 ขั้นตอนการยึดติดที่คมตัด.....	21
2.13 เศษโลหะแบบต่างๆ.....	22
2.14 ประเภทของรูปแบบของเศษโลหะตามมาตรฐาน ISO 3685-1993	23
2.15 ลักษณะของพื้นผิว.....	24
2.16 การวัดความขรุขระโดยใช้นิ้วสัมผัสเปรียบเทียบ	25
2.17 การวัดค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย Ra	25
2.18 ระบบแรงบนคมตัดของการตั้งฉาก.....	26

รูปที่	หน้า
2.19 ระบบแรงเสียดทาน.....	27
2.20 ระบบของแรงเฉือน.....	28
2.21 วิธีการสร้างรูปหลายเหลี่ยมแทนแรงตัด.....	28
2.22 ทิศทางแรงตัด.....	29
2.23 สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น.....	30
2.24 การแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปสู่โดเมนความถี่.....	30
2.25 การคำนวณพื้นที่ใต้กราฟ	31
2.26 การหาค่าปริพันธ์ด้วยวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู.....	32
3.1 เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมสำหรับมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว	42
3.2 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.3 เม็ดมีดที่ใช้ในการทดลอง มุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	43
3.4 เม็ดมีดที่ใช้ในการทดลอง มุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	44
3.5 ด้ามมีดกลึงที่ใช้ในการทดลอง.....	44
3.6 เครื่องกลึงซีเอ็นซีที่ใช้ในการทดลอง.....	45
3.7 ไดนาโมมิเตอร์.....	45
3.8 ออสซิลโลสโคป.....	45
3.9 เครื่องขยายสัญญาณ.....	46
3.10 เครื่องวัดความขรุขระผิว.....	46
3.11 การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์.....	47
4.1 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนเวลา.....	62
4.2 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา.....	62
4.3 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนความถี่.....	64
4.4 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่.....	65
4.5 เศษโลหะแบบต่อเนื่อง.....	66
4.6 ความถี่แรงตัดพลวัตของเศษโลหะแบบต่อเนื่อง.....	66
4.7 ความถี่ความขรุขระผิวชิ้นงานของเศษโลหะแบบต่อเนื่อง.....	66
4.8 เศษโลหะแบบแตกหัก.....	67
4.9 ความถี่แรงตัดพลวัตของเศษโลหะแบบแตกหัก.....	67
4.10 ความถี่ความขรุขระผิวชิ้นงานของเศษโลหะแบบแตกหัก.....	68

รูปที่	ฐ หน้า
4.11 ตัวอย่างการหาพื้นที่ด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู.....	69
4.12 ตัวอย่างพื้นที่แรงตัดพลวัตที่เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตรา ป้อนตัด 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุมุกมีด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6.....	69
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราส่วนพื้นที่แรงตัด (AFy/AFz) สำหรับเศษโลหะแบบต่อเนื่อง.....	70
4.14 เศษโลหะที่ความเร็วตัด 100 180 และ 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุกมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6.....	71
4.15 เศษโลหะที่อัตราป้อนตัด 0.1 0.2 และ 0.3 มม./รอบ ความเร็วตัด 100 ม./นาที ความลึกตัด 0.2 มม. รัศมีจุมุกมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6.....	71
4.16 เศษโลหะที่ความลึกตัด 0.2 0.5 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 180 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. รัศมีจุมุกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6.....	72
4.17 เศษโลหะที่รัศมีจุมุกมีด 0.4 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 260 ม./นาที ความลึกตัด 0.5 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6.....	72
4.18 เศษโลหะที่มุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา ความเร็วตัด 180 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.3 มม./รอบ ความลึกตัด 0.2 มม. และรัศมีจุมุกมีด 0.4 มม.....	73
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความเร็วตัด ที่ความเร็วตัด 100 180 และ 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มม./รอบ ความลึกตัด 0.2 มม. และรัศมี จุมุกมีด 0.4 มม.	74
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความเร็วตัด ที่ความเร็วตัด 100 180 และ 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มม./รอบ ความลึกตัด 0.2 มม. และรัศมี จุมุกมีด 0.4 มม.	74
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความเร็วตัด ที่ความเร็วตัด 100 180 และ 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มม./รอบ ความลึกตัด 0.2 มม. และรัศมี จุมุกมีด 0.8 มม.....	75
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราการป้อนตัด ที่อัตราการป้อน ตัด 0.1 0.2 และ 0.3 มม./รอบ ความเร็วตัด 260 ม./นาที ความลึกตัด 0.5 มม. และ รัศมีจุมุกมีด 0.8 มม.	75
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราการป้อนตัด ที่อัตราการป้อน	

รูปที่	หน้า
ตัด 0.1 0.2 และ 0.3 มม./รอบ ความเร็วตัด 260 ม./นาที ความลึกตัด 0.5 มม. และ รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม.....	76
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราการป้อนตัด ที่อัตราการ ป้อนตัด 0.1 0.2 และ 0.3 มม./รอบ ความเร็วตัด 100 ม./นาที ความลึกตัด 0.2 มม. และรัศมีจุมูกมีด 0.4 มม.	76
3.25 พื้นที่การตัดสำหรับอัตราการป้อนตัดที่แตกต่างกัน.....	77
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความลึกตัด ที่ความลึกตัด 0.2 0.5 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มม./รอบ และรัศมีจุมูกมีด 0.8 มม.	77
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความลึกตัด ที่ความลึกตัด 0.2 0.5 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มม./รอบ และรัศมีจุมูกมีด 0.8 มม.	78
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความลึกตัด ที่ความลึกตัด 0.2 0.5 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มม./รอบ และรัศมีจุมูกมีด 0.4 มม.	78
4.29 พื้นที่การตัดสำหรับความลึกตัดที่แตกต่างกัน.....	79
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับรัศมีจุมูกมีด ที่รัศมีจุมูกมีด 0.4 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มม./รอบ และความลึกตัด 0.2 มม.	79
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับรัศมีจุมูกมีด ที่รัศมีจุมูกมีด 0.4 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มม./รอบ และความลึกตัด 0.5 มม.	80
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับรัศมีจุมูกมีด ที่รัศมีจุมูกมีด 0.4 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มม./รอบ และความลึกตัด 0.2 มม.	80
4.33 อิทธิพลของรัศมีจุมูกมีดต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน	81
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับมุมคายเศษโลหะ ที่มุมคายเศษ โลหะ -6 และ 11 องศา ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มม./รอบ ความลึกตัด 0.2 มม. และรัศมีจุมูกมีด 0.4 มม.	81

รูปที่	หน้า
4.35 (ก) แอมพลิจูดสัญญาณแรงตัดพลวัต และ (ข) แอมพลิจูดความขรุขระผิวชิ้นงาน ที่ความเร็วตัด 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.4 มม./รอบ ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	83
4.36 (ก) แอมพลิจูดสัญญาณแรงตัดพลวัต และ (ข) แอมพลิจูดความขรุขระผิวชิ้นงาน ที่ความเร็วตัด 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มม./รอบ ความลึกตัด 0.2 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	84
4.37 Normal Probability Plot ของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra).....	85
4.38 Normal Probability Plot ของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุด (Rz).....	85
4.39 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra).....	86
4.40 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุด (Rz).....	86
4.41 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra).....	87
4.42 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวสูงสุด (Rz).....	88
4.43 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra).....	97
4.44 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz).....	97
4.45 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra).....	101
4.46 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz).....	101
4.47 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra).....	104
4.48 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz).....	104
4.49 เวก์ที่ถูกละเลยและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า a และ b ต่างๆ กัน.....	110
4.50 ลักษณะเวก์ที่แฟมิลีต่างๆ.....	111
4.51 ความขรุขระผิวชิ้นงานที่โดเมนเวลา.....	111
4.52 ความขรุขระผิวชิ้นงานที่โดเมนความถี่.....	111
4.53 สัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาด้วยการแปลงเวก์.....	112
4.54 สัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงเวก์.....	113

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

1.1.1 ภาพรวมของอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกลึงและเหล็กกล้า

ภาคอุตสาหกรรมเป็นภาคที่มีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศไทย มาโดยตลอด ซึ่งในปี 2552 พบว่า สัดส่วนมูลค่าผลผลิตอุตสาหกรรมต่อ GDP อยู่ที่ประมาณร้อยละ 39 หรือคิดเป็นจำนวนเงินประมาณ 3.09 ล้านล้านบาท [1] โดยเฉพาะกลุ่มสินค้าอุตสาหกรรมที่ต้องใช้เทคโนโลยีระดับกลางและสูง เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องใช้ไฟฟ้า ถือเป็นกลุ่มอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญยิ่งต่อเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยวัตถุดิบที่สำคัญ เป็นปัจจัยพื้นฐานในการผลิต ได้แก่ วัสดุประเภทเหล็กกล้า ซึ่งโดยมากแล้วจะใช้เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของคาร์บอนผสมอยู่ ทั้งนี้คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนจะเหมาะสมกับ งานทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เพื่อ ก้านสูบ ท่อเหล็ก และชิ้นส่วนพื้นฐานสำหรับการผลิตอีกมาก

นอกจากนี้ในปี 2554 รัฐบาลมีนโยบายเพื่อกระตุ้นเศรษฐกิจ โดยการลดภาษีประชาชน สำหรับรถคันแรก ทำให้กลุ่มธุรกิจอุตสาหกรรมยานยนต์มีความเฟื่องฟู ส่งผลให้มีความต้องการใช้เหล็กกล้าเพื่อผลิตชิ้นส่วนต่างๆ เพิ่มมากขึ้นด้วย

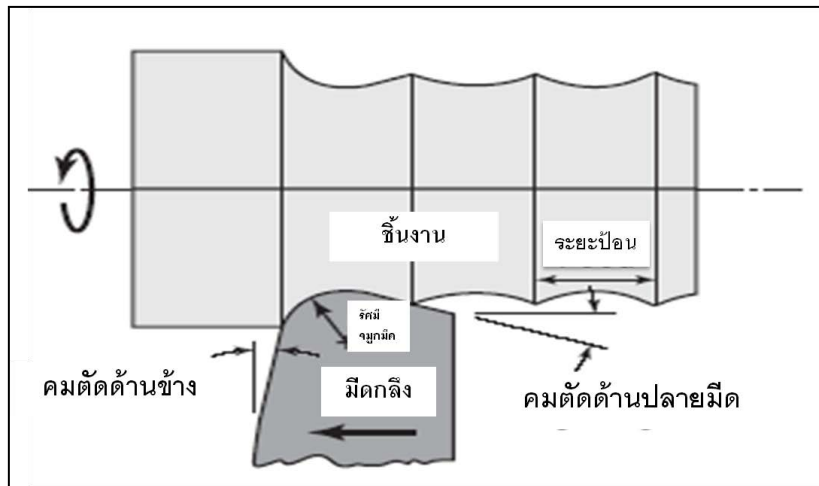
1.1.2 ความสำคัญของความขรุขระผิวชิ้นงานและเงื่อนไขการตัดต่างๆ

กระบวนการกลึงเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่ใช้ผลิตชิ้นส่วนสำคัญต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะชิ้นส่วนประกอบยานยนต์ และชิ้นส่วนเครื่องจักร เช่น เพลา, ล้อเฟือง และสลักเกลียว ลักษณะของกระบวนการเป็นการตัดแบบต่อเนื่อง (Continuous cut) ที่ใช้มีดตัดเคลื่อนที่ขนานไปกับแกนหมุนและขจัดผิวเนื้อวัสดุออก [2] เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการ ซึ่งชิ้นส่วนที่ผลิตจะต้องคำนึงถึงความขรุขระผิวชิ้นงานเป็นสำคัญ เนื่องจากความขรุขระผิวชิ้นงานส่งผลต่อกระบวนการประกอบ, ขนาดและค่าความเผื่อของชิ้นงาน

ตามทฤษฎีความขรุขระผิว อ้างจากสมการที่ 1.1-1 และสมการที่ 1.1-2 พบว่าความขรุขระผิวมีความสัมพันธ์กับอัตราป้อนตัด (f) และ รัศมีจุมกมิด (R_n) ซึ่งสามารถพิจารณาได้ตามหลักการรูปทรงเรขาคณิต (Geometry) ดังแสดงในรูปที่ 1.1

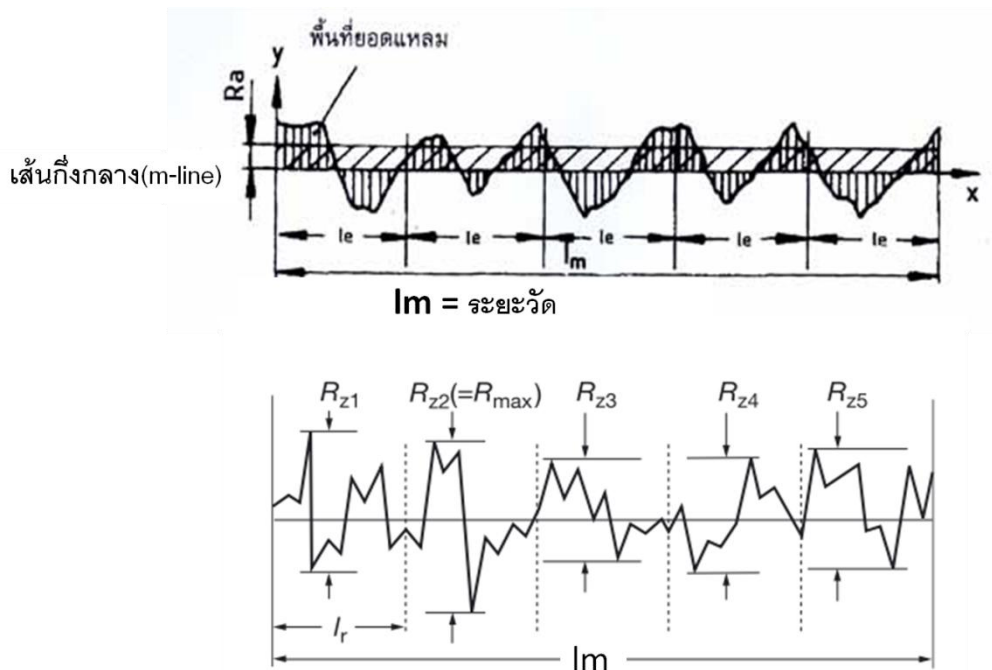
$$R_a = \frac{f^2}{32R_n} \tag{1.1-1}$$

$$R_z = \frac{f^2}{8R_n} \tag{1.1-2}$$



รูปที่ 1.1 รอยการป้อนระหว่างการกรัด [3]

แต่ในความเป็นจริงความขรุขระผิวชิ้นงานที่เกิดขึ้น สามารถคำนวณจากชิ้นงานจริงโดยมีรูปร่างแตกต่างออกไปจากพื้นผิวเรขาคณิต ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ลักษณะความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจริง

โดยสามารถหาค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) ได้ตามสมการที่ 1.1-3 และสามารถหาค่าความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) ได้จากสมการที่ 1.1-4

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (1.1-3)$$

$$R_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1.1-4)$$

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิว แบ่งได้เป็น 2 ปัจจัยหลักคือ ปัจจัยภายนอกที่สามารถควบคุมได้ เช่น เงื่อนไขการตัด อิทธิพลจากมีดตัด อิทธิพลของชิ้นงาน และปัจจัยภายในที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด เช่น แรงตัด อุณหภูมิ ความสั่นสะเทือน เป็นต้น

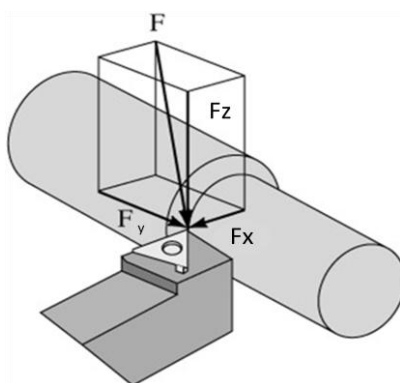
ปัจจัยภายนอก เช่น เงื่อนไขการตัด ประกอบด้วยหลายพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งแต่ละพารามิเตอร์ล้วนส่งผลต่อความขรุขระผิวที่แตกต่างกัน เช่น ถ้าอัตราป้อนตัดมากจะส่งผลให้ความขรุขระผิวมาก ขณะที่อัตราป้อนตัดน้อยจะให้ความขรุขระผิวที่ดีกว่าแต่ใช้เวลาในการตัดมากกว่า ในทำนองเดียวกันมีดตัดที่มีรัศมีงูมกมีดน้อยจะส่งผลให้ความขรุขระผิวแยกว่ารัศมีงูมกมีดที่มากกว่า แต่การใช้อัตราป้อนตัดมากเกินไปทำให้มีแนวโน้มเกิดแรงตัดสูงซึ่งส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนมากและความขรุขระผิวก็มากด้วยเช่นกัน หรืออิทธิพลของมีดตัด เช่น เนื้อวัสดุของมีดก็มีความหลากหลายแตกต่างกัน จำเป็นต้องมีการพิจารณาคุณสมบัติของมีดตัดตามความเหมาะสม โดยคุณสมบัติที่จะต้องนำมาพิจารณา ได้แก่ ค่าความแข็งของวัสดุ ค่าความเหนียว ค่าการต้านทานต่อการสึกหรอ เป็นต้น ส่วนปัจจัยภายในที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด เช่น แรงตัด ความสั่นสะเทือน อุณหภูมิ และเสียง เป็นปัจจัยที่เกิดขึ้นจริงในระหว่างกระบวนการตัด ที่สามารถวัดได้ด้วยเทคโนโลยีเซนเซอร์

1.1.3 เครื่องจักรกลอัจฉริยะและเทคโนโลยีเซนเซอร์

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่างๆ มากมาย รวมถึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้อง แต่ในความเป็นจริงในระหว่างกระบวนการตัดจริงไม่สามารถวัดความขรุขระผิวชิ้นงานได้อย่างทันท่วงที ดังนั้นเพื่อลดของเสียที่เกิดจากการผลิตที่ไม่ได้ขนาดและคุณภาพผิวตามต้องการ จึงต้องมีการควบคุมกระบวนการทำงานภายใต้เงื่อนไขซึ่งมีสภาวะการตัดที่เหมาะสม โดยได้ศึกษาถึงอิทธิพลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างรอบด้าน เพื่อตรวจจับความขรุขระผิวระหว่างกระบวนการได้อย่างทันท่วงที

เครื่องจักรกลอัจฉริยะจึงถูกวิจัยและพัฒนาขึ้น เพื่อให้สามารถตอบสนองของกระบวนการผลิตที่มีความหลากหลาย และต้องการความมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยคาดหวังว่าจะเป็นเครื่องจักรที่สามารถเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในระหว่างกระบวนการได้ด้วยตนเอง ทั้งนี้ยังสามารถ

ทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่นๆ และอำนวยความสะดวกต่อการผลิตได้ โดยเริ่มจากการนำเครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันซึ่งเป็นเครื่องจักรที่มีลักษณะการผลิตแบบอัตโนมัติที่ผู้ควบคุมจะต้องระบุค่าพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการตัดเฉือนชิ้นงานที่ต้องการก่อนที่จะเริ่มกระบวนการ มาทำการศึกษาวิจัยถึงผลกระทบของปัจจัยทั้งหมดที่มีต่อผลลัพธ์ของกระบวนการ เช่น คุณภาพผิวชิ้นงาน และการสึกหรอของเครื่องมือตัด เป็นต้น



รูปที่ 1.3 แรงตัดในแนวแกน 3 มิติ [3]

เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ให้รอบด้านและปรับปรุงให้เป็นเครื่องจักรกลอัจฉริยะ เทคโนโลยีเซนเซอร์เข้ามามีบทบาทสำคัญในกระบวนการผลิตและกระบวนการประกอบ เนื่องจากแนวโน้มทั้งในปัจจุบันและอนาคตของเทคโนโลยีการผลิตอัตโนมัติและการออกแบบเครื่องจักรกลอัจฉริยะพยายามที่จะตอบสนองความต้องการที่หลากหลาย รวมถึงเพื่อปรับปรุงอัตราผลิตภาพให้สูงขึ้น เพิ่มคุณภาพและเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ ดังจะเห็นได้ว่างานวิจัยที่ผ่านมามีการนำเซนเซอร์มาใช้ในการวัดแรงตัดที่เกิดขึ้น

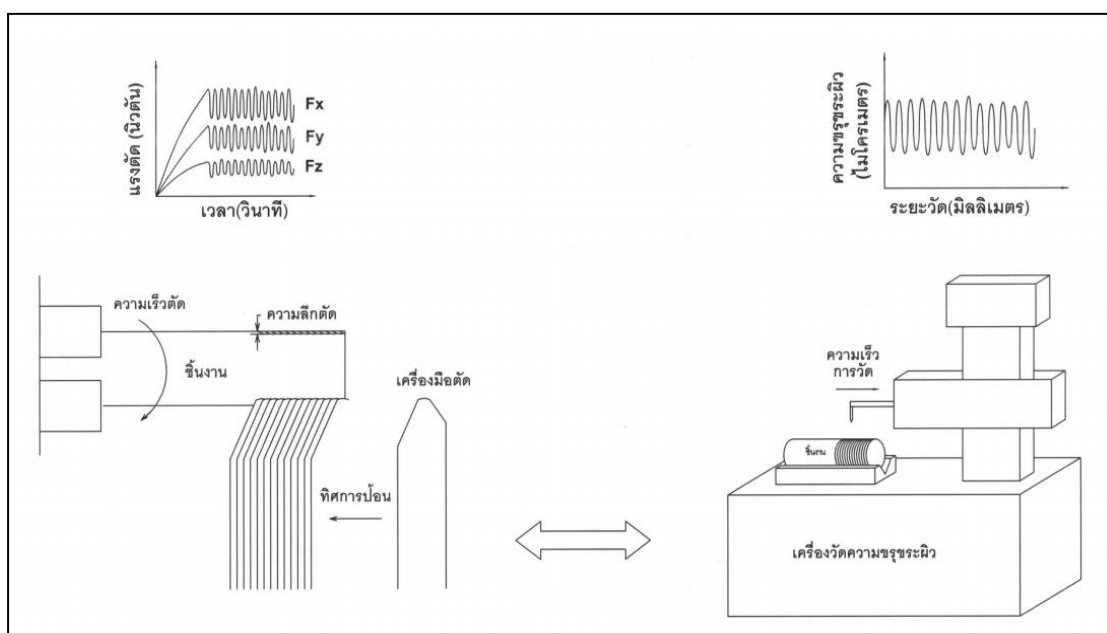
ในระบบตรวจติดตามการผลิตสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือการตรวจติดตามทางตรงและทางอ้อม การตรวจติดตามทางตรงจะให้ค่าของตัวแปรที่ผู้ปฏิบัติการต้องการจะวัด เช่น การสึกหรอของมีดตัด ในขณะที่การตรวจติดตามทางอ้อมเป็นการวัดค่าที่เกิดขึ้นในระบบ เช่น การใช้ไดนาโมมิเตอร์วัดแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาแปลงเพื่อให้ได้ค่าของตัวแปรที่ต้องการจะวัดต่อไป

แรงตัดที่ตรวจจับได้ จากรูปที่ 1.3 ประกอบด้วย 3 แรง ตามทิศทางแรงที่เกิดขึ้น คือ แรงตัดแนวรัศมี (Radial force: F_y) แรงตัดป้อน (Feed force: F_x) และแรงตัดหลัก (Main force: F_z) ซึ่งมีการนำแรงตัดที่เกิดขึ้นนี้มาใช้ทำนายความขรุขระผิว และพบว่าแรงป้อนตัดเป็นแรงที่มีผลกระทบมากที่สุดต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน ในขณะที่แรงตัดหลักเกิดจากเงื่อนไขการตัด [4, 5]

ด้วยเหตุนี้แรงตัดหลักและแรงป้อนจึงถูกนำมาใช้เพื่อทำการประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน ในขณะที่กำลังชิ้นงาน

อย่างไรก็ตามแรงตัดนั้นอาจแปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันไป อัตราส่วนของแรงตัดจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน เนื่องจากอัตราส่วนแรงตัดนั้นถูกสันนิษฐานว่าสามารถคำนวณความขรุขระผิวชิ้นงานได้โดยไม่แปรเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขการตัด [2] โดยการใช้ข้อมูลที่เป็นแรงตัดพลวัตจะเป็นการเฉลี่ยแรงที่เกิดขึ้นขณะตัด ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนและขาดความแม่นยำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้พื้นที่แรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นขณะตัดโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) เพื่อความละเอียดและถูกต้องของข้อมูลมากยิ่งขึ้น

1.1.4 กรอบแนวคิดงานวิจัย



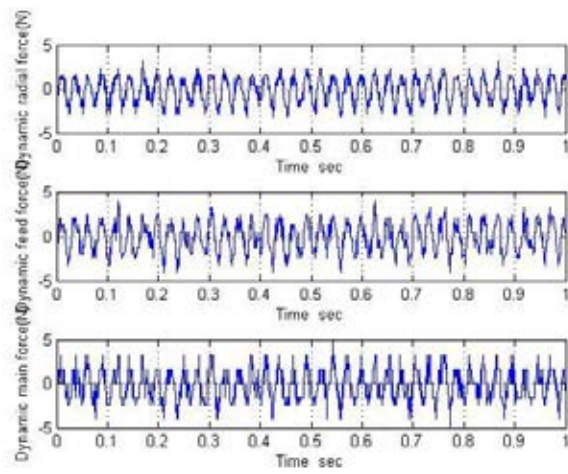
รูปที่ 1.4 กรอบแนวคิดงานวิจัย

กรอบแนวความคิดของงานวิจัยนี้สามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวชิ้นงาน ซึ่งเมื่อพิจารณาสัญญาณแรงตัดที่โดเมนเวลาพบว่าลักษณะของสัญญาณแรงตัดพลวัตเกิดเป็นลูกคลื่นที่ซ้ำๆกัน และมีความสอดคล้องกับอัตราการป้อนตัดชิ้นงาน สามารถอธิบายได้ว่าการตัดที่อัตราป้อนตัดใดๆ แรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดจะมีลักษณะเป็นลูกคลื่นซ้ำๆ ซึ่งพบว่าแรงตัดที่เกิดขึ้นนั้นมีความสอดคล้องกับรอยของความขรุขระผิวชิ้นงาน ที่มีลักษณะเป็นลูกคลื่นด้วยจำนวนที่สอดคล้องกัน

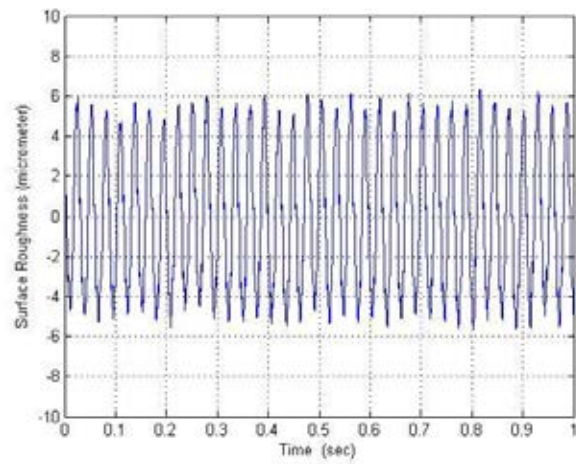
จากทฤษฎีการเกิดเศษโลหะขณะตัด พบว่าเศษโลหะที่เกิดขึ้นขณะตัดชิ้นงานแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ คือ เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous chip) เศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous chip) เศษโลหะแบบต่อเนื่องที่มีการเย็บติดที่คมตัด (Continuous chip with built-up edge) และเศษโลหะที่มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย (Serrated chip) แต่การตัดที่มีคุณภาพและเป็นที่ต้องการคือ เศษโลหะแบบต่อเนื่อง เนื่องจากการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องจะทำให้ได้ผิวชิ้นงานที่ดี และใช้แรงตัดน้อย

จากผลการทดลองเบื้องต้น เมื่อทำการวิเคราะห์เฉพาะความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัต ที่มีลักษณะการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง พบว่าแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นมีลักษณะสอดคล้องกับความขรุขระผิวในรูปแบบข้อมูลเชิงความถี่ โดยที่เงื่อนไขการตัดคือ ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6

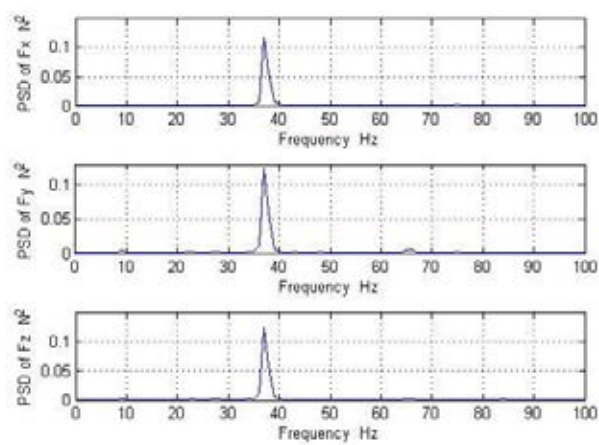
จากรูปที่ 1.5 และ 1.6 แสดงถึงการวิเคราะห์แรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวในโดเมนเวลาตามลำดับ พบว่าความขรุขระผิวของชิ้นงานและแรงตัดพลวัตมีลักษณะการเกิดเป็นรูปคลื่นเช่นเดียวกันที่โดเมนเวลา และจากรูปที่ 1.7 และ 1.8 แสดงการวิเคราะห์แรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนความถี่ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ลักษณะความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่แล้ว ผลที่เกิดขึ้นนั้นแสดงให้เห็นว่ามีความถี่ใกล้เคียง คือ เท่ากับ 36 เฮิร์ตซ์ ดังนั้นมีความเป็นไปได้ว่า แรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้น น่าจะมีความสอดคล้องเช่นเดียวกันกับความขรุขระผิวที่โดเมนความถี่ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตที่โดเมนเวลาโดยการประยุกต์การใช้แรงตัดพลวัตในขณะที่ทำการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจว่าสัญญาณแรงที่เกิดขึ้นมาจากการตัดผิวชิ้นงานที่ต่อเนื่องไม่ได้มาจากการแตกหักของเศษโลหะ



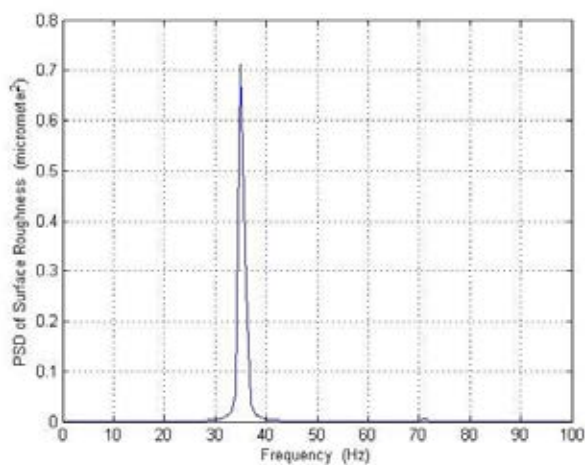
รูปที่ 1.5 การวิเคราะห์แรงตัดในโดเมนเวลา



รูปที่ 1.6 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนเวลา



รูปที่ 1.7 การวิเคราะห์แรงตัดในโดเมนความถี่



รูปที่ 1.8 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนความถี่

จากตารางที่ 1 พบว่าแม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวมาแล้วอย่างกว้างขวาง เช่น ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมกมีด แต่อย่างไรก็ตามในการพิจารณาปัจจัยการตัดนั้นยังไม่ครอบคลุมถึงมุมคายเศษโลหะในขณะที่สำคัญรุนแรงตัดเป็นสัญญาณแรงตัดพลวัต ซึ่งมุมคายเศษโลหะเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลออกของเศษโลหะ และมุมที่ต่างกันก็ส่งผลต่อแรงตัดที่แตกต่างกันด้วย ทำยที่สุดแล้วก็ย่อมส่งผลต่อคุณภาพผิวของชิ้นงานด้วยเช่นกัน

งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกลึงแบบแห้ง ซึ่งเป็นที่นิยมเนื่องจากให้ผลการตัดที่ดีเมื่อใช้เงื่อนไขการตัดเหมาะสมด้วยความเร็วตัดไม่สูงมากจนเกินไป อีกทั้งยังมีความสะดวกเหมาะสำหรับการทำวิจัยเนื่องจากลดผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงาน รวมถึงการตัดแบบแห้งนั้นก่อให้เกิดมลพิษขณะตัดต่ำที่สุด และยังใช้ต้นทุนต่ำที่สุดอีกด้วย [27] โดยงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานกับเงื่อนไขการตัดที่เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สามารถควบคุมได้ คือ ความเร็วในการตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด มุมคายเศษโลหะ และพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ คือแรงตัดพลวัต ซึ่งจะประยุกต์ใช้อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงตัดป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัตที่เกิดขึ้น โดยที่ความสัมพันธ์ของแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวในขณะตัดในโดเมนเวลาสามารถพิสูจน์ได้จากค่าความถี่ที่เกิดขึ้นของแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวที่มีความถี่สอดคล้องกัน โดยผู้วิจัยคาดหวังว่าสมการทำนายความขรุขระผิวที่ได้นี้จะมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น และจะนำไปสู่การพัฒนาของเครื่องจักรกลอัจฉริยะที่พิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น ทำยที่สุดเพื่อเป็นการประกันความเชื่อมั่นของระบบการผลิตอัจฉริยะให้สูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 1 งานวิจัยที่ผ่านมา

อ้างอิง	ตัวแปรตาม	ตัวแปรต้น								วัสดุของชิ้นงาน	ชนิดเม็ดตัด	ข้อจำกัด
		ความเร็วตัด	อัตราการใช้ป้อนตัด	ความลึกตัด	รัศมีจุมุมกัด	มุมคายเศษโลหะ	แรงตัด	การสึกหรอ	อื่นๆ			
[16]	แรงตัด	✓	✓	✓						เหล็กงานร้อน (X38CrMoV5-1)	เซรามิกสแบบผสม	ไม่สามารถทำนายความขรุขระผิวขณะตัดได้
	ความขรุขระผิว	✓	✓	✓								
	แรงตัด						✓					
	ความขรุขระผิว						✓					
[17]	ความขรุขระผิว	ความเร็วรอบ	✓	✓					แอมฟลูจูดการสั้น	อลูมิเนียม (6061T2)		ไม่สามารถทำนายความขรุขระผิวขณะตัดได้
[20]	ความขรุขระผิว(Ra,Rz)	✓	✓	✓	✓		✓(สลิต)			เหล็กกล้าคาร์บอน S45C	มีดคาร์ไบด์เคลือบผิว	ใช้อัตราส่วนแรงป้อนตัดสลิตและแรงตัดหลักสลิต ซึ่งเป็นการเฉลี่ยทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำนาย
[22]	ความขรุขระผิวเฉลี่ย	✓	✓	✓	✓					เหล็กกล้าคาร์บอน S45C	มีดคาร์ไบด์เคลือบผิว	ไม่ได้บูรณาการความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัด อุณหภูมิตัด และแรงตัดสลิตที่เกิดขึ้นเพื่อใช้อธิบายความขรุขระผิวขณะตัด
	อุณหภูมิตัด	✓	✓	✓	✓							
	อัตราส่วนแรงตัดสลิต (Fy/Fz)	✓	✓	✓	✓							
[23]	ความขรุขระผิวเฉลี่ย	✓	✓	✓						เหล็กงานเย็น(AISI:P20)	มีดคาร์ไบด์เคลือบผิว	ไม่สามารถทำนายความขรุขระผิวขณะตัดได้
[24]	ความขรุขระผิวเฉลี่ย	ความเร็วรอบ	✓	✓	✓				ความแข็งแรงชิ้นงาน	เหล็กกล้า AISI 8620 และ อลูมิเนียม6061T	มีดคาร์ไบด์เคลือบผิว	ไม่สามารถทำนายความขรุขระผิวขณะตัดได้
[26]	ความขรุขระผิว(Ra,Rz)	✓	✓	✓	✓	✓	✓(สลิต)			เหล็กกล้าคาร์บอน S45C	มีดคาร์ไบด์เคลือบผิว	แรงตัดสลิตจะเป็นการเฉลี่ยแรงที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำนาย
[27]	ความขรุขระผิว	✓	✓	✓	✓		✓(พลวัต)			เหล็กกล้าคาร์บอน S45C	มีดคาร์ไบด์เคลือบผิว	ใช้อัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัต แต่ไม่ได้คำนึงถึงอิทธิพลของมุมคายเศษโลหะที่แตกต่างกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัด และเงื่อนไขการตัดอื่นๆบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. กระบวนการกลึงปลอกโดยเป็นการตัดแบบแห้ง (Dry Cutting)
2. ทำการทดลองบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น NEXUS 200MY/MSY
3. วัสดุทดสอบในการกลึงคือ เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร
4. เม็ดมีดที่ใช้ตัด เป็นแบบคาร์ไบด์เคลือบผิว (Coated Carbide)
5. ด้ามมีดกลึง (Tool holder) เบอร์ CTGPR 2525M-16N และ WTJNR 2525M-16N
6. ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง ตามตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ
ความเร็วตัด	100 180 และ 260 เมตร/นาที
อัตราป้อนตัด	0.1 0.2 และ 0.3 มิลลิเมตร/รอบ
ความลึกตัด	0.2 0.5 และ 0.8 มิลลิเมตร
รัศมีจมูกมีด	0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร
มุมคายเศษโลหะ	-6 และ 11

7. เซนเซอร์วัดแรง (3-Component Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9121
8. การทดลองจะใช้มีดตัดใหม่ที่มีค่าการสึกหรอไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สมการความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับพื้นที่แรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัด และเงื่อนไขในการตัดอื่นๆบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงอิทธิพลของเงื่อนไขการตัด และพื้นที่แรงตัดพลวัตที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวชิ้นงาน
2. เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการตรวจติดตามความขรุขระผิวในขณะตัดสำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อรองรับระบบการผลิตอัจฉริยะในอนาคต

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาขั้นตอนการใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซี เครื่องขยายสัญญาณ และเครื่องวัดความขรุขระผิว ตลอดจนวิธีการเก็บสัญญาณข้อมูลต่างๆ
2. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดต่างๆที่มีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน
3. กำหนดระดับของปัจจัยและออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบแฟคทอเรียล
4. ทำการทดลองตามเงื่อนไขต่างๆที่กำหนด พร้อมทั้งเก็บสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นด้วยไดนามิเตอร์
5. ทำการวัดค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานที่เกิดจากเงื่อนไขการตัด
6. เปรียบเทียบความถี่ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับแรงตัดพลวัตในขณะตัด ด้วยการวิเคราะห์ความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่
7. หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวชิ้นงานที่เงื่อนไขการตัดต่างๆในโดเมนเวลา
8. ทำการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการความขรุขระผิวที่ได้เทียบกับค่าความขรุขระผิวจริง
9. สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงานวิจัย
10. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

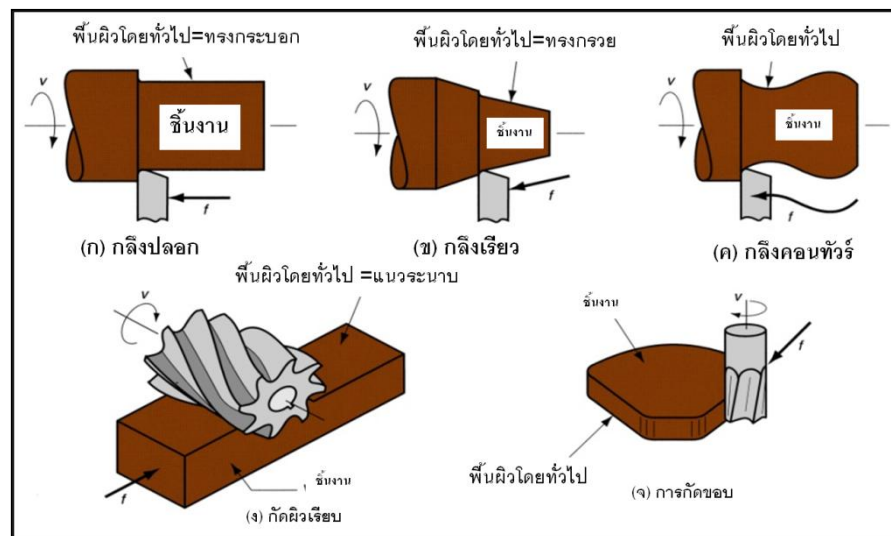
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการตัดเฉือน (Machining Process) [6]

กระบวนการตัดเฉือน เป็นกระบวนการขจัดเนื้อวัสดุออกด้วยเครื่องมือตัดที่มีความคม เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปที่พบจะเป็นการตัดเฉือนโลหะ เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการผลิตทั้งหมด กระบวนการตัดเฉือนถือว่าเป็นกระบวนการที่มีความหลากหลายและให้ความถูกต้องแม่นยำมากที่สุด เช่น กระบวนการหล่อขึ้นรูป สามารถผลิตชิ้นงานรูปร่างหลากหลายได้ แต่มักขาดความเที่ยงตรงแม่นยำของขนาด เป็นต้น

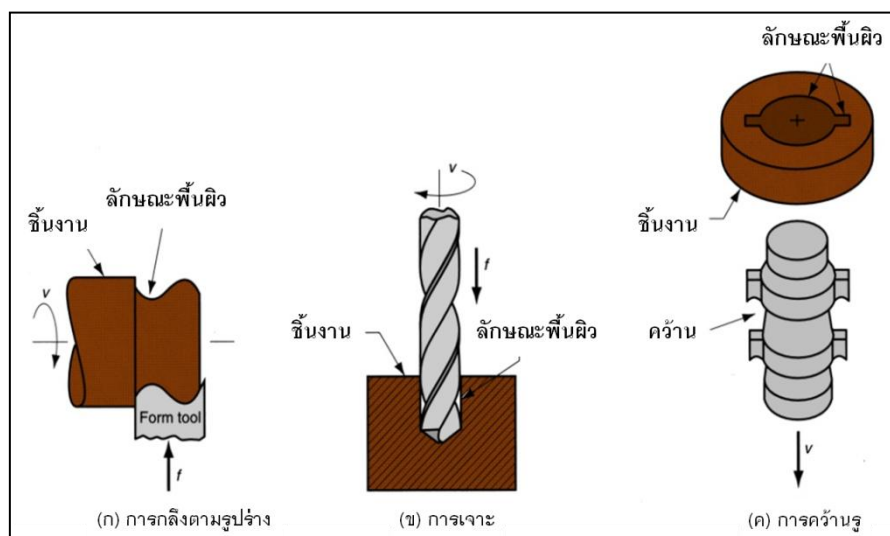
กระบวนการตัดเฉือนสามารถแบ่งประเภทตามรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงานตัด ดังนี้

1. รูปร่างชิ้นงานเกิดจากทิศทางการป้อนของเครื่องมือตัด



รูปที่ 2.1 รูปร่างชิ้นงานเกิดจากทิศทางการป้อนของเครื่องมือตัด

2. รูปร่างชิ้นงานเกิดจากรูปร่างของเครื่องมือตัด

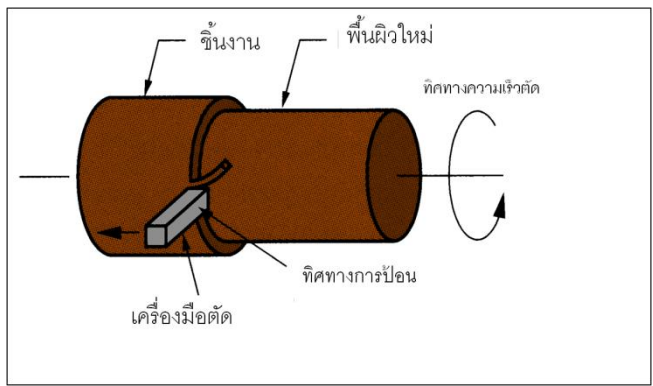


รูปที่ 2.2 รูปร่างชิ้นงานเกิดจากรูปร่างของเครื่องมือตัด

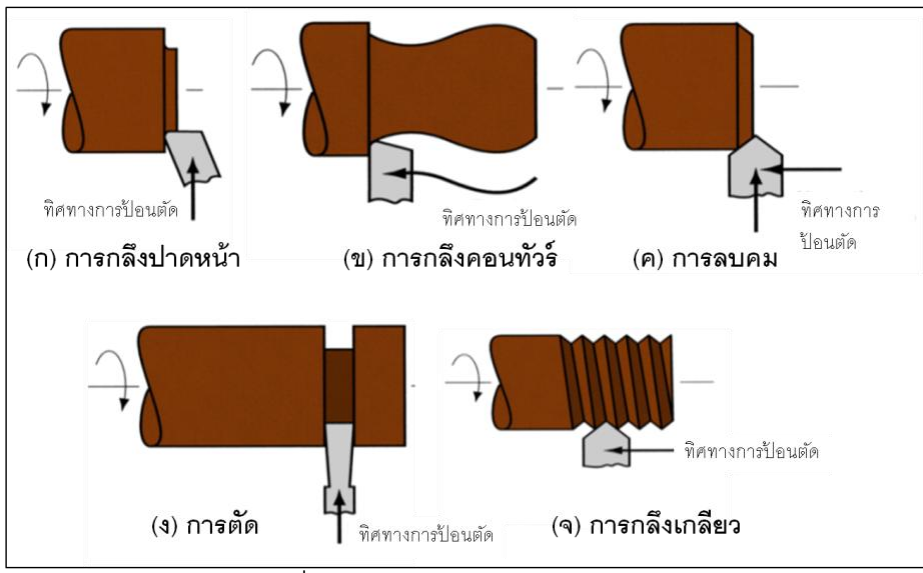
2.2 กระบวนการกลึง [6]

กระบวนการกลึงเป็นกระบวนการตัดซึ่งใช้มีดตัดคมตัดเดียว (Single cutting edge) ในการขจัดเนื้อวัสดุออกจากผิวของชิ้นงานทรงกระบอกที่กำลังหมุนอยู่ โดยเครื่องจักรที่ใช้ปฏิบัติการกลึง เรียกว่าเครื่องกลึง (Lathe) กระบวนการกลึงแบ่งได้หลายประเภท เช่น

1. การกลึงปาดหน้า (Facing) มีดกลึงถูกป้อนเข้าไปในแนวรัศมีชิ้นงาน
2. การกลึงคอนทัวร์ (Contour turning) ทิศทางการป้อนมีดเคลื่อนที่ตามแนวเส้นคอนทัวร์ที่ถูกตั้งรูปแบบไว้ ไม่ได้เคลื่อนที่ขนานกับแกนในการหมุนชิ้นงาน
3. การลบคม (Chamfering) คือ การใช้คมตัดของมีดกลึงลบมุมที่ขอบของชิ้นงานออก
4. การตัด (Cutoff) ทิศทางการเคลื่อนที่ของมีดตัดถูกป้อนเข้าไปภายในชิ้นงานที่กำลังหมุนอยู่ และสามารถตัดชิ้นงานให้ขาดออกจากกันได้
5. การกลึงเกลียว (Threading) คมตัดเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงขนานกับชิ้นงานที่หมุนและใช้อัตราการป้อนตัดที่มาก

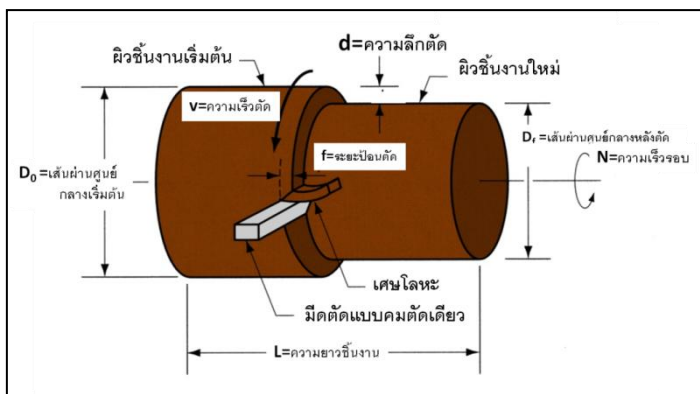


รูปที่ 2.3 กระบวนการกลึง



รูปที่ 2.4 กระบวนการกลึงแบบต่างๆ

2.2.1. เงื่อนไขของการตัดในกระบวนการกลึง (Cutting Conditions in turning)



รูปที่ 2.5 เงื่อนไขของการตัดในกระบวนการกลึง [6]

ความเร็วรอบในกระบวนการกลึงมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการตัดที่พื้นผิวของชิ้นงาน
ทรงกระบอกดังสมการที่ 2.2-1

$$N = \frac{v}{\pi D_0} \quad (2.2-1)$$

โดยที่ N (Rotational Speed) = ความเร็วรอบในการหมุน (รอบ/นาที)
v (Cutting Speed) = ความเร็วในการตัด (เมตร/นาที หรือ ฟุต/นาที)
D₀ (Diameter of workpiece) = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานเริ่มต้น (เมตร หรือ ฟุต)
การกลึงชิ้นงานเป็นการขจัดเนื้อวัสดุชิ้นงานออก ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน
ลดลงจาก D₀ เหลือ D_f โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดลงแสดงถึงความลึกในการตัด (depth of
cut, d) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.2-2

$$D_0 - D_f = 2d \quad (2.2-2)$$

ส่วนอัตราการป้อนตัดโดยทั่วไปจะแสดงในหน่วย มิลลิเมตร/รอบ หรือนิ้ว/รอบ และ
สามารถที่จะเปลี่ยนเป็นอัตราเร็วเชิงเส้นในหน่วย มิลลิเมตร/นาที หรือนิ้ว/นาทีได้ดังสมการที่ 2.2-3

$$f_r = N \times f \quad (2.2-3)$$

โดยที่ f_r (feed rate) = อัตราป้อนตัดมีดเชิงเส้น (มิลลิเมตร/นาที หรือนิ้วต่อนาที)
f (feed) = อัตราการป้อนมีด (มิลลิเมตร/รอบ หรือนิ้วต่อรอบ)
เวลาที่ใช้ในการตัดชิ้นงานจากด้านหนึ่งของชิ้นงานไปอีกด้านหนึ่งจะสามารถคำนวณได้
จากสมการที่ 2.2-4

$$T_m = \frac{L}{f_r} \quad (2.2-4)$$

โดยที่ T_m (Time of actual machining) = เวลาที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน (นาที)
L (Length) = ความยาวของชิ้นงาน (มิลลิเมตร หรือ นิ้ว)
ปริมาตรของวัสดุชิ้นงานที่ถูกกลึงออกไปต่อหน่วยเวลาจะแสดงในรูป อัตราการกำจัดเนื้อ
วัสดุ (Material Removal Rate, MRR) มีหน่วยเป็น ลบ.มม./นาที หรือ ลบ.นิ้ว/นาที จะคำนวณได้
จากสมการที่ 2.2-5

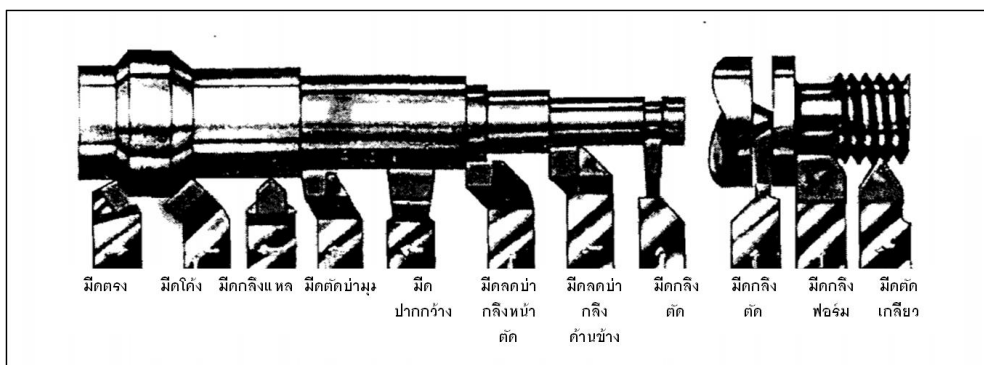
$$MRR = v \times f \times d \quad (2.2-5)$$

2.2.2. มีดกลึง (Cutting tool) [7]

มีดกลึง คือเครื่องมือที่ใช้ในการตัดเฉือนชิ้นงานให้เป็นรูปทรงต่างๆในกระบวนการกลึง

1) มีดกลึงสำหรับงานทั่วไป โดยปกติจะเป็นมีดกลึงที่ทำจากเหล็กกล้ารอบสูง (High Speed Steel) ที่นำมาลับคมตัดให้มีรูปร่างต่างๆ เนื่องจากงานกลึงมีหลากหลายประเภท เช่น งาน

กลึงปาดหน้า งานกลึงปอก งานกลึงตัด งานกลึงเกลียว งานกลึงเซาะร่อง เป็นต้น ดังนั้นมีดที่ใช้กลึงจึงต้องมีรูปร่างหลายลักษณะ ซึ่งมีชื่อเรียกและตำแหน่งของคมตัด ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 มีดกลึงสำหรับงานทั่วไป [7]

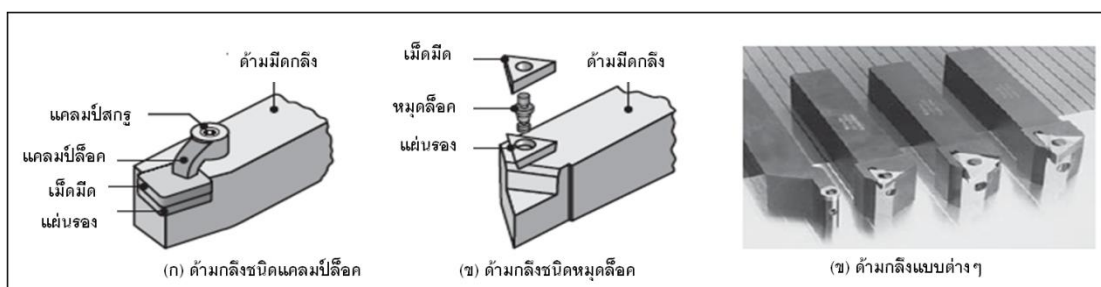
2) เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์ ปัจจุบันมีดกลึงได้พัฒนาให้มีการใช้งานที่สะดวก มีการปรับปรุงคุณภาพให้สามารถทนต่อการสึกหรอสูงและยืดอายุการใช้งานให้นานมากยิ่งขึ้น เรียกว่าเม็ดมีดกลึงแบบคาร์ไบด์ ซึ่งต่อมาถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะสำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซี



รูปที่ 2.7 เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์ [3]

2.2.3. ด้ามมีดกลึง [7]

การใช้เม็ดมีดกลึงแบบคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นเม็ดมีดที่มีลักษณะดังรูป 2.8 จำเป็นต้องใช้ด้ามจับที่มีการออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อให้มีความเหมาะสมกับลักษณะของเม็ดมีด



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบด้ามมีดกลึง [3]

2.3. การเกิดเศษโลหะ

2.3.1 แบบจำลองการเกิดเศษโลหะ [10]

เมื่อพิจารณาการตัด ตามแบบจำลองอย่างง่ายในดังแสดงในรูปที่ 2.9 พบว่าการตัดวัสดุชิ้นงาน จะรับแรงกระทำจากเครื่องมือตัดผ่านทางคมตัด ซึ่งจะมีผลให้ชิ้นงานเกิดความเค้นขึ้นในหลายลักษณะ

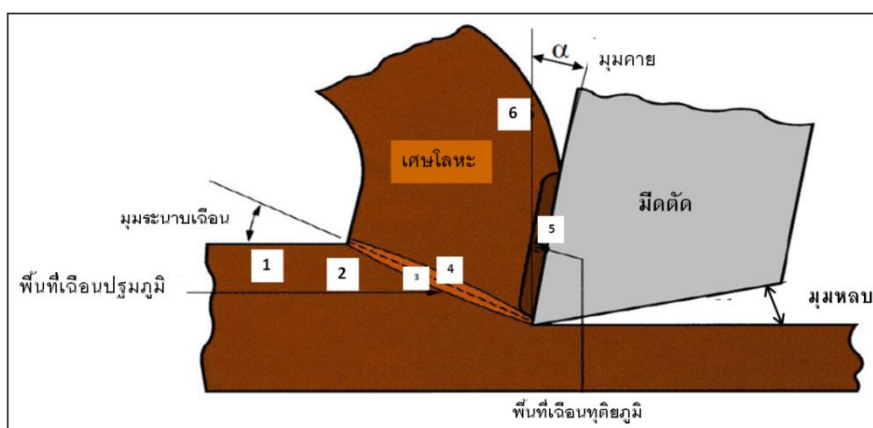
บริเวณที่ 1 เป็นบริเวณที่วัสดุยังไม่เกิดการเปลี่ยนรูป เนื่องจากยังไม่มีแรงมากระทำต่อเกรนของวัสดุงาน ซึ่งพบว่าจะเป็บริเวณการตัดที่เม็ดเกรนของวัสดุงาน ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

บริเวณที่ 2 เป็นบริเวณที่โลหะหรือวัสดุงานเกิดการเปลี่ยนรูป เมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุ แต่จะสามารถกลับสู่สภาพเดิมได้ เนื่องจากยังไม่ถึงจุดคราก (Yield Point) และจุด Plastic deformation ซึ่งเป็นจุดที่ 3

บริเวณที่ 3-4 จะเกิดความเค้นที่จุดนี้มากขึ้น และเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรจนกลายเป็นเศษตัดที่บริเวณนี้ เม็ดเกรนของวัสดุเกิดการเคลื่อนตัวในแนวตัดเฉือน (Shear Plan) เนื่องจากการเปลี่ยนรูปไปของวัสดุที่บริเวณนี้ และความแข็งจะมากขึ้น ซึ่งเรียกว่าบริเวณการเฉือน (Shear zone)

บริเวณที่ 5 เลยจุดที่เกิดการเคลื่อนตัว (Slip) ของเกรนในแนวเฉือนที่บริเวณการเฉือนไปแล้ว โดยบริเวณนี้เกรนของวัสดุจะเคลื่อนตัวอย่างถาวร นอกจากความแข็งจะมากขึ้นแล้ว ความร้อนหรืออุณหภูมิก็จะสูงขึ้นด้วย และวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปมากขึ้น

บริเวณที่ 6 เกรนส่วนใหญ่ที่เกิดการเปลี่ยนรูปไปของวัสดุกลายเป็นเศษที่ได้จากการตัดเฉือน ทำให้เกิดความแตกต่างกันด้านคุณสมบัติทางฟิสิกส์มากขึ้น และความแข็งในเศษตัดมากขึ้น



รูปที่ 2.9 แบบจำลองของการตัด [6]

รูปร่างของมีดตัดสามารถแสดงได้ด้วยมุม 2 มุมคือ มุมคาย (Rake angle , α) และมุมหลบ (Clearance angle) โดยมุมคายจะเป็นตัวกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของเศษกลึงโลหะ ส่วนมุมหลบจะเป็นมุมระหว่างผิวหลบ (flank face) กับผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงแล้ว โดยในระหว่างการตัด คมตัดของมีดกลึงจะถูกตั้งไว้ที่ตำแหน่งที่แน่นอนในระยะที่ต่ำกว่าพื้นผิวของชิ้นงาน รูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับความลึกตัด (t_1) ในขณะที่เศษโลหะกำลังก่อตัวตามระนาบเฉือน ความหนาของเศษโลหะจะเพิ่มขึ้นเป็น t_2 อัตราส่วนระหว่าง t_1 กับ t_2 เรียกว่า อัตราส่วนความหนาของเศษโลหะ (Chip thickness ratio , r) ซึ่งอาจเขียนได้ดังสมการที่ 2.3-1 และอัตราส่วนนี้จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ เนื่องจากความหนาของเศษโลหะหลังจากการตัดจะมากกว่าความหนาก่อนการตัดเสมอ

$$r = \frac{t_1}{t_2} \quad (2.3-1)$$

และความยาวของระนาบเฉือนสามารถคำนวณได้จาก

$$l = \frac{t_1}{\sin \phi} = \frac{t_2}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (2.3-2)$$

โดยที่	l	=	ความยาวระนาบเฉือน (มิลลิเมตร)
	t_1	=	การป้อน หรือความลึกในการตัดแล้วแต่กรณี (มิลลิเมตร)
	t_2	=	ความหนาของเศษโลหะ (มิลลิเมตร)
	ϕ	=	มุมระนาบเฉือน (องศา)
	α	=	มุมคายเศษโลหะ (องศา)

จากสมการที่ 2.3-2

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (2.3-3)$$

จากการที่

$$\cos(\phi - \alpha) = \cos \phi \cos \alpha + \sin \phi \sin \alpha$$

แทนค่าลงในสมการที่ 2.3-3 แล้วจัดใหม่สมการใหม่จะได้

$$\tan \phi = \frac{(t_1/t_2) \cos \alpha}{1 - (t_1/t_2) \sin \alpha} \quad (2.3-4)$$

จากสมการที่ 2.3-1 แทนค่าลงในสมการที่ 2.3-4 สามารถเขียนได้เป็น

$$\tan \phi = \frac{r_a \cos \alpha}{1 - r_a \sin \alpha} \quad (2.3-5)$$

จากสมการที่ 2.3-5 พบว่า มุมคายเศษวัสดุ เป็นตัวแปรที่มีผลต่อมุมระนาบเฉือน ในกรณีที่มุมคายเศษวัสดุมีค่ามากขึ้น จะมีผลให้ความหนาของเศษวัสดุมีค่าลดลง และมุมระนาบเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าของมุมระนาบเฉือนสามารถใช้คำนวณค่าที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง คือ พื้นที่ระนาบเฉือนได้ดังนี้

$$A_s = \frac{t_1 b}{\sin \phi} \quad (2.3-6)$$

โดยที่ A_s = พื้นที่ระนาบเฉือน (ตารางมิลลิเมตร)
 b = ความกว้างของการตัด (มิลลิเมตร)

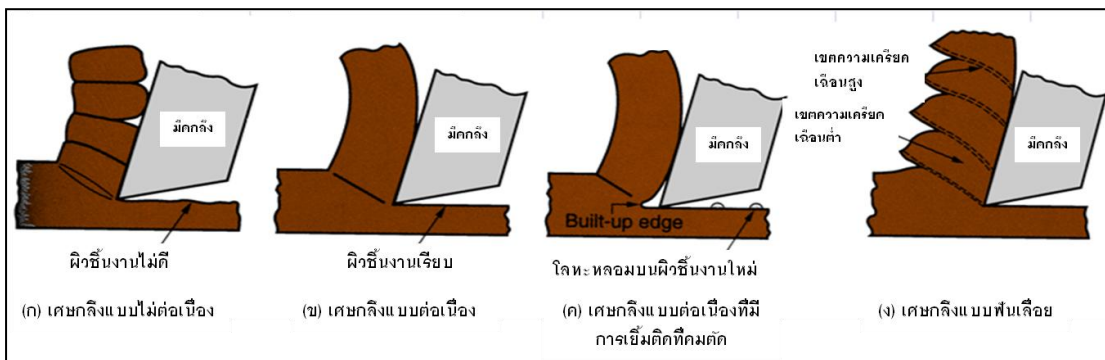
2.3.2 อิทธิพลของเงื่อนไขการตัดต่อการแตกหักของเศษโลหะ

การเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องมักจะพบในการกลึงชิ้นงานจำพวก เหล็กกล้าผสมเหล็กเหนียว และพวกลูมิเนียม ซึ่งเป็นผลมาจาก อัตราป้อนและความเร็วตัด รวมทั้งมีแนวโน้มผลของความลึกการตัด มุมคายเศษตัดและมุมตั้งสันคมมีดตัด

- เมื่ออัตราการป้อนเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้เกิดเศษตัดงอมากขึ้นและหักง่ายขึ้น
- เมื่อใช้ความเร็วตัดสูงขึ้น ทำให้การหักเศษตัดเลวลงและทำให้เศษตัดมีโอกาสเป็นเส้นยาวหรือขดยุ่ง
- เมื่อเพิ่มความลึกการตัดให้มากขึ้น ทำให้การหักเศษตัดง่ายขึ้น
- เมื่อมุมคายเศษน้อยลงจนมุมมีค่าเป็นลบ ส่วนมากแล้วจะทำให้การหักเศษดีขึ้น

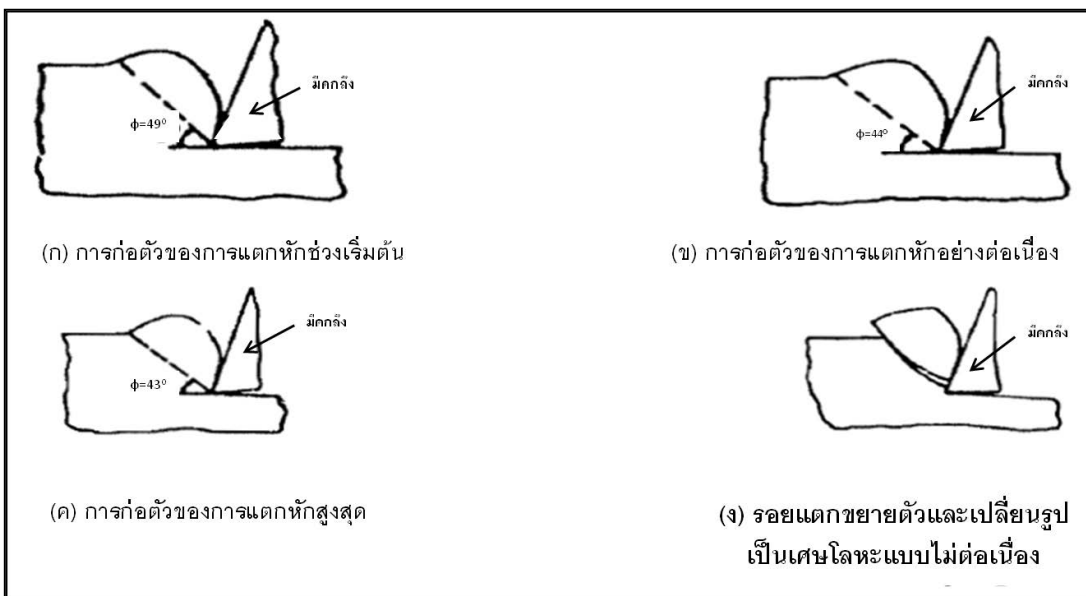
2.3.3 การเกิดเศษตัดและลักษณะเศษตัด [9, 10]

ลักษณะของเศษตัด หมายถึงลักษณะรูปร่างของเศษตัดที่หลังจากจบสิ้นการตัดเฉือน ไหลหลุดพ้นจากผิวคายเศษแล้ว ซึ่งเป็นผลมาจาก อัตราการป้อนตัดและความเร็วตัด รวมทั้งยังเป็นผลมาจากความลึกตัด มุมคายเศษโลหะและมุมตั้งสันคมมีดตัด อย่างไรก็ตามสภาพการกลึงอาจทำให้เกิดเศษโลหะจากการกลึงเป็นอย่างใดอย่างหนึ่งใน 4 แบบหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 รูปแบบหลักของการเกิดเศษโลหะในการตัด [6]

1) เศษโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Chip)



รูปที่ 2.11 การเกิดเศษโลหะไม่ต่อเนื่อง

เศษโลหะชนิดนี้เกิดขึ้นเมื่อวัสดุชิ้นงานเป็นวัสดุเปราะ เช่น เหล็กหล่อ ทองเหลือง ซึ่งเป็นวัสดุที่มีส่วนผสมของสังกะสีอยู่มาก โดยที่กลไกของการเกิดเศษโลหะชนิดนี้จะแตกต่างจากกลไกของการเกิดเศษโลหะเมื่อวัสดุชิ้นงานเป็นวัสดุเหนียว เนื่องจากวัสดุเปราะมีคุณสมบัติที่ไม่สามารถรับความเค้นเฉือนที่บริเวณเขตการแปรรูปหลัก จึงเกิดการแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) (ข) (ค) และ (ง)

เนื่องจากช่วงเวลาที่เศษโลหะสัมผัสกับเครื่องมือตัดเป็นช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นส่วนมากแล้วความร้อนที่เกิดขึ้นจึงติดไปกับเศษโลหะ อุณหภูมิของเครื่องมือตัดจึงต่ำลง ส่งผลให้อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดสูงขึ้น

2) เศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chips)

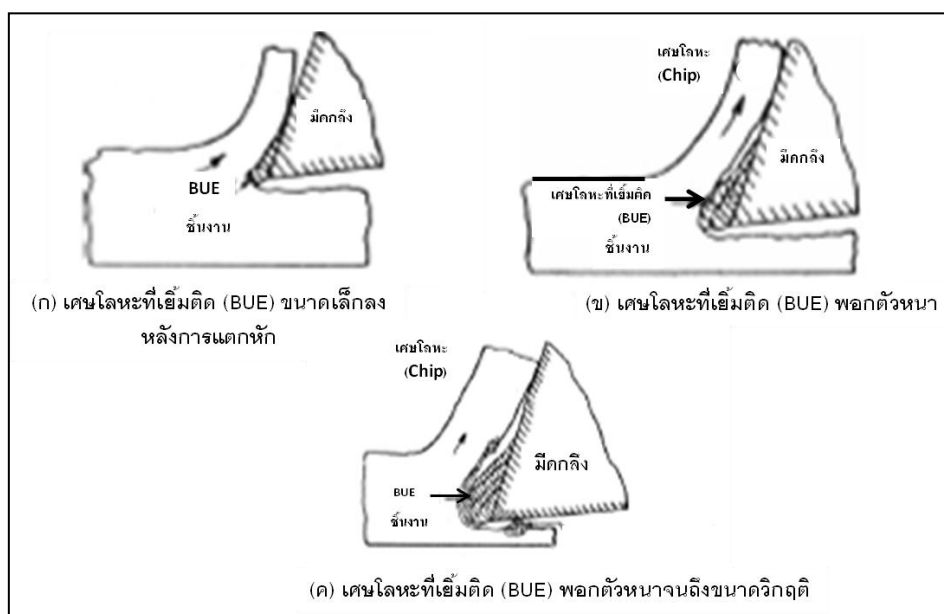
รูปที่ 2.10 (ข) เกิดขึ้นในกรณีที่วัสดุชิ้นงานเป็นวัสดุเหนียว เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ อลูมิเนียมผสม และสแตนเลส (Stainless) ลักษณะของเศษโลหะจะเป็นเส้นยาว เคลื่อนที่สัมผัสกับผิวคายเศษโลหะเป็นระยะทางเล็กน้อย จากนั้นก็จะเคลื่อนที่พื้นผิวคายเศษโลหะออกไป การเปลี่ยนรูปของเศษโลหะเกิดขึ้นในสองบริเวณ คือ เขตการแปรรูปหลัก (Primary Deformation Zone) หรือตามสมมติฐานก็คือ ระบายเฉือน เพราะเนื่องจากการแปรรูปจากวัสดุชิ้นงานกลายเป็นเศษโลหะเกิดขึ้นเพราะการเฉือน บริเวณที่สองที่เกิดการแปรรูปโดยความดันระหว่างผิวคายเศษ

โลหะกับเศษโลหะ ส่วนที่สัมผัสกับผิวคายเศษโลหะ เรียกว่า เขตการแปรรูปรอง (Secondary Deformation Zone)

เศษโลหะแบบต่อเนื่องนี้ หากไม่สามารถควบคุมได้ จะยากต่อการทำงานและเป็นอันตรายอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการกลึงที่ให้เศษโลหะที่มีความยาวมากอย่างอิสระ โดยจะเกิดการม้วนตัวพันรอบชิ้นงาน และมีดกลึง รวมถึงก่อให้เกิดอันตรายกับผู้ควบคุม เนื่องจากอาจเกิดการเหวี่ยงของเศษโลหะยาวๆ ที่มีร้อนสูง ทั้งเพื่อความปลอดภัยและง่ายต่อการควบคุมคงต้องมีการทำให้เศษโลหะขาดลงบ้างด้วยการใช้มีดกลึงตัดที่มีตัวหักเศษโลหะให้ขาดเป็นช่วงสั้นๆ หรือที่เรียกว่า chip breaker

3) เศษโลหะต่อเนื่องที่มีการเชื่อมติดที่คมตัด (Continuous Chips with built-up Edge)

รูปที่ 2.10 (ค) เนื่องจากขณะเกิดการตัดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเศษโลหะและเครื่องมือตัดมีอุณหภูมิสูงประกอบกับความดันขนาดมหึมาในบริเวณนั้น ทำให้มีเนื้อบางส่วนของเศษโลหะเชื่อมติดอยู่ที่บริเวณคมตัดและผิวคายเศษโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) มีผลให้ความเสียดทานในบริเวณนั้นเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งขัดขวางการเคลื่อนที่ของเศษโลหะ จึงเกิดการพอกตัวเพิ่มของส่วนที่เชื่อมติดรูปที่ 2.12 (ข) เมื่อส่วนนี้พอกตัวเพิ่มสูงขึ้นจนถึงขนาดที่เรียกว่า ขนาดวิกฤต (Critical Size) รูปที่ 2.12 (ค) ชิ้นส่วนนี้ก็หลุดออกมาซึ่งบางส่วนจะติดไปกับเศษโลหะและบางส่วนจะฝังตัวอยู่บนผิวสำเร็จของชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้คุณภาพของผิวสำเร็จแย่ง



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการเชื่อมติดที่คมตัด











การเย็บติดที่คมตัดจะเกิดเป็นวัฏจักร กล่าวคือ เกิดขึ้นแล้วหลุดออกไปแล้วก็เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากส่วนที่หลุดออกไปนี้จะมีเนื้อของเครื่องมือตัดติดออกไปด้วย การเพิ่มความเร็วตัดให้สูงขึ้นมีผลให้ส่วนที่เย็บติดอ่อนตัวลง จึงทำให้ขนาดวิกฤติเล็กลงด้วย ซึ่งเมื่อเพิ่มความเร็วตัดขึ้นสูงเพียงพอ จะไม่พบส่วนที่เย็บติดนี้

4) เศษโลหะแบบที่มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย (Serrated chips)

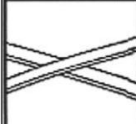


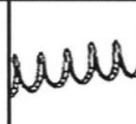
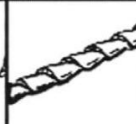

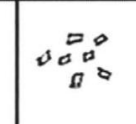

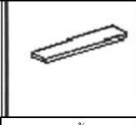
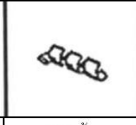

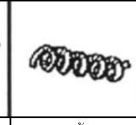
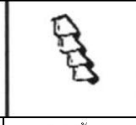

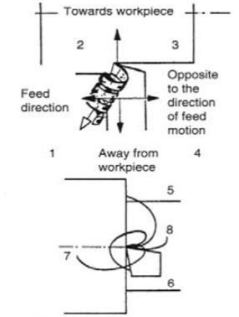
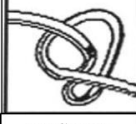
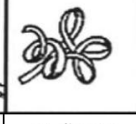
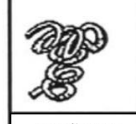

เศษโลหะในลักษณะนี้จะมีลักษณะเป็นแบบกึ่งต่อเนื่องและมีรูปร่างคล้ายฟันเลื่อย ซึ่งเกิดจากการเกิดเศษโลหะแบบเป็นวัฏจักรของการสับเปลี่ยนกันระหว่างความเครียดเฉือนที่สูงและความเครียดเฉือนที่ต่ำ โดยพื้นที่ส่วนใหญ่จะมีความเครียดเฉือนต่ำ และพื้นที่ส่วนน้อยเป็นบริเวณที่มีความเครียดเฉือนสูงดังรูปที่ 2.10 (ง) การเกิดเศษโลหะลักษณะนี้จะเกิดกับวัสดุที่มีความสามารถในการต้านทานอุณหภูมิต่ำพร้อมทั้งมีความแข็งลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีความร้อนเกิดขึ้น เช่น ไทเทเนียม เป็นต้น

จากรูปแบบเศษโลหะที่กล่าวมาข้างต้นทั้ง 4 แบบนั้นเป็นรูปแบบที่เกิดจากการตัดวัสดุที่แตกต่างกันโดยไม่ผ่านตัวหักเศษ (Chip Breaker) แต่รูปแบบของเศษโลหะที่จะกล่าวถึงในงานวิจัยนี้หมายถึงเศษโลหะที่ผ่านการตัดแล้วไหลออกมาโดยไม่คำนึงถึงตัวหักเศษและเกิดการแตกหักของเศษโลหะ 2 แบบคือ เศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chip) และ เศษโลหะแบบแตกหัก (Broken Chip)

จากรูปที่ 2.13 แสดงรูปแบบของเศษโลหะแบบต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จัดให้ลักษณะเศษโลหะตามรูปหมายเลข 1-3 เป็นเศษโลหะแบบต่อเนื่อง (Continuous Chip) และลักษณะเศษโลหะตามรูปหมายเลข 4-10 เป็นเศษโลหะแบบแตกหัก (Broken Chip) อ้างจากงานวิจัยก่อนหน้า [23] การจำแนกเศษโลหะ กำหนดให้เศษโลหะที่มีความยาวมากกว่า 5 เซนติเมตรเป็นเศษโลหะแบบต่อเนื่อง และเศษโลหะที่มีความยาวน้อยกว่า 5 เซนติเมตรเป็นเศษโลหะแบบแตกหัก

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
									
ริบบิ้น	ม้วนพัน	เกลียว	เฮลิคซ์	เกลียว ยาว	เกลียว สั้น	ม้วน โค่น	ม้วนวง	โค้งตัวซี	หยิก หยอย

รูปที่ 2.13 เศษโลหะแบบต่างๆ

1.ริบมัน	2.เกลียว	3.ม้วนเป็นวง	4.เชลิกซ์	5.โคม	6.โค้ง	7.ชั้นเล็ก	8.เข็ม
							
1.1 ยาว	2.1 ยาว	3.1 ม้วนเรียบ	4.1 ยาว	5.1 ยาว	6.1 หยิกหยอย		
							
1.2 สั้น	2.2 สั้น	3.2 ม้วนโคม	4.2 สั้น	5.2 สั้น	6.2 แดกหัก		
							
1.3 ม้วนพัน	2.3 ม้วนพัน		4.3 ม้วนพัน	5.3 ม้วนพัน			

รูปที่ 2.14 ประเภทของรูปแบบของเศษโลหะตามมาตรฐาน ISO 3685-1993 [3]

นอกจากนี้ยังมีการจัดประเภทของรูปแบบของเศษโลหะที่เกิดจากกระบวนการตัดโลหะตามมาตรฐาน ISO 3685-1993 โดยขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเศษโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งแบ่งเป็น 8 กลุ่มตามรูปร่างของเศษโลหะ โดยในแต่ละกลุ่มจะถูกแบ่งย่อยตามขนาด (ยาว, สั้น) และตามลักษณะทางกายภาพ (พันกัน, เป็นชิ้นเล็กๆ) อีกด้วย ทั้งนี้เศษโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงอาจเป็นแบบริบมัน, แบบหยิกหยอย หรือแบบเกลียว เป็นต้น

2.4. ทฤษฎีความขรุขระผิว [11]

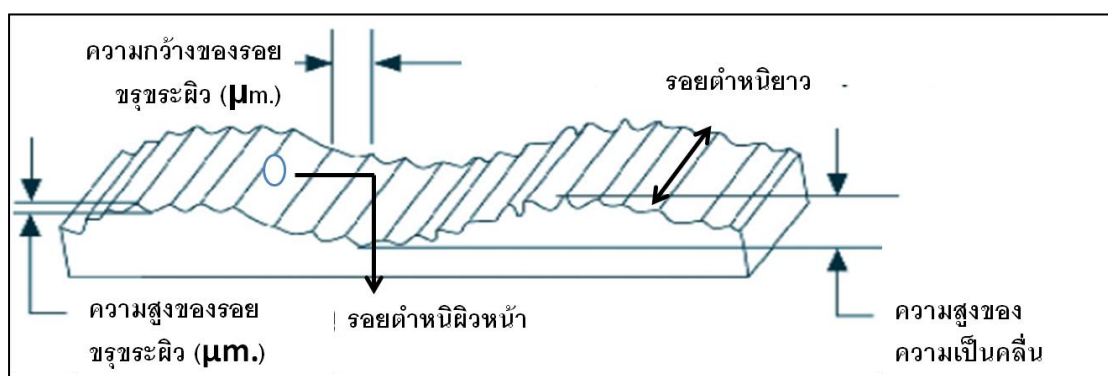
ความขรุขระ (Roughness) เป็นคุณสมบัติของชิ้นงานซึ่งไม่ขึ้นกับชนิดของวัสดุ หากแต่ขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้ในการขัดผิวหน้า (Surface Finish) เกิดเป็นลวดลายต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นเส้นตรง เส้นโค้ง หรืออาจเป็นลวดลายที่มีระเบียบหรือไม่ระเบียบก็ได้ ในการพิจารณาพื้นผิววัสดุจะดูจากปริมาณความกว้าง (Roughness Width) และความสูง (Roughness Height) ของความขรุขระผิว

การวิเคราะห์ความขรุขระผิวหน้าของชิ้นงาน จะต้องทำการแยกลักษณะความเป็นคลื่น (waviness height) ที่เป็นความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง ซึ่งมีสาเหตุมาจากความไม่ถูกต้องทางเรขาคณิตของกรรมวิธีการผลิตผิวหน้า โดยจะมีขนาดใหญ่กว่า roughness sampling length ประมาณ 1 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับระนาบอ้างอิงดัง แสดงในรูปที่ 2.15

การแยกความเป็นคลื่น (waviness height) ออกจากความขรุขระผิว สามารถทำได้โดยการจำกัดการทดสอบของผิวหน้าที่ถูกตกแต่งมาด้วยช่วงความยาวหนึ่ง ซึ่งจะไม่นับความยาวคลื่นที่ยาว ดังนั้นจะมีเฉพาะความขรุขระผิวเท่านั้น ความยาวคลื่นสูงสุดที่ถูกพิจารณาเราเรียกว่าความยาวคลื่นตัดออก (Cut-off wavelength) ซึ่งกำหนดเป็นมาตรฐานในสหราชอาณาจักรโดย B.S1134 ให้มีค่าเท่ากับ 0.25 มม. 0.8 มม. และ 2.5 มม. ซึ่งการเลือกใช้ค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวหน้าที่จะทำการทดสอบ นอกจากนี้คุณภาพผิวชิ้นงานสามารถวิเคราะห์ค่าอื่นๆ ได้ดังนี้

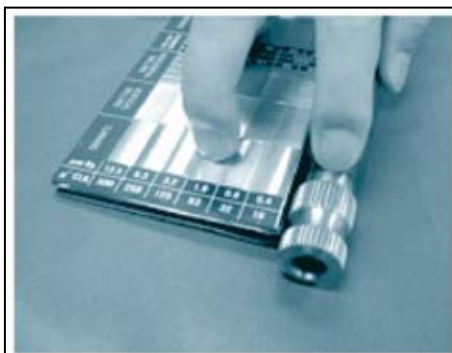
รอยตำหนิยาว (Lay) เป็นรอยตำหนิ หรือรอยทางเดินของเครื่องมือตัด ซึ่งเกิดขึ้นบนพื้นผิวระหว่างกระบวนการตัดเฉือน ทิศทางที่เกิดขึ้นอาจเป็นได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้

ตำหนิผิวหน้า (Surface Flaw) เป็นรอยตำหนิเล็กๆ บนสันของยอด เช่น รอยร้าว โพรงอากาศ ที่มีลักษณะเกิดขึ้นแบบสุ่ม ซึ่งไม่ควรนำมาพิจารณาในการคำนวณความขรุขระผิวชิ้นงาน



รูปที่ 2.15 ลักษณะของพื้นผิว

ความขรุขระของพื้นผิวชิ้นงานมีผลต่อคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการทำงานของชิ้นงานนั้นๆ เช่น ลูกสูบที่ผิวด้านในขรุขระมากจะทำให้เกิดการเสียดสีขณะใช้งาน ทำให้ต้องใช้แรงในการขับเคลื่อนมากขึ้น การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความร้อนสูง กระฉกและเลนส์ชนิดต่างๆ โดยเฉพาะที่ใช้ในการทำแว่นตาจำเป็นต้องมีความเรียบสูง เพื่อให้แสงสามารถสะท้อนและลอดผ่านได้โดยปราศจากการกระเจิงของแสง หรือเกิดขึ้นน้อยที่สุด เพื่อให้การมองผ่านเลนส์เป็นไปโดยสมบูรณ์



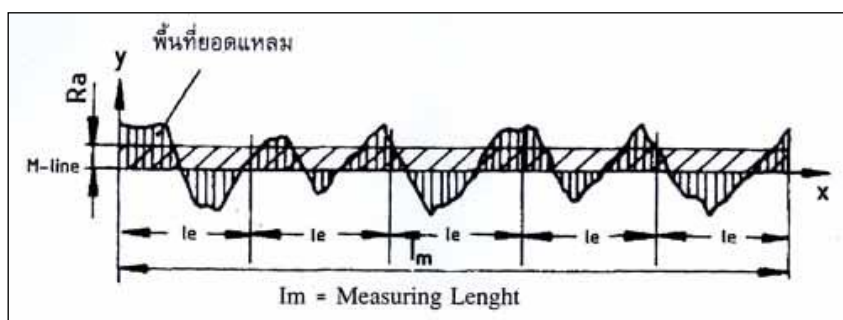
รูปที่ 2.16 การวัดความขรุขระโดยใช้นิวส์ัมผัสเปรียบเทียบ [11]

วิธีการวัดความขรุขระมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ในระดับอุตสาหกรรมตรวจสอบความขรุขระของผลิตภัณฑ์โดยดูด้วยตา หรือใช้นิวส์ัมผัสเปรียบเทียบกับความขรุขระมาตรฐานดังรูปที่ 2.16 การตรวจสอบวิธีนี้พบว่ามีผลผิดพลาดสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากผู้ตรวจสอบ สำหรับการวัดที่ต้องการความถูกต้องสูงขึ้น สามารถทำได้โดยใช้เครื่องสไตลัส อินสทรูเมนต์ (Stylus Instrument) ซึ่งประกอบด้วยหัววัดที่ต่อกับตัวแปลงสัญญาณ (Transducer) ลากไปบนผิวชิ้นงาน ซึ่งสัญญาณเชิงกลจะถูกแปลงสัญญาณไฟฟ้าแล้วนำไปคำนวณเป็นค่าความขรุขระผิว

2.4.1 การวัดความขรุขระผิว

1) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย

ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (Average Roughness, Ra) หมายถึง ค่าความขรุขระผิวที่หาได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลาง ทหารด้วยความยาวเฉลี่ย (Lm) มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร การวัดค่าความขรุขระผิวแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การวัดค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย Ra

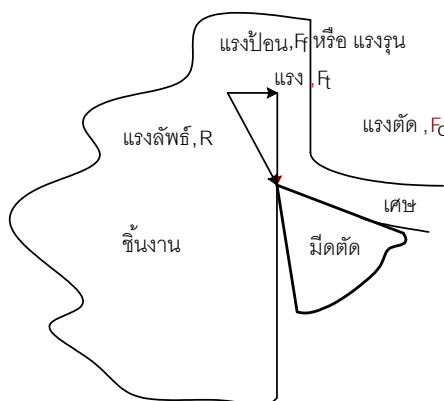
2) ค่าความขรุขระชิ้นงานสูงสุด

ค่าความขรุขระชิ้นงานสูงสุด (Rz) หมายถึง ค่าความหยาบผิวซึ่งหาได้จากการวัดทดสอบเป็นช่วงเท่า ๆ แล้วนำค่าที่ได้มารวมกันหารเป็นค่าเฉลี่ย โดยที่ค่าของ Rz มีหน่วยเป็นไมโครเมตร

2.5. แรงในการตัด [10]

2.5.1. แรงบนคมตัด

แรงบนคมตัด หมายถึงแรงที่กระทำที่คมตัดของเครื่องมือตัดขณะเกิดการตัด ในเบื้องต้นนี้จะใช้แบบจำลองของการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) ในการวิเคราะห์เนื่องจากทำให้ระบบของแรงบนคมตัดมีเพียง 2 มิติเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ จากรูปที่ 2.18 พบว่าแรงลัพธ์ (Resultant force) สามารถแยกออกเป็น 2 องค์ประกอบย่อย คือ แรงในทิศขนานกับทิศของความเร็วตัด เรียกว่า แรงตัด (Cutting force) และแรงในทิศขนานกับทิศของการป้อน เรียกว่าแรงป้อน (Feed force) ซึ่งแรงตัด และแรงป้อนนี้สามารถวัดได้โดยใช้อุปกรณ์วัดแรงตัด ทำให้สามารถคำนวณแรงลัพธ์ได้จากสมการที่ 2.5-1



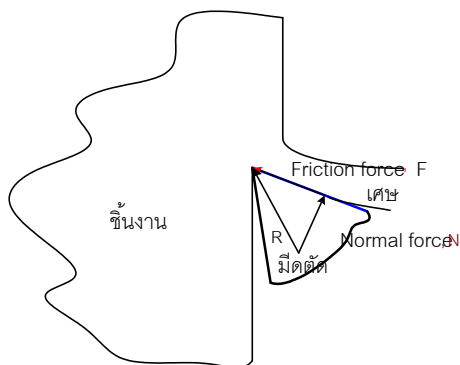
รูปที่ 2.18 ระบบแรงบนคมตัดของการตัดฉาก

$$R = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} \quad (2.5-1)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{F_f}{F_c} \quad (2.5-2)$$

2.5.2 แรงเสียดทาน

การที่เศษวัสดุเคลื่อนที่ผ่านผิวคายนเศษวัสดุของเครื่องมือตัด ทำให้เกิดแรงขึ้นอีกระบบหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.19 คือ แรงเสียดทาน (Friction force) และแรงกดบนผิวคายนเศษวัสดุ (Normal force) สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างเศษวัสดุและผิวคายนเศษวัสดุ เมื่อกำหนดให้ β คือ มุมเสียดทาน (Friction angle) ได้จาก



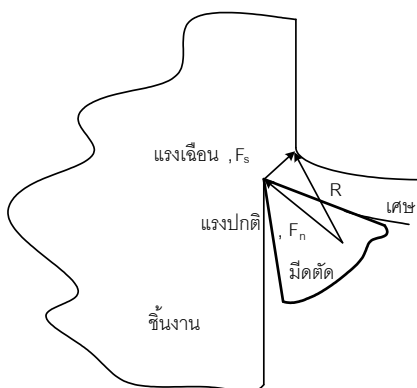
รูปที่ 2.19 ระบบแรงเสียดทาน

$$\mu = \frac{F}{N} = \tan\beta \quad (2.5-3)$$

โดยที่	μ	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
	F	=	แรงเสียดทาน (นิวตัน)
	N	=	แรงกดบนผิวคายนเศษวัสดุ (นิวตัน)
	β	=	มุมเสียดทาน (องศา)

2.5.3 แรงเฉือน

แรงเฉือน หมายถึง แรงที่กระทำบนระนาบเฉือน เป็นแรงที่ทำให้วัสดุชิ้นงานเกิดจากการแปรรูปกลายเป็นเศษวัสดุ แสดงในรูปที่ 2.20 โดยกำหนดให้ F_s คือ แรงเฉือน (Shear force)



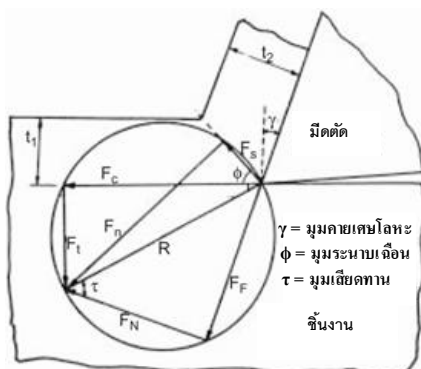
รูปที่ 2.20 ระบบของแรงเฉือน

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

$$R = \sqrt{F_s^2 + F_N^2} \quad (2.5-4)$$

2.5.4 รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงของการตัด

การใช้รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงเป็นวิธีทางกราฟที่ใช้แรงแทนการคำนวณได้อย่างสะดวกและถูกต้อง ดังในรูปที่ 2.21 โดยการกำหนดเวกเตอร์ของแรงตัดและแรงป้อน จะได้ผลลัพธ์โดยการบวกเวกเตอร์ทั้งสอง (ขั้นตอนที่ 1) ใช้แรงลัพธ์เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางสร้างวงกลม จากนั้นลากเส้นต่อจากผิวคายเศษวัสดุตัดกับวงกลม จะได้แรงเสียดทานและแรงกดผิวคายเศษวัสดุ (ขั้นตอนที่ 2) คำนวณมุมระนาบเฉือน (ϕ) จากนั้นกำหนดมุมนี้ลงในรูป จากจุดตัดของมุมนี้กับวงกลม จะได้แรงเฉือนและแรงกดบนระนาบเฉือน (ขั้นตอนที่ 3) สามารถวัดขนาดของแรงได้จากรูปที่สร้างขึ้นเทียบกับมาตราส่วนที่กำหนดเอาไว้



รูปที่ 2.21 วิธีการสร้างรูปหลายเหลี่ยมแทนแรงตัด

จากรูปที่ 2.21 การใช้แผนภาพของแรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการตัดโลหะ (Force diagram) นั้นจะสามารถคำนวณค่าของแรง F , N , F_s และ F_n ได้โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงตรีโกณมิติของแรงที่สามารถวัดได้ (F_c , F_t) ซึ่งจะได้ค่าของแรงต่าง ๆ ดังสมการที่ 2.5-5 ถึง 2.5-8

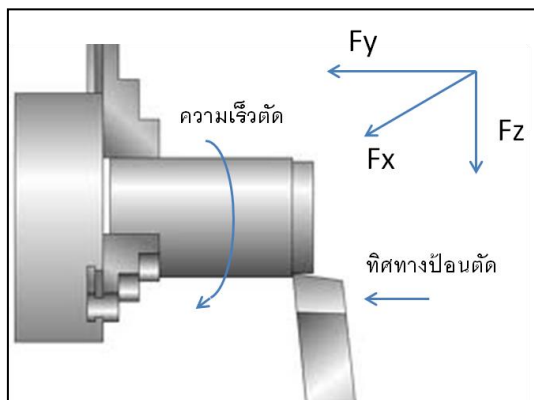
$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \quad (2.5-5)$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (2.5-6)$$

$$F_s = F_c \cos \alpha - F_t \sin \phi \quad (2.5-7)$$

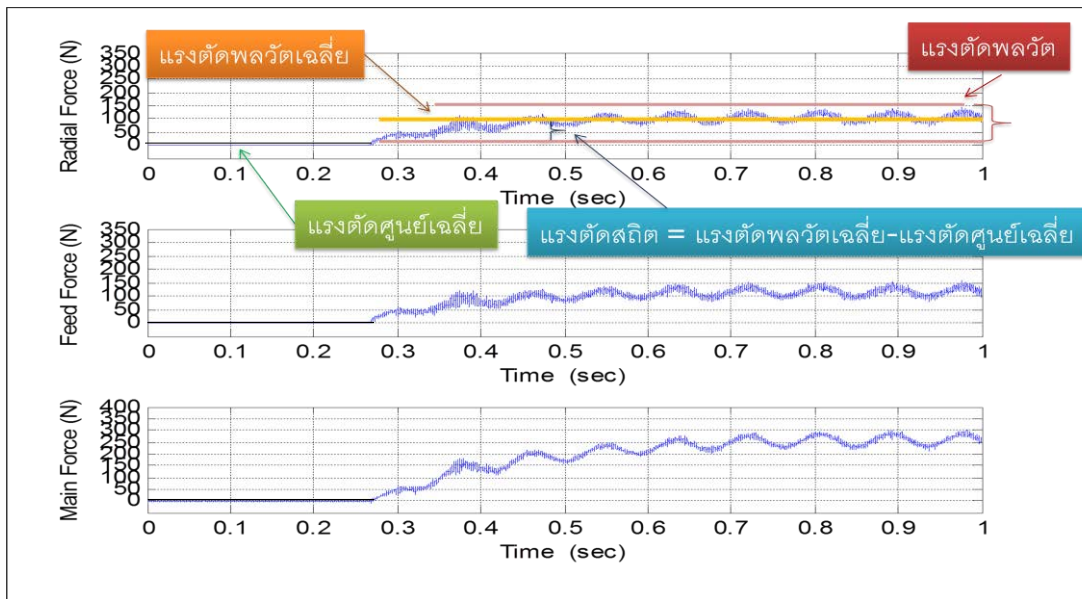
$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \quad (2.5-8)$$

2.5.5. สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น



รูป 2.22 ทิศทางแรงตัด

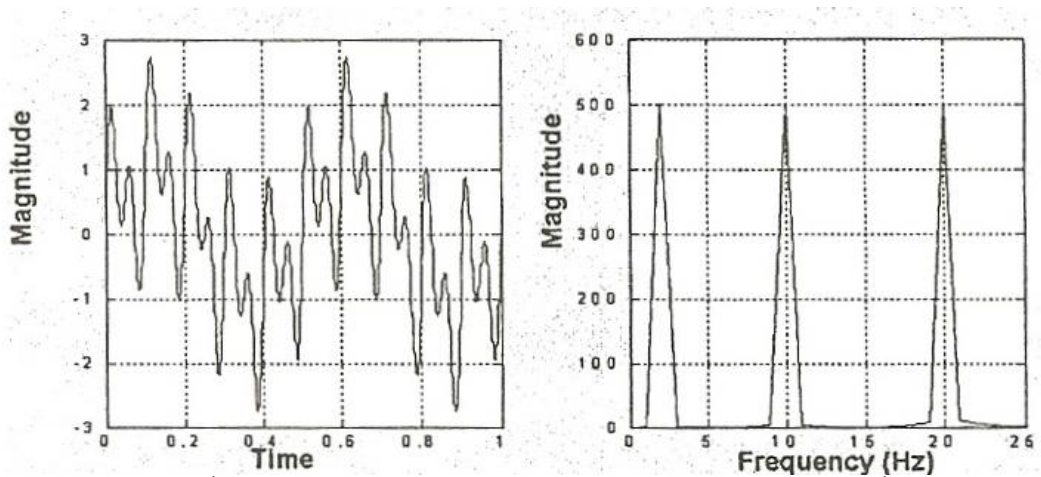
จากรูป 2.22 สามารถแบ่งได้เป็น 3 แรงหลัก ประกอบด้วย แรงตัดที่เกิดในแนวรัศมี เรียกว่าแรงรุนหรือแรงรัศมี (Radial force: F_x) แรงในทิศทางขนานกับทิศของการป้อน เรียกว่า แรงป้อนตัด (Feed force: F_y) และแรงในทิศทางขนานกับทิศของความเร็วตัด เรียกว่า แรงตัดหลัก (Main force: F_z) โดยแรงทั้งสามแนวแกน จะถูกเก็บสัญญาณด้วยไดนาโมมิเตอร์ เพื่อนำมาวิเคราะห์ จะประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ แรงตัดศูนย์ แรงตัดพลวัต และแรงตัดสถิต โดยแรงตัดศูนย์ คือแรงที่ยังไม่เกิดการตัดจริง ซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวน (Noise) ของอุปกรณ์ แรงตัดพลวัต เป็นแรงที่เกิดขึ้นจริงขณะทำการตัดจริง และแรงตัดสถิต คือแรงตัดเฉลี่ยที่กำหนดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น โดยเกิดจากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงตัดพลวัตและค่าเฉลี่ยแรงตัดศูนย์ ดังที่แสดงในรูป 2.23



รูปที่ 2.23 สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น

2.6 การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing)

การวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analysis) เป็นกระบวนการที่สำคัญในการประมวลผล โดยเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ของสัญญาณ และทราบว่าส่วนใดเป็นส่วนที่มีความสำคัญ ส่วนใดสามารถตัดทิ้งได้โดยไม่ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากนัก ก็สามารถที่จะประมวลผลสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ดังรูปที่ 2.24 และสมการที่ 2.6 โดยที่ $f(t)$ คือ สัญญาณใดๆ



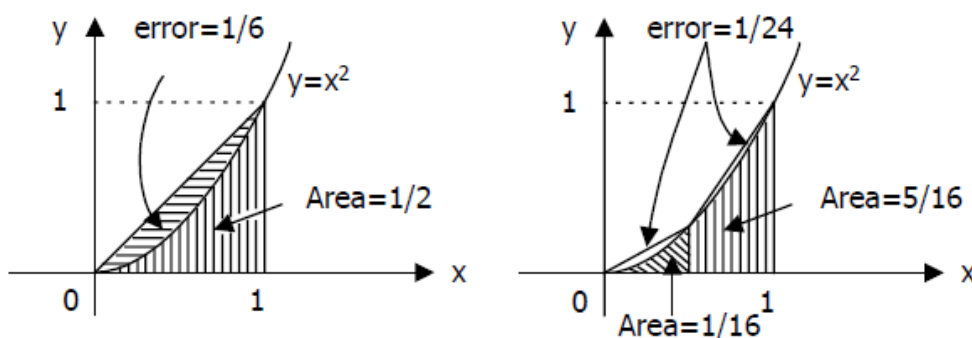
รูปที่ 2.24 การแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปสู่โดเมนความถี่

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2\pi ft} dt \quad (2.6)$$

ในการวิเคราะห์สัญญาณใดๆนั้น บางครั้งการพิจารณาที่โดเมนเวลาของสัญญาณอย่างเดียวอาจไม่สามารถให้ข้อมูลที่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ได้ การเปลี่ยนมุมมองของสัญญาณสามารถช่วยให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้น ซึ่งการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) เป็นการวิเคราะห์รูปแบบหนึ่งซึ่งช่วยในการเปลี่ยนมุมมองดังกล่าวกล่าวนี้ โดยการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่นั้น ใช้หลักการที่ว่าสัญญาณบางประเภทสามารถสังเคราะห์จากผลรวมของฟังก์ชันไซน์ (Sine Function) ที่ความถี่และขนาดต่างๆได้ เมื่อรู้เกี่ยวกับความถี่และขนาดของฟังก์ชันไซน์ที่เป็นองค์ประกอบของสัญญาณ หรือที่เรียกว่าสเปกตรัมของความถี่ (Frequency Spectrum) ของสัญญาณนั้น โดยจะทำให้รู้ถึงการกระจายกำลังของสัญญาณในความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์สัญญาณนั้นๆ เพราะจะทำให้ทราบว่ากำลังของสัญญาณนั้นอยู่ในย่านไหนของสเปกตรัมของความถี่ และส่วนใดที่สำคัญหรือไม่สำคัญ

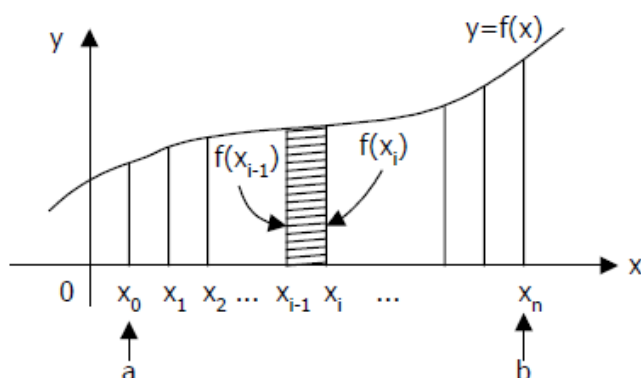
2.7 วิธีการประมาณด้วยสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Method)

วิธีนี้การหาพื้นที่ใต้กราฟโดยการประมาณด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู ทำได้โดยการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟออกเป็นส่วนย่อย n ส่วนเท่าๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.25 โดยการหาพื้นที่ของสี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละรูปแล้วนำพื้นที่ของแต่ละรูปมารวมกันจะได้คำตอบเป็นค่าปริพันธ์ของฟังก์ชัน $f(x)$ ในช่วงตัวแปร x เปลี่ยนแปลงจาก a ถึง b เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.26



(ก) ประมาณพื้นที่ใต้กราฟด้วยสามเหลี่ยม (ข) แบ่งพื้นที่ใต้กราฟเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู
รูปที่ 2.25 การคำนวณพื้นที่ใต้กราฟ

จากรูปที่ 2.25(ก) แสดงการประมาณพื้นที่ใต้กราฟด้วยรูปสามเหลี่ยม ซึ่งพบว่ามีความคลาดเคลื่อน (error) มากกว่าที่ควรเป็น จึงใช้วิธีการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูดังแสดงในรูปที่ 2.25 (ข) ซึ่งจะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนลดน้อยลง นั่นคือถ้าแบ่งพื้นที่ใต้กราฟออกเป็นส่วนย่อยๆ มากขึ้นจะทำให้มีความถูกต้องดีกว่า ในทางทฤษฎีจะคำนวณที่จำนวนเป็นอนันต์ เพื่อให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ แต่ความคลาดเคลื่อนจะมาจากการปัดค่าแทน ซึ่งจะยังไม่กล่าวถึงโดยทั่วไป เมื่อเราต้องการหาค่าปริพันธ์ของฟังก์ชัน $f(x)$ จาก $x = a$ ถึง $x = b$ ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การหาค่าปริพันธ์ด้วยวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู

การใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู เราจะแบ่งช่วงขีดจำกัดเริ่มจาก a ถึง b ออกเป็นส่วนย่อย n ส่วนเท่าๆ กันจะได้สี่เหลี่ยมคางหมูที่มีขอบเขตของแต่ละส่วนอยู่ที่ตำแหน่ง $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ พิจารณาที่สี่เหลี่ยมลำดับที่ i ซึ่งอยู่ระหว่าง x_{i-1} และ x_i จะมีความกว้าง ความสูงด้านซ้าย และความสูงด้านขวาเป็น $w = \frac{b-a}{n}$, $f(x_{i-1})$ และ $f(x_i)$ จะคำนวณหาพื้นที่ได้จากสมการ

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

ซึ่งได้มาจากสูตรการหาพื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

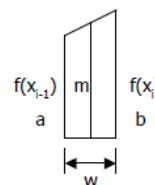
$$A = m w$$

โดยที่

$$m = \frac{1}{2} (a + b)$$

เมื่อแทน m จะได้

$$A = \frac{1}{2} (a+b) w$$



พื้นที่ทั้งหมดของสี่เหลี่ยมคางหมูจำนวน n รูปจะใช้แทนเป็นค่าปริพันธ์ ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ T_n คือเป็นผลรวมของพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละรูปจะได้

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

เมื่อพิจารณาจากสมการจะเห็นว่าความถูกต้องของวิธีสี่เหลี่ยมคางหมูขึ้นอยู่กับจำนวนของสี่เหลี่ยมคางหมูที่ใช้ในการประมาณค่า และนอกจากนี้จะได้ว่าพื้นที่ใต้กราฟที่เป็นเส้นตรงจะสามารถใช้สี่เหลี่ยมคางหมูเพียงรูปเดียวได้ ขณะที่พื้นที่ภายใต้กราฟที่มีความโค้งเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว หลายโค้ง ในทางทฤษฎีอาจต้องใช้สี่เหลี่ยมคางหมูหลายรูป ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงเรื่องของความเร็วในการคำนวณ และความผิดพลาดที่เกิดจากการปัดค่าตัวเลขแล้วปรากฏว่าจำนวนสี่เหลี่ยมที่ใช้จะมีจำนวนหนึ่งเท่านั้นที่เหมาะสมและให้ผลดีกว่าจำนวนที่มากเกินไป

2.8 การวิเคราะห์ความถดถอย (Multiple Regression) [12, 13]

2.8.1 รูปแบบของสมการความถดถอยเชิงพหุคูณ

การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นที่ทำหน้าที่พยากรณ์ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป กับตัวแปรตาม 1 ตัว ในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณนั้นจะต้องหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation Coefficient) เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามว่ามีลักษณะความสัมพันธ์กันเช่นใด สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ จะต้องหาสมการถดถอยเพื่อใช้ในการพยากรณ์ของตัวแปรตาม (Y) และหาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน รวมทั้งหาค่าสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation) เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่เป็นไปได้สูงสุดระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม รูปแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณที่มีตัวแปรถดถอย k ตัว มีรูปแบบดังสมการที่ 2.8

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + e \quad (2.8)$$

พารามิเตอร์ $\beta_j, j = 0, 1, \dots, k$ ถูกเรียกว่าสัมประสิทธิ์การถดถอย แบบจำลองนี้แสดงระนาบแบบระนาบเกิน (Hyperplane) ที่มีมิติ k ของตัวแปรถดถอย $\{x_j\}$ พารามิเตอร์ β_j แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ y ต่อหนึ่งหน่วยของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ x_j เมื่อตัวแปรอิสระที่เหลือ $x_i (i \neq j)$ มีค่าคงตัว

2.8.2. สมมติฐานหรือเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ

- ความคลาดเคลื่อน e เป็นตัวแปรที่มีการแจกแจงแบบปกติ
- ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ นั่นคือ $E(e) = 0$
- ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า $V(e) = \sigma_e^2$
- e_i และ e_j เป็นอิสระต่อกัน ; ($i \neq j$) นั่นคือ covariance (e_i, e_j) = 0

2.9 การวิเคราะห์ผล [14]

2.9.1. การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

การสรุปผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่งคือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ค่า α หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด โดย P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value จะแสดงถึงค่าที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถข้อสรุปผลการทดลองที่ระดับนัยสำคัญอื่นๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0

โดยปกติแล้วค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 ถูกปฏิเสธ ดังนั้นเราอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็น α ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ เมื่อรู้ค่า P-Value แล้ว ผู้ทดลองก็สามารถทราบว่าข้อมูลมีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

2.9.2. การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2)

การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบด้วยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอยหรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนเท่าใด ค่า R^2 ยิ่งมาก สมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่าค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจมีความไวในการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป จึงนิยมใช้ค่าที่ทำการปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) แทน

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการตัดต่างๆ ที่มีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานมากมาย เช่น ในปี ค.ศ. 2008 Frides, B., Aouici, H., และ Yaltese, M.A. [16] ได้ศึกษาอิทธิพลของแรงตัดและความขรุขระผิวสำหรับการกลึงงานแข็ง (Hard turning) สำหรับเหล็กงานร้อน (Hot work steel) เกรด X38CrMoV5-1 ด้วยมีดตัดชนิดเซรามิกส์แบบผสม (Mixed Ceramic) ซึ่ง พารามิเตอร์ที่ใช้ประกอบด้วย อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด ความเร็วตัด และการสึกหรอบนผิวหลบของมีดตัด (Flank wear) โดยผลการศึกษาพบว่า ความลึกตัดที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลอย่างชัดเจนต่อแรงตัด ความขรุขระได้รับอิทธิพลโดยตรงอย่างชัดเจนเมื่ออัตราการป้อนตัดเปลี่ยนแปลงไป และขนาดการสึกหรอของมีดตัดที่มากขึ้นส่งผลอย่างมากต่อแรงตัด และทำให้คุณภาพผิวชิ้นงานแย่ลง นอกจากนี้มีการอธิบายลักษณะความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ในรูปแบบของสมการการถดถอย เช่น งานวิจัยของ Huang, L., และ Chen, J.C.A. [17] ที่ทำการพัฒนาสมการถดถอยแบบพหุคูณเพื่อใช้พยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในระหว่างกระบวนการกลึงด้วยเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ซึ่งงานวิจัยทำการพัฒนาสมการที่แตกต่างกันที่รัศมีจุมุมมีดที่ 0.016 นิ้วและ 0.031 นิ้ว และประกอบด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัวคือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และค่าเฉลี่ยแอมพลิจูดการสั่น โดยงานวิจัยพัฒนาสมการพยากรณ์ แบ่งออกเป็นสองรูปแบบคือ แบบที่พิจารณาถึงความสั่นสะเทือน และแบบที่ไม่พิจารณาความสั่นสะเทือน ผลจากการวิจัยพบว่าสมการทั้งสองสามารถพยากรณ์ความขรุขระผิวได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่าความถูกต้องแม่นยำของสมการที่พิจารณาถึงความสั่นสะเทือนมีแนวโน้มความถูกต้องมากกว่า

จะสังเกตได้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการอธิบายความสัมพันธ์ด้วยการวัดทางอ้อม นั่นคือการวัดแรงในการตัด และการวัดการสั่นสะเทือน ซึ่งนอกจากจะส่งผลดีต่อการอธิบายความขรุขระผิวชิ้นงานได้ดียิ่งขึ้นแล้ว ยังมีความสะดวกในการตรวจติดตามรวมถึงมีค่าความแม่นยำที่ดีด้วย และเช่นเดียวกันในปี ค.ศ. 2008 สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และ Moriwaki, T. [18] ทำการพัฒนาแบบตรวจติดตามและชี้บ่งสถานะของเศษโลหะแบบต่อเนื่อง เศษโลหะแบบแตกหัก และการเกิดเขตเตอร์ในระหว่างกระบวนการตัดจริง โดยประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในการตรวจจับสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น โดยได้เสนอตัวแปร 3 ตัว คือ I1, I2 และ I3 ที่คำนวณได้จากค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัตทั้งสาม(แรงตัดหลัก แรงป้อนตัด และแรงรัศมี) ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมคือ C1, C2 และ C3 เพื่อใช้ในการบ่งชี้สถานะการตัดโดยอ้างอิงพื้นที่จากการทดลอง ซึ่งพบว่าสามารถจำแนก

สถานะการตัดได้อย่างชัดเจนดีเยี่ยม โดยไม่ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ประโยชน์ของงานวิจัยนี้ ทำให้ระบบการผลิตแบบอัจฉริยะมีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น

ต่อมา สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ [19] ได้ศึกษาและพบว่าขณะกำลังด้วยเงื่อนไขต่างๆ จะก่อให้เกิดรูปร่างของเศษโลหะที่แตกต่างกัน จึงทำการวิจัยเพื่อนำเสนอทฤษฎีสำหรับกระบวนการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะแม้เงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป โดยการประยุกต์ใช้การตรวจติดตามแรงตัดพลวัตและความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมของแรงป้อนตัดพลวัตนั้นในระหว่างกระบวนการตัดจริง สำหรับเครื่องมือที่ใช้สำหรับการตรวจจับเริ่มด้วยการพัฒนาและติดตั้งไดนามิเตอร์ในเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อใช้วัดแรงป้อนตัดพลวัตที่เกิดขึ้นขณะทำการกลึง ซึ่งแรงป้อนตัดนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเกิดเศษโลหะแบบแตกหักเป็นชิ้นเล็กๆมากที่สุด โดยสัญญาณแรงป้อนตัดที่วัดได้จากไดนามิเตอร์จะถูกขยายและผ่านเครื่องกรองความถี่ต่ำผ่านก่อนที่จะถูกนำมาแปลงเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขและทำการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ค่าพาวเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดพลวัต แต่รูปร่างเศษโลหะและชนิดเศษโลหะที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการจำแนกแยกเศษโลหะจะใช้อัตราส่วนความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมของแรงป้อนตัดพลวัตในช่วงความถี่ของการแตกหักของเศษโลหะต่อช่วงความถี่ทั้งหมด เพื่อขจัดอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัด และเกณฑ์ในการตรวจจับจะเท่ากับค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง นั่นคือ 0.6 โดยที่ถ้าเศษโลหะเป็นแบบแตกหักอัตราส่วนพาวเวอร์สเปกตรัมจะมีค่ามากกว่า 0.6 ถ้าเศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องจะน้อยกว่า 0.6 และถ้าเศษโลหะเป็นแบบผสมจะมีค่าประมาณ 0.6 จากงานวิจัยนี้เองพบว่าสามารถตรวจจับการแตกหักเศษโลหะได้เป็นอย่างดี ซึ่งส่งผลดีต่อการประกันความเชื่อมั่นของระบบอัจฉริยะให้สูงขึ้น และยังสามารถนำไปพัฒนาเพื่อหาสภาพเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่ติดต่อกันได้

และในปี พ.ศ. 2553 สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, ศักดิ์ดา ศรีอนุศาสตร์ และดวงดา ละเอียดดี [20] ได้นำเสนอสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงโดยการประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงตัด สมการจากงานวิจัยนี้ได้พัฒนามาจากการทดลองโดยอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลที่ประกอบด้วยตัวแปรห้าตัวแปร ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อน รัศมีจุมกมีดตัด ความลึกในการตัด และอัตราส่วนแรงตัด ค่าสัมประสิทธิ์ในฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการถดถอยพหุคูณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ทั้งนี้งานวิจัยยังสร้างขอบเขตการพยากรณ์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในการพยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงาน จากผลการนำไปประยุกต์ใช้พบว่าสมการที่สร้างขึ้นสามารถพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานเป็นที่

ยอมรับได้ แต่ทั้งนี้งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัด นั่นคือเป็นการวิเคราะห์สัญญาณแรงตัด สถิต ซึ่งจะเป็นการเฉลี่ยทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ในการทำนายได้

แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมา มีการจำแนกเศษโลหะด้วยการวิเคราะห์พาวเวอร์สเปกตรัม แต่พบว่า การวิจัยยังไม่คำนึงถึงอุณหภูมิในขณะตัดที่แตกต่างกัน ในปี พ.ศ. 2554 กิติกุล กลิ่งผล [21] ได้นำเสนอทฤษฎีสำหรับกระบวนการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะแบบต่อเนื่องและแบบแตกหักแม้เงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป โดยการประยุกต์ใช้ค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมของแรงป้อนตัดพลวัตและค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิตัดพลวัต โดยนำเสนอพารามิเตอร์ที่หาได้จากอัตราส่วนค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมสะสมของแรงตัดในช่วงความถี่การแตกหักของเศษโลหะเทียบกันระหว่าง 3 แกน นั่นคือ AX, AY และ AZ และพารามิเตอร์ AVT ที่หาได้จากอัตราส่วนความแปรปรวนของอุณหภูมิสูงสุดต่อความแปรปรวนของอุณหภูมิเฉลี่ย ซึ่งผลการวิจัยทำให้ทราบว่าเมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของพาวเวอร์สเปกตรัมของแรงตัดพลวัตมีความถี่สูงกว่า 500 เฮิรตซ์ ทั้ง 3 แกน ซึ่งแตกต่างกับการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องที่ค่าความหนาแน่นพาวเวอร์สเปกตรัมต่ำกว่า 100 เฮิรตซ์ ทั้ง 3 แกน ตลอดจนพบว่าการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องให้ค่าความแปรปรวนสูงสุดและค่าความแปรปรวนเฉลี่ยของอุณหภูมิตัดมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแตกต่างกับการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องที่ให้ค่าความแปรปรวนสูงสุดและค่าความแปรปรวนเฉลี่ยของอุณหภูมิตัดนั้นแตกต่างกันมาก จากนั้นนำมาพล็อตในพื้นที่อ้างอิง ซึ่งสามารถกำหนดค่าควบคุมได้ผลดังนี้คือ เมื่อเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง ค่า AX จะน้อยกว่า 0.8 ค่า AY จะมากกว่า 0.4 ค่า AZ จะมากกว่า 0.6 และค่า AVT จะมากกว่า 1.6 ซึ่งอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวสามารถจำแนกเศษโลหะได้อย่างชัดเจน แต่เพื่อความแม่นยำควรใช้พารามิเตอร์ทั้งสี่ตัวร่วมกัน ทั้งนี้งานวิจัยนี้ยังทำการเสนอขั้นตอนในการหลีกเลี่ยงเมื่อการตัดเกิดเศษแบบต่อเนื่อง ที่ส่งผลให้กระบวนการกลึงมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้นด้วย

และในปีเดียวกัน ศิริวัลย์ จันทร์ผ่อง [22] ได้นำเสนอสมการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานเหล็กกล้าในกระบวนการกลึง โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน แรงตัดและอุณหภูมิตัด รวมถึงหาเงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระผิวน้อยที่สุดสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน S45C กับเม็ดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้งไดนามิเตอร์สำหรับวัดแรงตัด และอินฟาเรดไพโรมิเตอร์สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิขณะตัด ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัย คือ สมการแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดกับความขรุขระ

ระผิว ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดกับแรงตัดสถิต และความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดกับอุณหภูมิตัด

จะเห็นว่ามีการนำเสนอความสัมพันธ์ด้วยวิธีการที่แตกต่างกันมากมาย โดยที่ Cakir, M. C., Ensarioglu, C., และ Demirayak, I. [23] ได้พัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยการเปรียบเทียบสมการแบบเชิงเส้นตรง และแบบเอ็กโปเนนเชียล สำหรับเหล็กงานเย็น (cold-work tool steel) โดยมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และความลึกตัด โดยใช้มีดตัดชนิดเคลือบคาร์ไบด์ที่แตกต่างกัน 2 ประเภท ชนิดที่หนึ่งคือ CVDเคลือบผิวด้วย $TiCN+Al_2O_3+TiN$ และชนิดที่สองคือ PVD เคลือบผิวด้วย $TiAlN$ จากงานวิจัยพบว่าสมการเอ็กโปเนนเชียลสามารถอธิบายได้ดีกว่า นอกจากนี้พบว่าอินเดิลรัทชนิดที่หนึ่งเมื่อความเร็วตัดที่ 110-160 เมตรต่อนาที ค่าความขรุขระผิวจะลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่า แรงตัดลดลงเมื่ออุณหภูมิการตัดเพิ่ม ทำให้ความขรุขระผิวชิ้นงานดีขึ้น และในช่วงต่อมาความขรุขระผิวค่อนข้างคงที่ แต่มีแนวโน้มว่าที่ความเร็วตัด 190 เมตรต่อนาที ความขรุขระผิวจะเพิ่มขึ้นเนื่องอุณหภูมิขณะตัดมากเกินไปจะทำให้เกิดการสึกหรอของอินเดิลรัท แต่สำหรับอินเดิลรัท ชนิดที่สองให้ความขรุขระผิวที่คงที่แม้ว่าความเร็วตัดจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากอินเดิลรัทชนิดนี้มีค่าความแข็งแกร่งที่สูงสามารถป้องกันผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่ความเร็วตัดต่ำและยังช่วยให้อินเดิลรัท สึกช้ากว่าแม้ที่ความเร็วตัดสูง

ในทำนองเดียวกัน มีงานวิจัยที่ทำการเปรียบเทียบด้วย 2 เทคนิค คือรูปแบบการวิเคราะห์สมการถดถอยไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear Regression Analysis; RA) และระบบการคำนวณด้วยโครงข่ายประสาท (Computational Neural Network) ซึ่ง Feng, C.X. และ Wang, X.F. [24] ได้ อธิบายว่างานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานสำหรับงานกลึงผิวสำเร็จ ด้วยมีดกลึงเคลือบคาร์ไบด์ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด และความแข็งของชิ้นงาน ผลจากการวิจัยพบว่าแม้ค่า Root-Mean-Square Error ของวิธีแรกจะให้ค่าที่สูงกว่าเล็กน้อย แต่ก็ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสำหรับสองวิธีการนี้ ทั้งนี้งานวิจัยเสนอว่าการวิธีวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เป็นเส้นตรงมีความเหมาะสมและเป็นที่ยอมรับมากกว่า เนื่องจากมีความชัดเจน ขณะที่วิธี CNN จะเกิดฟังก์ชันในลักษณะคล้ายกล่องดำ (black box) ที่ไม่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้อย่างชัดเจน รวมถึงวิธี RA สามารถแสดงค่าทางสถิติที่เกี่ยวข้องได้มากกว่า และวิธีการก็เข้าใจได้ง่ายกว่า แต่อย่างไรก็ตามถ้าไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ตามการออกแบบการทดลองแล้วก็ไม่สามารถพัฒนาโมเดลได้ดีกว่าแบบ CNN

กระบวนการกลึงด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีมีขั้นตอนมากมายที่จำเป็นต้องทำการควบคุม โดยปิยะ ศิริธรรมปิติ [25] ได้ศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยการประยุกต์ใช้วิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด และทำการหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C กับมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว โดยกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกการตัด และวิธีการหล่อเย็น (การตัดแบบเปียก การใช้สเปรย์ของสารหล่อเย็น และการตัดแบบแห้ง) ผลจากการศึกษาพบว่า การตัดแบบแห้งมักจะให้ผลที่ดีกว่าเสมอ ยกเว้นการตัดด้วยความเร็วสูงมาก ที่ควรจะใช้สารหล่อเย็นช่วย และเงื่อนไขการตัดแบบแห้งที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร ให้ความสามารถในการตัดดีที่สุด ก่อให้เกิดมลพิษขณะตัดต่ำที่สุดและต้นทุนต่ำที่สุด จากนั้น ในปี 2554 สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ [26] ได้นำเสนอสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงโดยการประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงตัด สมการจากงานวิจัยนี้ได้พัฒนาจากการทดลองโดยอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลที่ประกอบด้วยตัวแปรหกตัวแปร ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อน รัศมีจุมกมีดตัด ความลึกในการตัด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนแรงตัดสถิต ซึ่งผลจากการนำไปประยุกต์ใช้พบว่าสมการที่สร้างขึ้นสามารถพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานเป็นที่ยอมรับได้

แต่ทั้งนี้งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังมีข้อจำกัด ซึ่งเกิดจากการวิเคราะห์แรงตัดด้วยสัญญาณแรงตัดสถิต ซึ่งเป็นการเฉลี่ยทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ในการทำนาย ทำให้ต่อมาได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัด โดยนำมาพัฒนาเป็นสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดจริง งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดในโดเมนความถี่ พบว่าแรงตัดพลวัตกับความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดมีความถี่ที่สอดคล้องตรงกัน และสามารถนำข้อมูลความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดพลวัตที่ได้จากการทดลองดังกล่าวมานั้น มาใช้ในการพัฒนาสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในรูปเอกซโพเนนเชียล โดยเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด รัศมีจุมกมีด ความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัดพลวัต โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากผลการวิจัยได้พิสูจน์ว่า สมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่พัฒนาขึ้นให้ค่าความแม่นยำในการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงาน 90.3% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้แรงตัดพลวัตสามารถอธิบายความขรุขระผิวได้ดีมากยิ่งขึ้น [27]

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะทำการต่อยอดองค์ความรู้ดังกล่าว โดยการประยุกต์ใช้แรงตัดพลวัตซึ่งมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับรอยของความขรุขระผิวชิ้นงาน รวมถึงพิจารณาอิทธิพลของมุมคายเศษโลหะร่วมด้วย เพื่อให้สมการมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) [13] และทำการคัดเลือกข้อมูล โดยเลือกเฉพาะเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องเพื่อนำมาสร้างสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการโดยการประยุกต์ใช้แรงตัดพลวัตในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ด้วยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว

3.1.1 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [22, 28, 29] มีการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึง ซึ่งพบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพผิวชิ้นงานดังนี้ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด และมุมคายเศษโลหะ ดังนั้นปัจจัยดังกล่าวจะถูกพิจารณาเพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ที่มีต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน และใช้พัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานโดยประยุกต์ใช้แรงตัดพลวัตในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ด้วยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว

3.1.2 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

การกำหนดระดับของปัจจัย (Level) จะพิจารณาจากคู่มือการแนะนำของผู้ผลิตเครื่องมือตัด ประกอบกับพิจารณาให้อยู่ในช่วงที่ได้ความขรุขระผิวที่ดี นอกจากนี้ยังเป็นเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องด้วย ซึ่งสามารถแบ่งเป็นระดับต่างๆได้ดังนี้

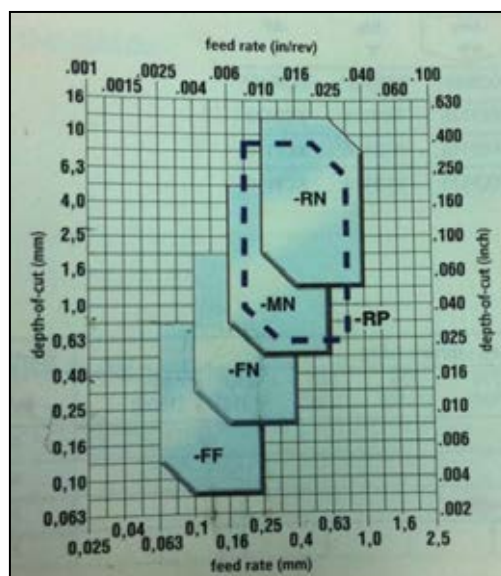
- ความเร็วตัด 100 180 และ 260 เมตรต่อนาที
- อัตราป้อนตัด 0.1 0.2 และ 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ
- ความลึกในการตัด 0.2 0.5 และ 0.8 มิลลิเมตร
- รัศมีจุมกมีด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร
- มุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา

- ความเร็วตัด ทำการกำหนดระดับปัจจัยความเร็วตัด เป็น 3 ระดับ คือ 100 180 และ 260 เมตร/นาที เป็นความเร็วตัดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งการกำหนด 3 ระดับเนื่องจาก มีความเป็นไปได้ว่าความสัมพันธ์อาจไม่เป็นเชิงเส้นตรง นอกจากนี้ยังเป็นช่วงที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [27] ที่พิสูจน์ว่าให้ผลการตัดที่ดีที่สุด ที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที

- อัตราการป้อนตัด ทำการกำหนดระดับปัจจัยของอัตราการป้อนตัด เป็น 3 ระดับ คือ 0.1 0.2 และ 0.3 มิลลิเมตร/รอบ เนื่องจากต้องการทราบแนวโน้มของความสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าความสัมพัทธ์อาจไม่เป็นเชิงเส้นตรง

- ความลึกตัด การกำหนดระดับปัจจัยของความลึกตัดเป็น 3 ระดับ คือ 0.2 0.5 และ 0.8 มิลลิเมตร เนื่องจากต้องการทราบแนวโน้มของความสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าความสัมพัทธ์อาจไม่เป็นเชิงเส้นตรง ทั้งนี้การเลือกใช้ความลึกตัด ปกติจะใช้ความลึกตัดที่น้อย เพื่อให้ได้ผิวที่ดี แต่หากน้อยเกินไปก็จะถูกบดบังด้วยอิทธิพลของรัศมีจุมูกมีด

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าระดับของปัจจัยของความลึกตัด และอัตราการป้อนตัด ที่กำหนดในข้างต้น จะครอบคลุมค่าที่เหมาะสม โดยเป็นค่าเงื่อนไขการตัดที่บริษัทผู้ผลิตอินเสิร์ตคาร์ไบด์ เป็นผู้แนะนำ



รูป 3.1 เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมสำหรับมีดกลึงคาร์ไบด์เคลือบผิว [28]

- รัศมีจุมูกมีด ทำการกำหนดระดับปัจจัยของรัศมีจุมูกมีด 2 ระดับ คือ 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร เพื่อต้องการแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของรัศมีจุมูกมีดที่เปลี่ยนแปลงไปต่อค่าความขรุขระของผิวชิ้นงาน โดยเป็นที่ทราบกันว่าความขรุขระผิวได้รับอิทธิพลโดยตรงจากรัศมีจุมูกมีด ทั้งนี้หากใช้รัศมีจุมูกมีดที่มากเกินไป มุมของรัศมีจะเพิ่มมากขึ้นขณะตัด จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและใช้แรงตัดมาก ท้ายที่สุดก็จะทำคุณภาพผิวที่ได้ไม่ดี รวมถึงรัศมีจุมูกมีดที่มากจะส่งผลให้มีอิทธิพลมาบดบังอิทธิพลของความลึกตัดที่น้อยอีกด้วย

- มุมคายเศษโลหะ การกำหนดระดับปัจจัยของรัศมีจุมกมีดจะแบ่งเป็น 2 ระดับ คือ -6 และ 11 เนื่องจากต้องการแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของมุมคายที่เปลี่ยนแปลงไปต่อค่าความขรุขระของผิวชิ้นงาน

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วัสดุชิ้นงาน (Workpiece material) เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน S45C มีลักษณะทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

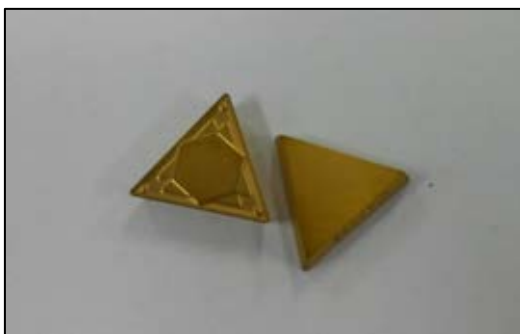
3.2.2 เม็ดมีด (Insert) แบบคาร์ไบด์เคลือบผิว เกรด CA 5525 ยี่ห้อ Kennametal

- มุมคายเศษโลหะ -6 องศา
 - รหัสเม็ดมีด TNMG 160404 HQ
 - รหัสเม็ดมีด TNMG 160408 HQ



รูปที่ 3.3 เม็ดมีดที่ใช้ในการทดลอง มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

- มุมคายพิเศษโลหะ 11 องศา
 - รหัสเม็ดมีด TPMP 160304 HQ
 - รหัสเม็ดมีด TPMP 160308 HQ



รูปที่ 3.4 เม็ดมีดที่ใช้ในการทดลอง มุมคายพิเศษโลหะ 11 องศา

3.2.3 **ด้ามมีดกลึง (Tool Holder)** ด้ามมีดกลึง ยี่ห้อ Kyocera เบอร์ CTGPR 2525M-16N และ WTJNR 2525M-16N



รูปที่ 3.5 ด้ามมีดกลึงที่ใช้ในการทดลอง

3.2.3 **เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC turning machine)** ชนิด 4 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น Quick Turn Nexus200MY/MSY



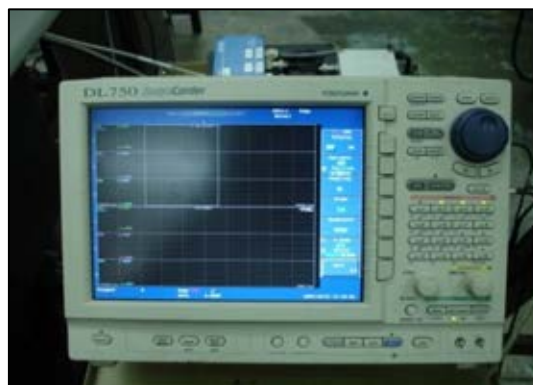
รูปที่ 3.6 เครื่องกลิ้งซีเอ็นซีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.4 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ยี่ห้อ Kister รุ่น 9121 สำหรับวัดแรงตัด



รูปที่ 3.7 ไดนาโมมิเตอร์

3.2.5 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL750 ใช้สำหรับ แสดงผลและบันทึกค่าแรงตัดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัด



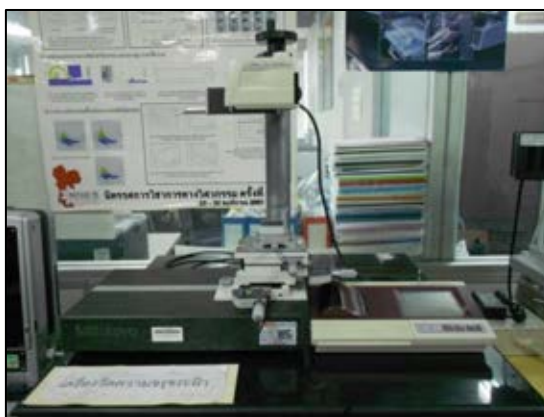
รูปที่ 3.8 ออสซิลโลสโคป

3.2.6 เครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier)



รูปที่ 3.9 เครื่องขยายสัญญาณ

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



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดความขรุขระผิว

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.3.1 ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เข้ากับชุดปั๊มมีด (Turret) เพื่อใช้วัดสัญญาณแรงที่เกิดขึ้นขณะตัด

3.3.2 เชื่อมต่อสายสัญญาณวัดแรงตัดเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier)

3.3.3 เชื่อมต่อเครื่องขยายสัญญาณเข้ากับออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ที่ใช้แสดงผลและบันทึกค่าแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด

3.3.4 ทำการกลึงชิ้นงานด้วยเงื่อนไขการตัดต่างๆ ตามตารางที่ 3.1

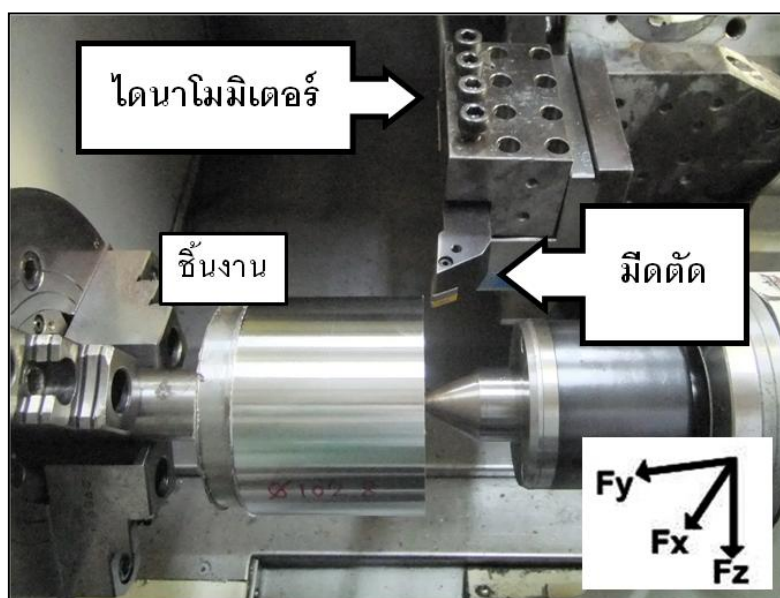
3.2.5 บันทึกค่าแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด โดยสัญญาณแรงตัดพลวัตที่วัดได้จากไดนาโมมิเตอร์ จะถูกขยายสัญญาณด้วยเครื่องขยายสัญญาณ และถูกกรองความถี่ย่านสัญญาณต่ำที่ 500 เฮิรท์ โดยใช้อัตราการเก็บข้อมูล 1,000 ค่าต่อวินาที

3.2.6 เก็บตัวอย่างของเศษโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

3.2.7 ตรวจสอบสภาพการสึกหรอของเม็ดมีดตัดด้วยเครื่องวัดความสึกหรอ โดยความสึกหรอที่ใช้จะต้องมีขนาดไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร

3.2.8 วัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยใช้ความเร็วในการลากเข็มวัด 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที และใช้อัตราสุ่มเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที

3.2.9 วิเคราะห์รูปแบบความถี่ของความขรุขระผิวชิ้นงานและสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform)



รูปที่ 3.11 การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดลอง

Run Order	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม)	รัศมีจุมุมัด (มม)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
1	180	0.2	0.2	0.8	11
2	180	0.2	0.8	0.4	11
3	180	0.3	0.2	0.4	11
4	100	0.1	0.8	0.8	-6
5	180	0.2	0.8	0.8	11
6	100	0.1	0.2	0.8	11
7	180	0.3	0.5	0.4	11
8	100	0.1	0.8	0.8	11
9	260	0.2	0.5	0.4	11
10	260	0.1	0.2	0.4	11
11	100	0.1	0.2	0.4	-6
12	100	0.2	0.2	0.8	11
13	180	0.1	0.2	0.4	-6
14	100	0.1	0.2	0.4	11
15	180	0.3	0.5	0.8	-6
16	260	0.1	0.8	0.4	-6
17	260	0.2	0.8	0.8	-6
18	260	0.1	0.2	0.4	-6
19	260	0.1	0.2	0.8	-6
20	260	0.1	0.2	0.8	11
21	180	0.3	0.5	0.4	-6
22	100	0.1	0.5	0.4	-6
23	100	0.1	0.5	0.4	11
24	100	0.3	0.2	0.8	-6
25	180	0.2	0.5	0.4	-6

Run Order	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม)	รัศมีจุ่มมีด (มม)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
26	260	0.2	0.5	0.4	-6
27	100	0.1	0.5	0.8	11
28	260	0.2	0.2	0.8	11
29	180	0.2	0.5	0.8	11
30	100	0.2	0.8	0.8	-6
31	100	0.2	0.2	0.4	-6
32	260	0.3	0.5	0.8	-6
33	180	0.1	0.8	0.4	11
34	260	0.3	0.8	0.4	-6
35	180	0.3	0.8	0.8	-6
36	260	0.3	0.2	0.8	-6
37	100	0.1	0.8	0.4	11
38	100	0.3	0.8	0.4	11
39	260	0.3	0.8	0.8	11
40	100	0.1	0.8	0.4	-6
41	100	0.2	0.5	0.4	11
42	180	0.3	0.2	0.8	11
43	260	0.1	0.8	0.8	-6
44	260	0.2	0.8	0.8	11
45	260	0.2	0.5	0.8	11
46	180	0.3	0.5	0.8	11
47	260	0.3	0.8	0.4	11
48	100	0.3	0.5	0.4	-6
49	260	0.2	0.8	0.4	-6
50	260	0.2	0.8	0.4	11
51	180	0.2	0.8	0.4	-6

Run Order	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม)	รัศมีจุ่มมีด (มม)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
52	260	0.1	0.5	0.8	-6
53	180	0.2	0.5	0.4	11
54	180	0.2	0.2	0.4	-6
55	100	0.2	0.5	0.8	-6
56	260	0.3	0.2	0.4	-6
57	180	0.3	0.2	0.8	-6
58	260	0.3	0.5	0.4	11
59	100	0.1	0.5	0.8	-6
60	180	0.2	0.2	0.4	11
61	180	0.1	0.5	0.8	-6
62	180	0.3	0.8	0.4	11
63	100	0.2	0.8	0.4	11
64	180	0.2	0.8	0.8	-6
65	100	0.2	0.2	0.4	11
66	260	0.3	0.5	0.4	-6
67	180	0.1	0.2	0.8	11
68	100	0.3	0.8	0.8	-6
69	180	0.1	0.2	0.8	-6
70	260	0.3	0.2	0.4	11
71	100	0.1	0.2	0.8	-6
72	260	0.3	0.5	0.8	11
73	100	0.3	0.8	0.8	11
74	260	0.1	0.5	0.8	11
75	260	0.1	0.5	0.4	11
76	260	0.1	0.8	0.8	11
77	180	0.1	0.5	0.8	11

Run Order	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม)	รัศมีจุ่มมีด (มม)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
79	180	0.2	0.5	0.8	-6
80	180	0.1	0.8	0.4	-6
81	180	0.1	0.8	0.8	-6
82	260	0.3	0.2	0.8	11
83	260	0.1	0.8	0.4	11
84	100	0.3	0.8	0.4	-6
85	100	0.3	0.5	0.8	11
86	180	0.1	0.8	0.8	11
87	100	0.2	0.5	0.8	11
88	260	0.2	0.5	0.8	-6
89	180	0.2	0.2	0.8	-6
90	100	0.3	0.2	0.8	11
91	180	0.1	0.5	0.4	-6
92	180	0.3	0.2	0.4	-6
93	260	0.3	0.8	0.8	-6
94	180	0.1	0.2	0.4	11
95	100	0.2	0.8	0.8	11
96	100	0.2	0.8	0.4	-6
97	260	0.2	0.2	0.8	-6
98	180	0.1	0.5	0.4	11
99	180	0.3	0.8	0.4	-6
100	180	0.3	0.8	0.8	11
101	100	0.2	0.2	0.8	-6
102	100	0.3	0.2	0.4	11
103	260	0.1	0.5	0.4	-6
104	100	0.3	0.5	0.4	11
105	100	0.2	0.5	0.4	-6

Run Order	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม)	รัศมีจุมูกมีด (มม)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
106	100	0.3	0.5	0.8	-6
107	260	0.2	0.2	0.4	-6
108	260	0.2	0.2	0.4	11

3.4 การพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัด

ตามทฤษฎีการหาค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน สมการที่จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันเอกโปเนนเชียล ซึ่งการคำนวณจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่สำคัญสองตัว คืออัตราการป้อนตัด และรัศมีจุมูกมีด ดังนั้นสมการที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้ซึ่งจะประกอบด้วยพารามิเตอร์อื่นๆ ดังนี้คือ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมูกมีด และมุมคายเศษโลหะ ก็จะนำเสนอในรูปเอกโปเนนเชียลด้วยเช่นกัน

สมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดนี้ จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัต และเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ดังนี้

$$R_a = C_1 \cdot (V)^{a_1} \cdot (f)^{a_2} \cdot (D)^{a_3} \cdot (R_n)^{a_4} \cdot (e)^{a_5 \gamma} \cdot \left(\frac{AF_y}{AF_z}\right)^{a_6} \quad (3.4-1)$$

$$R_z = C_2 \cdot (V)^{a_7} \cdot (f)^{a_8} \cdot (D)^{a_9} \cdot (R_n)^{a_{10}} \cdot (e)^{a_{11} \gamma} \cdot \left(\frac{AF_y}{AF_z}\right)^{a_{12}} \quad (3.4-2)$$

โดยที่ R_a และ R_z คือ ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย และความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดเฉลี่ย 5 จุดในหน่วยไมโครเมตร V คือความเร็วตัดชิ้นงานในหน่วยเมตรต่อนาที f คืออัตราการป้อนตัดในหน่วยมิลลิเมตรต่อรอบ D คือค่าความลึกตัดในหน่วยมิลลิเมตร R_n คือค่ารัศมีจุมูกมีดในหน่วยมิลลิเมตร γ คือค่ามุมคายเศษโลหะในหน่วยองศา $\frac{AF_y}{AF_z}$ คืออัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟระหว่างแรงป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัต $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, C_1$ และ C_2 คือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการ

จากสมการแบบไม่เชิงเส้น 3.4-1 และ 3.4-2 จะถูกแปลงและนำเสนอในรูปสมการถดถอยพหุคูณด้วยการใช้การแปลงลอการิทึม ดังนี้

$$\ln R_a = \ln C_1 + a_1 \ln V + a_2 \ln f + a_3 \ln D + a_4 \ln R_n + a_5 \gamma + a_6 \ln \left(\frac{AF_y}{AF_z}\right) \quad (3.4-3)$$

$$\ln R_z = \ln C_2 + a_7 \ln V + a_8 \ln f + a_9 \ln D + a_{10} \ln R_n + a_{11} \gamma + a_{12} \ln \left(\frac{AF_y}{AF_z}\right) \quad (3.4-4)$$

จากสมการถดถอยพหุคูณ 3.4-3 และ 3.4-4 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 \quad (3.4-5)$$

$$y_2 = \beta_7 + \beta_8 x_1 + \beta_9 x_2 + \beta_{10} x_3 + \beta_{11} x_4 + \beta_{12} x_5 + \beta_{13} x_6 \quad (3.4-6)$$

โดยที่ y_1 และ y_2 แทนค่า $\ln R_a$ และ $\ln R_z$ ตัวแปร x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 , และ x_6 แทนด้วยค่า $\ln V, \ln f, \ln D, \ln R_n, \gamma$ และ $\ln \frac{AF_y}{AF_z}$ ตามลำดับ ค่า β_0 และ β_7 คือจุดตัดแกน y ของสมการ y_1 และ y_2 เมื่อพารามิเตอร์ x_1 ถึง x_6 เท่ากับ 0 โดยที่ค่า $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8, \beta_9, \beta_{10}, \beta_{11}, \beta_{12}$ และ β_{13} คือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยซึ่งได้มาจากการใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณ โดยใช้การประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method)

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 จากข้อมูลที่ได้จากผลการทดลอง ได้แก่ ความขรุขระผิวชิ้นงานและสัญญาณแรงตัดพลวัต จะนำมาแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา เป็นโดเมนความถี่ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) ดังแสดงในภาคผนวก ค

3.5.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ เมื่อพบว่ามีความสอดคล้องกันด้วยการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องแล้ว จะนำผลการทดลอง ณ เงื่อนไขการตัดนั้นๆ มาใช้วิเคราะห์ต่อไป

3.5.3 ใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) ในการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดพลวัตในขณะตัดที่โดเมนเวลา ซึ่งพื้นที่ของแรงตัดพลวัตในขณะตัดที่โดเมนเวลานี้จะเป็นพารามิเตอร์หนึ่งๆ ที่สัมพันธ์กับค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน และใช้ในการนำไปพัฒนาสมการความสัมพันธ์ โดยจะอยู่ในรูปของอัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตต่อแรงตัดหลักพลวัต

3.5.4 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยพหุคูณ

เพื่อยืนยันว่าสมการทำนายความขรุขระผิวที่ได้มีความเหมาะสมด้วยข้อมูลที่นำเชื่อถือ จะต้องทำการทดสอบว่า ความผิดพลาดในสมการ ϵ_i มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 ซึ่งเขียนย่อได้เป็น $\epsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ซึ่งจะส่งผลให้ผลที่ตามมาคือค่า y จะมีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ ขั้นตอนการทดสอบประกอบด้วย

3.5.4.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality)

ในการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normal distribution assumption) นั้นจะพิจารณาการกระจายตัวของค่าค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ของตัวแปรผลตอบว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยนำค่าคลาดเคลื่อนมาสร้าง Normal Probability Plot และพิจารณาการกระจายตัวโดยการกระจายตัวควรเป็นตามแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงถือว่าเป็นการกระจายตัวแบบปกติ

3.5.4.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ นั้นจะตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ของตัวแปรผลตอบว่ามีความเกี่ยวพันกันหรือไม่ โดยการพล็อตค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล (Observation order) ค่าค่าคลาดเคลื่อนไม่ควรมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ จึงถือว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ

3.5.4.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance stability)

การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนเป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของการกระจายของค่าคลาดเคลื่อน (Residual) กับค่าที่ถุกฟิต (Fitted Value) ซึ่งการกระจายไม่ควรมีลักษณะที่เป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด จะถือว่ามีความเสถียรภาพของความแปรปรวน

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยจะอธิบายเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงป้อนตัด พลวัตและแรงตัดหลักพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัด และเงื่อนไขการตัดอื่นๆบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี เพื่อนำมาพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัด ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจมูกมีด และมุมคายเศษโลหะ โดยที่ตัวแปรเหล่านี้กำหนดเป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variable) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ถูกกำหนดขึ้นในการทำวิจัย เพื่อหาความสัมพันธ์กับความขรุขระผิวชิ้นงาน และอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดที่เป็นตัวแปรตอบสนองดังที่กล่าวข้างต้น

4.1 ผลการทดลอง

ทำการทดลองกลึงชิ้นงานตามเงื่อนไขการตัดต่างๆ ตามตารางที่ 3.1 และบันทึกผลที่ได้จากการทดลอง โดยเลือกเฉพาะเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะแบบต่อเนื่อง ซึ่งตารางประกอบด้วยปัจจัยการตัดต่างๆ ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) และพื้นที่แรงตัดพลวัต ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง

Run Order	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม)	รัศมีจุ่มกมิด (มม)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)	ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)	พื้นที่ได้กราฟแรงรัศมี (AFx)	พื้นที่ได้กราฟแรงป้อนตัด (AFy)	พื้นที่ได้กราฟแรงตัดหลัก (AFz)	อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ AFy/AFz
1	180	0.2	0.2	0.8	11	1.521	5.804	0.420	0.527	0.551	0.955
3	180	0.3	0.2	0.4	11	5.116	21.4590	0.618	0.627	1.085	0.578
6	100	0.1	0.2	0.8	11	2.328	3.373	0.463	1.101	1.036	1.063
7	180	0.3	0.5	0.4	11	5.167	23.334	1.090	1.405	2.583	0.544
8	100	0.1	0.8	0.8	11	1.164	5.476	2.665	1.947	2.545	0.765
9	260	0.2	0.5	0.4	11	2.8330	9.9410	0.916	1.071	1.358	0.788
10	260	0.1	0.2	0.4	11	0.562	3.023	0.706	0.803	0.772	1.040
11	100	0.1	0.2	0.4	-6	1.825	6.194	3.620	4.985	6.043	0.825
12	100	0.2	0.2	0.8	11	1.572	6.707	0.506	0.940	1.230	0.764
13	180	0.1	0.2	0.4	-6	0.983	4.350	2.852	4.028	4.102	0.982
14	100	0.1	0.2	0.4	11	1.154	4.828	0.634	1.075	1.019	1.054
15	180	0.3	0.5	0.8	-6	2.332	12.061	0.767	1.262	1.616	0.781

Run Order	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม)	รัศมีจุ่มกมิด (มม)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)	ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)	พื้นที่ได้กราฟแรงรัศมี (AFx)	พื้นที่ได้กราฟแรงป้อนตัด (AFy)	พื้นที่ได้กราฟแรงตัดหลัก (AFz)	อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ AFy/AFz
18	260	0.1	0.2	0.4	-6	0.813	3.834	0.461	0.770	0.705	1.093
19	260	0.1	0.2	0.8	-6	0.833	2.163	0.167	0.269	0.272	0.987
20	260	0.1	0.2	0.8	11	0.415	2.1090	0.653	0.427	0.381	1.121
22	100	0.1	0.5	0.4	-6	3.155	12.525	3.242	1.537	2.280	0.674
23	100	0.1	0.5	0.4	11	1.452	6.089	1.358	1.454	1.487	0.978
27	100	0.1	0.5	0.8	11	0.639	4.198	1.669	2.334	2.105	1.109
28	260	0.2	0.2	0.8	11	1.262	6.611	0.775	0.675	0.837	0.807
29	180	0.2	0.5	0.8	11	1.608	6.027	0.626	1.175	1.340	0.877
31	100	0.2	0.2	0.4	-6	3.494	11.113	0.531	0.722	1.092	0.661
32	260	0.3	0.5	0.8	-6	3.104	11.482	1.086	1.297	1.644	0.789
33	180	0.1	0.8	0.4	11	0.776	3.745	0.796	0.977	1.039	0.940
37	100	0.1	0.8	0.4	11	1.564	7.413	1.403	0.908	1.007	0.902
41	100	0.2	0.5	0.4	11	3.114	10.136	2.179	1.625	2.521	0.645

Run Order	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม)	รัศมีจุ่มกมิด (มม)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)	ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)	พื้นที่ได้กราฟแรงรัศมี (AFx)	พื้นที่ได้กราฟแรงป้อนตัด (AFy)	พื้นที่ได้กราฟแรงตัดหลัก (AFz)	อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ AFy/AFz
42	180	0.3	0.2	0.8	11	2.9170	11.881	0.565	0.839	1.215	0.691
43	260	0.1	0.8	0.8	-6	0.886	2.946	0.970	1.388	1.082	1.283
45	260	0.2	0.5	0.8	11	1.766	6.652	0.596	1.107	1.343	0.824
46	180	0.3	0.5	0.8	11	3.458	13.607	0.808	1.165	1.718	0.678
52	260	0.1	0.5	0.8	-6	0.756	2.700	0.672	0.456	0.404	1.129
53	180	0.2	0.5	0.4	11	2.491	10.343	0.818	1.339	1.531	0.875
54	180	0.2	0.2	0.4	-6	3.182	10.364	5.694	5.402	7.900	0.684
55	100	0.2	0.5	0.8	-6	2.3230	11.051	0.719	1.070	1.326	0.807
58	260	0.3	0.5	0.4	11	5.382	23.962	1.593	1.108	2.293	0.483
59	100	0.1	0.5	0.8	-6	1.186	5.797	0.727	1.103	1.278	0.863
60	180	0.2	0.2	0.4	11	2.3100	8.504	0.459	0.582	0.762	0.764
61	180	0.1	0.5	0.8	-6	0.883	5.556	0.5903	1.697	1.4656	1.158

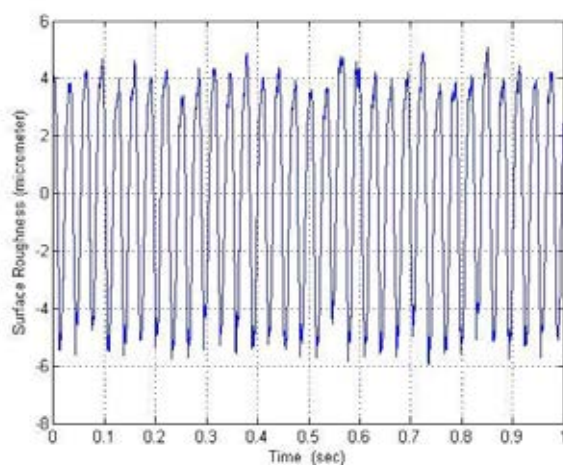
Run Order	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม)	รัศมีจุ่มกมิด (มม)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)	ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)	พื้นที่ได้กราฟแรงรัศมี (AFx)	พื้นที่ได้กราฟแรงป้อนตัด (AFy)	พื้นที่ได้กราฟแรงตัดหลัก (AFz)	อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ AFy/AFz
65	100	0.2	0.2	0.4	11	2.774	9.663	0.724	0.794	1.088	0.729
67	180	0.1	0.2	0.8	11	1.2090	1.186	0.426	0.924	0.751	1.230
69	180	0.1	0.2	0.8	-6	2.063	2.033	0.259	0.719	0.809	0.889
70	260	0.3	0.2	0.4	11	4.325	21.8830	0.785	0.625	1.046	0.597
71	100	0.1	0.2	0.8	-6	3.373	2.328	0.944	1.411	1.582	0.892
72	260	0.3	0.5	0.8	11	2.902	12.265	1.163	1.197	1.975	0.606
73	100	0.3	0.8	0.8	11	3.2380	16.589	6.937	4.674	7.361	0.635
74	260	0.1	0.5	0.8	11	0.433	2.364	0.832	0.589	0.413	1.424
75	260	0.1	0.5	0.4	11	0.636	3.210	0.925	0.892	1.065	0.838
76	260	0.1	0.8	0.8	11	0.566	2.700	0.891	1.095	1.073	1.020
77	180	0.1	0.5	0.8	11	0.480	2.766	0.412	0.709	0.887	0.800
78	100	0.3	0.2	0.4	-6	6.597	23.535	0.614	0.648	1.195	0.542
79	180	0.2	0.5	0.8	-6	1.802	6.755	0.918	1.270	1.717	0.740

Run Order	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม)	รัศมีจุ่มกมิด (มม)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)	ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)	พื้นที่ได้กราฟแรงรัศมี (AFx)	พื้นที่ได้กราฟแรงป้อนตัด (AFy)	พื้นที่ได้กราฟแรงตัดหลัก (AFz)	อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ AFy/AFz
81	180	0.1	0.8	0.8	-6	1.7460	8.1000	0.956	0.943	1.225	0.7695
82	260	0.3	0.2	0.8	11	2.4439	11.2120	1.047	0.993	1.363	0.728
83	260	0.1	0.8	0.4	11	0.785	3.588	0.959	0.840	1.019	0.825
85	100	0.3	0.5	0.8	11	3.101	12.4960	4.314	3.230	5.263	0.614
86	180	0.1	0.8	0.8	11	0.575	3.066	0.574	1.196	1.094	1.093
87	100	0.2	0.5	0.8	11	2.035	8.545	2.880	1.939	3.045	0.637
88	260	0.2	0.5	0.8	-6	1.820	6.851	0.743	0.928	1.053	0.881
89	180	0.2	0.2	0.8	-6	1.206	5.849	0.269	0.598	0.718	0.832
90	100	0.3	0.2	0.8	11	2.982	11.4890	0.648	0.932	1.325	0.703
94	180	0.1	0.2	0.4	11	0.684	3.256	0.431	0.758	0.728	1.042
97	260	0.2	0.2	0.8	-6	1.675	7.101	0.498	0.595	0.720	0.826

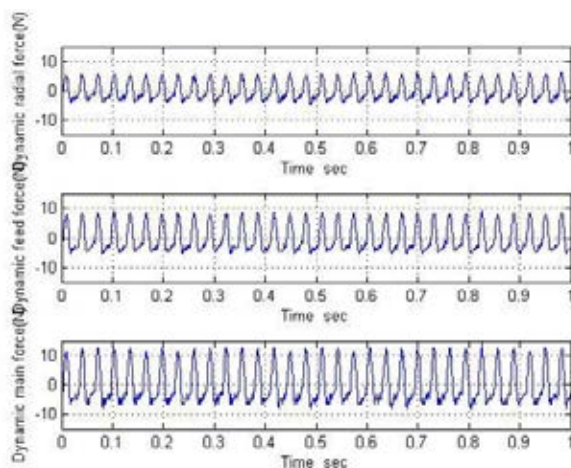
Run Order	ความเร็วตัด (ม/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม/รอบ)	ความลึกตัด (มม)	รัศมีจุ่มกมิด (มม)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)	ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)	พื้นที่ได้กราฟแรงรัศมี (AFx)	พื้นที่ได้กราฟแรงป้อนตัด (AFy)	พื้นที่ได้กราฟแรงตัดหลัก (AFz)	อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟ AFy/AFz
98	180	0.1	0.5	0.4	11	0.703	4.328	0.843	1.353	1.157	1.170
101	100	0.2	0.2	0.8	-6	1.820	8.540	0.703	0.976	1.219	0.800
104	100	0.3	0.5	0.4	11	4.157	17.118	2.915	2.066	3.670	0.563
106	100	0.3	0.5	0.8	-6	3.312	16.662	1.259	1.276	1.780	0.717
107	260	0.2	0.2	0.4	-6	3.1270	10.3350	2.784	4.566	5.700	0.801
108	260	0.2	0.2	0.4	11	2.040	7.852	0.744	0.510	0.583	0.874

4.2 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่

การใช้ค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาเป็นปัจจัยในอธิบายความสัมพันธ์ต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงานชิ้นงานในขณะตัด จะต้องวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในเชิงความถี่ก่อน โดยจะยกตัวอย่างความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการตัดที่ ความเร็วตัด 260 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6



รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนเวลา



รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อนำข้อมูลสัญญาณแรงตัดพลวัตมาวิเคราะห์เทียบกับเวลาจะเห็นว่าลักษณะของสัญญาณข้อมูลเกิดเป็นรูปแบบที่เป็นลักษณะลูกคลื่นเช่นเดียวกับกับข้อมูลความขรุขระผิวชิ้นงาน ซึ่งการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสองสัญญาณนี้ จะต้องเปรียบเทียบ

ข้อมูลทีจุดอ้างอิงเดียวกัน จึงใช้ระยะทางการตัดที่เท่ากันในการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ ซึ่งการหาระยะทางการมีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

4.2.1 การคำนวณระยะทางการกลิ้งใน 1 วินาที

1. คำนวณความเร็วรอบของชิ้นงาน (Nw) สำหรับใช้หาความเร็วป้อน จากสมการที่ 4.2-1

$$N_w = 1000v/\pi D \quad (4.2-1)$$

โดยที่ v คือ ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที) และ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร) ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} N_w &= 1000 \cdot (260) / \pi \cdot (43.5) \\ &= 1,903.51 \text{ รอบต่อนาที} \end{aligned}$$

2. คำนวณความเร็วป้อนตัดในแนวเส้นตรง (Vf) สำหรับใช้หาระยะทางการตัด ตามสมการที่ 4.2-2

$$V_f = fN_w \quad (4.2-2)$$

โดยที่ f คือ อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ) ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} V_f &= (0.2) \cdot (1,903.51) \\ &= 380.70 \text{ มิลลิเมตรต่อนาที} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} S &= V_f/60 \\ &= 380.70 / 60 \\ &= 6.35 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

4.2.2 การคำนวณจำนวนข้อมูลของความขรุขระผิวชิ้นงาน

เนื่องจากอัตราสุ่มของการเก็บข้อมูลแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าไม่เท่ากัน โดยแรงตัดพลวัตใช้อัตราสุ่มเท่ากับ 1,000 ข้อมูลต่อวินาที ขณะที่ความขรุขระผิวชิ้นงานใช้อัตราสุ่มเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที จึงต้องทำการคำนวณหาจำนวนข้อมูลของความขรุขระผิวชิ้นงานที่เท่ากับระยะทางการกลิ้งใน 1 วินาที ซึ่งการวัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานได้ทำการตั้งค่า

เพิ่มวัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน ให้สัมพันธ์และลากวัดบนผิวชิ้นงานด้วยความเร็วเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ด้วยระยะทางการวัดเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร ทำให้ในการวัดความขรุขระผิวจะใช้เวลาในการวัดทั้งหมดเท่ากับ $12.5/0.5 = 25$ วินาที ดังนั้นหากใช้ระยะทางในการกลึง 1 วินาที จำนวนข้อมูลความขรุขระผิวชิ้นงานที่ต้องใช้ในการเปรียบเทียบ สามารถคำนวณได้ ดังนี้

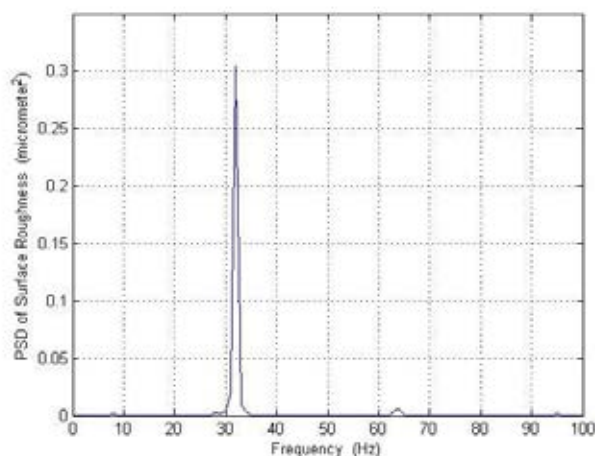
$$\text{จำนวนข้อมูล} = (\text{ระยะทางในการตัด } 1 \text{ วินาที} / 0.5) \cdot 400$$

เมื่อระยะทางการตัด คือ 6.35 มิลลิเมตร ดังนั้น

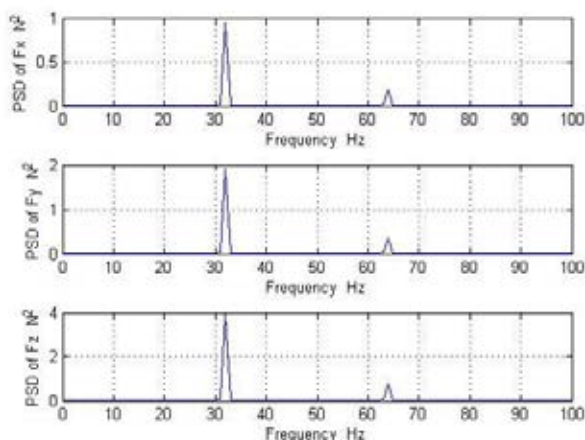
$$\begin{aligned} \text{จำนวนข้อมูล} &= (6.35 / 0.5) \cdot 400 \\ &= 5,077 \text{ ข้อมูล} \end{aligned}$$

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงถึงสัญญาณคลื่นแรงตัดพลวัต และความขรุขระผิวชิ้นงาน ด้วยระยะทางในการตัด 1 วินาทีที่เท่ากัน จะสังเกตได้ได้ว่าในระยะเวลาอ้างอิงที่เท่ากัน ความขรุขระผิวชิ้นงานและสัญญาณแรงตัดเกิดจำนวนลูกคลื่นที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าทั้งความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตจะมีความถี่ที่สอดคล้องกัน

ซึ่งเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาแปลงด้วยฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ด้วยจำนวนข้อมูลที่คำนวณได้ เพื่อทำการวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนความถี่ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และทำเช่นเดียวกันที่ข้อมูลแรงตัดพลวัต จะได้สัญญาณแรงตัดพลวัตที่ถูกวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.4 ผลปรากฏว่าความถี่ของแรงตัดพลวัตมีความถี่เท่ากับ 32 Hz ซึ่งสอดคล้องตรงกันกับความถี่ของความขรุขระผิวชิ้นงาน ดังนั้นสรุปได้ว่าความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตมีความสัมพันธ์กันสามารถใช้แรงตัดพลวัตที่วัดได้ในกระบวนการ มาทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดได้



รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ความขรุขระผิวในโดเมนความถี่



รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตในเชิงความถี่ในงานวิจัยนี้เป็น การวิเคราะห์ความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดพลวัตสำหรับเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะ แบบต่อเนื่องเท่านั้น ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์เพื่อพัฒนาเป็นสมการทำนายความขรุขระ ผิวชิ้นงานต่อไป สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัด พลวัตในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่สำหรับเงื่อนไขการตัดอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ค

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของแรงตัดพลวัตและลักษณะของเศษโลหะ

4.3.1 ความถี่แรงตัดพลวัตสำหรับเศษโลหะแบบต่อเนื่อง

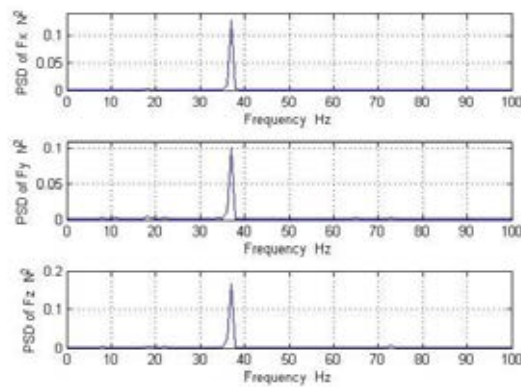
การตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีที่มีคุณภาพและเป็นที่ต้องการคือ การตัดที่ให้เศษโลหะเป็น แบบต่อเนื่อง เนื่องจากการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องจะทำให้ได้ผิวชิ้นงานที่ดี เพราะใช้แรงตัดที่ น้อย แต่อย่างไรก็ตามการตัดที่ให้เศษโลหะแบบต่อเนื่องจะต้องมีการควบคุมให้เศษโลหะมีการ แยกหักบ้าง ด้วยการใส่ตัวหักเศษ (Chip breaker) เพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน และไม่ เกี่ยวพันรอบชิ้นงานซึ่งจะส่งผลเสียต่อคุณภาพผิวตามมา ซึ่งการกลึงที่ทำให้เกิดเศษโลหะ แบบต่อเนื่องนี้ พบว่าแรงที่เกิดขึ้นขณะตัดจะมีค่าความถี่ต่ำ นอกจากนี้ยังมีความสอดคล้องกับ ความขรุขระผิวชิ้นงานที่โดเมนความถี่ด้วย ซึ่งความถี่เหล่านี้จะนำมาพิจารณาความสัมพันธ์ ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาต่อไป

รูปที่ 4.5 แสดงเศษโลหะแบบต่อเนื่อง รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงความถี่ของแรงตัดพลวัต และความขรุขระผิวชิ้นงานที่เกิดขึ้น ที่ความเร็วตัด 260 เมตร/นาที อัตราการป้อน 0.3 มิลลิเมตร/

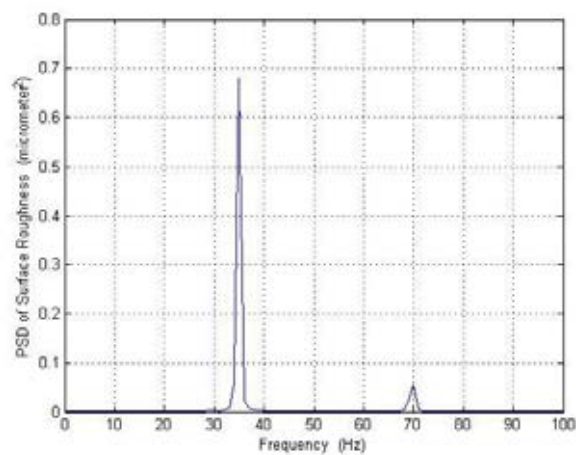
รอบ ความลึกตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มกมิต 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ 11 ซึ่งเมื่อนำมาพิจารณาเทียบกับความถี่ที่เกิดขึ้นของแรงพลวัตในขณะตัดจะพบว่ามีความสอดคล้องกัน



รูปที่ 4.5 เศษโลหะแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.6 ความถี่แรงตัดพลวัตของเศษโลหะแบบต่อเนื่อง



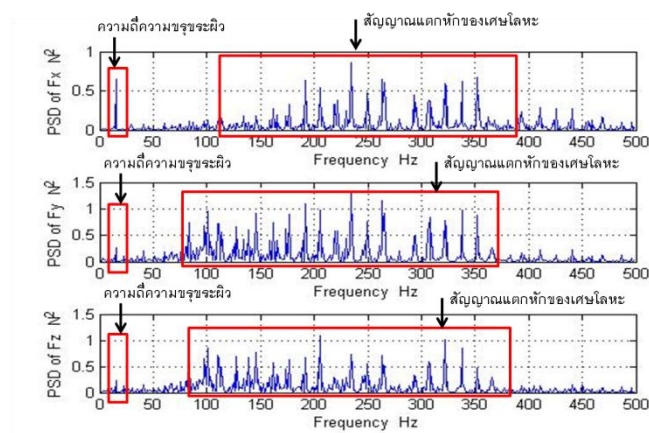
รูปที่ 4.7 ความถี่ความขรุขระผิวชิ้นงานของเศษโลหะแบบต่อเนื่อง

4.3.2 ความถี่แรงตัดพลวัตสำหรับเศษโลหะแบบแตกหัก

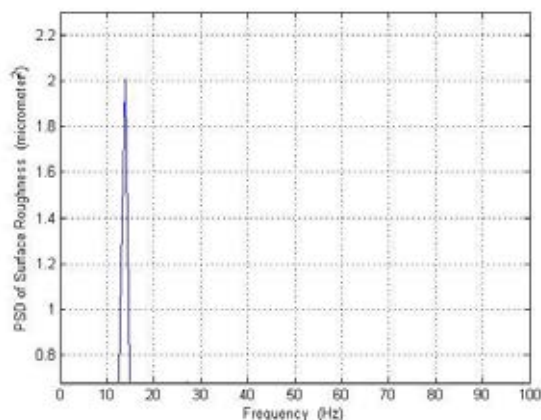
รูปที่ 4.8 แสดงถึงเศษโลหะแบบแตกหัก รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงความถี่ของแรงตัดพลวัตและความขรุขระที่เกิดขึ้น ที่ความเร็วตัด 100 เมตร/นาที อัตราการป้อน 0.4 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6



รูปที่ 4.8 เศษโลหะแบบแตกหัก



รูปที่ 4.9 ความถี่แรงตัดพลวัตของเศษโลหะแบบแตกหัก



รูปที่ 4.10 ความถี่ความขรุขระผิวชิ้นงานของเศษโลหะแบบแตกหัก

จากรูปที่ 4.8 ถึง 4.10 แสดงเงื่อนไขการกลึงที่ให้เศษโลหะแบบแตกหัก พบว่าแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดจะมีความถี่ที่สูงกว่าการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง และความถี่ที่ได้จะเป็นความถี่ของการแตกหักเศษโลหะ ซึ่งไม่สามารถแยกออกจากความถี่ของความขรุขระผิวได้ง่าย ดังนั้นในการพัฒนาเป็นสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานจะไม่นำเงื่อนไขการตัดนั้นๆ มาพิจารณา เนื่องจากสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดเป็นเศษโลหะแบบแตกหักนี้ จะส่งผลต่อพื้นที่ได้กราฟด้วย ทำให้การคำนวณเกิดความคลาดเคลื่อนได้ [29]

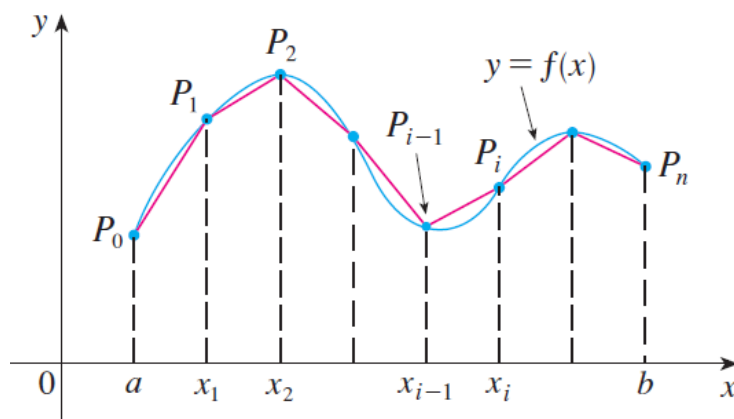
อย่างไรก็ตามลักษณะความถี่ของสัญญาณแรงตัดพลวัตนี้ สามารถใช้การศึกษาด้วยวิธีอื่น เพื่อแยกสัญญาณให้ละเอียดและได้ผลที่ดียิ่งขึ้น เช่น วิเคราะห์การแยกสัญญาณด้วยโปรแกรมเวฟเล็ต ซึ่งจะทำให้นำสัญญาณแรงตัดพลวัตมาอธิบายความขรุขระผิวได้ดียิ่งขึ้น แม้เงื่อนไขการตัดจะให้เศษโลหะเป็นแบบแตกหักก็ตาม

4.4 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา

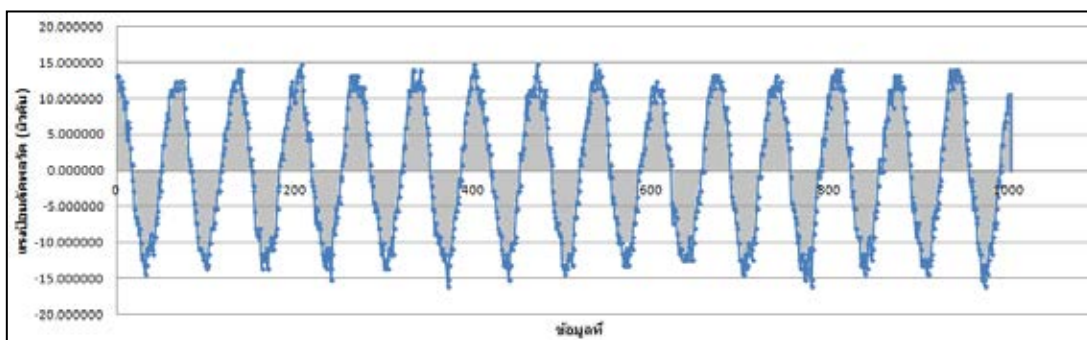
เมื่อวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนความถี่ที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ แล้ว พบว่ามีความสัมพันธ์สอดคล้องกันในเชิงความถี่ จึงสามารถนำเงื่อนไขการตัดนั้นๆ มาพัฒนาเป็นสมการทำนายความขรุขระผิวขณะตัดที่เกิดขึ้นในโดเมนเวลา โดยการวิเคราะห์พื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดพลวัต ด้วยการประยุกต์ใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) จากสมการที่ 4.4 มาใช้ในการหาพื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดพลวัต ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.12

การวิเคราะห์ด้วยพื้นที่ใต้กราฟ เป็นการนำข้อมูลสัญญาณแรงตัดพลวัตทุกข้อมูลที่เกิดขึ้นในขณะตัดมาทำการวิเคราะห์ ซึ่งคาดหวังว่าจะทำให้ได้ค่าความแม่นยำที่สูงขึ้นกว่างานวิจัยที่ผ่านมาที่ทำการวิเคราะห์ด้วยแรงตัดสถิต

$$\frac{1}{2}d(f(a)+2f(x_1)+2f(x_2)+L+2f(x_{n-1})+f(b)) \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างการหาพื้นที่ด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู



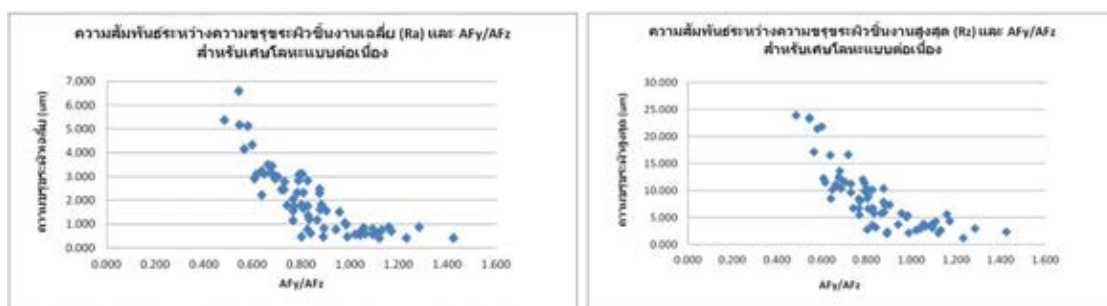
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างพื้นที่แรงตัดพลวัตที่เงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมิต 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6

อย่างไรก็ตามขนาดของแรงตัดพลวัตอาจแปรเปลี่ยนตามเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันไป ดังนั้นอัตราส่วนของแรงตัดพลวัตจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อประมาณค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยสันนิษฐานว่าอัตราส่วนแรงตัดสามารถคำนวณความขรุขระผิวชิ้นงานได้โดยไม่แปรเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขการตัด [4, 5] โดยการประยุกต์ใช้การหาพื้นที่ของแรงป้อนตัดพลวัต (AFy) และพื้นที่แรงตัดหลักพลวัต (AFz) แล้วจึงทำการนำพื้นที่ของทั้งสองแรงที่เกิดขึ้น มาหารกันเป็นอัตราส่วนของพื้นที่แรงตัดพลวัต (AFy/AFz) ทำให้สามารถใช้อธิบายความขรุขระผิวชิ้นงานได้แม้เงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไป [29] ผลการคำนวณอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตสำหรับเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะแบบต่อเนื่อง แสดงไว้ตามตารางที่ 4.1

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัต

จากรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราส่วนพื้นที่แรงตัด (AFy/AFz) สำหรับเศษโลหะแบบต่อเนื่อง สังเกตได้ว่าเมื่อพิจารณาเฉพาะเศษโลหะแบบต่อเนื่อง จะสามารถใช้อัตราส่วนพื้นที่แรงตัด (AFy/AFz) ในการอธิบายความขรุขระผิวได้ดี นั่นคือค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตเพิ่มขึ้น ซึ่งเข้าใจได้ว่าแรงตัดหลักพลวัต (Fz) ได้รับอิทธิพลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแรงป้อนตัดพลวัต (Fy) อัตราส่วนแรงตัดจึงลดลง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาอัตราส่วนแรงตัดพลวัต เฉพาะเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องเท่านั้น เนื่องจากสามารถใช้อธิบายความขรุขระผิวชิ้นงานได้ แม้เงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะแบบแตกหักจะไม่สามารถนำมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟและความขรุขระผิว เนื่องจากขณะเกิดการแตกหักสัญญาณของแรงตัดพลวัตจะถูกตรวจวัดและบันทึกผลโดยไม่สามารถระบุได้ว่าสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น เป็นสัญญาณของการแตกหักหรือสัญญาณของแรงที่ใช้ในการตัดจริง จึงส่งผลให้ค่าอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัตมีลักษณะความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นระบบ และไม่สามารถนำมาอธิบายความขรุขระผิวได้



(ก) ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)

(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราส่วนพื้นที่แรงตัด (AFy/AFz) สำหรับเศษโลหะแบบต่อเนื่อง

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดและการเกิดเศษโลหะ

จากการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่ใช้ในการกลึงชิ้นงาน ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิด และมุมคายเศษโลหะ ล้วนมีผลทำให้เศษโลหะที่ได้มีลักษณะที่ต่างกัันทั้ง ขนาด ความยาว ความกว้างและความหนา ดังแสดงในภาคผนวก ง ซึ่งนอกจากปัจจัยด้านเงื่อนไขที่ใช้ในการตัดแล้ว การเกิดเศษโลหะยังถือว่าเป็นกลไกที่ค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งการเปลี่ยนรูป

ชิ้นงานโลหะเป็นเศษโลหะที่เกิดขึ้น ณ บริเวณระนาบเฉือน (Shear plane) หรือพื้นที่เฉือน (Shear area) อยู่ภายใต้อิทธิพลของปัจจัยหลายตัว เช่น ชนิดของวัสดุ เรขาคณิตของมีดตัด อุณหภูมิการตัด แรงที่เกิดขึ้นขณะตัด และลักษณะการเคลื่อนที่พลศาสตร์ของเครื่องกลึง เป็นต้น แต่จากการทดลองสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดต่างๆ กับการเกิดเศษโลหะได้ดังนี้

4.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและการเกิดเศษโลหะ



(ก) 100 เมตร/นาที

(ข) 180 เมตร/นาที

(ค) 260 เมตร/นาที

รูปที่ 4.14 เศษโลหะที่ความเร็วตัด 100 180 และ 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มม.

ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจมูกมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6

จากรูปที่ 4.14 แสดงเศษโลหะที่ตัดด้วยความเร็วตัดที่ต่างกัน ที่ 100 180 และ 260 เมตร/นาที พบว่าเมื่อใช้ความเร็วตัดที่สูงกว่าจะทำให้ได้เศษโลหะที่มีความยาวต่อเนื่องมากกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการใช้ความเร็วตัดที่สูง ส่งผลให้อุณหภูมิการตัดมาก วัสดุเมื่อได้รับความร้อน จะเกิดการเปลี่ยนรูปและอ่อนตัว นุ่มมากขึ้น ทำให้เหล็กเหนียวและเคลื่อนที่ออกมาอย่างต่อเนื่อง จึงมีความยาวมากกว่าเมื่อใช้ความเร็วตัดต่ำ

4.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนตัดและการเกิดเศษโลหะ



(ก) 0.1 มม./รอบ

(ข) 0.2 มม./รอบ

(ค) 0.3 มม./รอบ

รูปที่ 4.15 เศษโลหะที่อัตราป้อนตัด 0.1 0.2 และ 0.3 มม./รอบ ความเร็วตัด 100 ม./นาที

ความลึกตัด 0.2 มม. รัศมีจมูกมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6

จากรูปที่ 4.15 แสดงเศษโลหะที่ตัดด้วยอัตราป้อนตัดที่ต่างกัน ที่ 0.1 0.2 และ 0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ พบว่าเมื่อใช้อัตราป้อนตัดที่ต่ำกว่าจะทำให้ได้เศษโลหะที่มีความยาวต่อเนื่อง

มากกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อใช้อัตราการป้อนตัดสูง ส่งผลให้ความหนาของเศษโลหะมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะทำให้โลหะเกิดการโค้งงอและเคลื่อนชนกับหน้าคานเศษโลหะของมีดตัด ซึ่งนำไปสู่การแตกหักของเศษโลหะได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ขนาดความยาวของเศษโลหะสั้นกว่าเมื่อใช้อัตราป้อนตัดต่ำ

4.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและการเกิดเศษโลหะ



(ก) 0.2 มม.

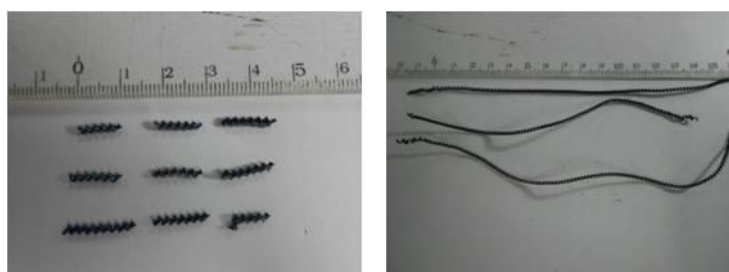
(ข) 0.5 มม.

(ค) 0.8 มม.

รูปที่ 4.16 เศษโลหะที่ความลึกตัด 0.2 0.5 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 180 ม./นาที
อัตราป้อนตัด 0.2 มม. รัศมีจุมุกมีด 0.4 มม. และมุมคานเศษโลหะ -6

จากรูปที่ 4.16 แสดงเศษโลหะที่ตัดด้วยความลึกตัดที่ต่างกัน ที่ 0.2 0.5 และ 0.8 มิลลิเมตรพบว่าเมื่อใช้ความลึกตัดที่ต่ำกว่าจะทำให้ได้เศษโลหะที่มีความยาวต่อเนื่องมากกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อใช้ความลึกตัดมาก ส่งผลให้เศษโลหะมีขนาดกว้างมากขึ้น ซึ่งเมื่อเคลื่อนที่ชนกับหน้าคานเศษโลหะของมีดตัดจะทำให้เกิดการแตกหักของเศษโลหะได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ขนาดความยาวของเศษโลหะสั้นกว่าที่ใช้ความลึกตัดต่ำ

4.6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีจุมุกมีดและการเกิดเศษโลหะ



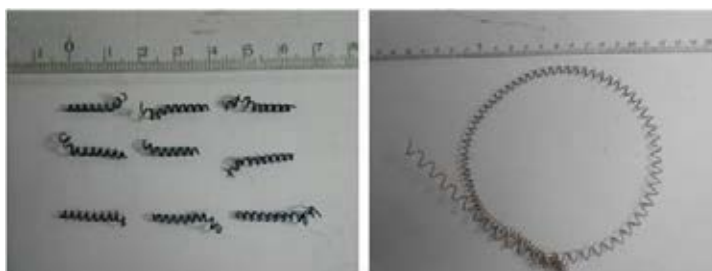
(ก) 0.4 มม.

(ข) 0.8 มม.

รูปที่ 4.17 เศษโลหะที่รัศมีจุมุกมีด 0.4 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 260 ม./นาที
ความลึกตัด 0.5 มม. และมุมคานเศษโลหะ -6

จากรูปที่ 4.17 แสดงเศษโลหะที่ตัดด้วยรัศมีจุมุกมีดที่ต่างกัน ที่ 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อใช้รัศมีจุมุกมีดที่มากกว่าจะทำให้ได้เศษโลหะที่มีความยาวต่อเนื่องมากกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า รัศมีจุมุกมีดที่น้อย จะทำให้ได้เศษโลหะที่มีความหนามากกว่า ซึ่งเมื่อเคลื่อนที่ชนกับหน้าคายเศษโลหะของมีดตัดจะทำให้มีแนวโน้มการแตกหักของเศษโลหะได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ขนาดความยาวของเศษโลหะสั้นกว่าเมื่อเทียบกับเมื่อใช้รัศมีจุมุกมีดมาก

4.6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมคายเศษโลหะและการเกิดเศษโลหะ



(ก) -6 องศา

(ข) 11 องศา

รูปที่ 4.18 เศษโลหะที่มุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา ความเร็วตัด 180 ม./นาที

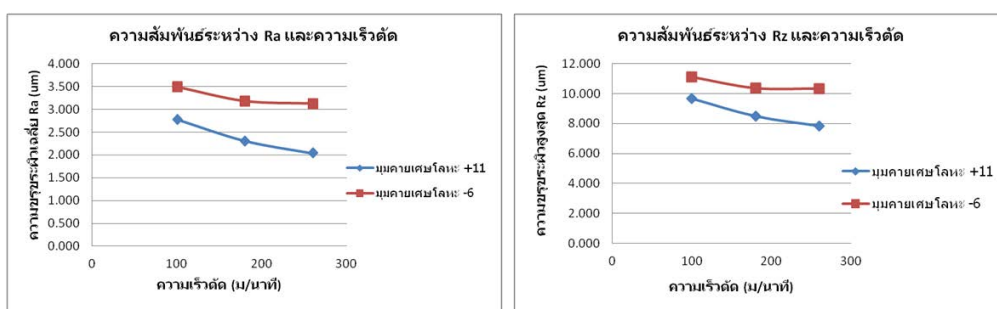
อัตราป้อนตัด 0.3 มม./รอบ ความลึกตัด 0.2 มม. และรัศมีจุมุกมีด 0.4 มม.

จากรูปที่ 4.18 แสดงเศษโลหะที่ตัดด้วยมุมคายเศษโลหะที่ต่างกัน ที่ -6 และ 11 องศา ซึ่งพบว่าเมื่อใช้มุมคายเศษโลหะที่มากกว่าจะทำให้ได้เศษโลหะที่มีความยาวต่อเนื่องมากกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า มุมคายเศษโลหะที่เป็นปัจจัยที่มีผลต่อมุมระนาบเฉือน ซึ่งเมื่อใช้มุมคายเศษโลหะที่มากกว่าจะมีผลทำให้ความหนาของเศษโลหะมีค่าน้อย ในทางตรงกันข้ามมุมคายเศษโลหะที่เล็กกว่าจะให้เศษโลหะที่หนามากกว่า ซึ่งเมื่อเคลื่อนที่ชนกับหน้าคายเศษโลหะของมีดตัดแล้ว จะมีผลให้มีแนวโน้มการแตกหักของเศษโลหะได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ขนาดความยาวของเศษโลหะสั้นกว่าเมื่อเทียบกับเมื่อใช้มุมคายเศษโลหะที่มาก

4.7 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของแรงป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัด และเงื่อนไขการตัดอื่น ๆ บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

จากผลการทดลองจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองหรือค่าความขรุขระผิวชิ้นงานกับเงื่อนไขการตัดต่างๆ ดังนี้

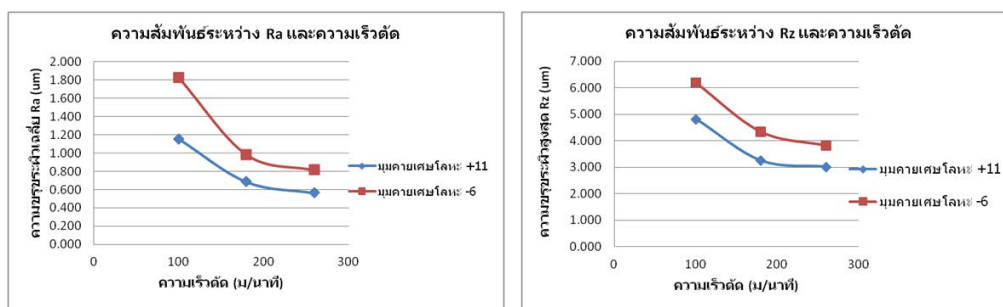
4.7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความเร็วตัด



(ก) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra)

(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz)

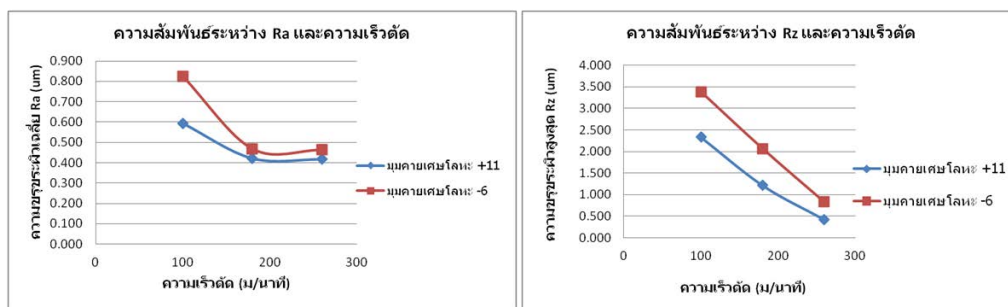
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความเร็วตัด ที่ความเร็วตัด 100 180 และ 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มม./รอบ ความลึกตัด 0.2 มม. และรัศมีจมูกมีด 0.4 มม.



(ก) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra)

(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความเร็วตัด ที่ความเร็วตัด 100 180 และ 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มม./รอบ ความลึกตัด 0.2 มม. และรัศมีจมูกมีด 0.4 มม.



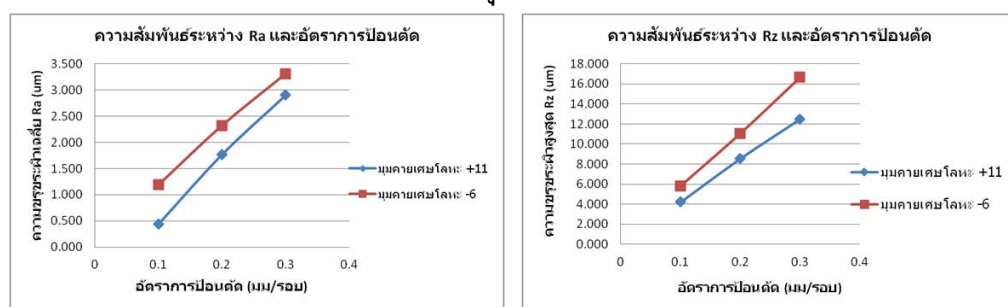
(ก) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra)

(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความเร็วตัด ที่ความเร็วตัด 100 180 และ 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มม./รอบ ความลึกตัด 0.2 มม. และรัศมีจุมกมีด 0.8 มม.

จากรูปที่ 4.19 ถึง 4.21 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความเร็วตัดที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้นความขรุขระผิวชิ้นงานจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดอุณหภูมิตัดเพิ่มมากขึ้น ความร้อนจึงสะสมที่ชิ้นงานมาก ทำให้วัสดุชิ้นงานอ่อนนุ่ม จึงใช้แรงในการตัดน้อย ดังนั้นผิวที่ได้มีคุณภาพที่ดี และจะสังเกตได้ว่ามุมคายเศษโลหะที่เป็นบวก จะให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่น้อยกว่ามุมคายเศษโลหะที่เป็นลบ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้มุมคายเศษโลหะที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้เศษโลหะที่เกิดขึ้นขณะตัดเคลื่อนที่ออกได้ง่าย ความต้านการเคลื่อนที่ของมีดตัดจะน้อย ดังนั้นแรงที่เกิดขึ้นขณะตัดจึงมีค่าน้อย ผิวที่ได้จึงดี และมีค่าความขรุขระผิวที่น้อยกว่ามุมคายเศษโลหะที่เป็นลบ

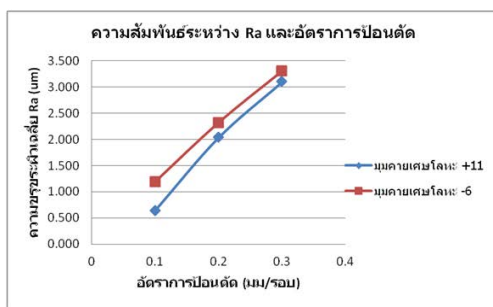
4.7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราการป้อนตัด



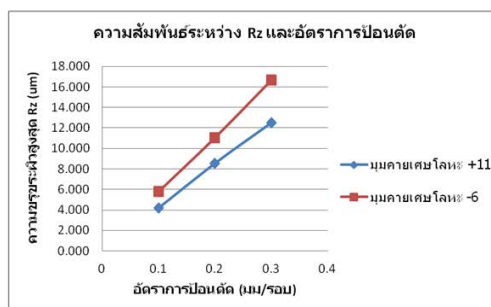
(ก) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra)

(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราการป้อนตัด ที่อัตราการป้อนตัด 0.1 0.2 และ 0.3 มม./รอบ ความเร็วตัด 260 ม./นาที ความลึกตัด 0.5 มม. และรัศมีจุมกมีด 0.8 มม.

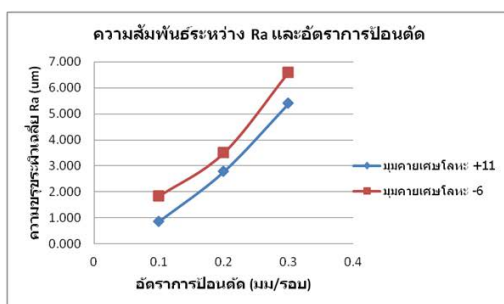


(ก) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra)

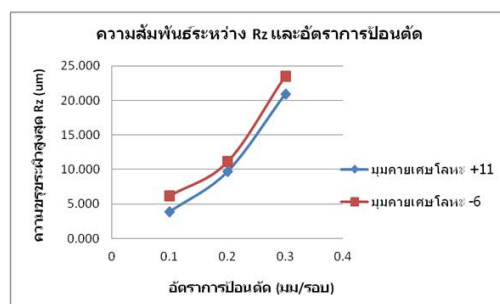


(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราการป้อนตัด ที่อัตราการป้อนตัด 0.1 0.2 และ 0.3 มม./รอบ ความเร็วตัด 260 ม./นาที ความลึกตัด 0.5 มม. และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มม.



(ก) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra)

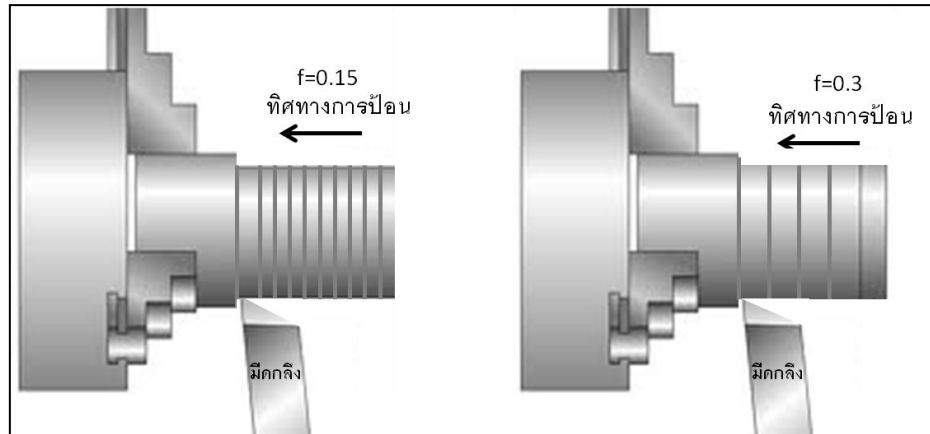


(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราการป้อนตัด ที่อัตราการป้อนตัด 0.1 0.2 และ 0.3 มม./รอบ ความเร็วตัด 100 ม./นาที ความลึกตัด 0.2 มม. และรัศมีจุมุมมีด 0.4 มม.

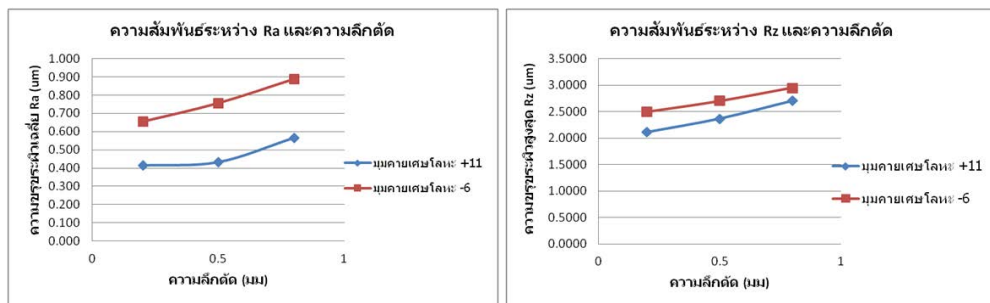
จากรูป 4.22 ถึง 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราการป้อนตัดที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มมากขึ้น ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนตัดในขณะที่ความลึกตัดเท่าเดิม จะทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงใช้แรงในการตัดมากขึ้น ส่งผลให้ผิวที่ได้มีความขรุขระมีค่ามากขึ้น รูปที่ 3.25 แสดงพื้นที่การตัดที่อัตราการป้อนตัดแตกต่างกันได้ ซึ่งให้ผลสอดคล้องตามทฤษฎีความขรุขระผิวด้วย นอกจากนี้ที่เงื่อนไขการตัดเดียวกันมุมคายเศษโลหะที่เป็นบวก จะให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่น้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการใช้มุมคายเศษโลหะที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้เศษโลหะที่เกิดขึ้นขณะตัดเคลื่อนที่ออกได้ง่าย ความ

ด้านการเคลื่อนที่ของมีดตัดจะน้อย ดังนั้นแรงตัดที่เกิดขึ้นจึงน้อย ผิวที่ได้จึงดีและมีค่าความขรุขระผิวที่น้อยกว่ามุมคายเศษโลหะที่เป็นลบ



รูปที่ 3.25 พื้นที่การตัดสำหรับอัตราการป้อนตัดที่แตกต่างกัน

4.7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความลึกตัด



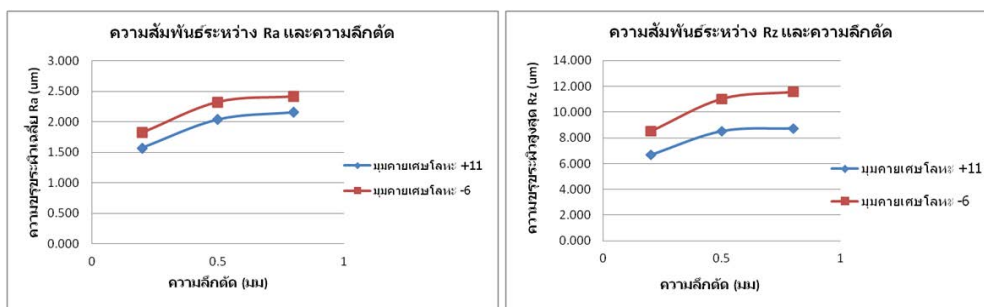
(ก) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra)

(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความลึกตัด ที่ความลึกตัด 0.2

0.5 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มม./รอบ

และรัศมีงูมมีด 0.8 มม.



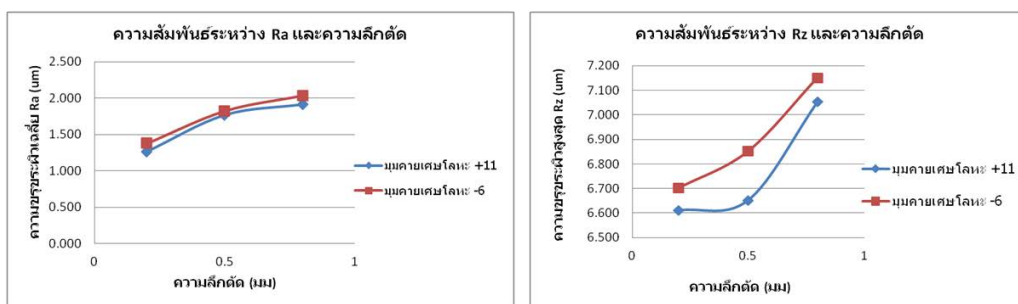
(ก) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra)

(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความลึกตัด ที่ความลึกตัด 0.2

0.5 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มม./รอบ

และรัศมีจุกมีด 0.8 มม.



(ก) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra)

(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz)

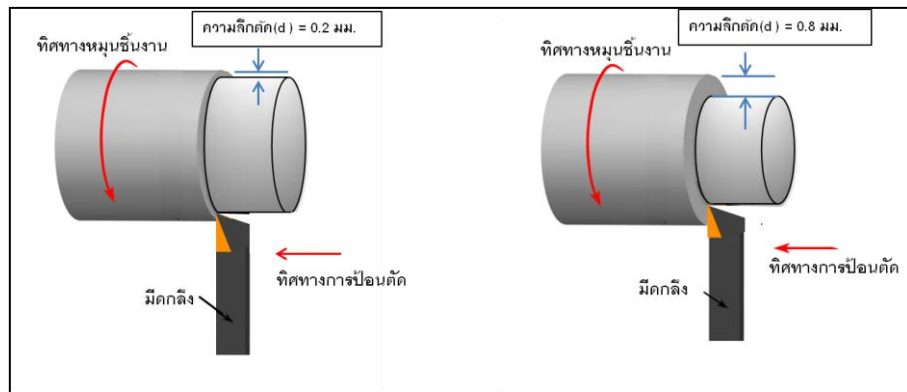
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความลึกตัด ที่ความลึกตัด 0.2

0.5 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มม./รอบ

และรัศมีจุกมีด 0.4 มม.

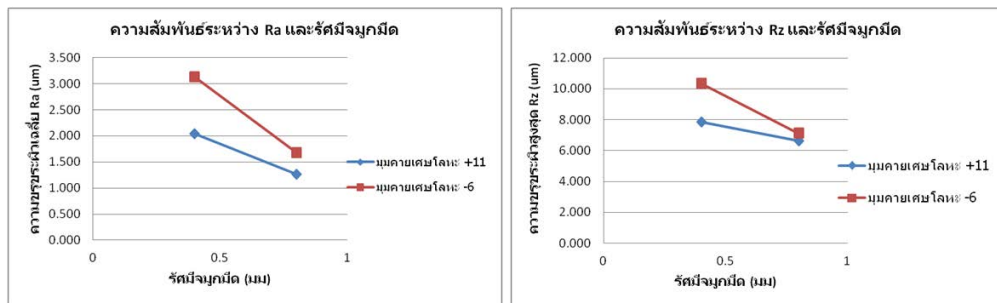
จากรูปที่ 4.26 ถึง 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความลึกตัด ที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ในทิศทางเช่นเดียวกัน กล่าวคือเมื่อความลึกตัดมากขึ้น ความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้ความลึกตัดที่มีค่าสูง จะทำให้ขณะตัดเกิดแรงสั่นสะเทือน ผิวที่ได้จึงไม่ดี นอกจากนี้ความลึกตัดที่เพิ่มมากขึ้นในขณะที่อัตราการป้อนตัดเท่าเดิมจะทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงใช้แรงในการตัดมากขึ้น ส่งผลให้ผิวที่ได้มีความขรุขระมีค่ามากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.29 แต่อย่างไรก็ตาม รูปที่ 4.27 สังเกตได้ว่าความชันของกราฟค่อนข้างคงที่เมื่อความลึกตัดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อธิบายได้ว่านอกจากความลึกตัดที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงานแล้ว ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น อัตราการป้อนตัด และรัศมีจุกมีด เป็นต้น ซึ่งสามารถใช้การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหา

ความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ต่อไปในหัวข้อ 4.9 และเช่นเดียวกับความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัด ที่เงื่อนไขการตัดเดียวกัน มุมคายเศษโลหะที่มากจะให้ผิวชิ้นงานที่ดี และมีค่าความขรุขระผิวน้อยกว่ามุมคายเศษโลหะที่น้อยกว่า



รูปที่ 4.29 พื้นที่การตัดสำหรับความลึกตัดที่แตกต่างกัน

4.7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวนำงานและรัศมีจุกมิด

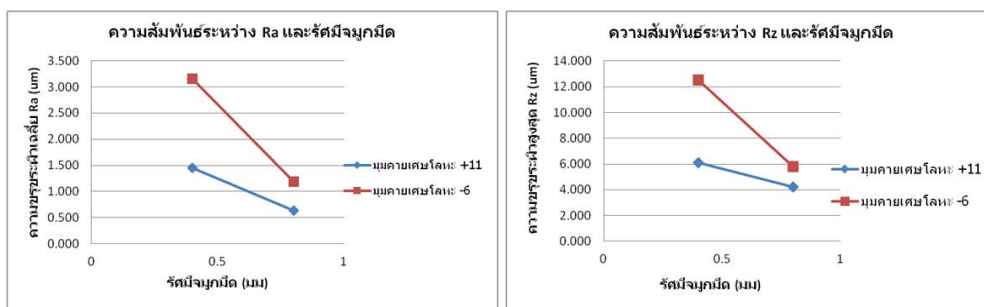


(ก) ความขรุขระผิวนำงานเฉลี่ย (Ra)

(ข) ความขรุขระผิวนำงานสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวนำงานกับรัศมีจุกมิด

ที่รัศมีจุกมิด 0.4 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มม./รอบ และความลึกตัด 0.2 มม.

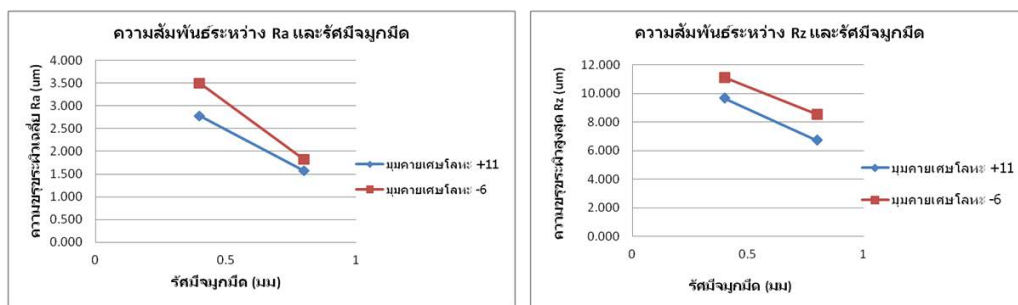


(ก) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra)

(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับรัศมีจุมุกมีด

ที่รัศมีจุมุกมีด 0.4 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มม./รอบ และความลึกตัด 0.5 มม.



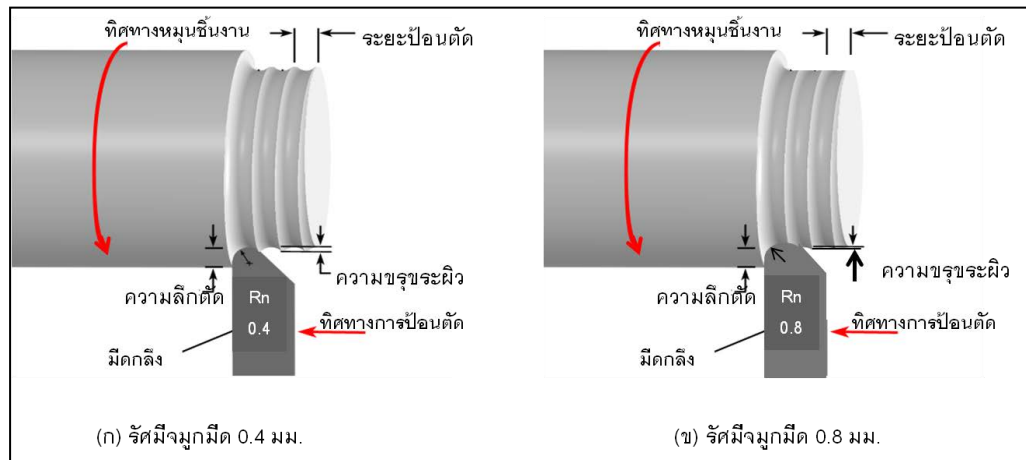
(ก) ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra)

(ข) ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับรัศมีจุมุกมีด

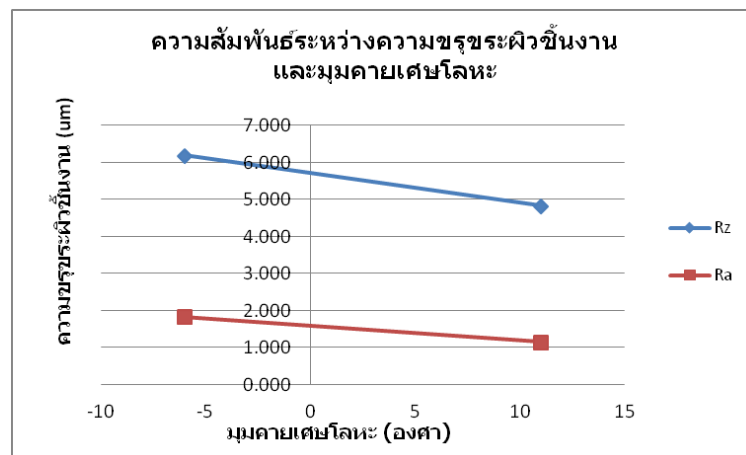
ที่รัศมีจุมุกมีด 0.4 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มม./รอบ และความลึกตัด 0.2 มม.

จากรูปที่ 4.30 ถึง 4.32 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับรัศมีจุมุกมีดที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ พบว่าค่าทั้งสองแปรผกผันต่อกัน กล่าวคือความขรุขระผิวงานที่ได้จะมีค่าน้อยลง เมื่อใช้มีดตัดที่มีรัศมีจุมุกมีดขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้รัศมีจุมุกมีดใหญ่จะช่วยลดรอยตัดที่เกิดจากการป้อนของมีดตัด (feed mark) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ตรงกับทฤษฎีความขรุขระผิว และสามารถแสดงการเปรียบเทียบได้ด้วยรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 อิทธิพลของรัศมีจุ่มกมิตต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน

4.7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและมุมคายเศษโลหะ



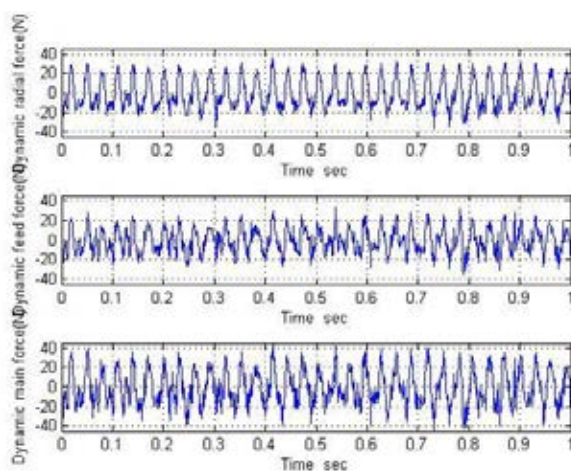
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับมุมคายเศษโลหะ ที่มุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา ความเร็วตัด 100 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.1 มม./รอบ ความลึกตัด 0.2 มม. และรัศมีจุ่มกมิต 0.4 มม.

จากรูป 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับมุมคายเศษโลหะ และจากรูป 4.19 ถึง 4.32 พบว่าค่าความขรุขระเฉลี่ย (Ra) และความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) มีค่าน้อยลง เมื่อมุมคายเศษโลหะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากมุมคายเศษโลหะที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้เศษโลหะที่เกิดขึ้นขณะตัดเคลื่อนที่ออกได้ง่าย สะดวก ความต้านการเคลื่อนที่ของมีดตัดจะน้อย ดังนั้นแรงตัดที่เกิดขึ้นจึงน้อย ผิวที่ได้จึงดี มีค่าความขรุขระผิวน้อยกว่ามุมคายเศษโลหะที่เป็นลบ

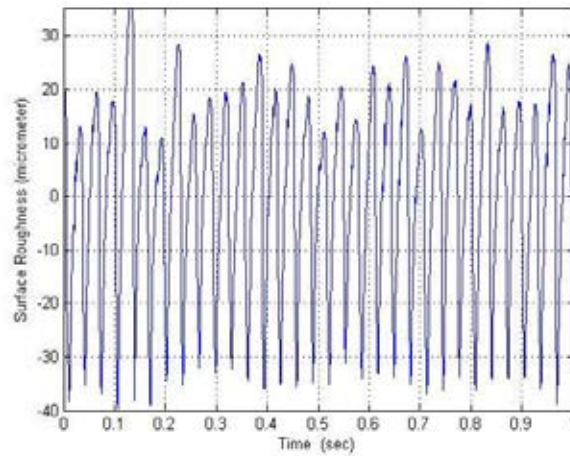
นอกจากนี้พบว่า ค่าความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) จะมีค่าสูงกว่าค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) เสมอ ดังแสดงใน รูป 4.19 ถึง 4.34 เนื่องจากค่าความขรุขระผิวสูงสุด คำนวณมาจากความขรุขระผิวที่สูงที่สุดในช่วงการทดสอบ ตามสมการคำนวณที่ 1.1-4

4.7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและพื้นที่ใต้กราฟแรงตัดพลวัต

จากการทดลองพบว่าขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณแรงตัดที่สูงแสดงถึงการใช้แรงตัดที่มาก ทำให้พื้นที่ใต้กราฟของแรงตัดพลวัตก็จะมาก ซึ่งการใช้แรงตัดมากนี้จะส่งผลให้ผิวชิ้นงานที่ได้มีความขรุขระผิวที่มากขึ้นด้วย ทั้งนี้เกิดจากแรงตัดที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้กระบวนการตัดเกิดการสั่นสะเทือนในขณะตัด ผิวชิ้นงานที่ได้จึงไม่ดี จากรูป 4.35 (ก) และ (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแอมพลิจูดของแรงตัดที่สูง ซึ่งส่งผลให้แอมพลิจูดของความขรุขระผิวสูงเช่นกัน ความขรุขระผิวที่ได้จึงมีค่าสูง ซึ่งจากการวัดด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงานพบว่า ความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) มีค่า 6.752 ไมโครเมตร และ 25.951 ไมโครเมตร ตามลำดับ



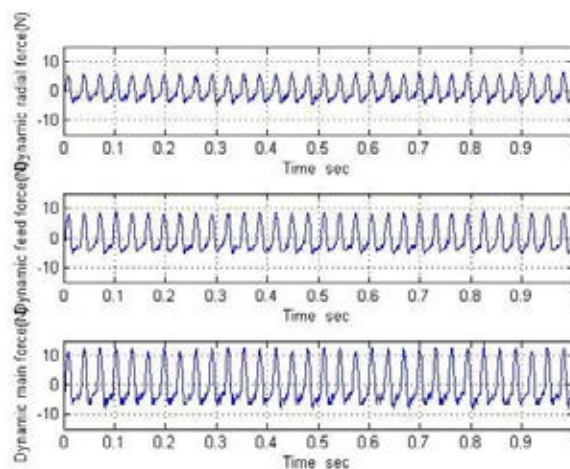
(ก) แอมพลิจูดสัญญาณแรงตัดพลวัต



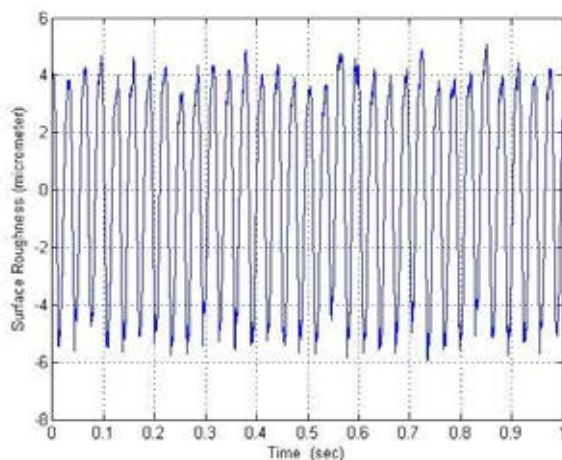
(ข) แอมพลิจูดความขรุขระผิวชิ้นงาน

รูปที่ 4.35 (ก) แอมพลิจูดสัญญาณแรงตัดพลวัต และ (ข) แอมพลิจูดความขรุขระผิวชิ้นงาน ที่ความเร็วตัด 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.4 มม./รอบ ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ในทางตรงกันข้ามถ้าขนาดแอมพลิจูดของแรงตัดที่น้อย หรือให้พื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตที่มีค่าน้อย จะส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้จากการตัดมีความเรียบผิวที่ดี แอมพลิจูดของความขรุขระผิวน้อย ความขรุขระผิวที่ได้จึงมีค่าน้อย ซึ่งจากการวัดด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงานพบว่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) มีค่า 3.127 ไมโครเมตร และ 10.335 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 4.36 (ก) และ (ข)



(ก) แอมพลิจูดสัญญาณแรงตัดพลวัต



(ข) แอมพลิจูดความขรุขระผิวชิ้นงาน

รูปที่ 4.36 (ก) แอมพลิจูดสัญญาณแรงตัดพลวัต และ (ข) แอมพลิจูดความขรุขระผิวชิ้นงาน ที่ความเร็วตัด 260 ม./นาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มม./รอบ ความลึกตัด 0.2 มม. รัศมีจุ่มมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

4.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) จะต้องทำการทดสอบข้อมูล โดยมีสมมติฐานว่าข้อมูลมีความผิดพลาดแบบสุ่ม เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวน (σ^2) มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่า โดยสามารถทำการทดสอบตามลำดับ ดังนี้

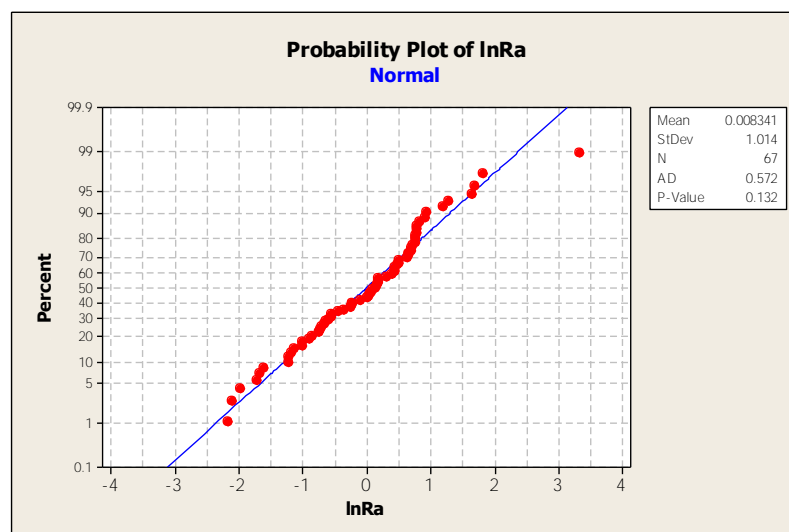
- 1) การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

4.8.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

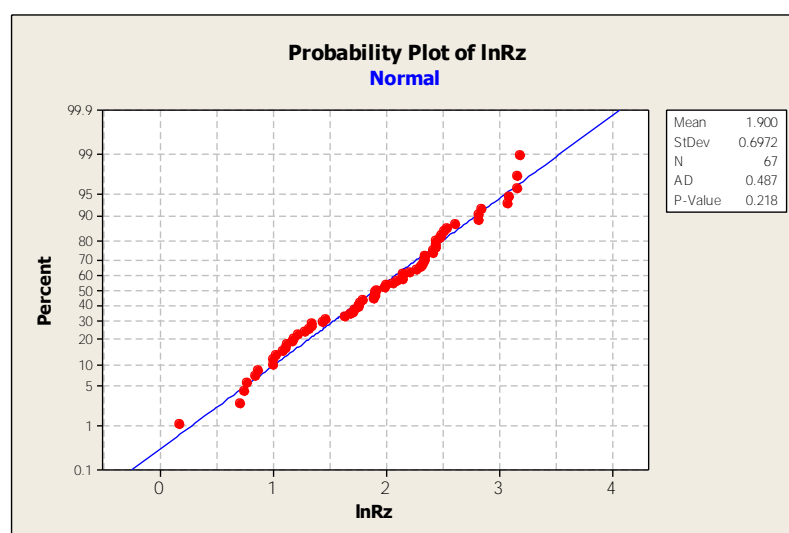
การตรวจสอบสมมติฐานของความปกติสามารถทำได้โดยการการสร้าง Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน (Residual) โดยมีสมมติฐานการทดสอบดังนี้

H_0 : ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

H_a : ข้อมูลไม่ได้มีการกระจายตัวแบบปกติ



รูปที่ 4.37 Normal Probability Plot ของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)

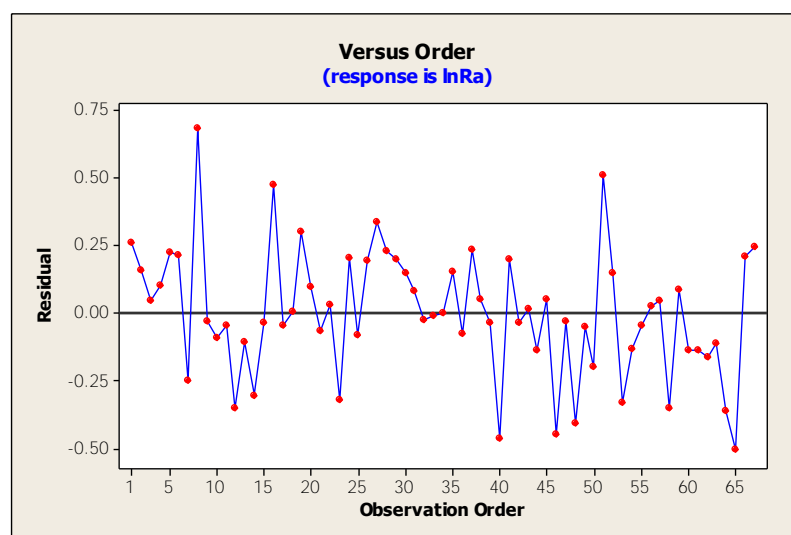


รูปที่ 4.38 Normal Probability Plot ของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

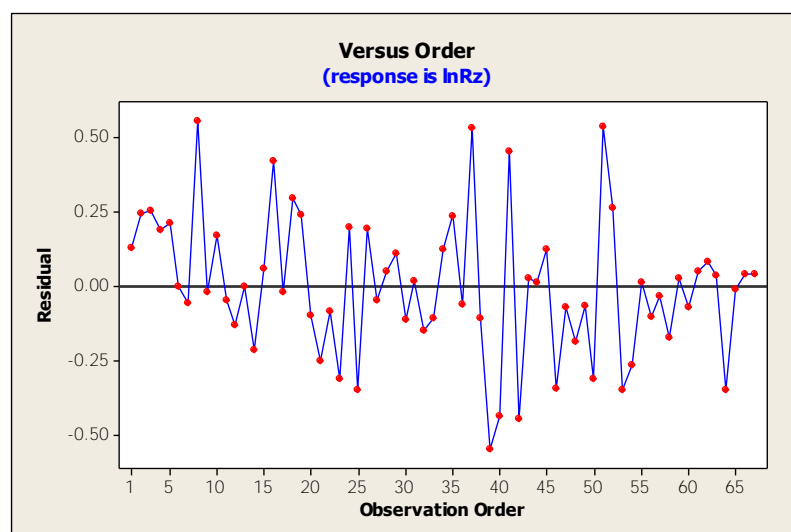
การทดสอบการกระจายแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ของความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) แสดงในรูปที่ 4.37 และ 4.38 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มที่เป็นลักษณะของเส้นตรง และมีค่า P-value = 0.132 และ 0.218 ซึ่งกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5 % ($\alpha=0.05$) ดังนั้นเมื่อ P-Value > α จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ทำให้สรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

4.8.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาหรือไม่ ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันว่าข้อมูลมีความอิสระ ค่าคลาดเคลื่อนไม่มีความเกี่ยวข้องกับเวลา ซึ่งบางครั้งอาจเกิดขึ้นได้ เนื่องจากขณะทำการทดลอง ผู้วิจัยอาจมีการพัฒนาทักษะเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ทำให้ลักษณะของข้อมูลมีความเกี่ยวข้องกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบโดยนำค่าคลาดเคลื่อนพล็อตกับเวลา หรือครั้งที่ทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.39 และ 4.40



รูปที่ 4.39 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)

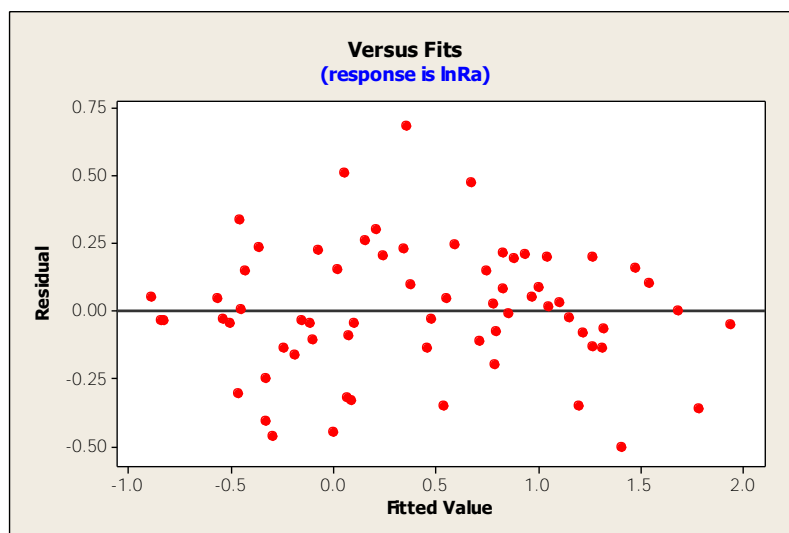


รูปที่ 4.40 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

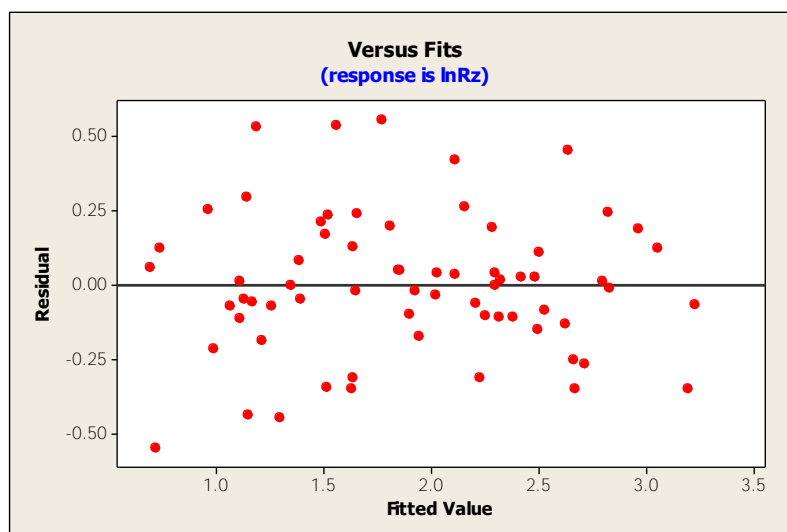
จากรูป 4.39 และ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับการเก็บข้อมูลของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) ตามลำดับ ซึ่งพบว่าลักษณะของค่าคลาดเคลื่อนจากทั้งสองรูปไม่มีลักษณะเป็นรูปแบบใดแบบหนึ่ง หรือเป็นวัฏจักร และมีการกระจายตัวอยู่รอบ 0 อย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีความเป็นอิสระ

4.8.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนเป็นการตรวจสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยจะทำการทดสอบว่าค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระใดๆ รวมถึงค่าของของตอบที่ถูกทำนาย (Predicted Response) ซึ่งก็คือค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน การทดสอบทำได้โดยพล็อตค่าคลาดเคลื่อนกับค่าที่ถุกฟิต (Fitted Value) ดังแสดงในรูปที่ 4.41 และ 4.42



รูปที่ 4.41 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระเฉลี่ย (R_a)



รูปที่ 4.42 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

จากรูป 4.41 และ 4.42 แสดงการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวชิ้นงาน (Ra) และความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) ตามลำดับ พบว่าค่าคลาดเคลื่อนของทั้งสองรูปมีการกระจายตัวอยู่รอบ 0 อย่างสม่ำเสมอ โดยไม่มีลักษณะเป็นรูปแบบใดแบบหนึ่งที่ชัดเจน และไม่มีจุดที่ออกห่างจาก 0 มากกว่าจุดอื่นๆ อย่างผิดปกติ ซึ่งหมายถึงความแปรปรวนของชุดข้อมูลมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง

4.9 สมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงาน

จากผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.1 แสดงถึงเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะแบบต่อเนื่องที่สามารถนำมาพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิว โดยเมื่อนำเงื่อนไขการตัดต่างๆ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด วัสดุมีจุ่มกมิต และมุมคายเศษโลหะ รวมถึงอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัตมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple linear regression analysis) และใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยได้สมการทำนายความขรุขระผิว ดังนี้

$$\ln R_a = 3.46 - 0.239 \ln V + 1.22 \ln f + 0.163 \ln D - 0.650 \ln R_n - 0.0158 \gamma - 0.82 \ln \left(\frac{AF_y}{AF_z} \right) \quad (4.9-1)$$

$$\ln R_z = 4.99 - 0.249 \ln V + 1.08 \ln f + 0.226 \ln D - 0.612 \ln R_n - 0.0127 \gamma - 0.655 \ln \left(\frac{AF_y}{AF_z} \right) \quad (4.9-2)$$

จากนั้นทำการทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย
2. การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว

4.9.1 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย

การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย คือการทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง หรือค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน และตัวแปรอิสระ ที่ประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด และมุมคายเศษโลหะ หรือไม่ แสดงขั้นตอนดังนี้

- 1) เมื่อตัวแปรตอบสนองคือความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) มีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

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

ซึ่งสามารถตรวจสอบความมีนัยสำคัญได้จากตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย R_a

Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	33.4376	5.5729	92.71	0.000
Residual Error	60	3.6068	0.0601		
Total	66	37.0444			
Source	DF	Seq SS			
Inv	1	1.8243			
Inf	1	25.7349			
Ind	1	0.1568			
InRn	1	3.7768			
r	1	1.2936			
In(Afy/Afz)	1	0.6514			

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอยพบว่าค่า P-value (0.000) มีค่าน้อยกว่า α ซึ่งกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5% ($\alpha=0.05$) ดังนั้นจึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปได้ว่า มีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัว ที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนอง นั่นคือสมการถดถอยสามารถนำมาใช้ได้

2) เมื่อตัวแปรตอบสนองคือความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) มีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

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

ซึ่งสามารถตรวจสอบความมีนัยสำคัญได้จากตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงการวิเคราะห์ ANOVA ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย Rz

Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	28.4051	4.7342	77.26	0.000
Residual Error	60	3.6765	0.0613		
Total	66	32.0817			

Source	DF	Seq SS
Inv	1	1.6811
Inf	1	21.7282
Ind	1	0.4744
InRn	1	3.2703
r	1	0.8361
In(Afy/Afz)	1	0.4151

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอยพบว่าค่า P-value (0.000) มีค่าน้อยกว่า α ซึ่งกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5 % ($\alpha=0.05$) ดังนั้นจึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปได้ว่า มีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัว ที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนอง นั่นคือสมการถดถอยสามารถนำมาใช้ได้

4.9.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว

เป็นการทดสอบว่าตัวแปรอิสระ (X) แต่ละตัวที่มีอยู่ในสมการ มีความสามารถในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงหรือการเคลื่อนไหวของตัวแปรตาม คือความขรุขระผิวชิ้นงาน (Y) หรือไม่ โดยสามารถทำการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

1) เมื่อตัวแปรตอบสนองคือความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra) มีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0$$

ซึ่งสามารถตรวจสอบความมีนัยสำคัญได้จากตารางที่ 4.4 ซึ่งทำการคำนวณด้วยโปรแกรม ให้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.4 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัวสำหรับ Ra

The regression equation is				
lnRa = 3.46 - 0.239 lnV + 1.12 lnF + 0.163 lnD - 0.650 lnRn - 0.0158 r - 0.820 ln(Afy/Afz)				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3.4591	0.5623	6.15	0.000
lnV	-0.23854	0.08249	-2.89	0.005
lnF	1.1240	0.1167	9.63	0.000
lnD	0.16296	0.05973	2.73	0.008
lnRn	-0.64969	0.09879	-6.58	0.000
r	-0.015817	0.003798	-4.16	0.000
ln(Afy/Afz)	-0.8199	0.2491	-3.29	0.002
S = 0.245182 R-Sq = 90.3% R-Sq(adj) = 89.3%				

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว พบว่าตัวแปรที่อยู่ในสมการ ได้แก่ lnV, lnF, lnD, lnRn, r, และ ln(Afy/Afz) โดยค่า P-value มีค่าน้อยกว่า α ซึ่งกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5 % ($\alpha=0.05$) ดังนั้นจึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปได้ว่า ตัวแปรดังกล่าวควรมีอยู่ในสมการถดถอย และสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าความขรุขระผิวได้อย่างมีนัยสำคัญ

2) เมื่อตัวแปรตอบสนองคือความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) มีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0$$

ซึ่งสามารถตรวจสอบความมีนัยสำคัญได้จากตารางที่ 4.5 ซึ่งทำการคำนวณด้วยโปรแกรม ให้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.5 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว สำหรับ Rz

The regression equation is				
$\ln Rz = 4.99 - 0.249 \ln v + 1.08 \ln f + 0.226 \ln d - 0.612 \ln Rn - 0.0127 r - 0.655 \ln(Afy/Afz)$				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4.9938	0.5677	8.80	0.000
lnv	-0.24887	0.08328	-2.99	0.004
lnf	1.0775	0.1178	9.15	0.000
lnd	0.22556	0.06031	3.74	0.000
lnRn	-0.61215	0.09974	-6.14	0.000
r	-0.012725	0.003834	-3.32	0.002
ln(Afy/Afz)	-0.6545	0.2515	-2.60	0.012
S = 0.247539 R-Sq = 88.5% R-Sq(adj) = 87.4%				

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว พบว่าตัวแปรที่อยู่ในสมการ ได้แก่ lnV, lnf, lnD, lnRn, r, และ ln(AFy/AFz) มีค่า P-value ที่น้อยกว่า α ซึ่งกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5 % ($\alpha=0.05$) ดังนั้นจึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปได้ว่า ตัวแปรดังกล่าวควรมีอยู่ในสมการถดถอย และสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าความขรุขระผิวสูงสุดได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากตารางที่ 4.4 และ 4.5 พบว่า lnV, lnf, lnD, lnRn, r, และ ln(AFy/AFz) สามารถใช้อธิบายตัวแปร y ได้ทั้งในสมการความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) และความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) โดยพบว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละปัจจัยมีค่าและเครื่องหมายที่แตกต่างกัน กล่าวคือค่าสัมประสิทธิ์สามารถบ่งบอกได้ทั้งขนาดและทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นๆที่มีต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยหากปัจจัยมีสัมประสิทธิ์ที่เป็นเครื่องหมายบวก จะหมายถึงปัจจัยนั้นมีความสัมพันธ์ต่อความขรุขระผิวในลักษณะแปรผันตรงต่อกัน ในทางตรงกันข้ามถ้าปัจจัยมีสัมประสิทธิ์ที่เป็นเครื่องหมายลบ จะหมายถึงปัจจัยนั้นลักษณะแปรผกผันกับความขรุขระผิวชิ้นงาน

จากสมการจะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของความเร็วตัดมีค่าเป็นลบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความเร็วตัดเพิ่มมากขึ้น ค่าความขรุขระผิวมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเร็วตัดสูง จะส่งผลให้อุณหภูมิตัดสูง วัสดุชิ้นงานอ่อนนุ่มลง ดังนั้นจึงใช้แรงในการตัดน้อยลง ส่งผลให้ความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าน้อย ทำให้ได้คุณภาพผิวการตัดที่ดี

ขณะที่อัตราการป้อนตัด พบว่าค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์มีค่าสูงที่สุดในสมการ โดยมีเครื่องหมายเป็นบวก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อใช้อัตราการป้อนตัดที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นมากตามไปด้วย โดยที่ค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์มีค่าสูงที่สุด บอกถึงว่าอัตราการป้อนตัดเป็นปัจจัยที่ส่งผลและสามารถอธิบายความขรุขระผิวชิ้นงานได้มากที่สุด ซึ่งจะเห็นว่าผลดังกล่าวนี้สอดคล้องตามทฤษฎีความขรุขระผิวที่แสดงไว้ในสมการที่ 1.1-1 และ 1.1-2

ส่วนปัจจัยความลึกตัดที่มีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก หมายถึงเมื่อเพิ่มความลึกตัดมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าความลึกตัดที่เพิ่มขึ้น จะเป็นการเพิ่มพื้นที่การตัด ซึ่งทำให้เกิดการสั่นสะเทือนมากขึ้น มีผลทำให้ความขรุขระผิวชิ้นงานแย่ลง และรัศมีจุกมีค่าสัมประสิทธิ์ในสมการเป็นลบ สามารถตีความได้ว่าเมื่อรัศมีจุกมีขนาดมากขึ้น จะส่งผลให้ความขรุขระผิวชิ้นงานลดลง ซึ่งความสัมพันธ์นี้ก็จะเป็นไปตามทฤษฎีความขรุขระผิวด้วยเช่นกัน และสัมประสิทธิ์ของมุมคายเศษโลหะ พบว่ามีค่าเป็นลบ นั้นหมายถึงเมื่อใช้มุมคายเศษโลหะที่มากขึ้นจะทำให้ความขรุขระผิวชิ้นงานลดน้อยลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ามุมคายเศษโลหะที่เพิ่มมากขึ้นนี้ จะทำให้เศษโลหะที่เกิดขึ้นในขณะตัดเคลื่อนที่ออกได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ใช้แรงในการตัดที่น้อยลง ผิวที่ได้จึงดี มีค่าความขรุขระผิวน้อย

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ของความเร็วตัด ความลึกตัดและมุมคายเศษโลหะ พบว่ามีค่าน้อย อธิบายได้ว่าปัจจัยดังกล่าวมีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานน้อยกว่า เมื่อเทียบกับอัตราการป้อนตัดและรัศมีจุกมีด แต่อย่างไรก็ตาม ทุกปัจจัยสามารถใช้อธิบายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานได้อย่างมีนัยสำคัญ และสามารถใช้นำมาทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานได้ดียิ่งขึ้นเมื่อพิจารณาปัจจัยต่างๆอย่างรอบด้าน

4.9.3 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

1) เมื่อตัวแปรตอบสนองคือความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a)

จากการวิเคราะห์การถดถอย ตามที่แสดงในตาราง 4.4 พบว่า สมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย มีค่า R^2 และ R^2_{adj} เท่ากับ 90.3% และ 89.3% ตามลำดับ นั้นหมายถึงตัวแปรอิสระสามารถอธิบายตัวแปรตอบสนอง หรือความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยได้เป็นอย่างดี

2) เมื่อตัวแปรตอบสนองคือความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z)

จากการวิเคราะห์การถดถอย ตามที่แสดงในตาราง 4.5 พบว่า สมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย มีค่า R^2 และ R^2_{adj} เท่ากับ 88.5% และ 87.4% ตามลำดับ นั้นหมายถึงตัวแปรอิสระสามารถอธิบายตัวแปรตอบสนอง หรือความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดได้เป็นอย่างดี

ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3.4 งานวิจัยนี้จะนำเสนอสมการซึ่งอยู่ในรูปของสมการเอกไปเนนเชียลเช่นเดียวกับสมการตามทฤษฎีความขรุขระผิว ดังนั้นจะต้องทำการจัดรูปสมการทำนายความขรุขระผิวที่ได้ในสมการที่ 4.9-1 และ 4.9-2 ซึ่งเป็นสมการที่เกิดจากการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม ดังนั้นจะได้สมการทำนายความขรุขระผิวขึ้นงาน ดังนี้

$$R_a = e^{3.46} \cdot V^{-0.239} \cdot f^{1.22} \cdot D^{0.163} \cdot R_n^{-0.65} \cdot e^{-0.0158\gamma} \cdot \left(\frac{AF_y}{AF_z}\right)^{-0.82} \quad (4.9-3)$$

$$R_z = e^{4.99} \cdot V^{-0.249} \cdot f^{1.08} \cdot D^{0.226} \cdot R_n^{-0.612} \cdot e^{-0.0127\gamma} \cdot \left(\frac{AF_y}{AF_z}\right)^{-0.655} \quad (4.9-4)$$


4.10 การทดสอบความแม่นยำของสมการ

สมการทำนายความขรุขระผิวขึ้นงานที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ จะต้องมีการทดสอบความแม่นยำ โดยคาดหวังว่าสมการสามารถใช้ทำนายความขรุขระผิวขึ้นงานสำหรับงานกลึงได้ดีสำหรับเงื่อนไขการตัดอื่นๆ โดยเงื่อนไขการตัดใหม่เพื่อใช้ทดสอบความแม่นยำได้แบ่งเป็น 3 การทดสอบ คือ

1. การทดสอบที่อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม
2. การทดสอบที่อยู่นอกขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม

4.10.1 การทดสอบที่อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวขึ้นงาน เงื่อนไขการตัดใหม่ที่อยู่ภายใต้ขอบเขตการทดลองได้ถูกกำหนด และใช้ทดสอบขึ้น โดยแสดงได้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เงื่อนไขการตัดสำหรับทดสอบความแม่นยำของสมการ

เม็ดมีดคาร์ไบด์	TNMG 160404 HQ	
	TNMG 160408 HQ	
	TPMR 160304 HQ	
	TPMR 160308 HQ	
มุมตัดด้านข้าง (องศา)	90	
ความเร็วตัด (เมตรต่อวินาที)	150, 200	
อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.15, 0.25	
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.4, 0.6	
รัศมีจมูกมีด (มิลลิเมตร)	0.4, 0.8	
มุมคายเศษโลหะ (องศา)	-6, 11	

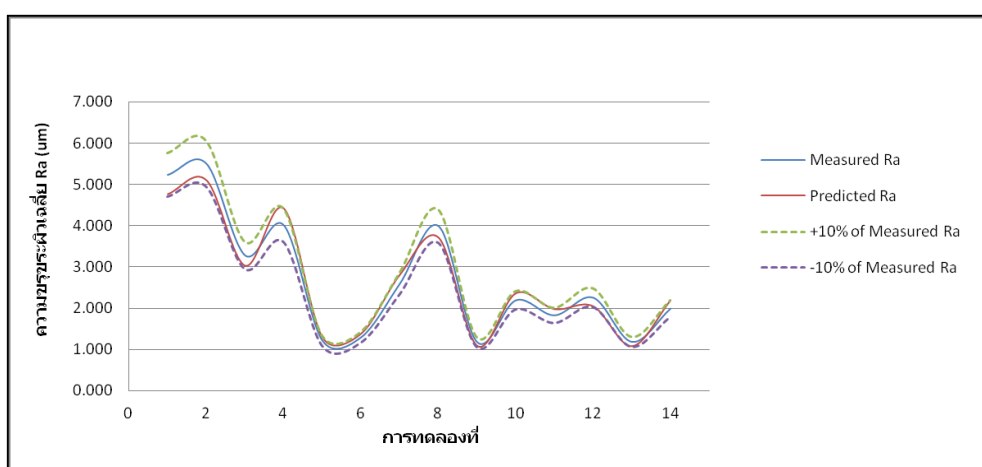
4.10.1.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองที่ใช้ทดสอบความแม่นยำของสมการ โดยทำการวิเคราะห์ผลเฉพาะการกลิ้งที่ให้เศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องเท่านั้น ซึ่งมีจำนวน 14 การทดลอง จากตารางประกอบด้วย เงื่อนไขการตัดต่างๆ ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดจริง ค่าอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัต และค่าความขรุขระผิวจากการคำนวณด้วยสมการที่ถูกพัฒนาขึ้น

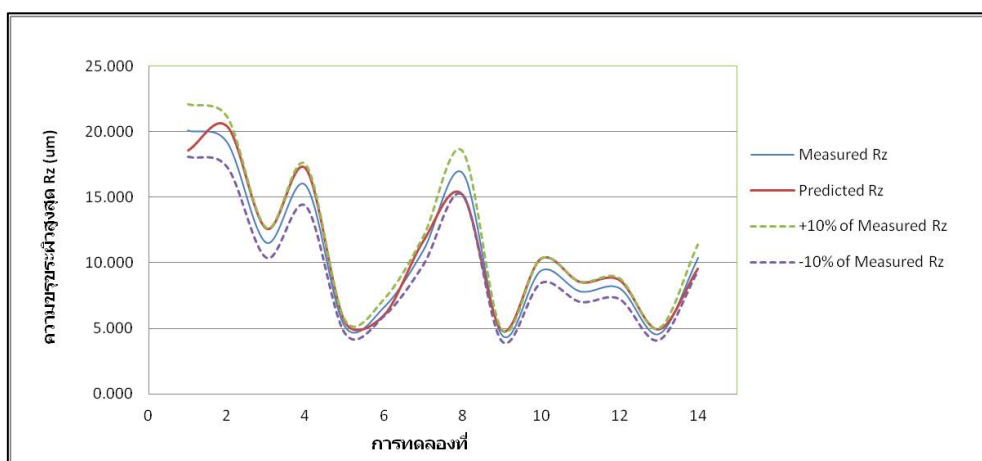
ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำ

ลำดับ	ความเร็วตัด	อัตราป้อนตัด	ความลึกตัด	รัศมีจุกมีด	มุมคายเศษโลหะ	AFy/AFz	ความขรุขระผิวจากการวัด		ความขรุขระผิวจากสมการ	
							Ra	Rz	Ra	Rz
1	150	0.25	0.4	0.4	-6	0.686	5.232	20.074	4.758	18.574
2	150	0.25	0.6	0.4	-6	0.684	5.503	19.185	5.094	20.394
3	150	0.25	0.6	0.8	-6	0.746	3.282	11.524	3.025	12.613
4	200	0.25	0.4	0.4	-6	0.692	4.012	15.907	4.410	17.191
5	200	0.15	0.4	0.8	-6	0.892	1.218	5.138	1.288	5.487
6	200	0.15	0.6	0.8	-6	0.889	1.301	6.610	1.379	6.025
7	200	0.25	0.6	0.8	-6	0.752	2.598	10.936	2.804	11.674
8	150	0.25	0.4	0.4	11	0.670	3.992	16.832	3.707	15.196
9	150	0.15	0.4	0.8	11	0.864	1.183	4.484	1.083	4.851
10	150	0.25	0.6	0.8	11	0.729	2.195	9.398	2.357	10.319
11	200	0.15	0.6	0.4	11	0.718	1.832	7.803	1.973	8.539
12	200	0.25	0.4	0.8	11	0.737	2.259	8.047	2.040	8.698
13	200	0.15	0.6	0.8	11	0.869	1.190	4.558	1.075	4.929
14	200	0.25	0.6	0.8	11	0.735	1.995	10.373	2.185	9.550

จากตารางที่ 4.7 สังเกตได้ว่าค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการวัดจริงด้วยเครื่องวัดขรุขระผิว กับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการทำนายความขรุขระผิวตามสมการที่ 4.7-3 และ 4.7-4 ที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ จะเห็นว่าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานทั้งแบบเฉลี่ย (Ra) และค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) ที่ได้จากการวัดจริง และจากการคำนวณด้วยสมการ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถแสดงด้วยรูปที่ 4.43 และ 4.44 ที่แสดงถึงความแม่นยำของสมการด้วยเงื่อนไขการตัดต่างๆ



รูปที่ 4.43 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)



รูปที่ 4.44 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

การคำนวณความแม่นยำของสมการ สามารถทำได้ผ่านการคำนวณค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน ตามสมการที่ 4.10-1 ดังนี้



$$\text{ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \frac{f_t - a_t}{a_t} \quad (4.10-1)$$

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

ซึ่งจากการคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และ สมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) พบว่า มีค่าเท่ากับ 8.11% และ 8.21% ตามลำดับ นั่นคือ มีสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) มีค่าความแม่นยำ เท่ากับ 91.89% และ 91.79% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าสามารถทำนายความขรุขระผิวได้ในระดับที่สูงขึ้นและเป็นที่ยอมรับได้

4.10.2 การทดสอบที่อยู่นอกขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงาน เงื่อนไขการตัดใหม่ที่อยู่นอกขอบเขตการทดลองได้ถูกกำหนดและใช้ทดสอบสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยแสดงได้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เงื่อนไขการตัดสำหรับทดสอบความแม่นยำของสมการ

เม็ดมีดคาร์ไบด์	TNMG 160404 HQ	
	TNMG 160408 HQ	
	TPMR 160304 HQ	
	TPMR 160308 HQ	
มุมตัดด้านข้าง (องศา)	90	
ความเร็วตัด (เมตรต่อวินาที)	270, 300	
อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.35, 0.4	
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	1, 1.2	
รัศมีจมูกมีด (มิลลิเมตร)	0.8	1.2
มุมคายเศษโลหะ (องศา)	-6, 11	

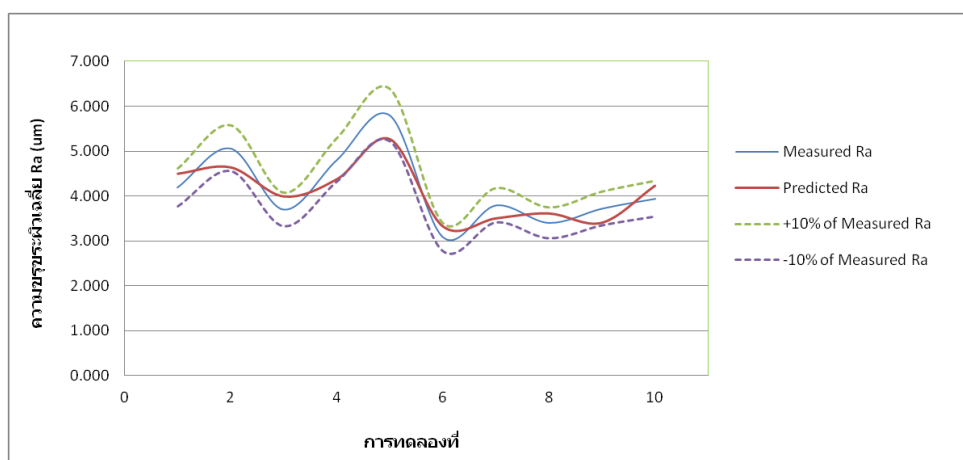
4.10.2.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองที่ใช้ทดสอบความแม่นยำของสมการ โดยทำการวิเคราะห์ผลเฉพาะการกลิ้งที่ให้เศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องเท่านั้น ซึ่งมีจำนวน 10 การทดลอง จากตารางประกอบด้วยเงื่อนไขการตัดต่างๆ ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดจริง ค่าอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัต และ ค่าความขรุขระผิวจากการคำนวณด้วยสมการที่ถูกพัฒนาขึ้น

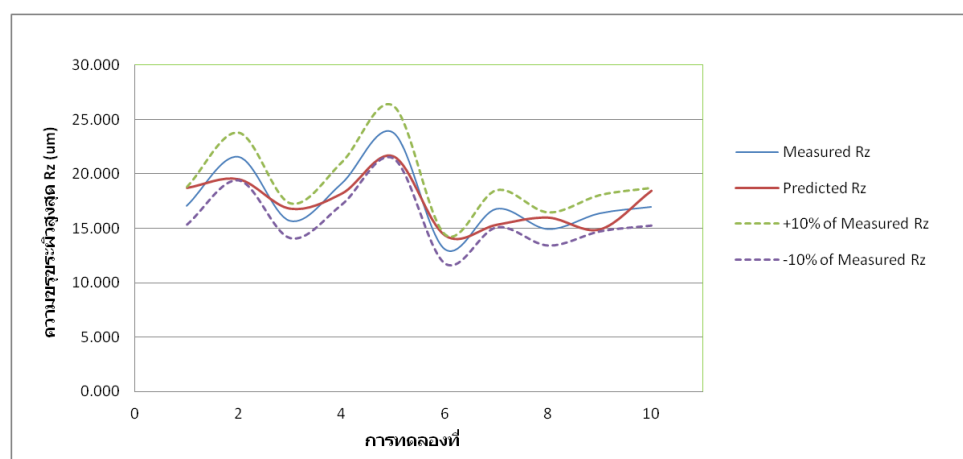
ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำ

ลำดับ	ความเร็วตัด	อัตราป้อนตัด	ความลึกตัด	รัศมีจุกมีด	มุมคายเศษ โลหะ	AFy/AFz	ความขรุขระผิวจากการวัด		ความขรุขระผิวจากสมการ	
							Ra	Rz	Ra	Rz
1	270	0.35	1	0.8	-6	0.677	4.191	17.083	4.506	18.728
2	270	0.35	1.2	0.8	-6	0.677	5.063	21.603	4.646	19.532
3	270	0.4	1	1.2	-6	0.682	3.699	15.704	3.999	16.808
4	300	0.35	1	0.8	-6	0.680	4.803	19.132	4.382	18.205
5	300	0.4	1	0.8	-6	0.651	5.801	23.837	5.275	21.641
6	300	0.35	1.2	1.2	-6	0.714	3.084	13.105	3.332	14.334
7	270	0.35	1	0.8	11	0.662	3.792	16.804	3.510	15.322
8	270	0.35	1.2	0.8	11	0.661	3.402	14.945	3.620	15.979
9	300	0.35	1	0.8	11	0.664	3.721	16.391	3.414	14.893
10	300	0.4	1.2	0.8	11	0.635	3.939	16.988	4.238	18.464

จากตารางที่ 4.9 สังเกตได้ว่าแม้เงื่อนไขการตัดจะอยู่นอกช่วงที่ใช้พัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิว แต่ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการวัดจริงด้วยเครื่องวัดขรุขระผิว กับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการทำนายความขรุขระผิวตามสมการที่ 4.7-3 และ 4.7-4 ที่เงื่อนไขการตัดต่างๆนี้ พบว่าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานทั้งแบบเฉลี่ย (Ra) และค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) ที่ได้จากการวัดจริง และจากการคำนวณด้วยสมการ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถแสดงด้วยรูปที่ 4.45 และ 4.46 ที่แสดงถึงความแม่นยำของสมการด้วยเงื่อนไขการตัดต่างๆ



รูปที่ 4.45 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)




รูปที่ 4.46 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

ในทำนองเดียวกัน เมื่อทำการคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และ สมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) ตามสมการที่ 4.10-1 พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 7.94% และ 8.33% ตามลำดับ นั่นคือสมการทำนายความขรุขระผิว

เฉลี่ย (Ra) และสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) มีค่าความแม่นยำ เท่ากับ 92.06% และ 91.67% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าสามารถทำนายความขรุขระผิวได้ในระดับที่สูงและเป็นที่ยอมรับได้ แม้เงื่อนไขการตัดจะอยู่นอกขอบเขต ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าพารามิเตอร์หรือเงื่อนไขการตัดต่างๆ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจมูกมีด และมุมคายเศษโลหะ สามารถใช้อธิบายค่าความขรุขระผิวขึ้นงานได้ เนื่องจากมีแนวโน้มความสัมพันธ์ในลักษณะเช่นเดียวกัน แม้เงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป และการใช้อัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัตเป็นตัวแปรหนึ่งในสมการก็เป็นพารามิเตอร์ที่ได้กำจัดอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัดแล้วด้วยเช่นกัน

นอกจากนี้เพื่อเป็นการทดสอบว่าสมการทำนายความขรุขระผิวขึ้นงานมีความสามารถในการทำนาย จึงทำการทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวขึ้นงานด้วยรูปทรงของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์ที่แตกต่างกัน รวมถึงเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.10

จากตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองที่ใช้ทดสอบความแม่นยำของสมการ

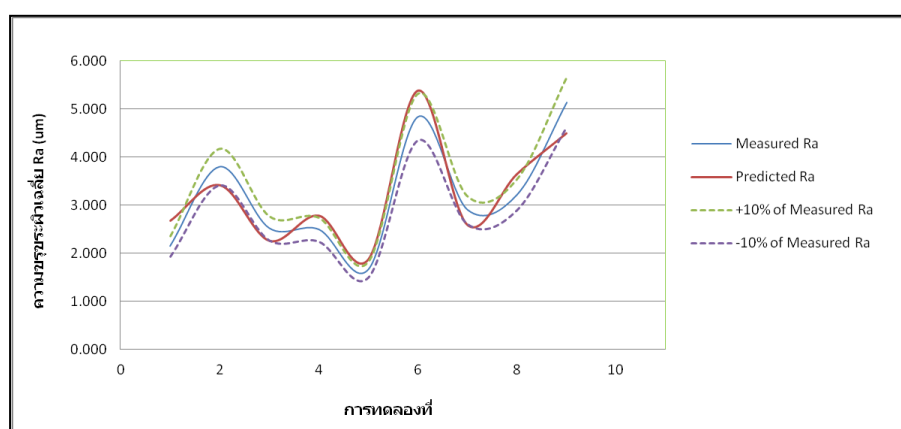
เม็ดมีดคาร์ไบด์	DNMG 150604FN DNMG 156008FN	
มุมตัดด้านข้าง (องศา)	90	
ความเร็วตัด (เมตรต่อวินาที)	150, 200	
อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.15, 0.2, 0.25	
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.4, 0.6, 0.8	
รัศมีจมูกมีด (มิลลิเมตร)	0.4, 0.8	
มุมคายเศษโลหะ (องศา)	-6	

โดยทำการวิเคราะห์ผลเฉพาะการกลึงที่ให้เศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องเท่านั้น ซึ่งมีจำนวน 9 การทดลอง จากตารางประกอบด้วยเงื่อนไขการตัดต่างๆ ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดจริง ค่าอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัต และ ค่าความขรุขระผิวจากการคำนวณด้วยสมการที่ ถูกพัฒนาขึ้น

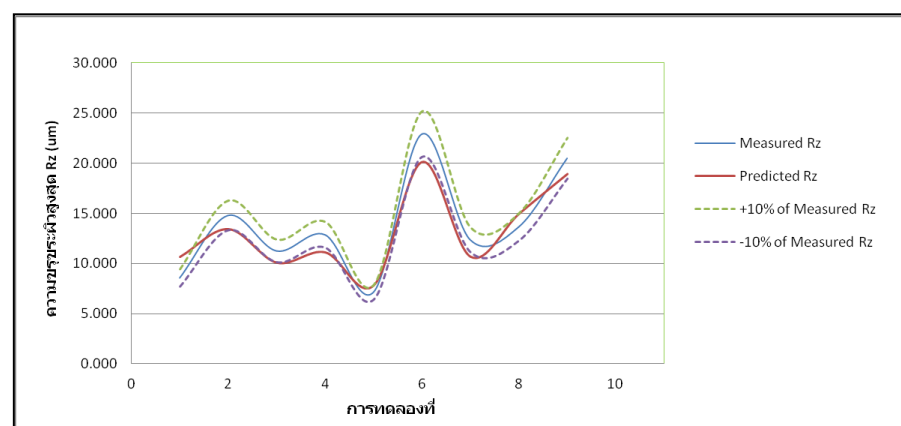
ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำ

ลำดับ	ความเร็วตัด	อัตราป้อนตัด	ความลึกตัด	รัศมีจุกมีด	มุมคายเศษโลหะ	AFy/AFz	ความขรุขระผิวจากการวัด		ความขรุขระผิวจากสมการ	
							Ra	Rz	Ra	Rz
1	150	0.15	0.4	0.4	-6	0.691	2.141	8.562	2.670	10.650
2	200	0.2	0.4	0.4	-6	0.698	3.791	14.803	3.410	13.433
3	200	0.25	0.8	0.8	-6	1.042	2.514	11.255	2.250	10.066
4	200	0.2	0.6	0.8	-6	0.562	2.487	12.869	2.774	11.104
5	150	0.15	0.6	0.8	-6	0.670	1.656	7.123	1.864	7.793
6	200	0.25	0.4	0.4	-6	0.543	4.830	22.922	5.382	20.156
7	150	0.2	0.6	0.8	-6	0.667	2.894	12.361	2.582	10.664
8	150	0.2	0.6	0.4	-6	0.760	3.212	13.648	3.641	14.963
9	150	0.25	0.8	0.4	-6	0.845	5.127	20.508	4.491	18.955

จากตารางที่ 4.11 สังเกตได้ว่าค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการวัดจริงด้วยเครื่องวัดขรุขระผิวกับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานตามสมการที่ 4.7-3 และ 4.7-4 ที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ จะเห็นว่าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra) และค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) ที่ได้จากการวัดจริง และจากการคำนวณด้วยสมการ มีค่าที่แตกต่างกันอยู่บ้าง ซึ่งสามารถแสดงด้วยรูปที่ 4.47 และ 4.48 ที่แสดงถึงความแม่นยำของสมการด้วยเงื่อนไขการตัดต่างๆ



รูปที่ 4.47 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)



รูปที่ 4.48 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

เมื่อทำการคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และ สมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) ตามสมการที่ 4.10-1 พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 13.03% และ 12.26% ตามลำดับ นั่นคือสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) มีค่าความแม่นยำ เท่ากับ 86.97% และ

87.74% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าสามารถทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานได้ลดลง เมื่อทดสอบด้วยเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์รูปทรงอื่น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่ารูปทรงของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์ หรือมุมตัดด้านข้างที่แตกต่างกัน เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานที่สมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ทำการพิจารณา ดังนั้นเพื่อให้มีความเหมาะสมในการใช้งานที่หลากหลาย และได้สมการทำนายที่มีค่าความแม่นยำมากยิ่งขึ้นสามารถพัฒนาต่อยอดในงานวิจัยอื่นๆ ได้ต่อไป

จากตารางที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบความแม่นยำที่ได้จากงานวิจัยกับงานวิจัยก่อนหน้า โดยงานวิจัยก่อนหน้าประกอบด้วย 2 งานวิจัย คือ

1. การพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวขรุขระผิวชิ้นงาน โดยใช้อัตราส่วนแรงตัดสถิตและเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด และมุมคายเศษโลหะ [28]

2. การพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวขรุขระผิวชิ้นงาน โดยใช้อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟแรงตัดพลวัต และเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมุมมีด [29]

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบความแม่นยำที่ได้จากงานวิจัยกับงานวิจัยก่อนหน้า

เงื่อนไข		สมการจากงานวิจัย	สมการจากงานวิจัยที่ใช้อัตราส่วนแรงตัดสถิต	สมการจากงานวิจัยที่ใช้อัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัต
สมการ Ra	การตัดในขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม	91.89%	-	-
	การตัดนอกขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม [เม็ดกลึงรูปทรงเพชร]	92.06% [86.97%]	84.23%	-
สมการ Rz	การตัดในขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม	91.79%	-	-
	การตัดนอกขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม [เม็ดกลึงรูปทรงเพชร]	91.67% [87.74%]	87.94%	[90.30%]

ตารางที่ 4.12 อธิบายการเปรียบเทียบความแม่นยำที่ได้จากงานวิจัยกับงานวิจัยก่อนหน้า สังเกตได้ว่าสมการที่ได้จากงานวิจัย ซึ่งประยุกต์ใช้อัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัตนี้สามารถใช้ทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานได้ดี โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใช้แรงตัดสถิตในการทำนาย พบว่าสมการที่ได้จากงานวิจัยนี้ ให้ค่าความแม่นยำที่สูงกว่ามาก เนื่องจากการประยุกต์ใช้พื้นที่แรงตัดพลวัตด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูเป็นการวิเคราะห์แบบละเอียด โดยเกิดจากการพิจารณาทุกค่าของสัญญาณแรงตัดส่งผลให้สมการที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

2. เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใช้อัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัตในการทำนายความขรุขระผิว ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยไม่ได้คำนึงถึงมุมคายเศษโลหะที่แตกต่างกัน พบว่าสมการที่ได้จากงานวิจัยนี้ให้ค่าความแม่นยำที่สูงกว่าและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ดี แม้มุมคายเศษโลหะที่ใช้จะเปลี่ยนแปลงไป

3. จากผลการทดสอบความแม่นยำเมื่อใช้มุมตัดด้านข้างที่แตกต่างกัน พบว่าค่าความแม่นยำที่ได้จากสมการ มีค่าน้อยกว่าการทดสอบจากงานวิจัยก่อนหน้า [29] ดังนั้นจะทำการทดสอบว่าสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จากการวิจัยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมากกว่างานวิจัยก่อนหน้าอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทดสอบความแปรปรวนของประชากรสองกลุ่ม

ตารางที่ 4.13 ความคลาดเคลื่อนของเงื่อนไขการตัดที่ใช้ทดสอบความแม่นยำของสมการ

ค่าความคลาดเคลื่อนของงานวิจัยก่อนหน้า	ค่าความคลาดเคลื่อนของงานวิจัยนี้
0.203	0.244
0.018	0.093
0.025	0.106
0.037	0.137
0.073	0.094
0.001	0.121
0.079	0.137
0.103	0.096

0.065	0.076
0.002	
0.014	
0.099	
0.071	
0.051	
0.097	
0.039	
0.011	
0.143	
0.071	
0.007	
0.037	
0.080	
0.105	
n=23	n=9

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_a : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

เมื่อ σ_1^2 = ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนประชากรของงานวิจัยนี้

σ_2^2 = ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนประชากรงานวิจัยก่อนหน้า

ตารางที่ 4.14 การทดสอบความแตกต่างของความแปรปรวนของสองประชากร

Statistics				
Variable	N	StDev	Variance	
ความคลาดเคลื่อน 1	9	0.050	0.003	
ความคลาดเคลื่อน 2	23	0.049	0.002	
Ratio of standard deviations = 1.010				
Ratio of variances = 1.020				
Tests				
Method	DF1	DF2	Statistic	P-Value
F Test (normal)	8	22	1.02	0.900

จากการทดสอบความแตกต่างของความแปรปรวนของสองประชากร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สรุปได้ว่า ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ เนื่องจากค่า P-value เท่ากับ 0.900 ซึ่งมากกว่า 0.05 นั่นคือ ความแปรปรวนของประชากรสองกลุ่มไม่มีความแตกต่างกัน

ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของงานวิจัยนี้มากกว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสำหรับงานวิจัยก่อนหน้า

$$H_0 : \mu_1 \geq \mu_2$$

$$H_a : \mu_1 < \mu_2$$

เมื่อ μ_1 = ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนประชากรของงานวิจัยนี้

μ_2 = ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนประชากรของงานวิจัยก่อนหน้า

ตารางที่ 4.15 การทดสอบความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย

Two-sample T for ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน1 vs ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน2				
	N	Mean	StDev	SE Mean
ความคลาดเคลื่อน 1	9	0.1227	0.0500	0.017
ความคลาดเคลื่อน 2	23	0.0622	0.0495	0.010

Difference = mu (ความคลาดเคลื่อน1) - mu (ความคลาดเคลื่อน2)

Estimate for difference: 0.0604

95% upper bound for difference: 0.0936

T-Test of difference = 0 (vs <): T-Value = 3.10 P-Value = 0.998 DF = 30

Both use Pooled StDev = 0.0496

จากผลการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปได้ว่า ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ เนื่องจาก P-Value เท่ากับ 0.998 มากกว่า 0.05 นั่นคือ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของงานวิจัยนี้ มากกว่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของงานวิจัยก่อนหน้าอย่างมีนัยสำคัญ หรือกล่าวได้ว่าสมการที่ได้จากงานวิจัยนี้ใช้ทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานได้น้อยเมื่อใช้มุมตัดด้านข้างเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น ในงานวิจัยต่อไปหากพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานโดยพิจารณาถึงมุมตัดด้านข้างที่แตกต่างกัน คาดว่าจะสามารถใช้ทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานได้ยิ่งขึ้น

4.11 การวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตด้วยการแปลงเวฟเล็ต

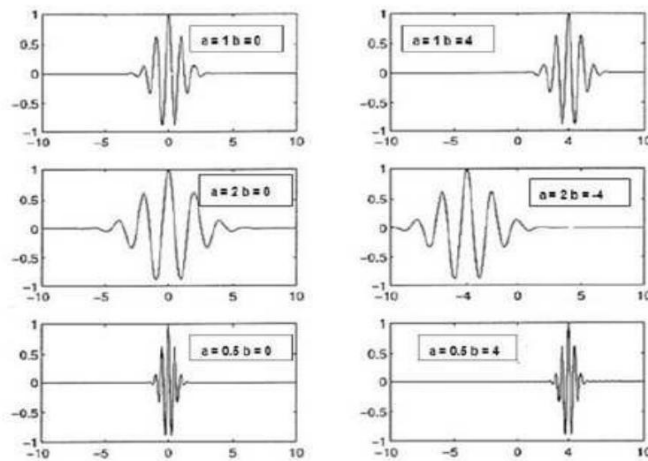
จากที่กล่าวข้างต้น การตัดที่ให้เศษโลหะแบบแตกหัก ไม่สามารถใช้ค่าแรงที่เกิดขึ้น ในขณะที่ตัดมาอธิบายความสัมพันธ์ที่มีต่อความขรุขระผิวชิ้นงานได้ เนื่องจากเมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่แล้วพบว่า ความถี่ที่เกิดขึ้นของแรงตัดพลวัตจะไม่สอดคล้องกับความถี่ของความขรุขระผิวชิ้นงาน และเป็นความถี่ของการแตกหักเศษโลหะ ซึ่งไม่สามารถแยกออกจากความถี่ของความขรุขระผิวได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10

อย่างไรก็ตามการแปลงสัญญาณแรงตัดพลวัตด้วยการวิเคราะห์เวฟเล็ต ทำให้สามารถใช้แรงตัดพลวัตในการอธิบายความขรุขระผิวชิ้นงานได้ แม้การตัดจะให้เศษโลหะเป็นแบบแตกหัก การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) และการแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform) เป็นการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปสู่โดเมนความถี่เช่นเดียวกัน และสามารถแปลงจากโดเมนความถี่ไป

เป็นโดเมนเวลาได้ โดยใช้การแปลงกลับ (Inverse Transform) ได้เช่นกัน ซึ่งหลักการของ 2 วิธีจะคล้ายกันคือ พังก์ชัน สามารถแทนได้ด้วยผลรวมเชิงเส้นของสัมประสิทธิ์ (Coefficient) และ พังก์ชันพื้นฐาน (Basic function) สำหรับการแปลงฟูเรียร์ ค่าสัมประสิทธิ์คือ a_1, a_2, \dots และ พังก์ชันพื้นฐาน คือ $\sin(x_1), \dots$ และ $\cos(x_1), \dots$ แต่การแปลงเวฟเล็ต ในส่วนฟังก์ชันพื้นฐาน ส่วนใหญ่เรียกว่าฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ (Mother Wavelet Function) เป็น ซึ่งมีคุณสมบัติในการสเกลและเลื่อนตำแหน่งได้

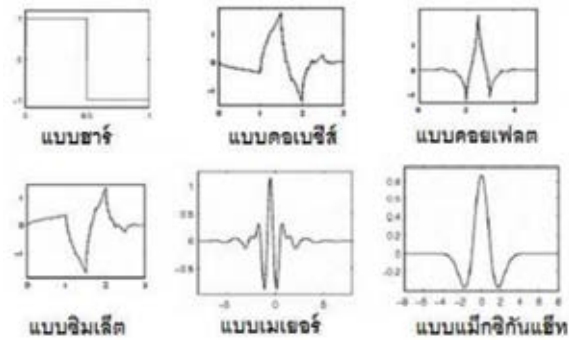
$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

โดยที่ $\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ ซึ่งจะถูกลดสเกลและเลื่อนตำแหน่งโดยพารามิเตอร์ a และ b ซึ่งการสเกล หมายถึง การหดเข้า (Compressing) หรือขยายออก (Dilation) โดยใช้ "a" แทนการหดหรือการขยาย ซึ่งเป็นการเปลี่ยนความถี่ การเลื่อนตำแหน่ง หมายถึง การเลื่อนตำแหน่งของการเกิดคลื่นบนแกนเวลา โดยแทนด้วยพารามิเตอร์ "b" รูปที่ 4.49 แสดงเวฟเล็ตที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า a และ b ต่างๆ กัน จากสมการ พบว่าจะมีการปรับค่าเพื่อให้สัญญาณที่ได้หลังจากปรับสเกลแล้วมีพลังงานเท่ากับเวฟเล็ตแม่ด้วยการคูณ $\frac{1}{\sqrt{a}}$



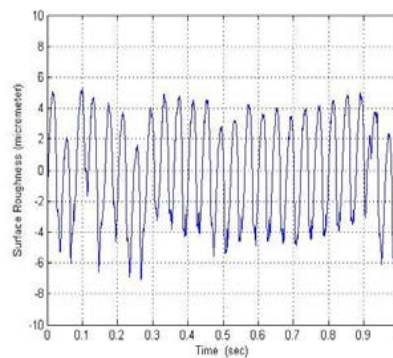
รูปที่ 4.49 เวฟเล็ตที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า a และ b ต่างๆ กัน

เมื่อนำข้อมูลสัญญาณใดๆ มาวิเคราะห์ด้วยกระบวนการแปลงเวฟเล็ต จะเปรียบเหมือนการแตกสัญญาณให้ออกมาดังรูปของเวฟเล็ตแม่ ที่การปรับสเกลและตำแหน่งที่แตกต่างกันไป เวฟเล็ตถูกแบ่งออกเป็นหลายลักษณะ ซึ่งเรียกลักษณะต่างๆ ว่า แฟมิลี (Family) โดยมีรูปแบบคลื่นสัญญาณที่แตกต่างกันออกไป เช่น คลื่นเวฟเล็ตแบบฮาร์, แบบเมเยอร์ และแบบดอบเชชีส์ เป็นต้น รูปที่ 4.50 แสดงลักษณะเวฟเล็ตที่แฟมิลีต่างๆ

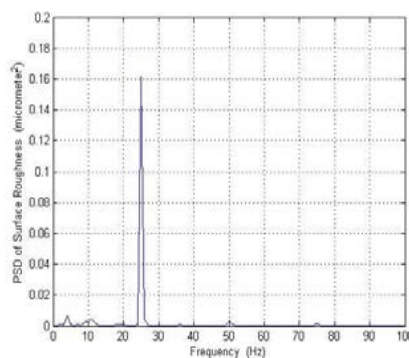


รูป 4.50 ลักษณะเวฟเล็ทที่แฟมิลีต่างๆ

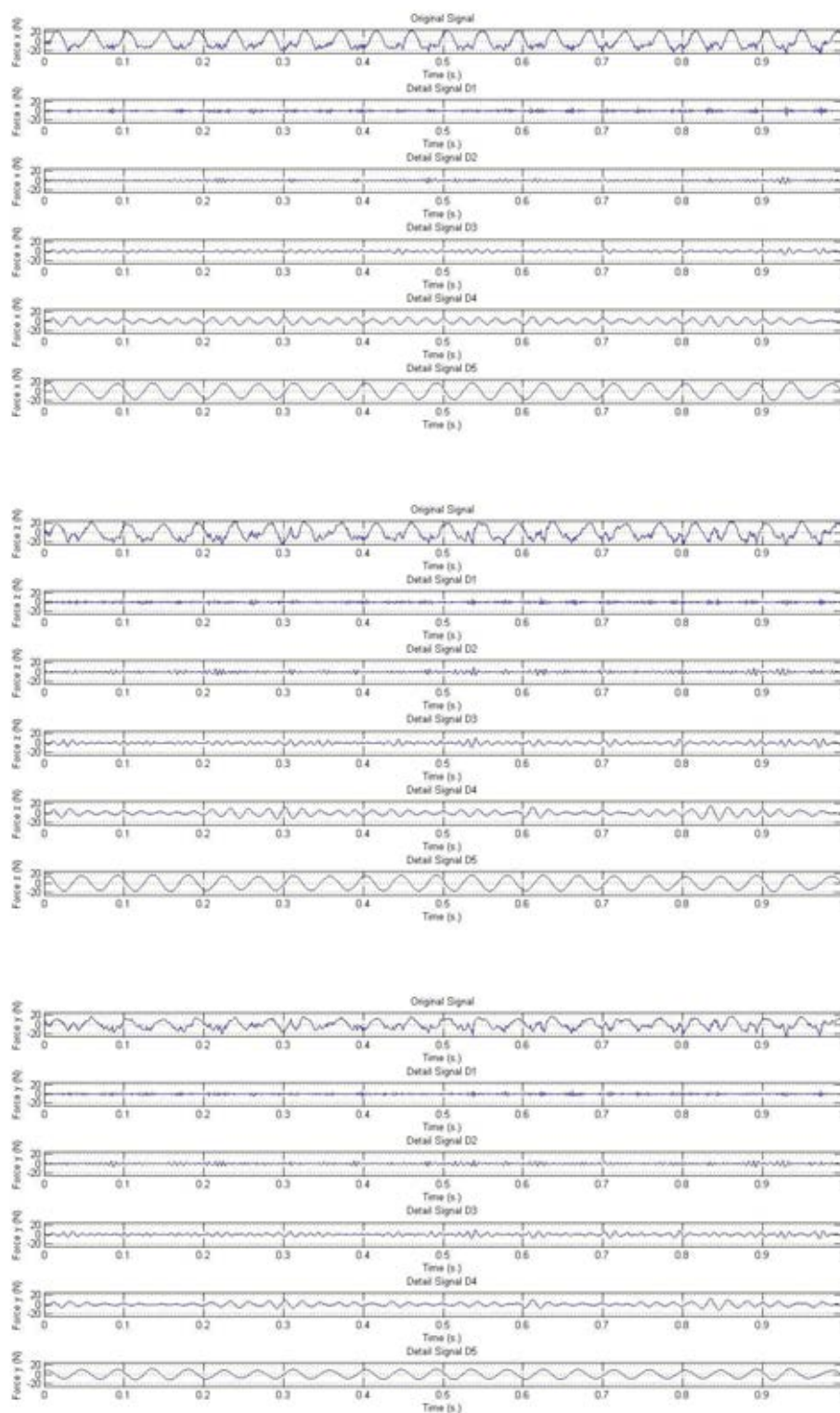
จากลักษณะสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้น มีลักษณะใกล้เคียงกับลักษณะเวฟเล็ทแบบเมเยอร์ จึงเลือกใช้ ฟังก์ชันแบบเมเยอร์ในการแปลงสัญญาณแรงตัดพลวัตดังกล่าวในการวิเคราะห์ตัวอย่างการทดลองวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตสำหรับการตัดที่ให้เศษโลหะแบบแตกหักด้วยการแปลงเวฟเล็ท ที่ความเร็วตัด 180 เมตร/นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตร ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6



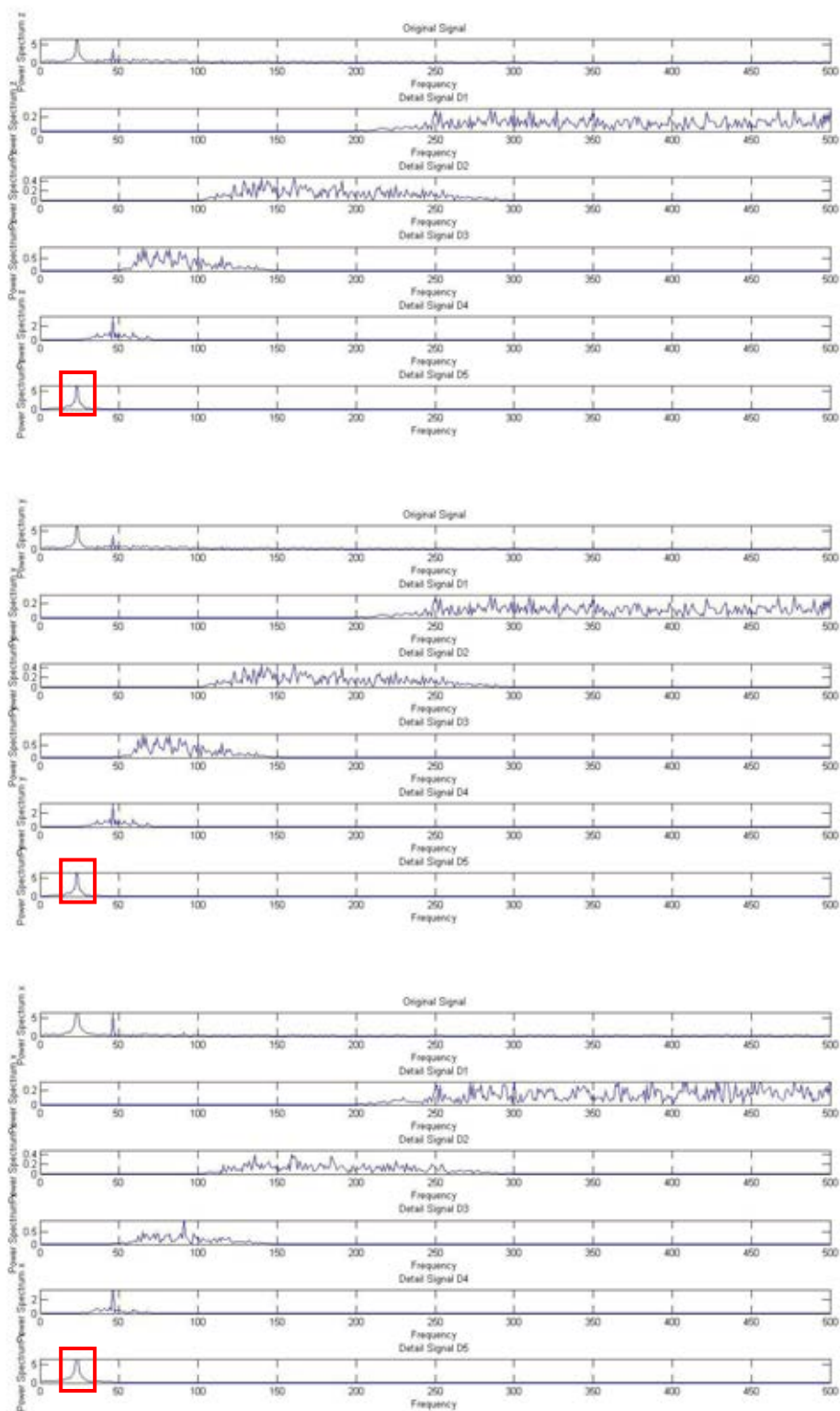
รูปที่ 4.51 ความขรุขระผิวชิ้นงานที่โดเมนเวลา



รูปที่ 4.52 ความขรุขระผิวชิ้นงานที่โดเมนความถี่



รูป 4.53 สัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาด้วยการแปลงเวฟเล็ต



รูป 4.54 สัญญาณแรงตัดพลังต์ในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ท

จากตัวอย่างการวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตด้วยการแปลงแบบเวฟเลท พบว่าเวฟเลท จะทำการแยกสัญญาณข้อมูลในแต่ละระดับได้อย่างชัดเจน โดยที่ระดับต่ำสามารถแยกสัญญาณ ข้อมูลที่ความถี่สูง และที่ระดับสูงจะแยกสัญญาณที่ความถี่ต่ำ ซึ่งความถี่ของสัญญาณแรงตัดใน ระดับที่ 5 มีความสอดคล้องกับความถี่ของความขรุขระผิวชิ้นงาน เป็นผลให้สามารถใช้ข้อมูล สัญญาณแรงตัดพลวัตที่ระดับนี้ในการอธิบายความสัมพันธ์ต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงานได้ต่อไป

การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตด้วยการแปลงเวฟเลท จึงถูกคาดหวังว่าสามารถใช้อธิบาย ความสัมพันธ์ต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงานได้ทุกกรณี แม้การตัดจะให้เศษโลหะเป็นแบบแตกหัก นอกจากนี้ยังทำให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ และได้สมการที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัด และเงื่อนไขการตัดต่างๆ บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยการพัฒนาเป็นสมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ทำนายความขรุขระผิวชิ้นงาน สำหรับชิ้นงานเหล็ก S45C ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เคลือบผิว

5.1 สรุปผลการวิจัย

สมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานที่ถูกพัฒนาขึ้นเป็นฟังก์ชันของเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด และมุมคายเศษโลหะ นอกจากนี้งานวิจัยได้มีการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เพื่อตรวจวัดแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดชิ้นงาน ซึ่งจะเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งในการทำนายความขรุขระผิว โดยจะอยู่ในรูปของอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงตัดพลวัต ที่ใช้การคำนวณด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูโดยอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัต เป็นสัดส่วนของพื้นที่แรงในแนวการป้อนตัดต่อพื้นที่ของแรงตัดหลักในหน่วยเวลาใดๆ ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้า [4, 5] ได้พิสูจน์ว่าการใช้สัดส่วนแรงตัดดังกล่าวนี้ จะทำให้สามารถทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานได้แม้เงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป

ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัด และเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการใช้สมการแบบฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล ทั้งนี้การหาความสัมพันธ์แบบถดถอยพหุคูณถูกนำมาใช้วิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลองความขรุขระชิ้นงานด้วยการใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

จากการวิจัยพบว่า อัตราการป้อนตัด และรัศมีจุมุมมีดเป็นสองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมากที่สุด และมุมคายเศษโลหะสามารถอธิบายความขรุขระผิวชิ้นงานได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่าน้อยเมื่อใช้ความเร็วตัด รัศมีจุมุมมีด และมุมคายเศษโลหะที่มาก ขณะที่ใช้อัตราการป้อนตัด และความลึกตัดที่น้อย ดังแสดงความสัมพันธ์ในสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงาน ที่ 4.7-3 และ 4.7-4 จากการทดลองซ้ำเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการ โดยเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งทำการทดสอบด้วย 2 ระบบ คือ เมื่อการ

ทดสอบที่อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม และการทดสอบที่อยู่นอกขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม พบว่าสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) สำหรับการทดสอบที่อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม มีความแม่นยำ เท่ากับ 91.60% และ 91.07% ตามลำดับ และ สมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) สำหรับการทดสอบที่อยู่นอกขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิมมีความแม่นยำ เท่ากับ 91.93% และ 90.90% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าสามารถทำนายความขรุขระผิวได้ดีที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงในอนาคตคาดหวังว่า เมื่อระบบตรวจวัดสัญญาณแรงที่เกิดขึ้นขณะตัด ระบบจะทำการประมวลค่าความขรุขระผิวที่จะได้จากเงื่อนไขการตัดนั้นๆ ซึ่งผลจากการใช้สมการทำนายความขรุขระผิวนี้ จะทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพ ได้ผิวชิ้นงานตามที่คาดหวัง รวมทั้งสามารถหยุดกระบวนการตัดได้อย่างทันท่วงที ถ้าระบบประเมินได้ว่าความขรุขระผิวที่ได้ไม่เป็นตามข้อกำหนดที่ต้องการ ซึ่งส่งผลให้ของเสียในกระบวนการลดน้อยลง คาดหวังว่าสมการทำนายความขรุขระผิวที่ได้นี้จะมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น และจะนำไปสู่การพัฒนาของเครื่องจักรกลอัจฉริยะที่พิจารณาถึงปัจจัยต่างๆครอบคลุมมากยิ่งขึ้น ทำได้ดีเพื่อเป็นการประกันความเชื่อมั่นของระบบการผลิตอัจฉริยะให้สูงขึ้นด้วย

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

1. การใช้อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟของแรงป้อนตัดพลวัตและแรงตัดหลักพลวัต สามารถนำมาใช้ทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานได้ แม้เงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยพื้นที่ยังทำให้ได้สมการที่สามารถทำนายความขรุขระผิวได้ดี มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

2. จากการทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานพบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอยู่ ซึ่งอาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น องศาของการวางมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิวที่แตกต่างกันแต่ครั้งการทดลอง และความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดค่าความขรุขระผิว

3. ความถี่ของความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดพลวัตมีความคลาดเคลื่อนบ้างในบางการทดลองตาม ภาคผนวก ค ซึ่งเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของการกำหนดจุดอ้างอิงในการลากเส้นวัดความขรุขระผิว แต่พบว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยจึงสามารถยอมรับได้

5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย

1. เนื่องจากเครื่องกลึงซีเอ็นซี มีผู้ใช้งานหลายคน ทำให้ต้องทำการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ใหม่ทุกครั้ง ซึ่งนอกจากจะใช้เวลาติดตั้งค่อนข้างนาน ยังอาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของค่าแรงตัดพลวัตที่ได้จากการทดลองได้

2. เนื่องจากเครื่องวัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน ต้องใช้กับชิ้นงานหลายรูปแบบ ทำให้มีการสร้างแท่นจับชิ้นงานใหม่เพื่อให้เกิดความเหมาะสม แต่ทั้งนี้ยังต้องทำการปรับแท่นจับทุกครั้งก่อนวัดชิ้นงาน ซึ่งอาจส่งผลให้ตำแหน่งของการวัดในแต่ละครั้งแตกต่างกัน

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแรงตัดพลวัตและความขรุขระผิวชิ้นงาน สามารถใช้การวิเคราะห์หอฟิสิกส์เพื่อแยกสัญญาณการแตกหักของเศษโลหะและสัญญาณของแรงตัดได้ เพื่อให้สมการใช้ทำนายความขรุขระผิวได้ทุกกรณี แม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะให้เศษโลหะเป็นแบบแตกหัก ซึ่งนอกจากจะทำให้นำไปใช้ได้จริงทุกกรณีแล้ว ยังคาดหวังว่าจะให้ค่าความแม่นยำที่มากขึ้นด้วย

2. ควรทดลองเปลี่ยนชิ้นงานเป็นวัสดุอื่น เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนสูง เพื่อยืนยันว่า สมการการทำนาย จะยังใช้ได้ กับเงื่อนไขการตัดอื่นๆ

3. เพื่อให้สมการมีความสามารถในการทำนายมากขึ้น ควรพิจารณาถึงรูปทรงของเม็ดมีดตัดที่ต่างกัน เช่น มีดตัดรูปทรงสามเหลี่ยม (Triangular) และเม็ดตัดรูปทรงเพชร (Diamond) เนื่องจากรูปทรงของเม็ดมีดตัดที่ต่างกัน จะบ่งบอกถึงมุมตัดด้านข้างที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ต่างกันด้วย

4. สามารถพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานโดยคำนึงถึงอายุมีดตัด สัดส่วนแรงตัด ร่วมกับค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน เพื่อให้สมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

5. ควรควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานก่อนทำการวัดความขรุขระผิวชิ้นงานให้มีค่าคงที่ทุกครั้ง เนื่องจากอาจส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวชิ้นงานได้

รายการอ้างอิง

- [1] กระทรวงอุตสาหกรรม, แผนแม่บทการพัฒนาอุตสาหกรรมไทย พ.ศ.2555-2574. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.industry.go.th/5/แผนแม่บทการพัฒนาอุตสาหกรรมไทย%20พ.ศ.%202555-2574.pdf> [15 กุมภาพันธ์ 2556]
- [2] สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ. วิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [3] Kalpakjian, S., and Schmid. S. Manufacturing Engineering and Technology. 5th Edition. Singapore : Pearson Prentice Hall, 2006.
- [4] Moriwaki, T., Shibasaki, T., and Somkiat T. Development of in-process tool wear monitoring system for CNC turning. International Journal of Japan Society of Mechanical Engineers 47-3 (2004) : 933-938.
- [5] Lee, J.H., Kim, D.E., and Lee, S.J. Statistical analysis of cutting force ratios for flank-wear monitoring. Journal of Materials Processing Technology 74 (1998) : 104-114.
- [6] Groover, M.P. Fundamentals of Modern Manufacturing. 2nd Edition, USA : John Wiley & Son, 2004.
- [7] ศุภชัย รมยานนท์ และฉวีวรรณ รมยานนท์. ทฤษฎีงานเครื่องกลึงเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์วัฒนาพานิช, 2534.
- [8] ชาญ ราชวงศ์. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิวงานในการกลึงงานแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [9] ชัยพฤกษ์ อาภาเวท, อาคม มณีคันโท และสมพงษ์ พิริยานต์. การศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรในการกลึงกับลักษณะเศษที่เกิดขึ้นของเหล็กกล้า St.37. ใน รายงานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 5, หน้า 129-133. วันที่ 10-11 พฤษภาคม 2550 ณ โรงแรมภูเก็ต เกรซแลนด์ รีสอร์ท & สปา จังหวัดภูเก็ต, 2550.
- [10] สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ. ลักษณะการเกิดเศษโลหะ [เอกสารประกอบการสอนวิชา Advanced Manufacturing Engineering]. กรุงเทพฯ: 2555.
- [11] จริยา บัวเจริญ. มาตรฐานความหยาบผิว Roughness standard. Metrology info (มกราคม - กุมภาพันธ์ 2552) : 16-17.

- [12] กัลยา วานิชย์บัญชา. หลักสถิติ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [13] ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [14] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป, 2545.
- [15] จักร จันทลักขณา. การแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (FFT) และการประยุกต์ใช้เพื่อวินิจฉัยสภาพเครื่องจักร ตอนที่ 1 แกนอ้างอิงเทียบทางความถี่ด้วยการวิเคราะห์แบบฟูริเยร์. วารสารพัฒนาเทคนิคศึกษา สจพ. 15, 44 (ต.ค.-ธ.ค. 2545) : 17-22.
- [16] Fnides, B., Aouici, H., and Yallese, M.A. Cutting forces and surface roughness in hard turning of hot work steel X38CrMoV5-1 using mixed ceramic. Journal of Mechanika 70, 2 (2008) : 73-78.
- [17] Huang, L., and Chen, J.C.A. Multiple regression model to predict in-process surface roughness in turning operation via accelerometer. Journal of Industrial Technology 17, 2 (February-April 2001) : 2-8.
- [18] Somkiat T., and Moriwaki, T. Intelligent monitoring and identification of cutting states of chips and force on CNC turning machine. Journal of Manufacturing Processes 10, 1 (January 2008) : 40-46.
- [19] สมเกียรติ ตั้งจิตสถิตเจริญ. ระบบการตรวจจับการแตกหักของเศษโลหะเชิงปัญญา. ใน รายงานการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม. 3-5 ตุลาคม 2548 ณ ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพฯ, 2548.
- [20] สมเกียรติ ตั้งจิตสถิตเจริญ, ศักดิ์ดา ศรีอนุศาสตร์ และดวงตา ละเอียดดี. การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดสำหรับกระบวนการกลึงซีเอ็นซีด้วยอัตราส่วนแรงตัด, วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) 2, 4 (2553) : 93-105.
- [21] กิติกุล กลิ่งผล. การพัฒนาตรวจจับการแตกหักเศษโลหะโดยใช้สัญญาณแรงตัดและอุณหภูมิ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [22] ศิริวัลย์ จันทร์ผ่อง. การพยากรณ์ความขรุขระผิวสำเร็จชิ้นงานเหล็กกล้าในกระบวนการกลึง

ซีเอ็นซีด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

- [23] Cakir, M. C., Ensarioglu, C., and Demirayak, I. Mathematical models of surface roughness for evaluating the effects cutting parameters and coating materials. Journal of materials processing technology 209 (2009) : 102-109.
- [24] Feng, C.X. and Wang, X.F. Surface roughness predictive modeling : neural networks versus regression. IIE Transactions 35-1 (2003) : 11-27.
- [25] ปิยะ ศิริธรรมปิติ. การศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยการประยุกต์ใช้วิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [26] Somkiat T. In-Process monitoring and prediction of surface roughness in CNC process, Journal of Applied Mechanics and Materials 199-200 (2011) : 1958-1966.
- [27] Somkiat T. Advanced prediction of surface roughness by monitoring of dynamic cutting force in CNC process, Journal of Applied Mechanics and Materials 239-240 (2013) : 661-669.
- [28] Kennametal. Lathe tooling catalog 4010GB. Latrobe, PA-USA : Kennametal Inc, 2004.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์ความขรุขระผิว

โปรแกรมการแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์ความขรุขระผิว

```

clc;
samp=4345;
unsamp=10000-samp;
unsampplus=unsamp+1;
fname='r27';
ext='.txt';
filename=[fname,ext];
load(filename);
eval(['data=',[fname],';']);
[N,n]=size(data);
t=1/samp;
tt=(0:t*(N-unsampplus));
f=(0:N-unsampplus)/(N-unsamp)*samp;
freq=f(1:(N-unsamp)/2);
SurfaceRoughness=fft(data(1:samp,2))/(N*2);
absSurfaceRoughness=abs(SurfaceRoughness(1:(N-unsamp)/2));
PabsSurfaceRoughness=absSurfaceRoughness.^2;
figure(1);
plot(freq,PabsSurfaceRoughness);grid;zoom on ;xlabel('Frequency (Hz)');ylabel('PSD of
Surface Roughness (micrometer^2)');
axis([0 100 680*10^-3 2300*10^-3])
figure(2);
plot(tt,data(1:samp,2));grid;zoom on ;xlabel('Time (sec)');ylabel('Surface Roughness
(micrometer)');
axis([0 1 -3 3])

```

ภาคผนวก ข

โปรแกรมการแปลงฟูรีเยร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงดันพลวัตขณะตัด

โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตขณะตัด

```

clear;

samp = 1000;           %Sampling Frequency
fname1 = 'd27';       % ชื่อ ไฟล์ที่ต้องการเปิด
ext1 = '.txt';        % ชื่อ สกุลไฟล์
filename = [fname1,ext1]; % รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์
load (filename);      % เรียกไฟล์
eval(['data1=',[fname1],';']); %
[N1,n1]=size(data1); % เก็บค่าขนาดของข้อมูล โดย N เป็นจำนวนแถวและ n เป็น
                    % จำนวนคอลัมน์
fname2 = 'n27';       % ชื่อ ไฟล์ที่ต้องการเปิด
ext2 = '.txt';        % ชื่อ สกุลไฟล์
filename = [fname2,ext2]; % รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์
load (filename);      % เรียกไฟล์
eval(['data2=',[fname2],';']); %
[N2,n2]=size(data2); % เก็บค่าขนาดของข้อมูล โดย N เป็นจำนวนแถว และ n เป็น
                    % จำนวนคอลัมน์

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;

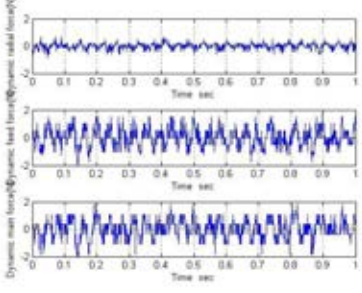
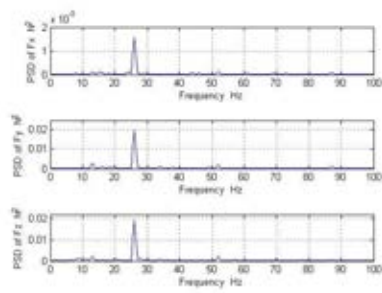
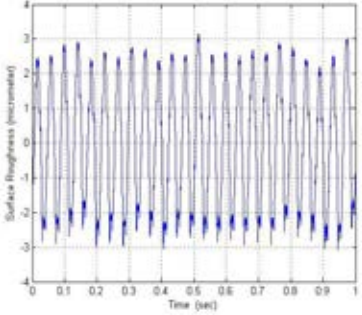
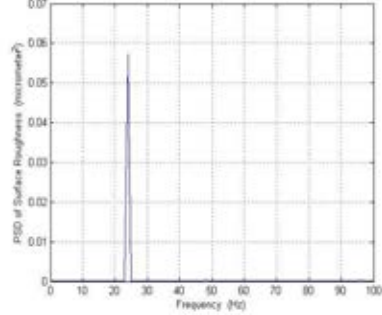
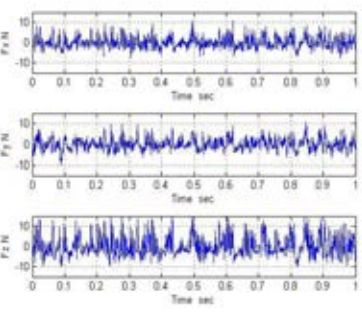
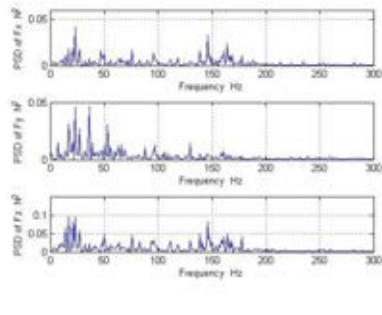
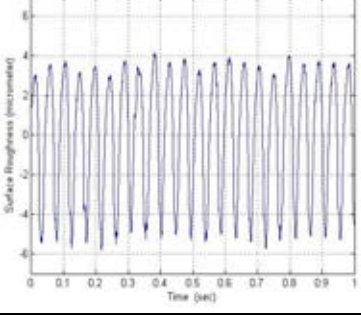
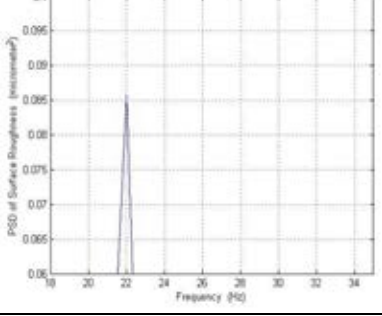
FZ=fft(data1(:,3))/(N1*2);    % column 3 _ take FFT of Fz
absFZ=abs(FZ(1:N1/2));
PabsFZ=absFZ.^2;

figure(102);
subplot(3,1,1);plot(freq,PabsFX);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Fx
N^2');
axis([0 500 0*10^-3 1000*10^-3])
subplot(3,1,2);plot(freq,PabsFY);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Fy
N^2');
axis([0 500 0*10^-3 1500*10^-3])
subplot(3,1,3);plot(freq,PabsFZ);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Fz
N^2');
axis([0 500 0*10^-3 1500*10^-3])

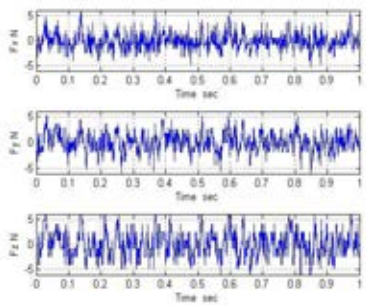
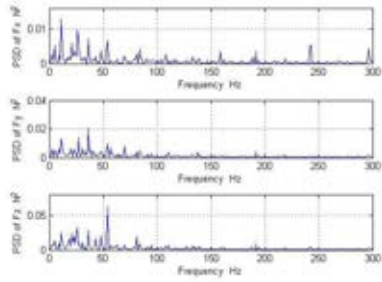
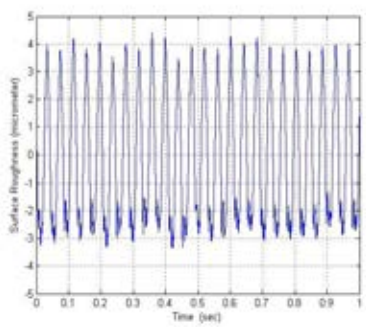
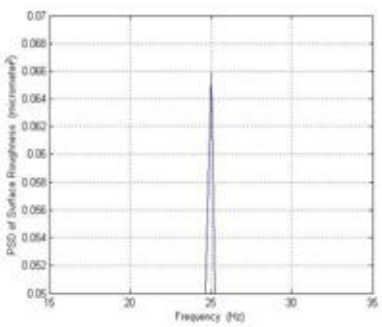
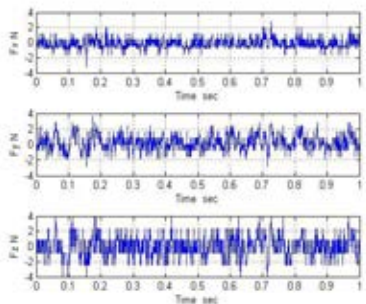
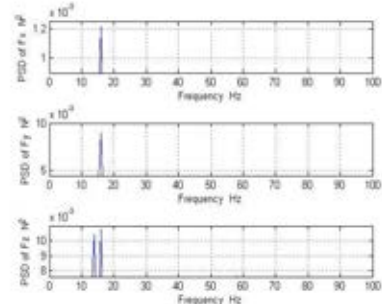
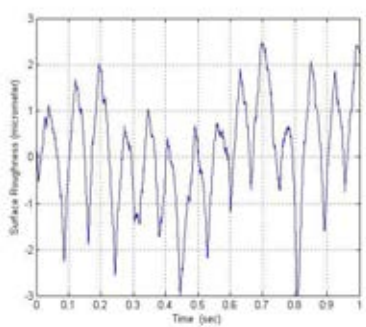
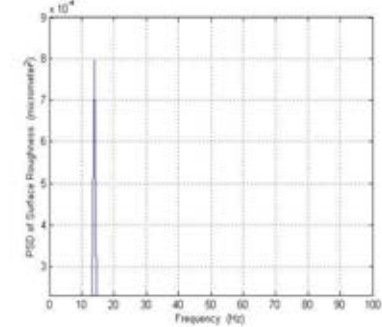
figure(103);
subplot(3,1,1);plot(tt,data2(:,1));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Dynamic radial
force(N)');
axis([0 1 -55 55])
subplot(3,1,2);plot(tt,data2(:,2));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Dynamic feed
force(N)');
axis([0 1 -55 55])
subplot(3,1,3);plot(tt,data2(:,3));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Dynamic main
force(N)');
axis([0 1 -55 55])

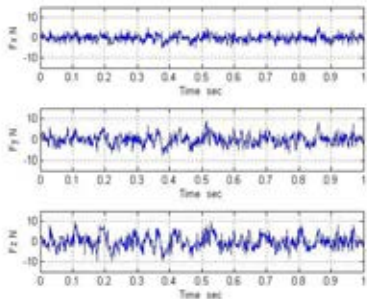
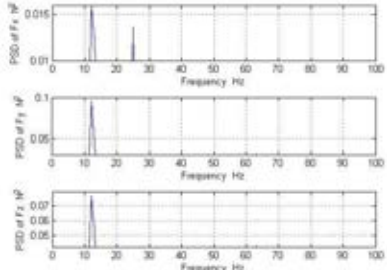
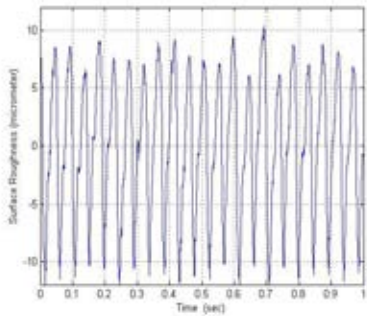
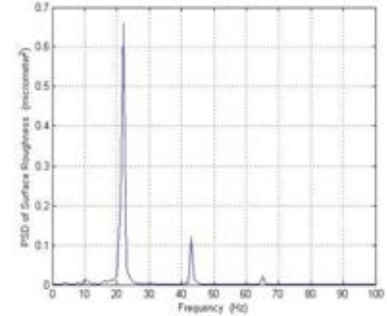
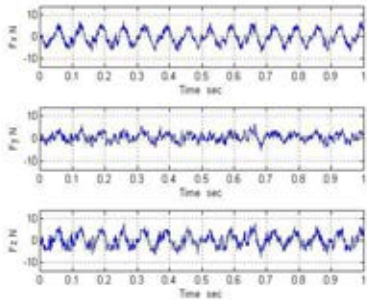
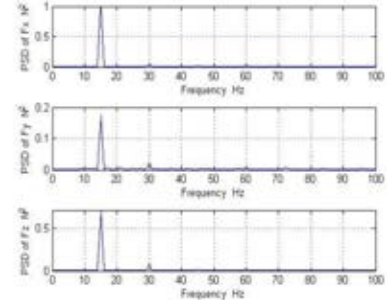
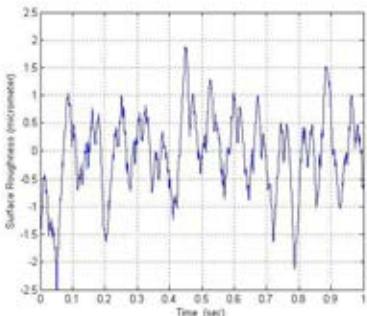
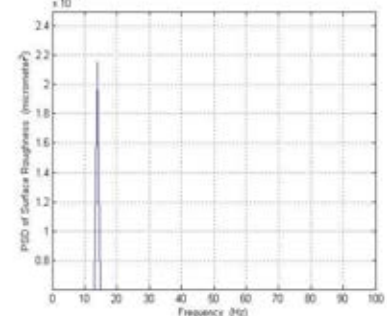
```

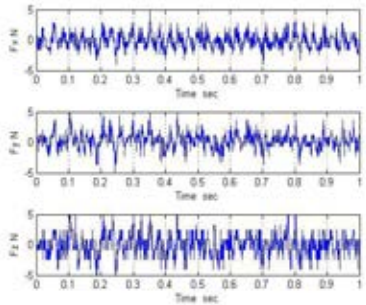
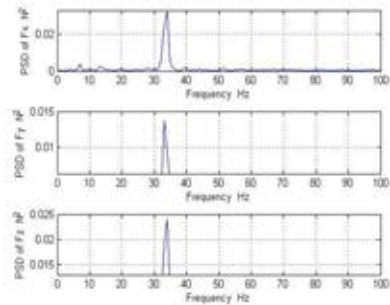
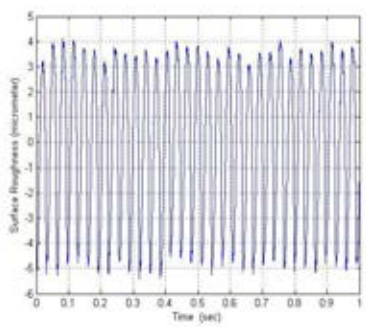
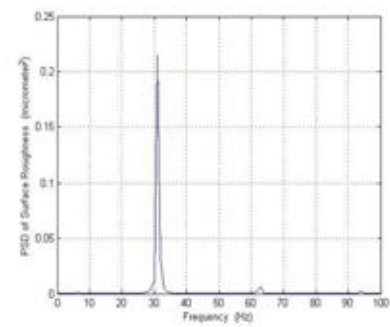
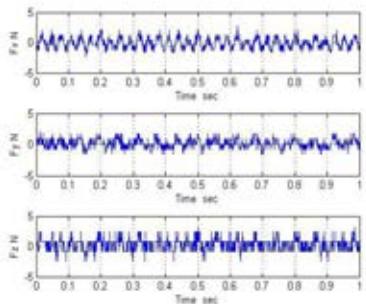
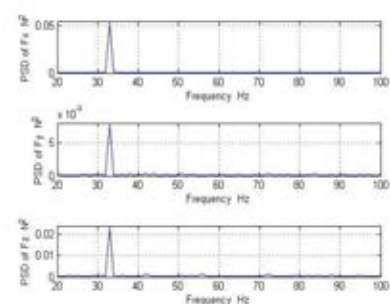
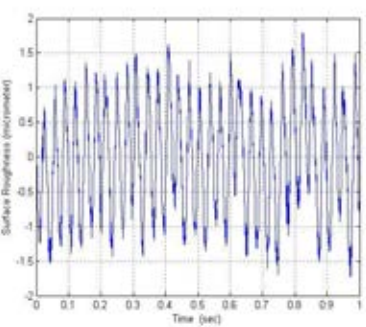
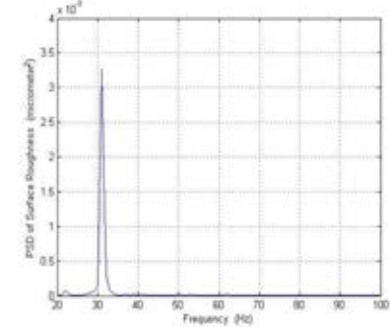
ภาคผนวก ค
การวิเคราะห์ FFT สำหรับเงื่อนไขการตัดต่างๆ

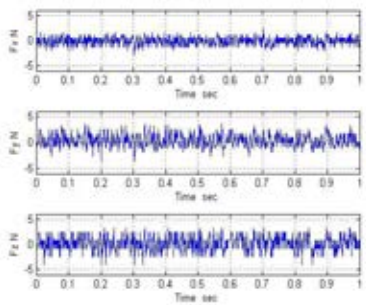
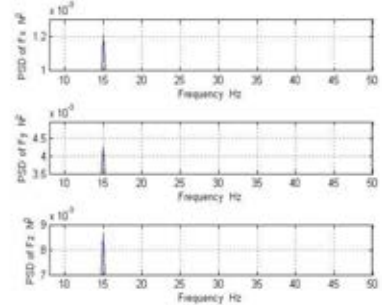
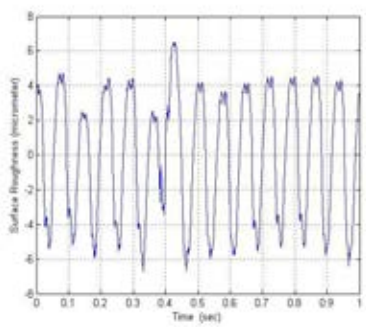
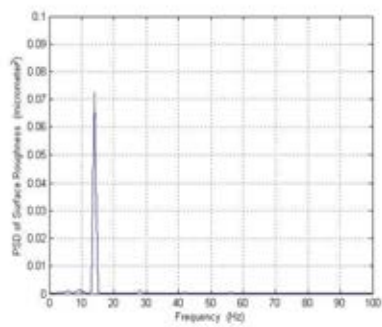
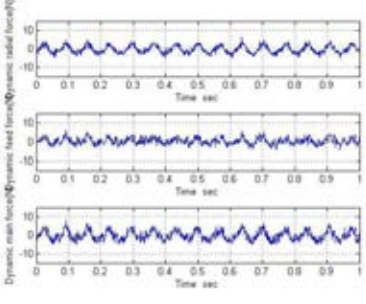
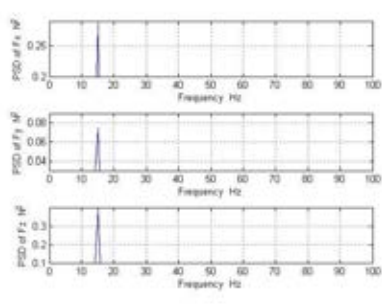
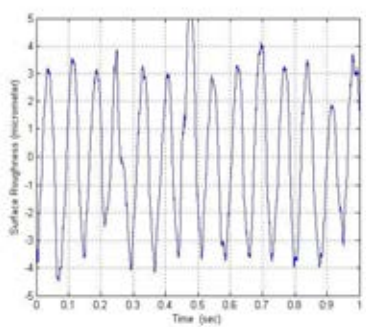
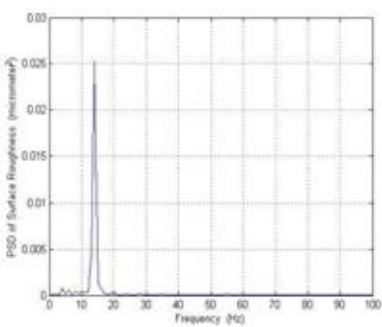
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมิด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
1	180	0.2	0.2	0.8	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมิด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
2	180	0.2	0.8	0.4	11
					
					

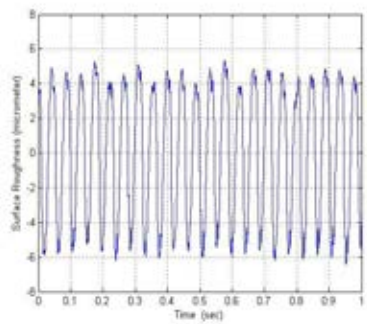
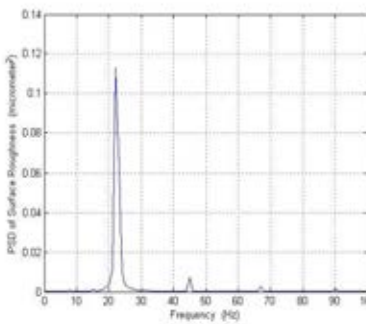
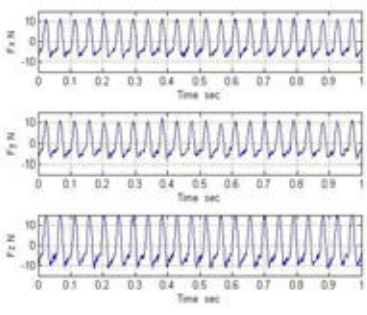
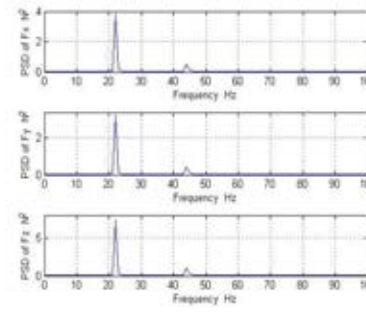
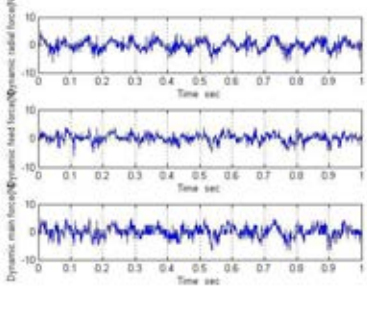
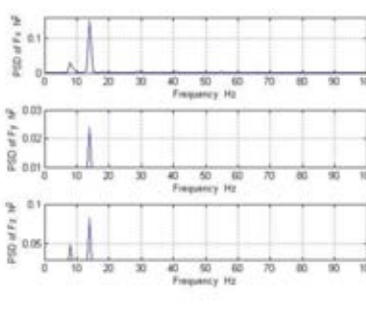
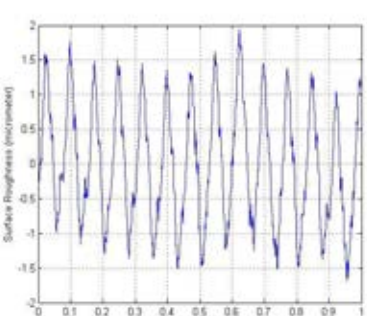
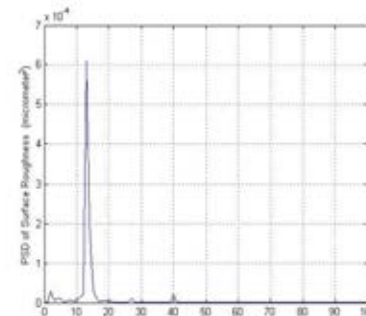
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
3	180	0.3	0.2	0.4	11
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
4	100	0.1	0.8	0.8	-6

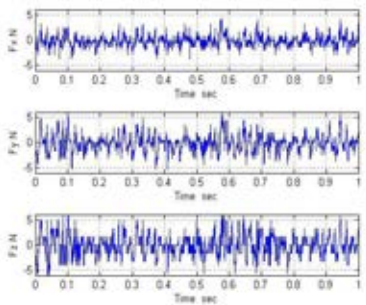
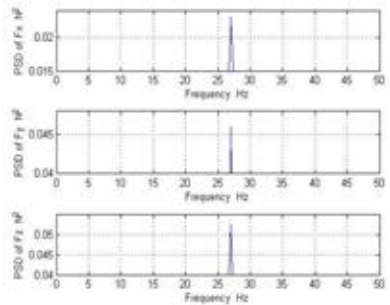
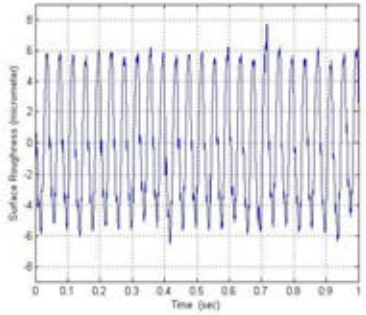
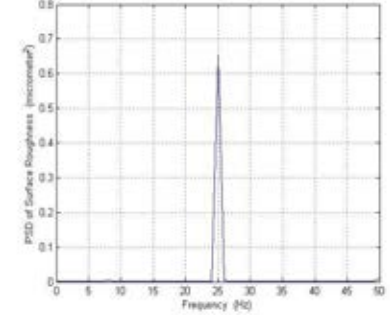
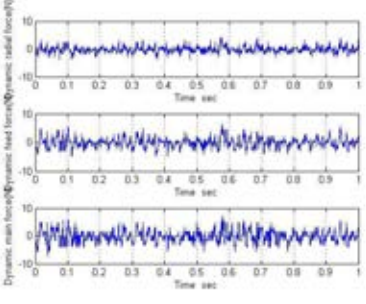
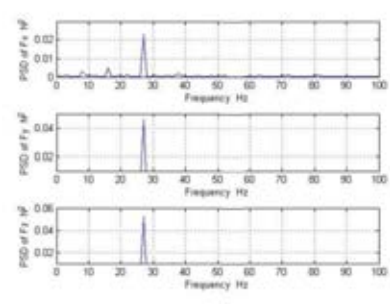
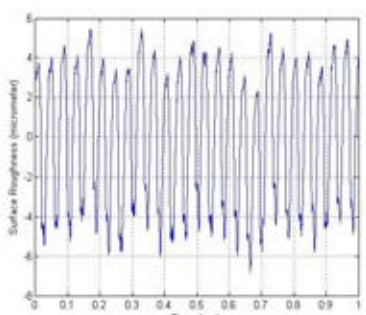
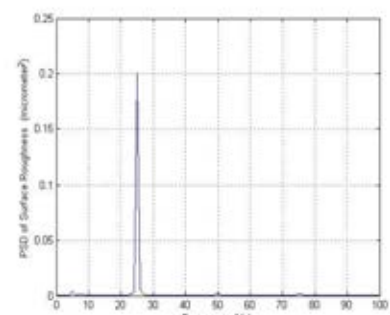
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
5	180	0.2	0.8	0.8	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
6	100	0.1	0.2	0.8	11
					
					

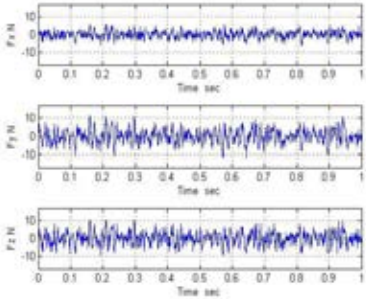
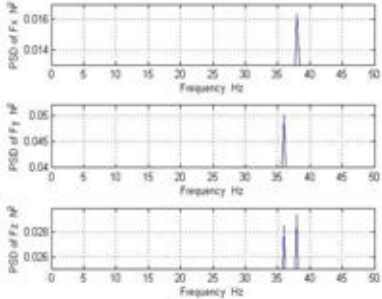
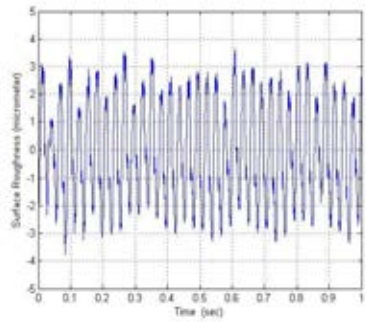
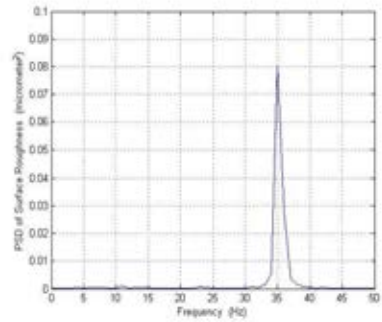
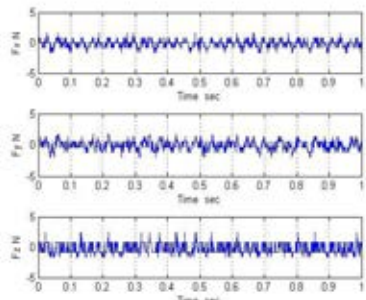
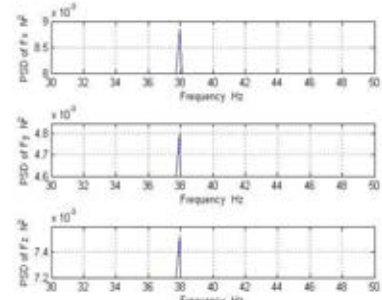
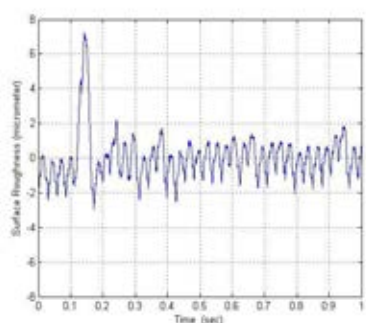
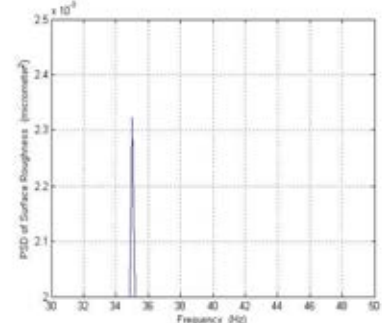
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
7	180	0.3	0.5	0.4	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
8	100	0.1	0.8	0.8	11
					
					

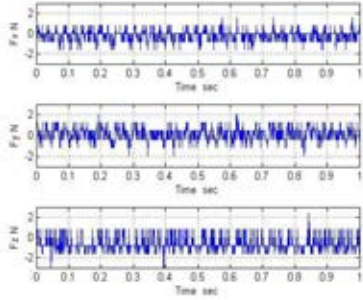
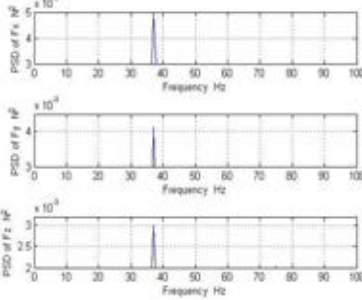
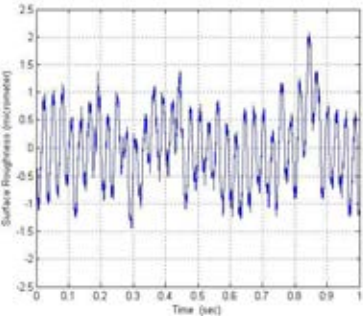
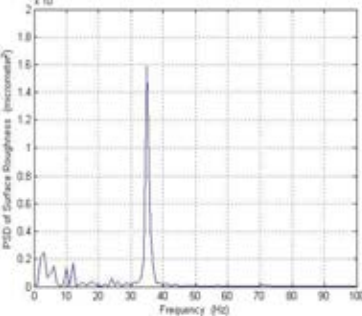
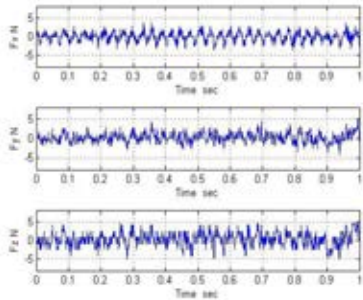
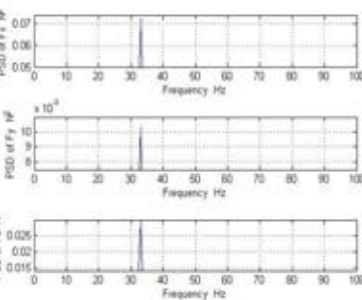
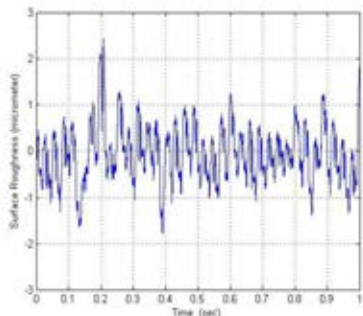
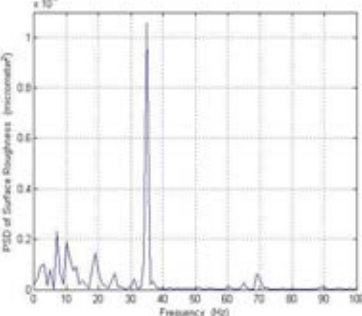
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
9	260	0.2	0.5	0.4	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
10	260	0.1	0.2	0.4	11
					
					

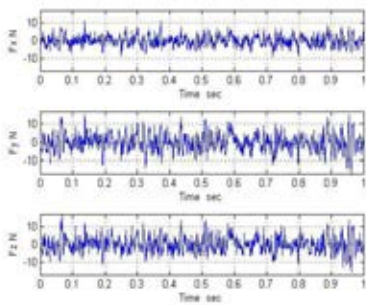
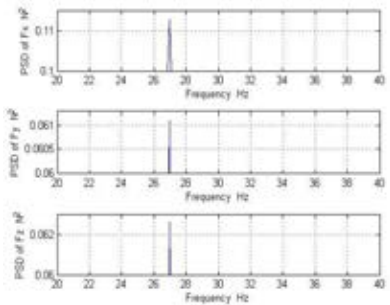
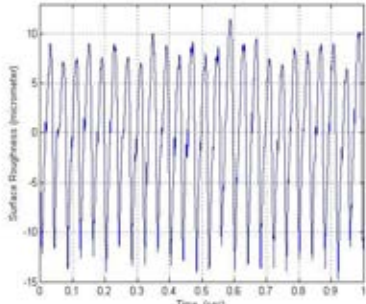
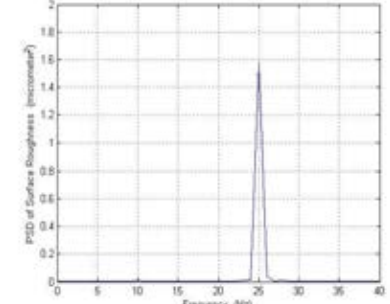
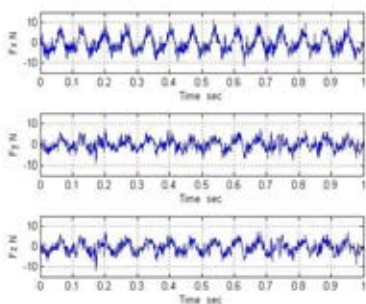
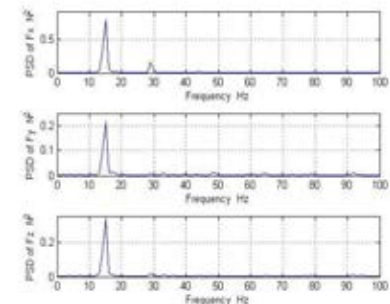
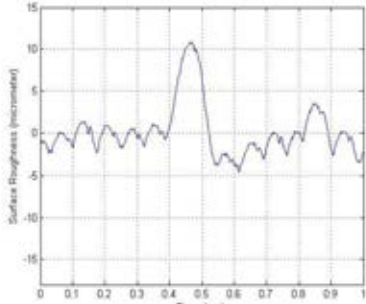
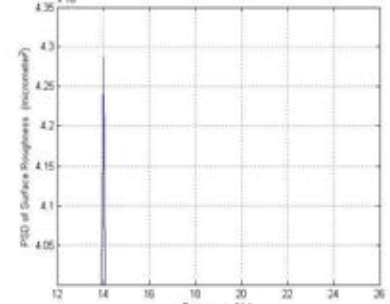
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
11	100	0.1	0.2	0.4	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
12	100	0.2	0.2	0.8	11
					
					

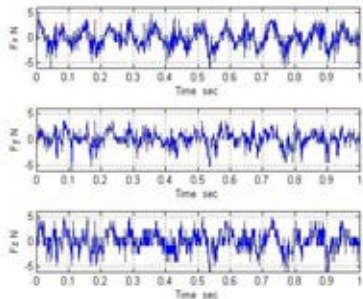
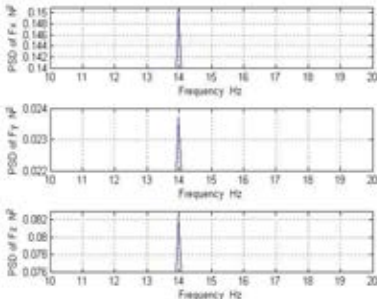
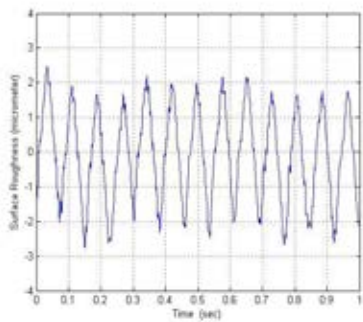
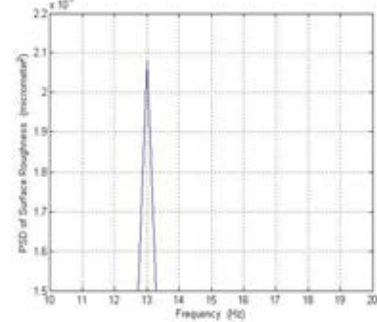
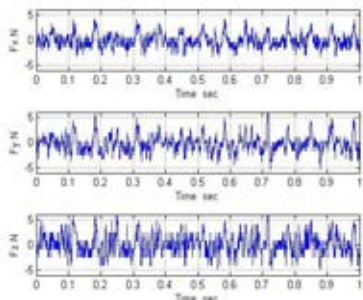
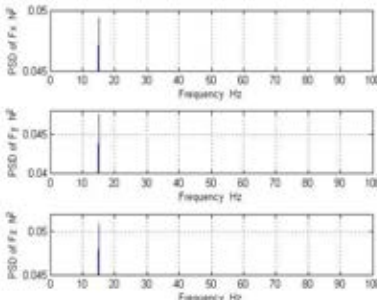
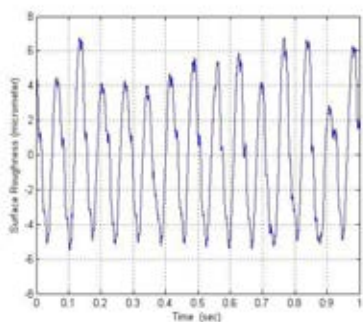
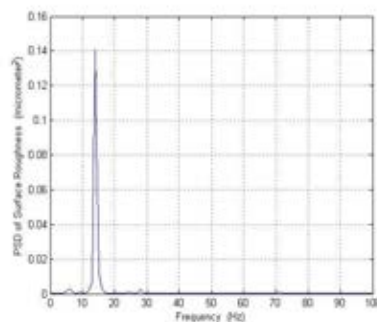
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
13	180	0.1	0.2	0.4	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
14	100	0.1	0.2	0.4	11
					
					

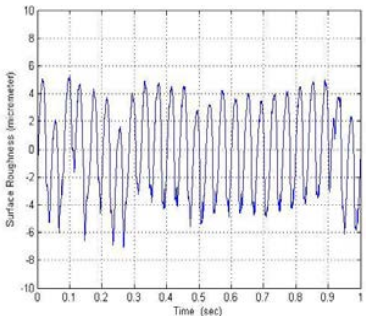
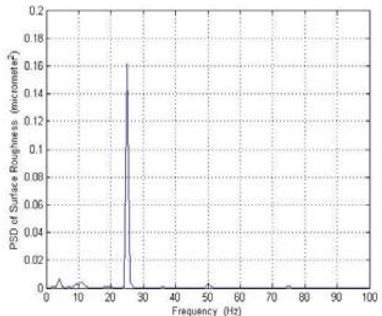
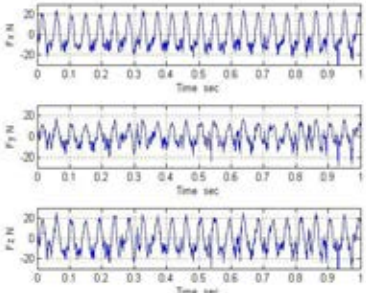
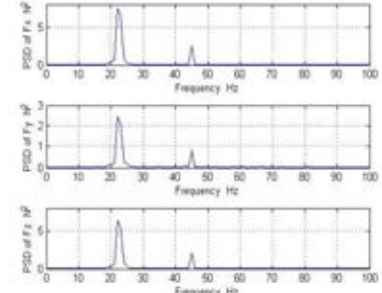
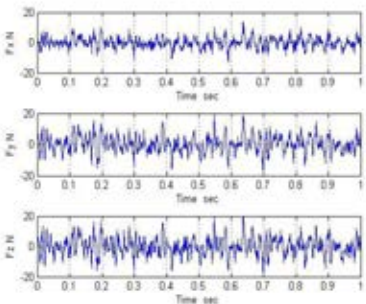
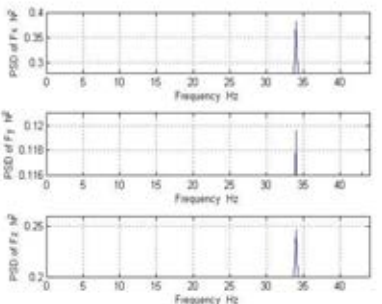
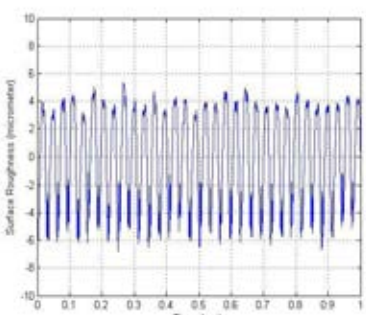
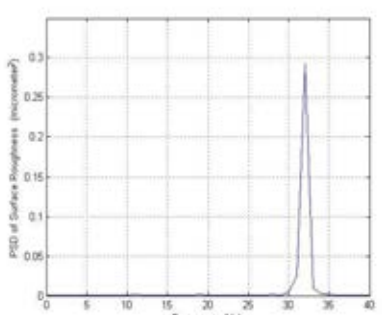
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
15	180	0.3	0.5	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
16	260	0.1	0.8	0.4	-6
					
					

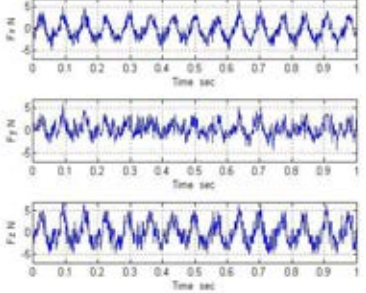
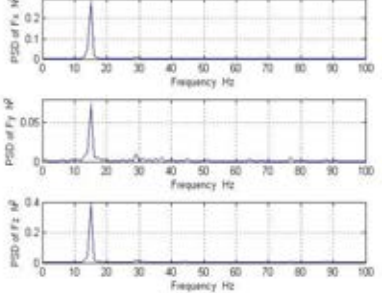
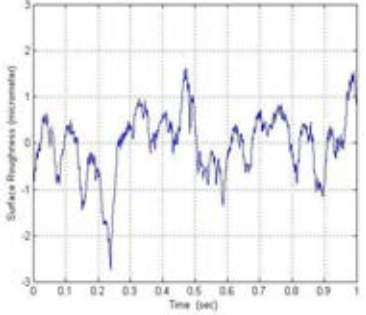
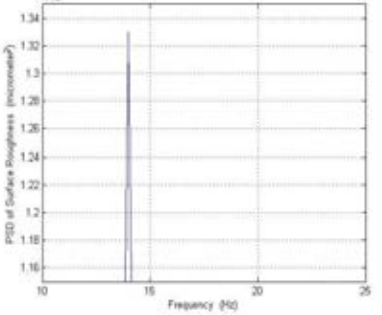
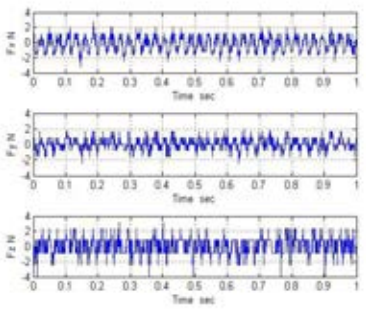
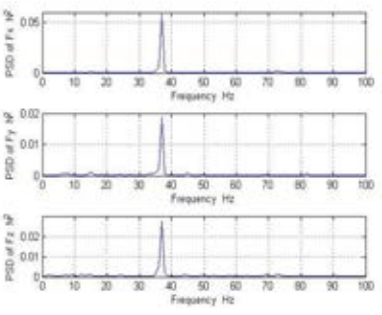
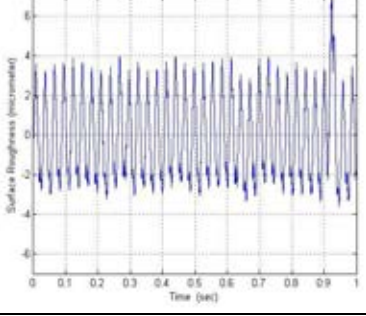
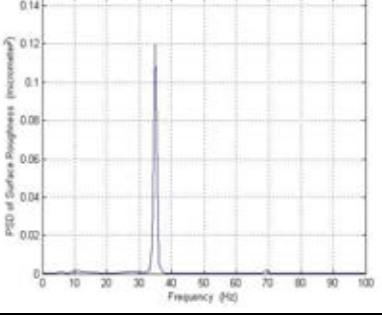
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
17	260	0.2	0.8	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
18	260	0.1	0.2	0.4	-6
					
					

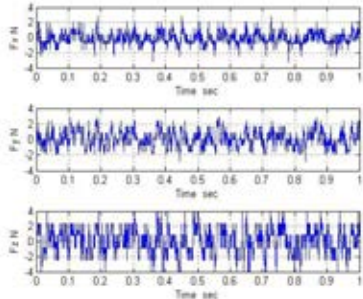
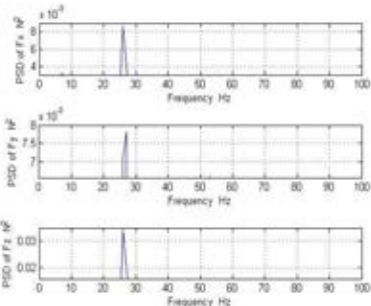
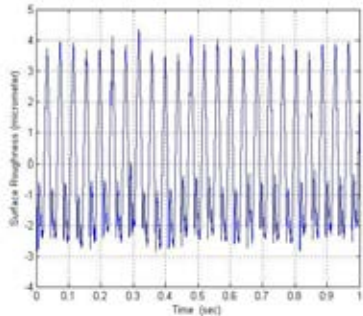
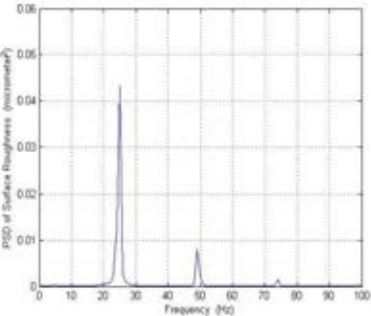
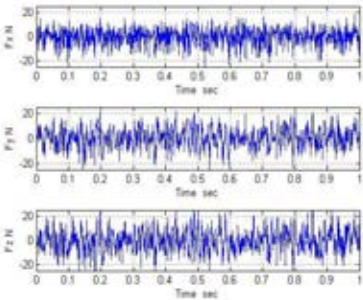
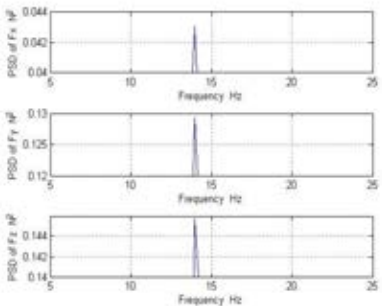
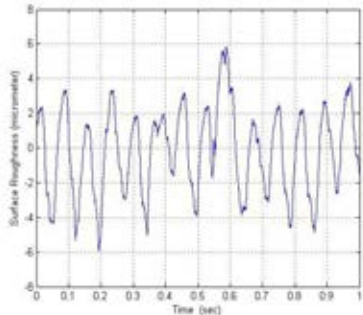
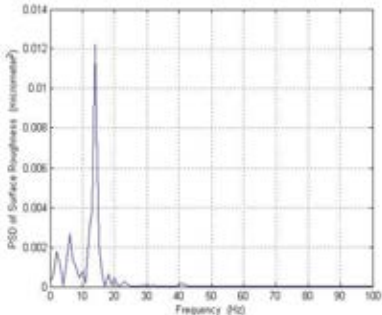
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มก มีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
19	260	0.1	0.2	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุ่มก มีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
20	260	0.1	0.2	0.8	11
					
					

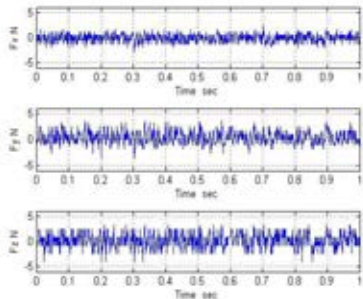
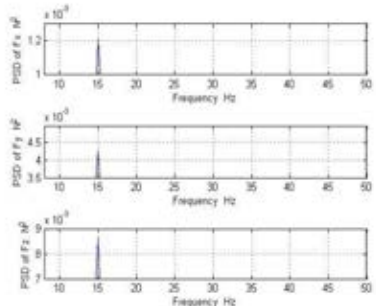
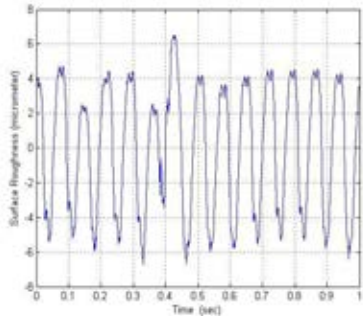
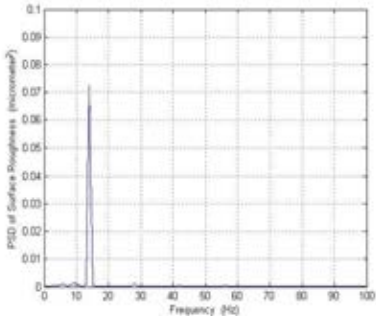
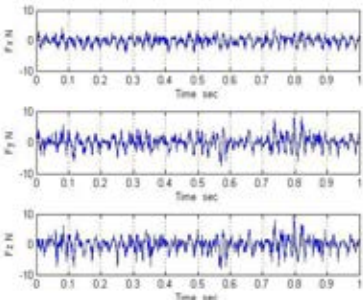
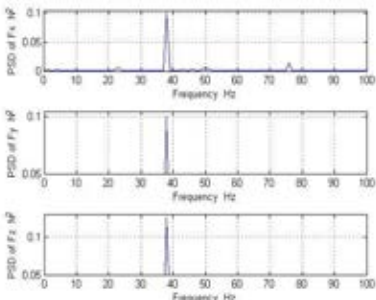
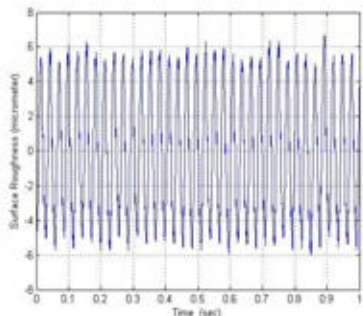
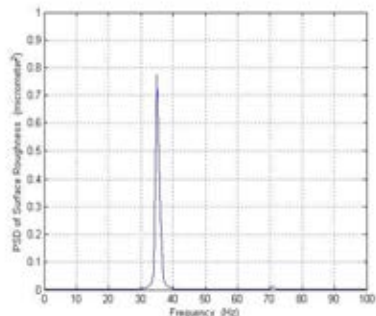
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
21	180	0.3	0.5	0.4	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
22	100	0.1	0.5	0.4	-6
					
					

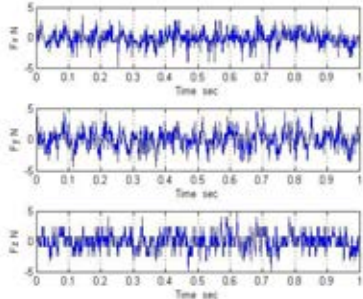
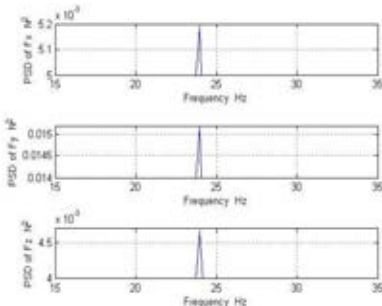
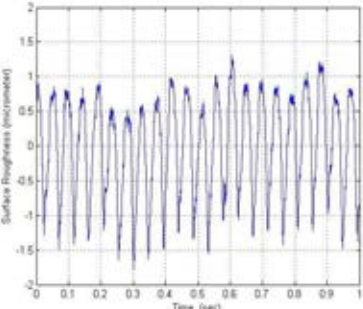
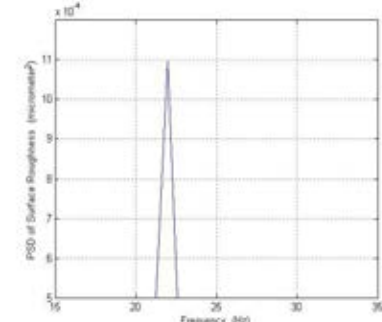
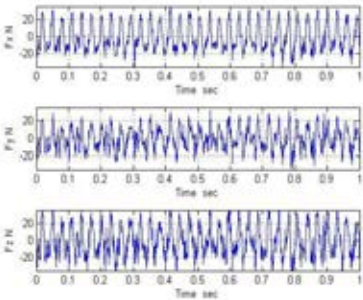
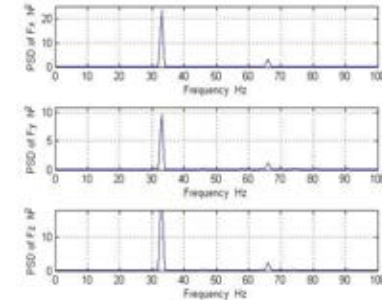
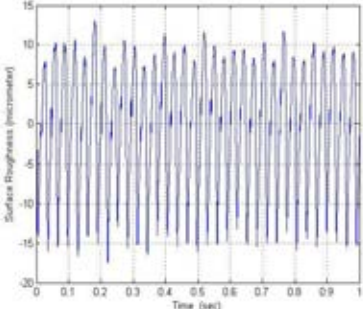
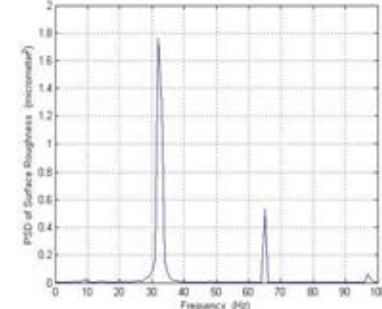
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
23	100	0.1	0.5	0.4	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
24	100	0.3	0.2	0.8	-6
					
					

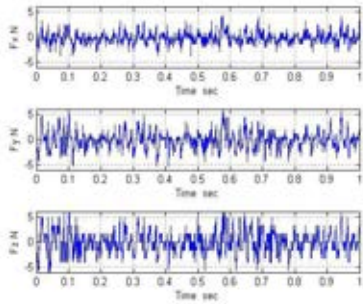
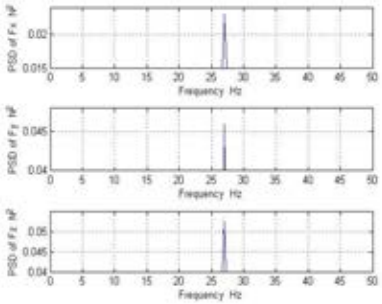
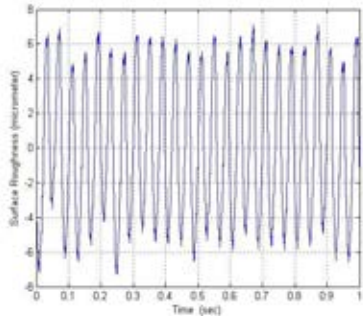
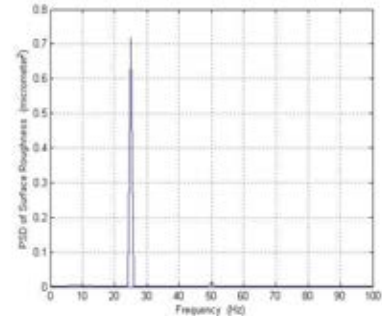
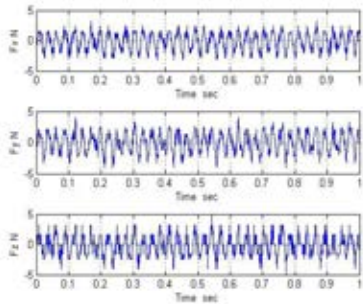
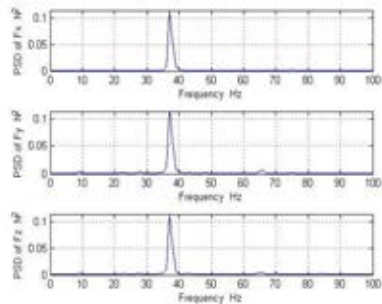
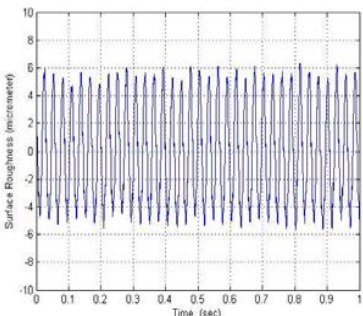
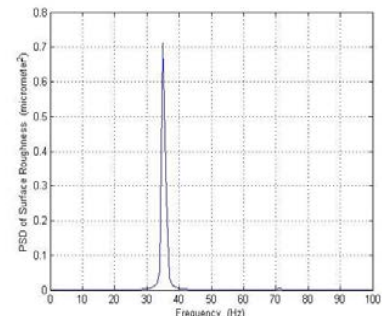
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อน ตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
25	180	0.2	0.5	0.4	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อน ตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
26	260	0.2	0.5	0.4	-6
					
					

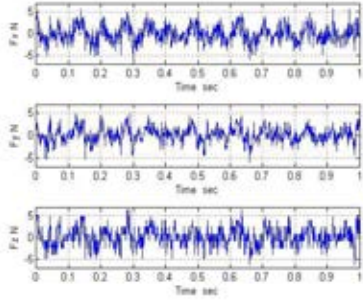
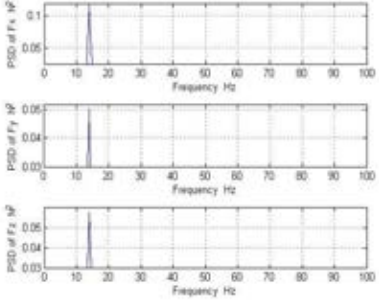
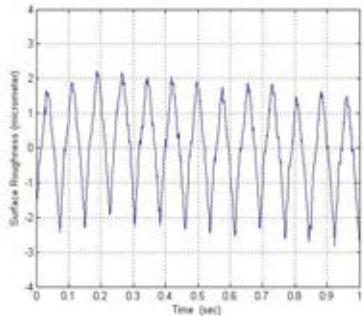
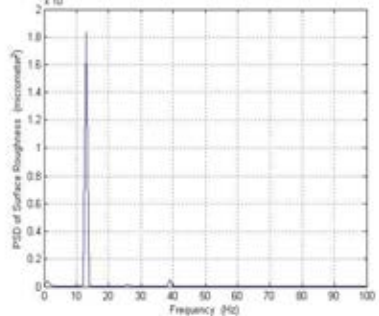
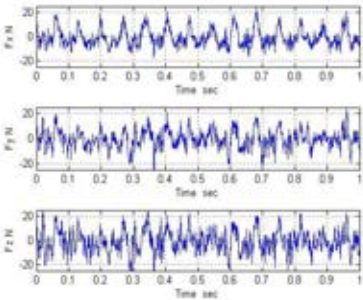
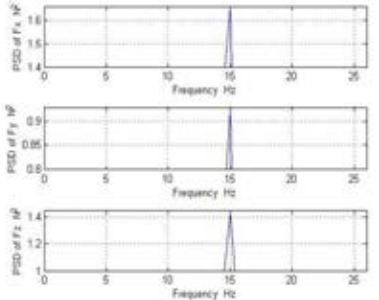
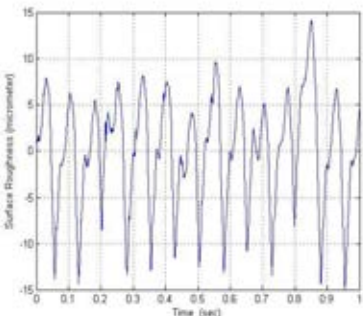
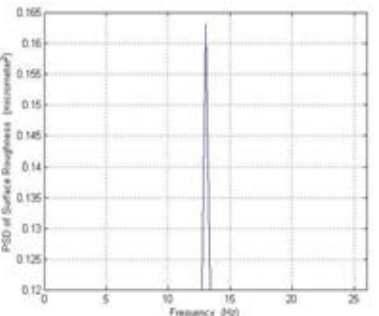
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
27	100	0.1	0.5	0.8	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
28	260	0.2	0.2	0.8	11
					
					

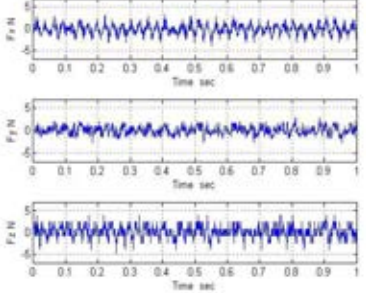
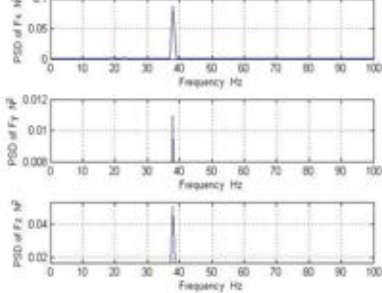
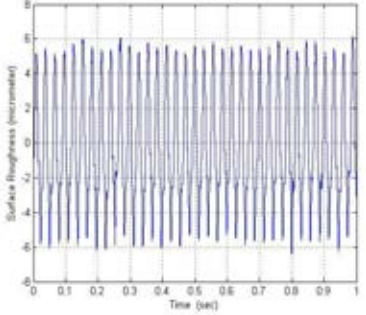
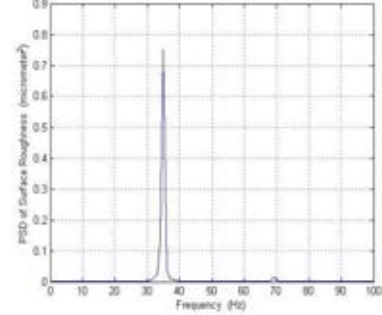
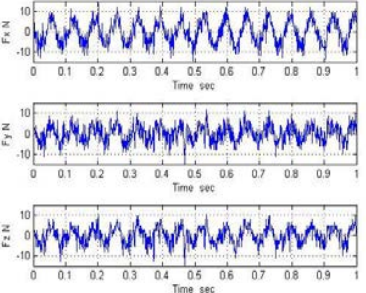
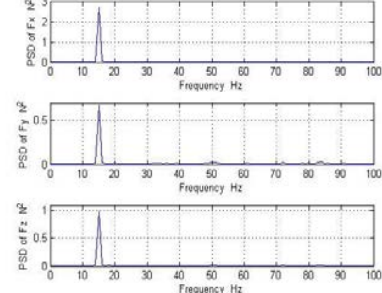
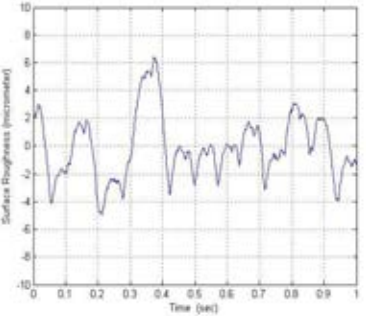
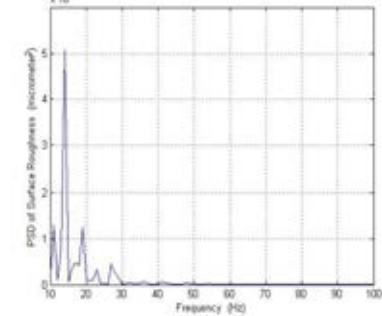
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
29	180	0.2	0.5	0.8	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
30	100	0.2	0.8	0.8	-6
					
					

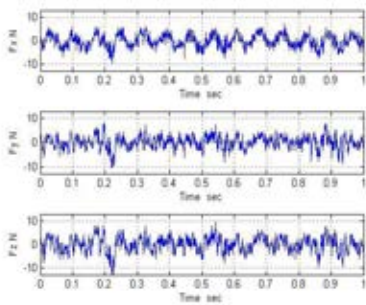
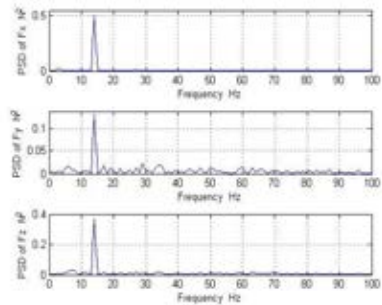
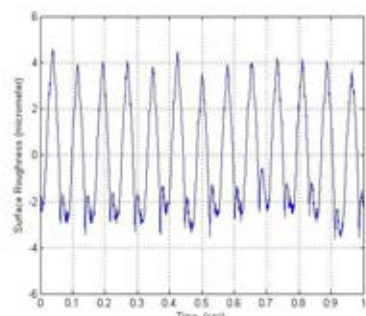
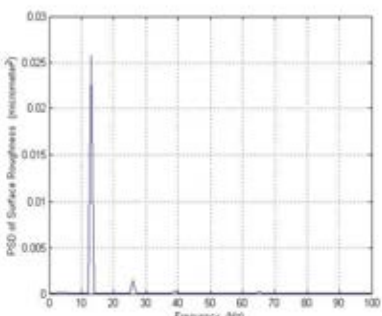
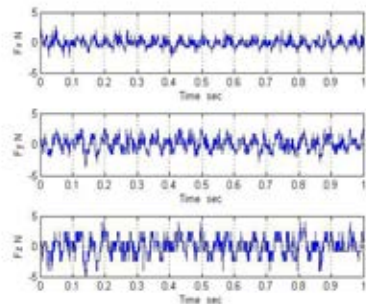
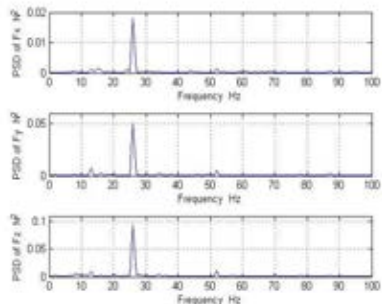
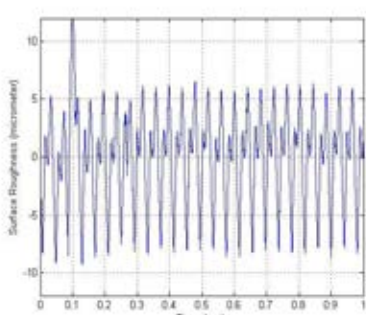
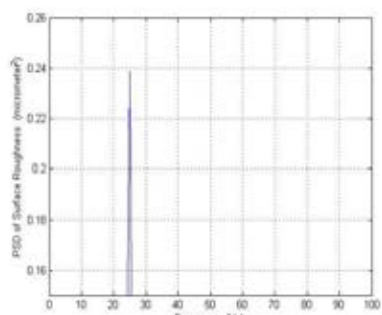
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
31	100	0.2	0.2	0.4	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
32	260	0.3	0.5	0.8	-6
					
					

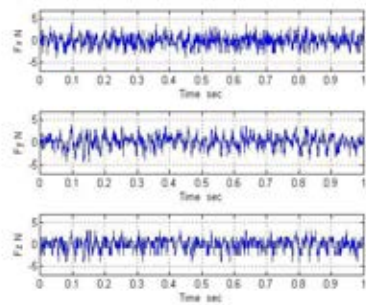
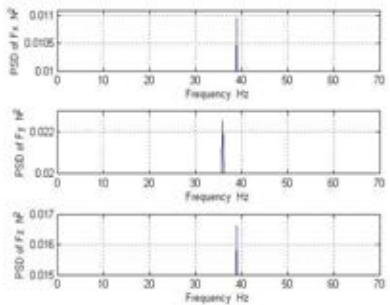
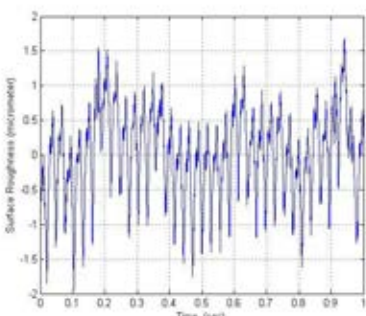
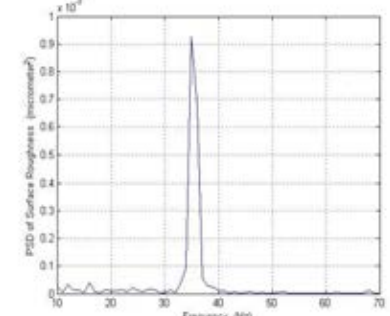
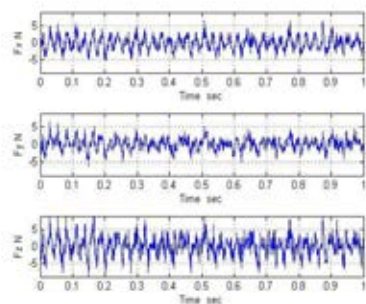
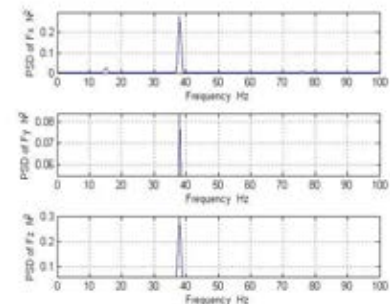
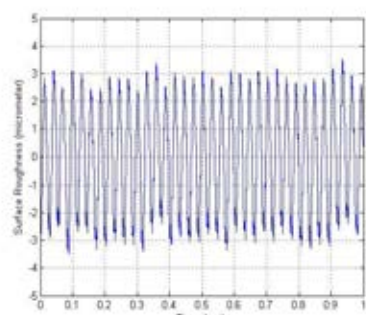
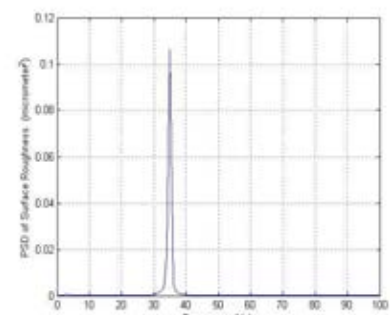
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
33	180	0.1	0.8	0.4	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
34	260	0.3	0.8	0.4	-6
					
					

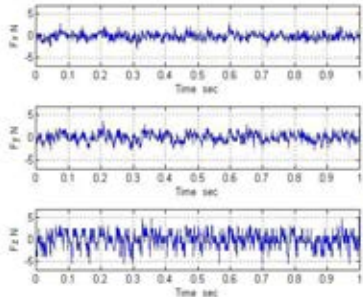
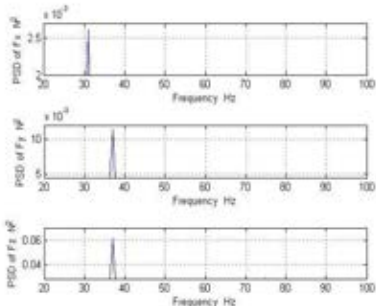
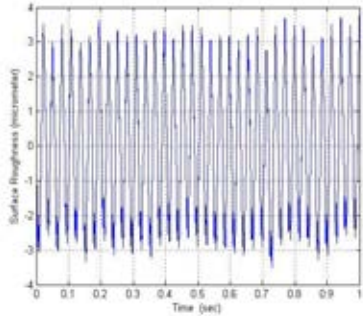
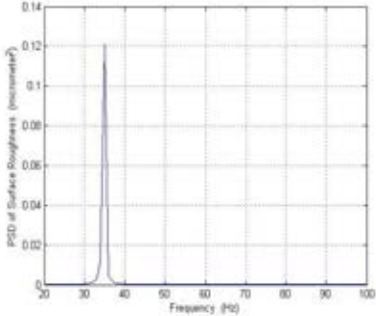
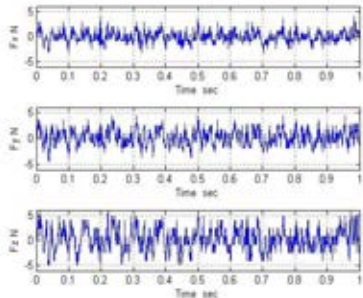
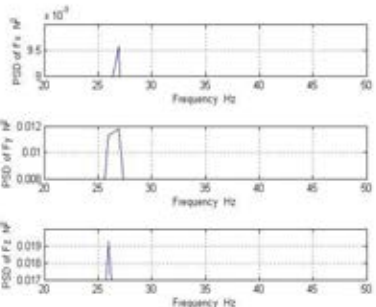
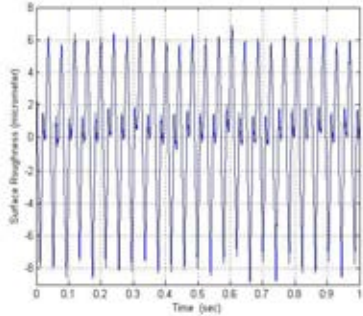
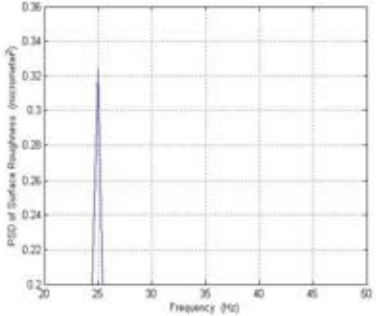
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
35	180	0.3	0.8	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
36	260	0.3	0.2	0.8	-6
					
					

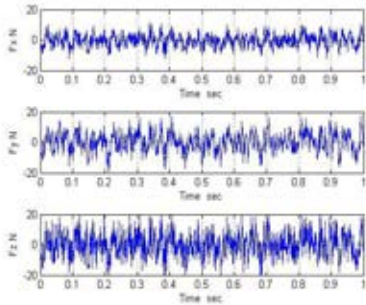
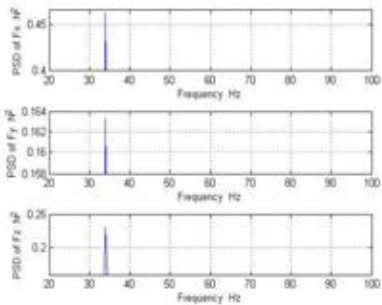
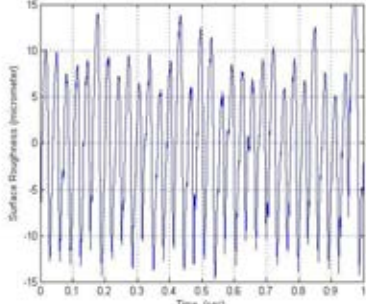
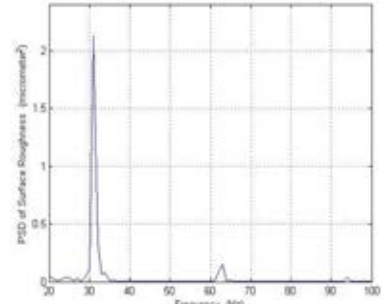
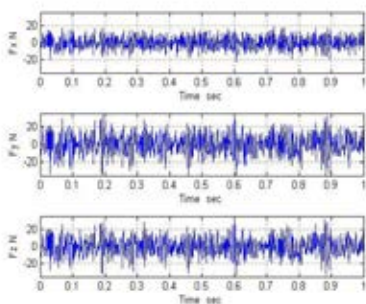
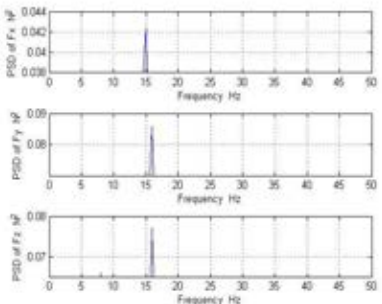
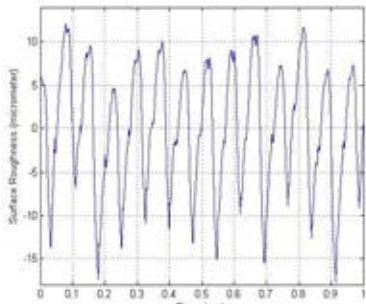
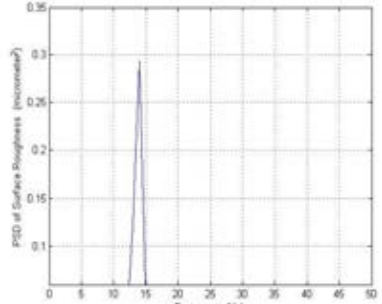
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
37	100	0.1	0.8	0.4	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
38	100	0.3	0.8	0.4	11
					
					

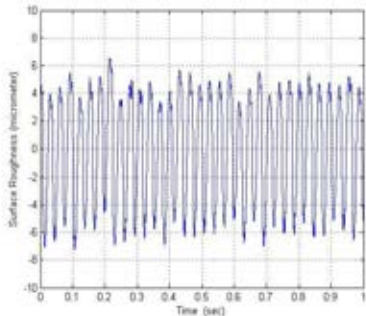
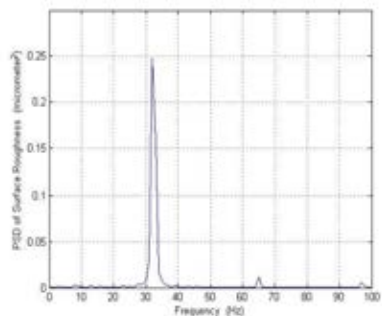
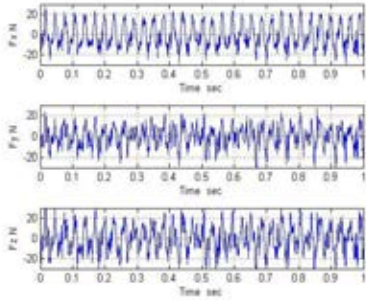
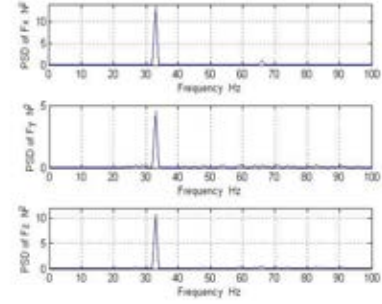
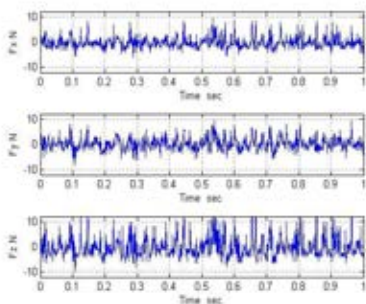
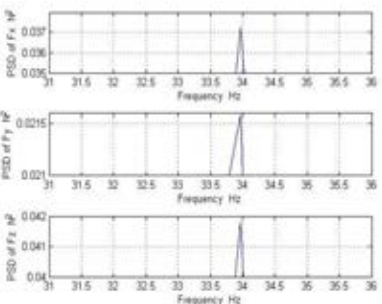
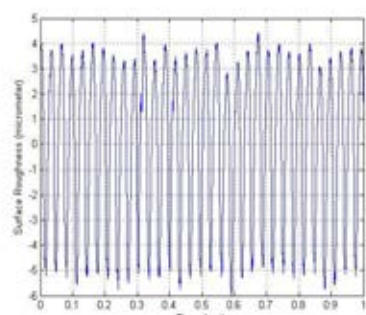
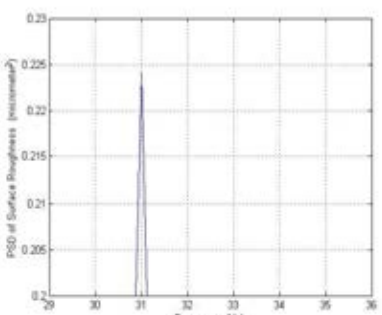
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
39	260	0.3	0.8	0.8	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
40	100	0.1	0.8	0.4	-6
					
					

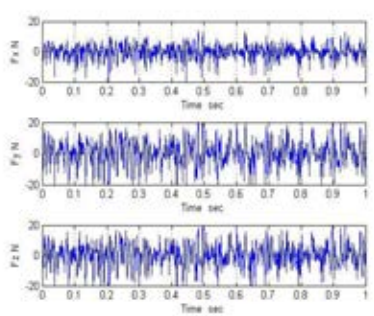
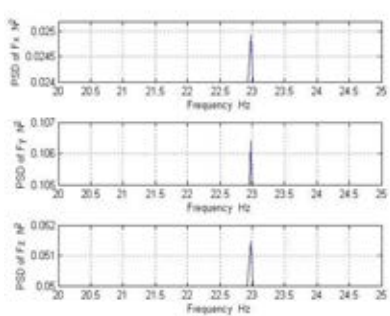
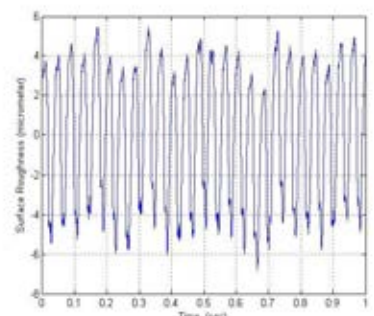
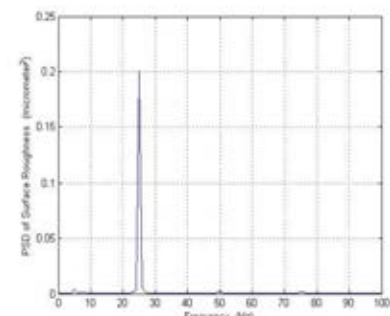
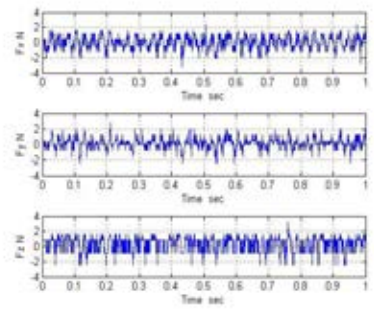
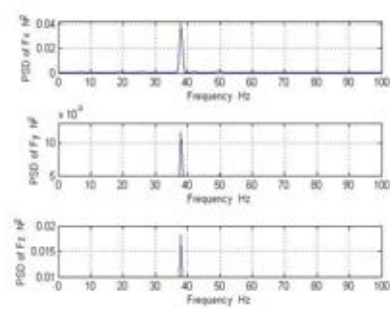
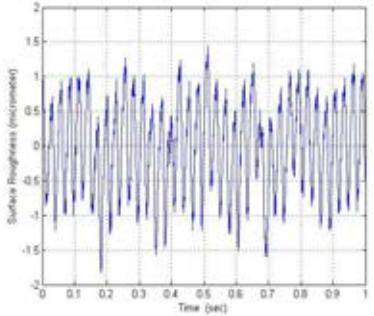
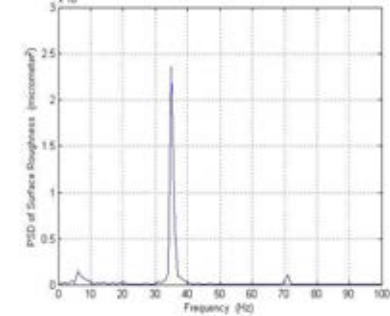
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
41	100	0.2	0.5	0.4	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
42	180	0.3	0.2	0.8	11
					
					

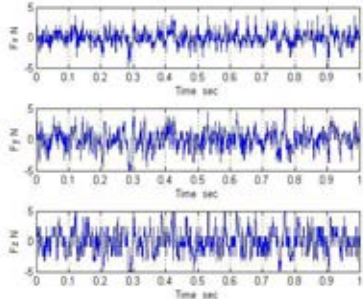
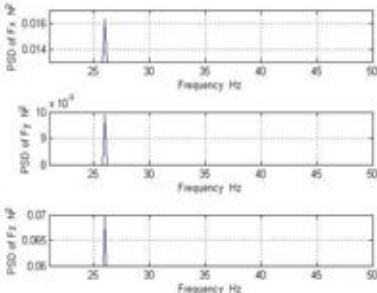
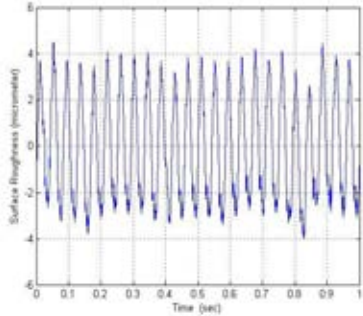
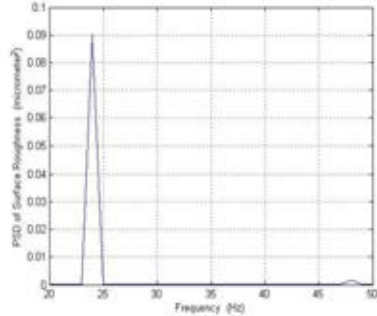
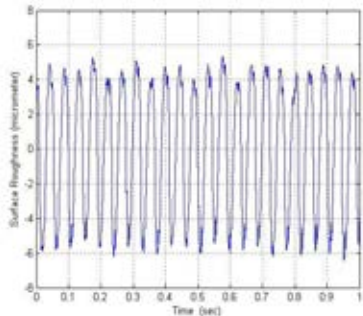
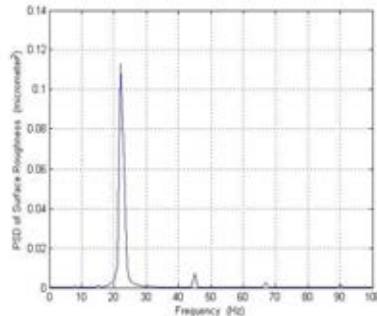
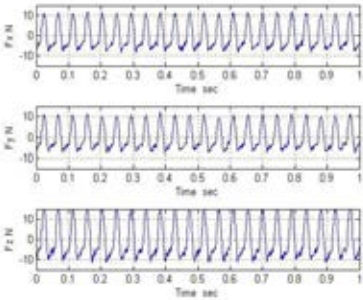
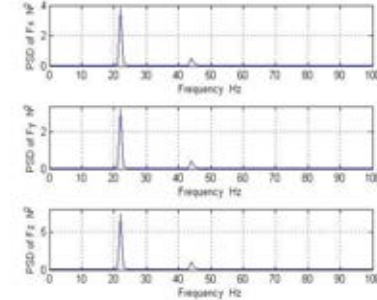
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
43	260	0.1	0.8	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
44	260	0.2	0.8	0.8	11
					
					

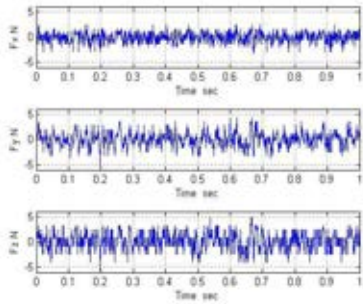
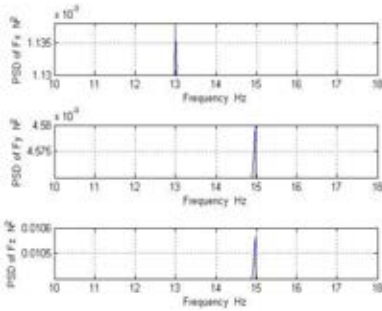
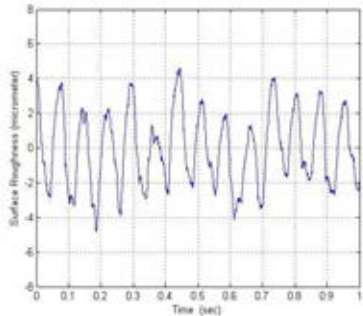
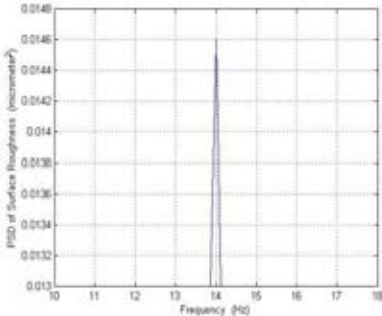
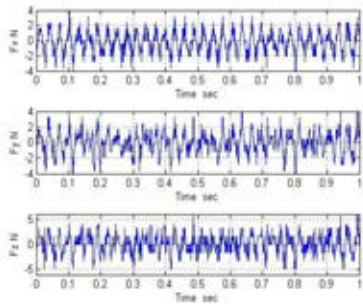
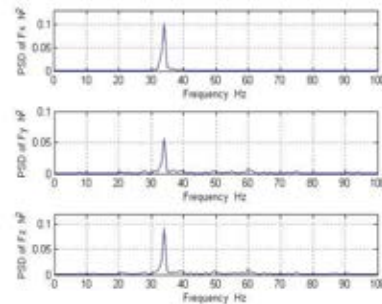
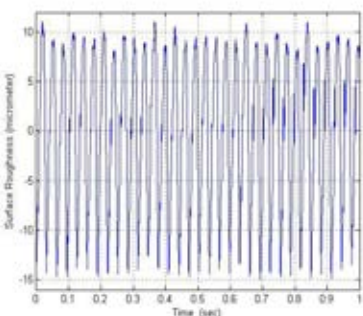
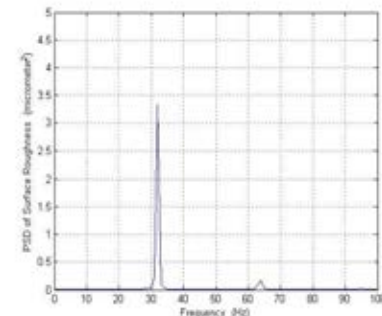
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
45	260	0.2	0.5	0.8	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
46	180	0.3	0.5	0.8	11
					
					

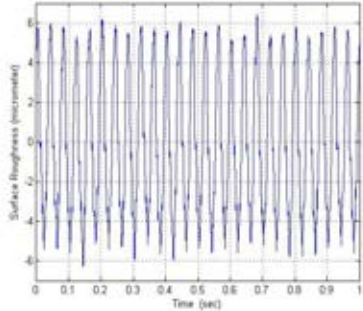
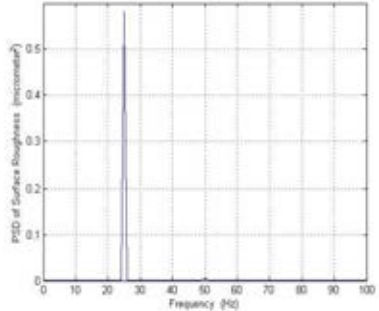
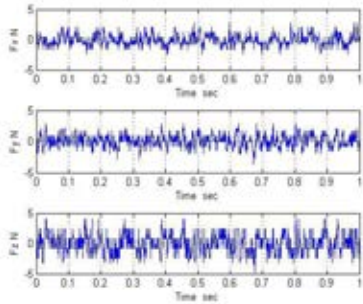
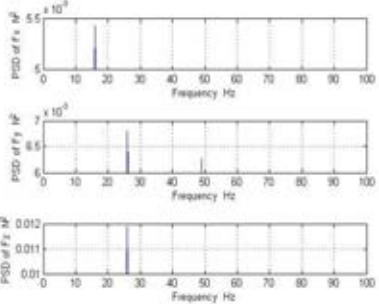
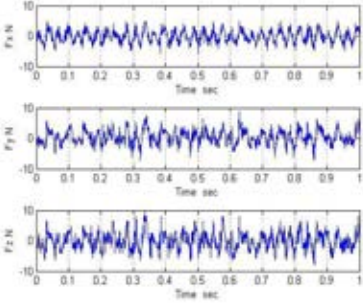
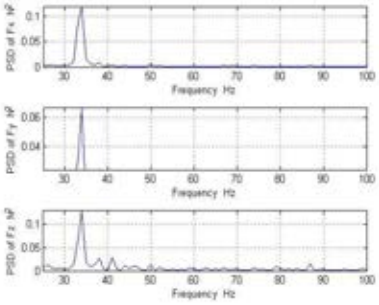
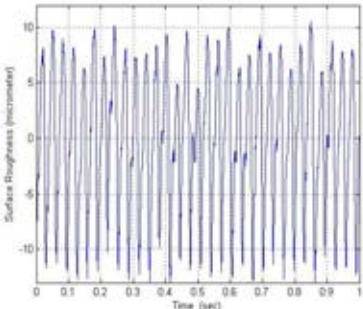
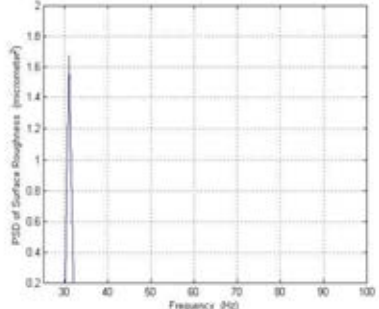
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
47	260	0.3	0.8	0.4	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
48	100	0.3	0.5	0.4	-6
					
					

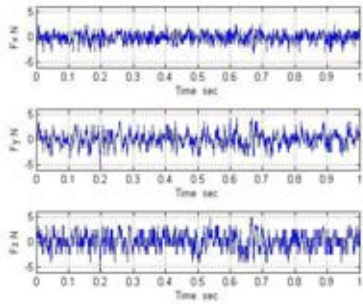
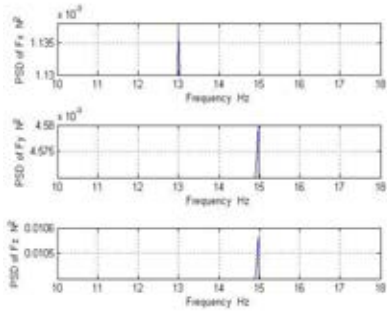
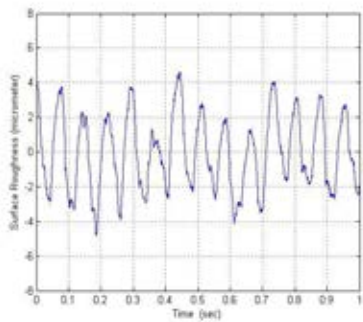
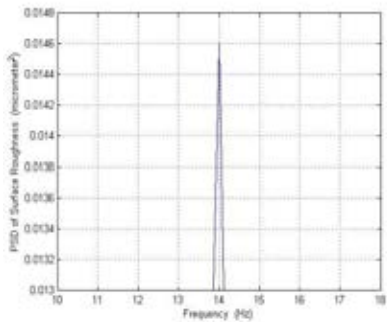
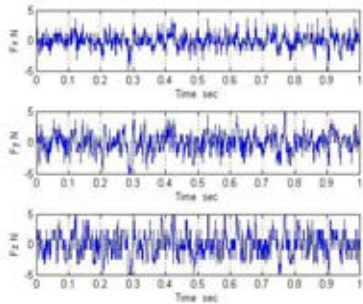
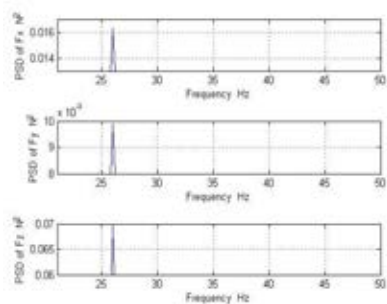
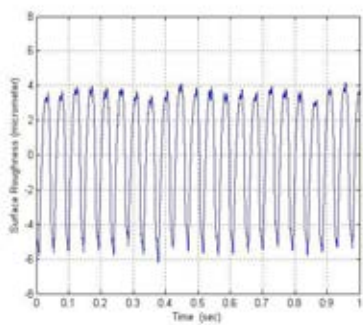
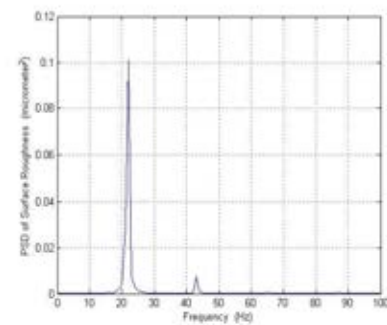
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
49	260	0.2	0.8	0.4	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
50	260	0.2	0.8	0.4	11
					
					

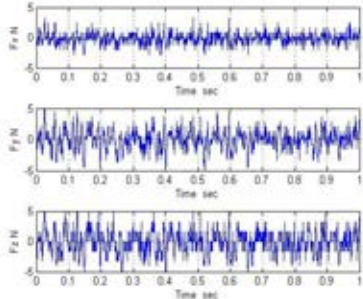
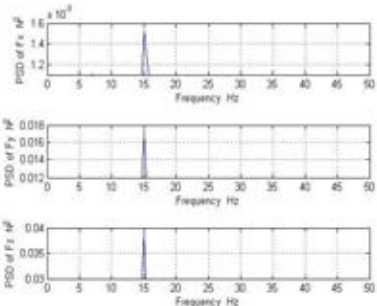
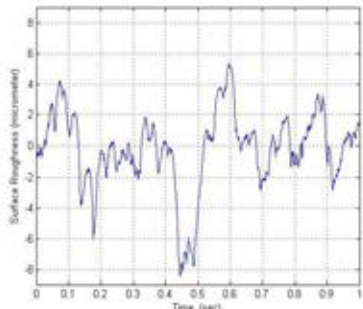
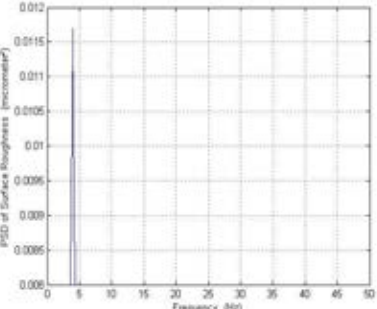
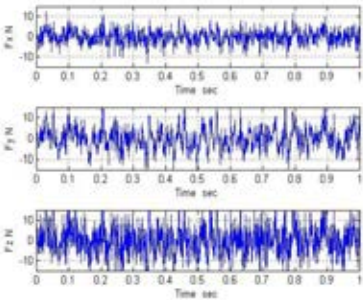
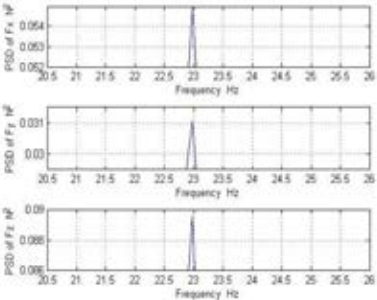
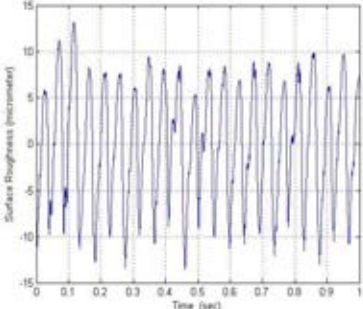
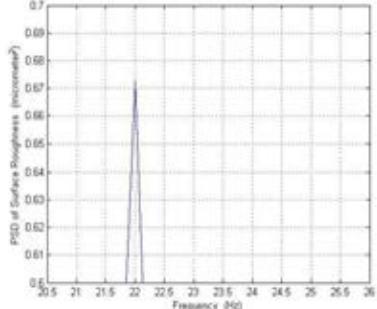
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
51	180	0.2	0.8	0.4	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
52	260	0.1	0.5	0.8	-6
					
					

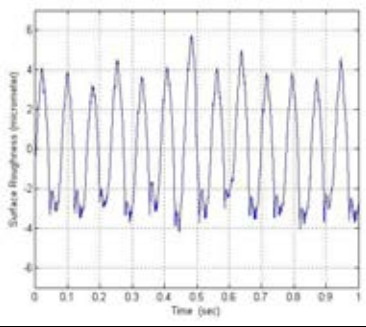
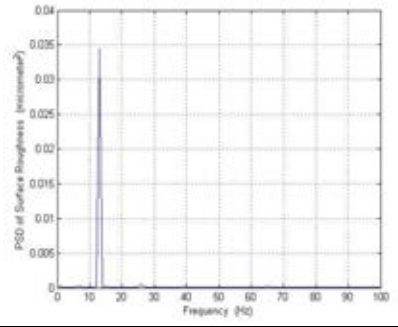
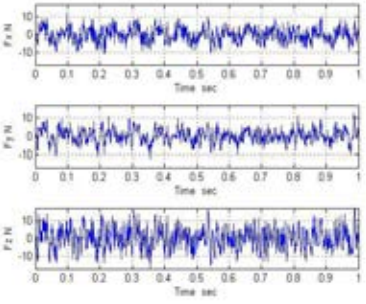
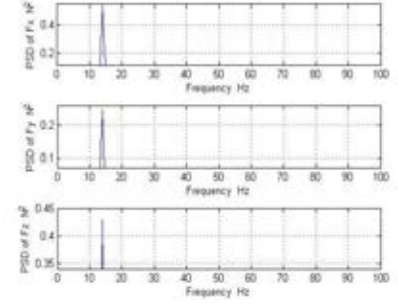
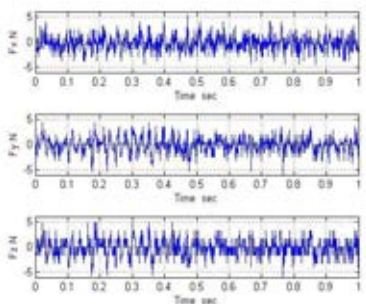
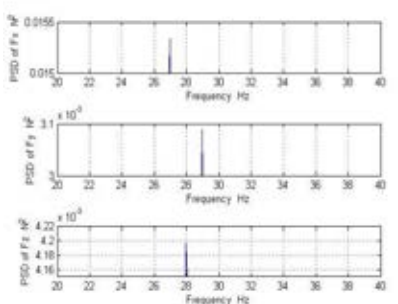
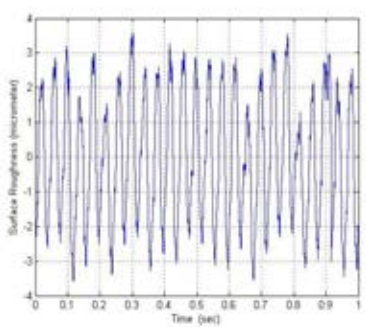
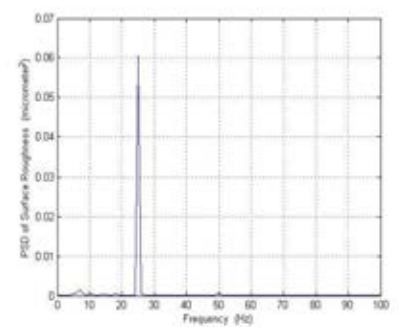
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
53	180	0.2	0.5	0.4	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
54	180	0.2	0.2	0.4	-6
					
					

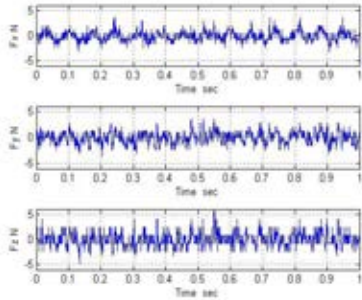
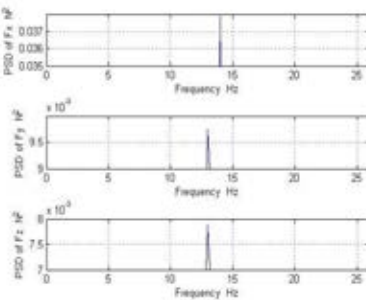
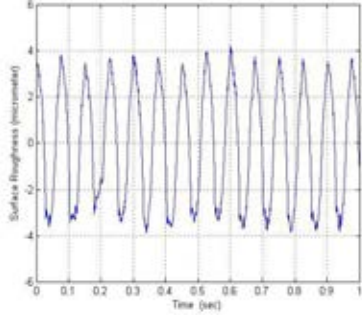
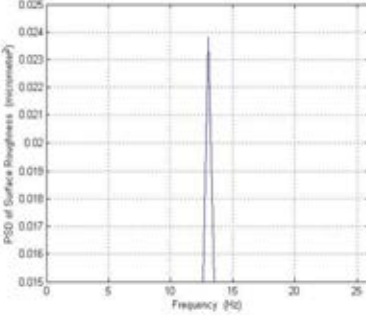
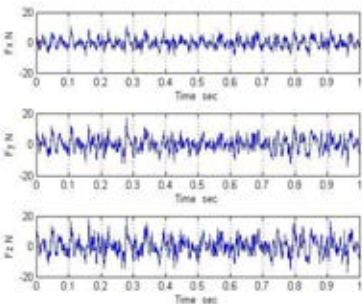
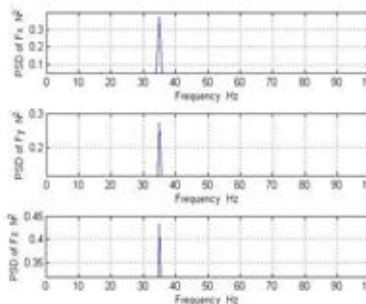
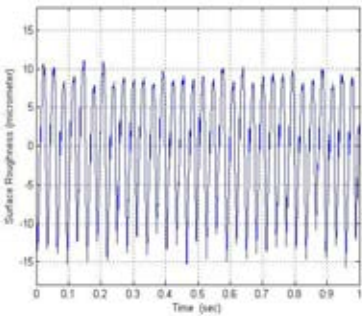
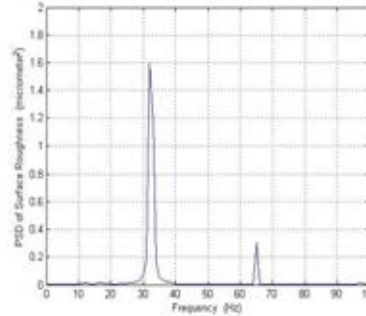
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
55	100	0.2	0.5	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
56	260	0.3	0.2	0.4	-6
					
					

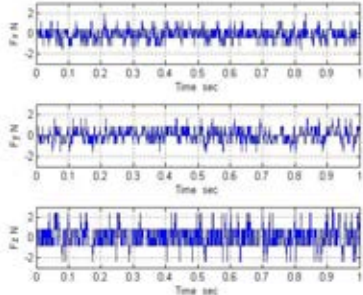
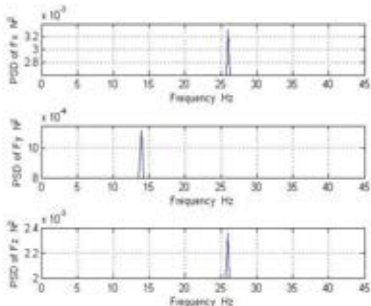
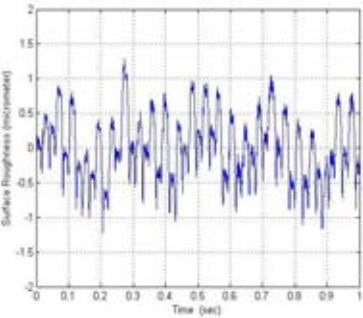
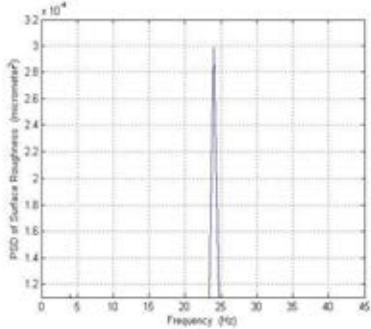
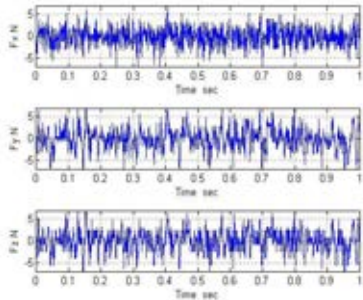
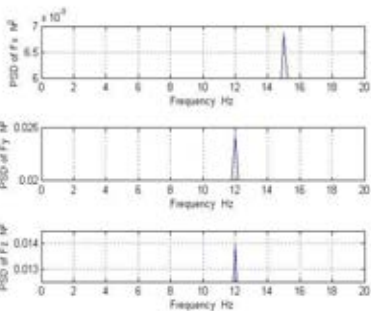
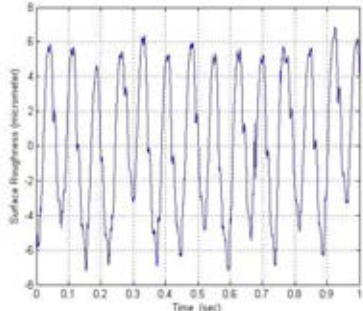
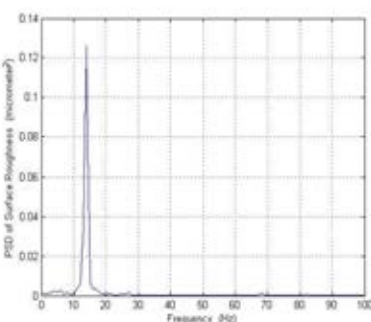
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
57	180	0.3	0.2	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
58	260	0.3	0.5	0.4	11
					
					

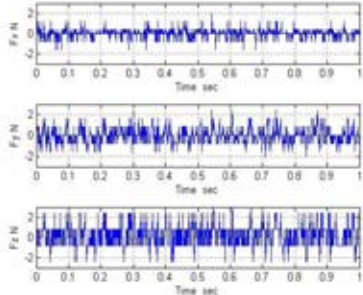
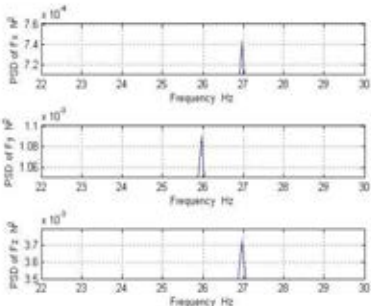
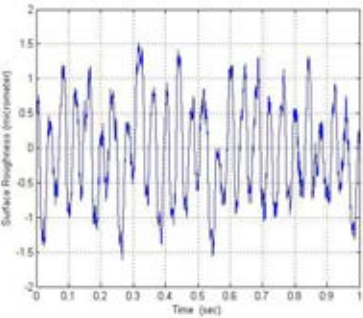
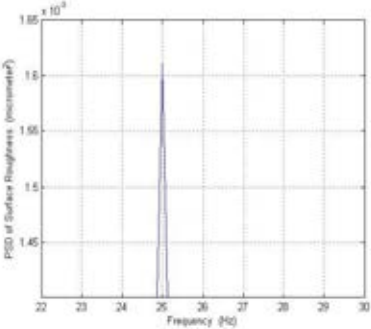
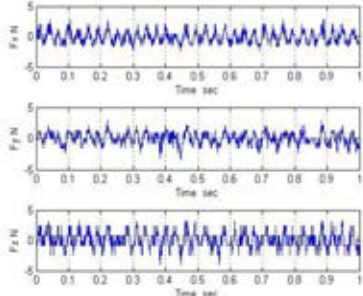
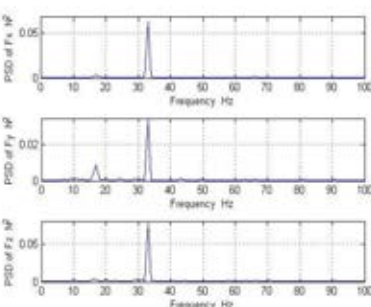
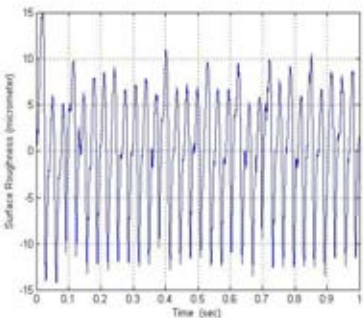
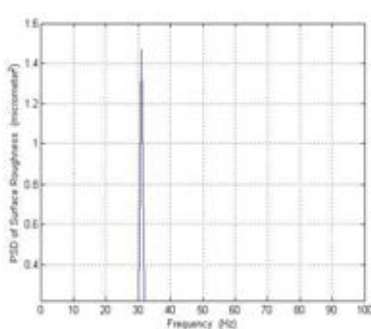
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมุมมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
59	100	0.1	0.5	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมุมมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
60	180	0.2	0.2	0.4	11
					
					

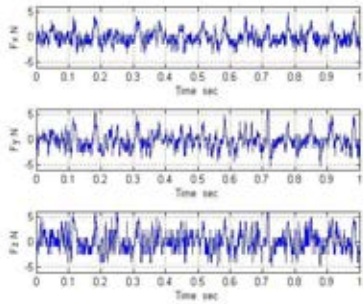
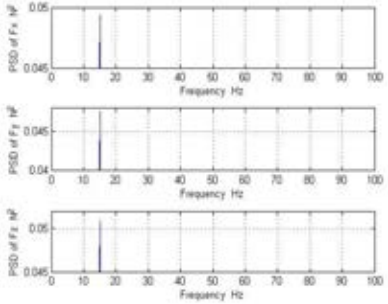
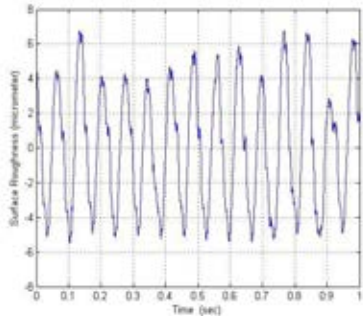
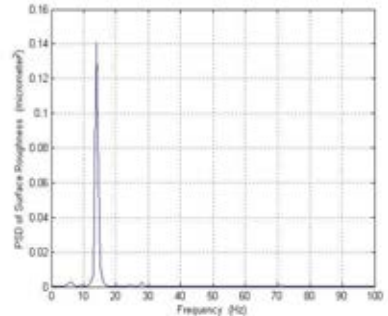
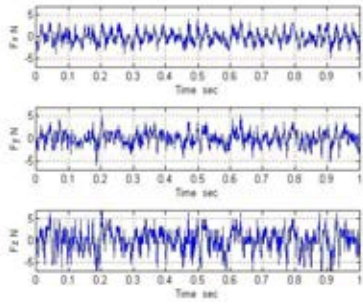
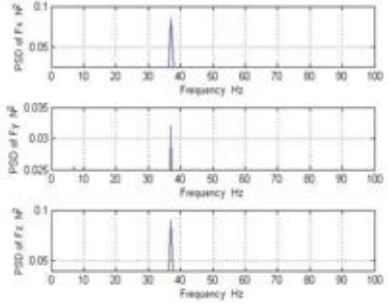
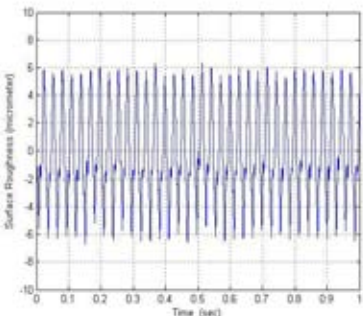
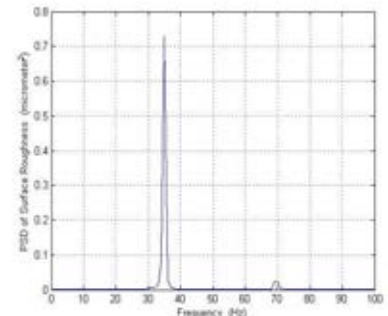
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
61	180	0.1	0.5	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
62	180	0.3	0.8	0.4	11
					
					

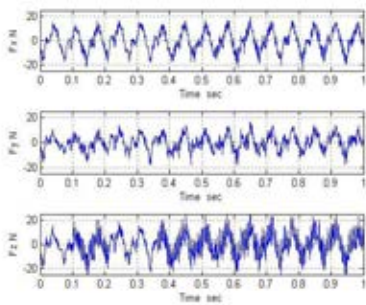
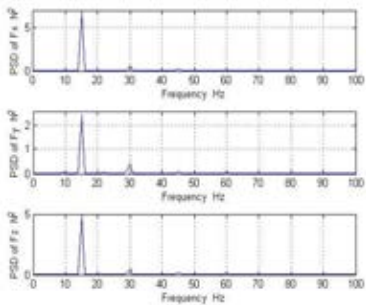
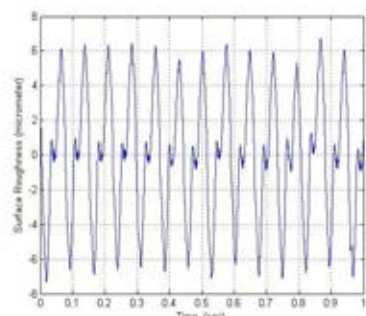
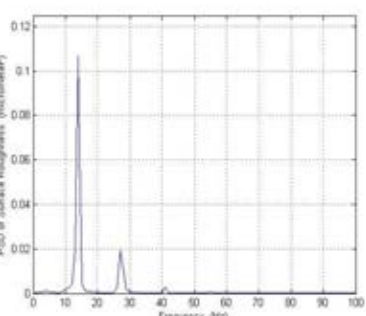
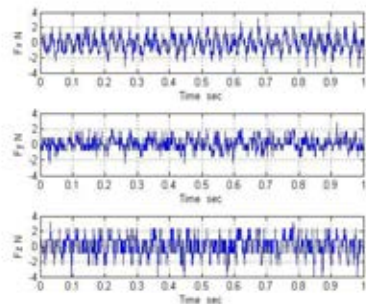
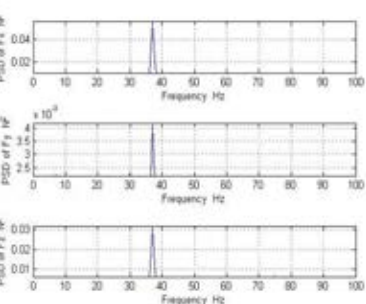
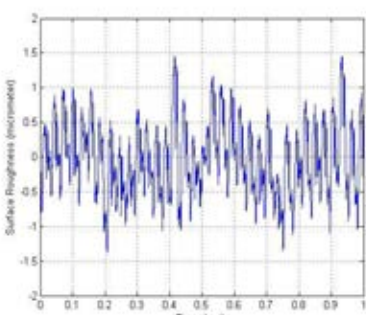
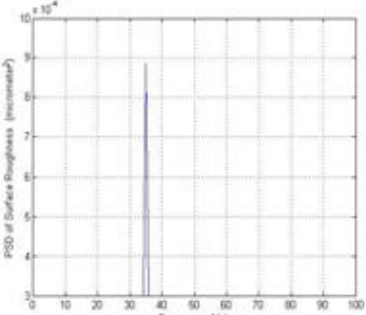
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
63	100	0.2	0.8	0.4	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
64	180	0.2	0.8	0.8	-6
					
					

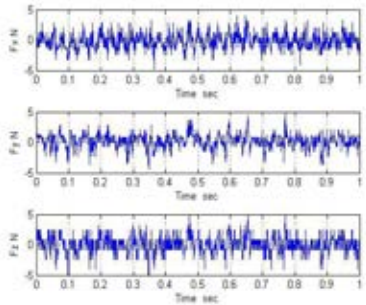
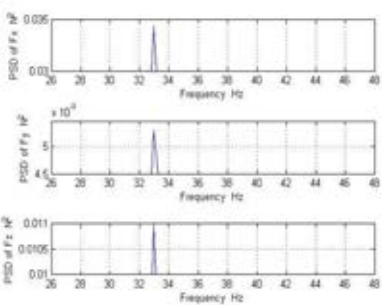
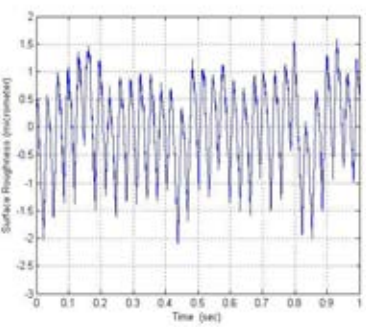
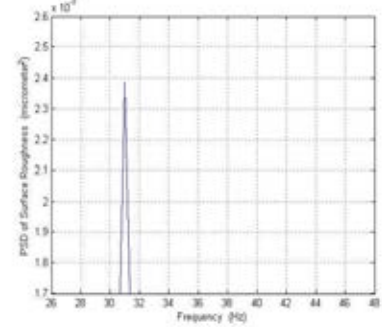
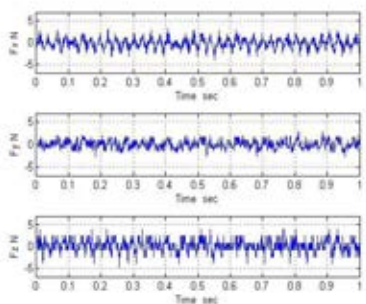
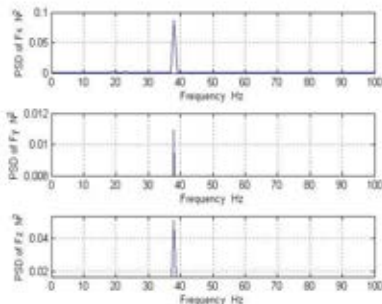
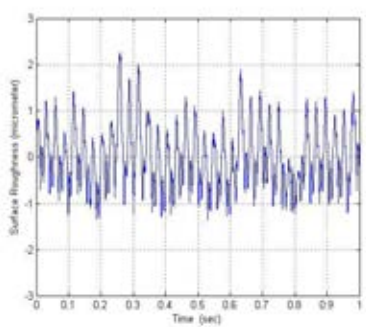
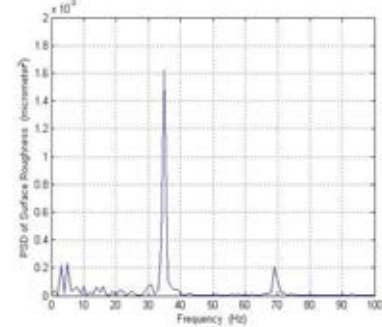
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
65	100	0.2	0.2	0.4	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
66	260	0.3	0.5	0.4	-6
					
					

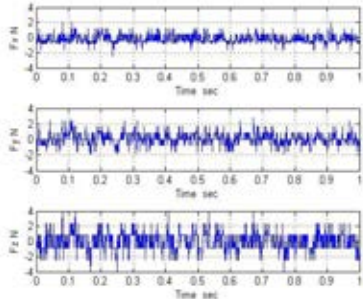
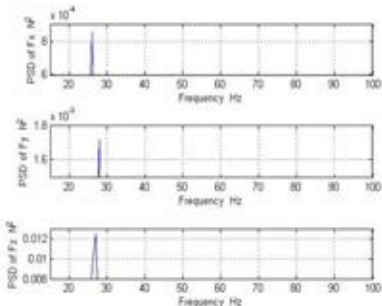
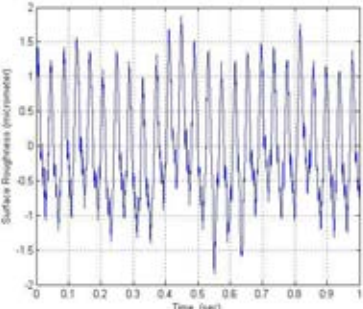
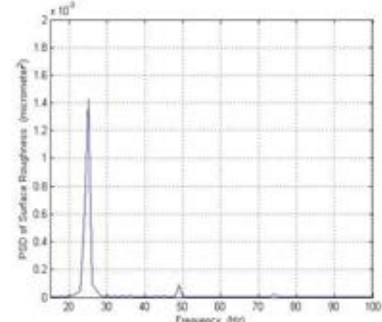
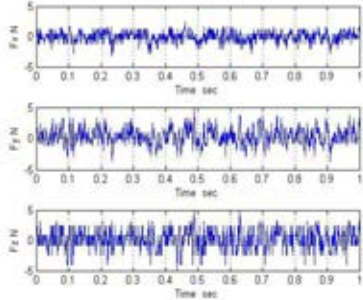
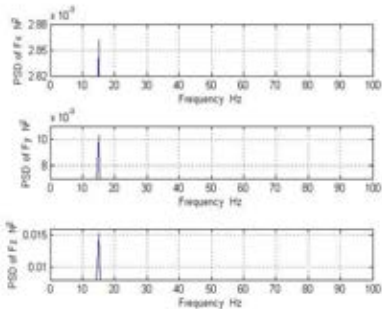
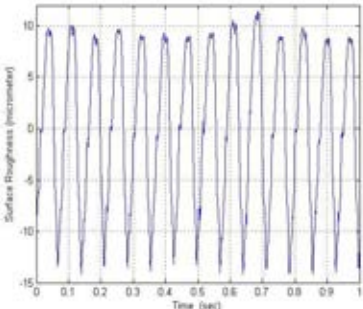
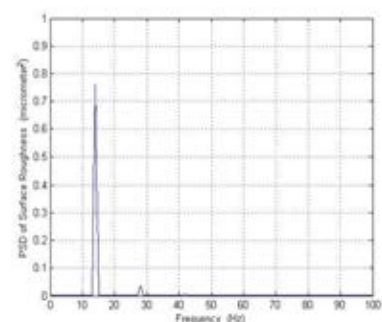
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
67	180	0.1	0.2	0.8	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
68	100	0.3	0.8	0.8	-6
					
					

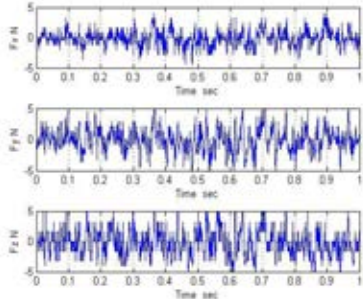
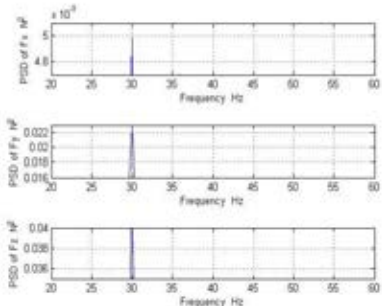
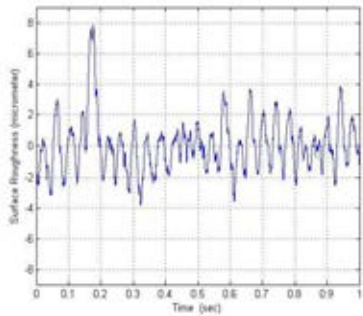
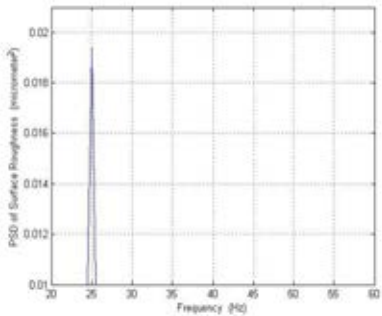
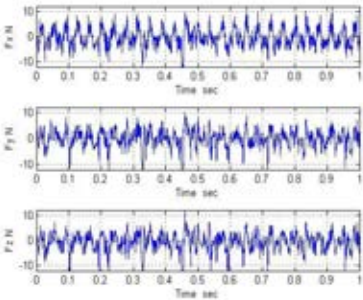
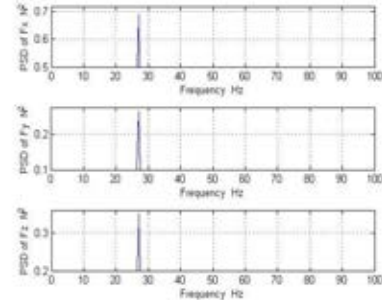
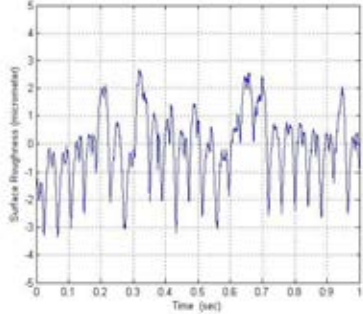
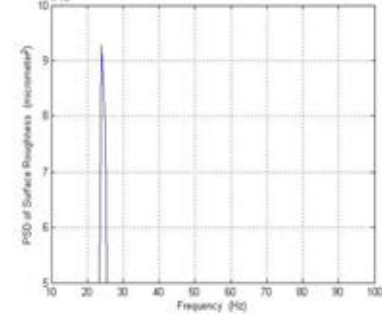
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
69	180	0.1	0.2	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
70	260	0.3	0.2	0.4	11
					
					

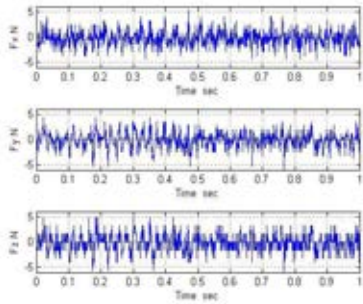
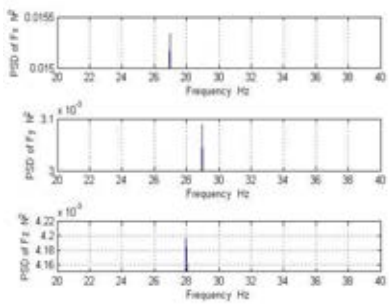
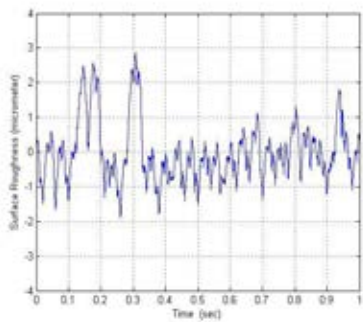
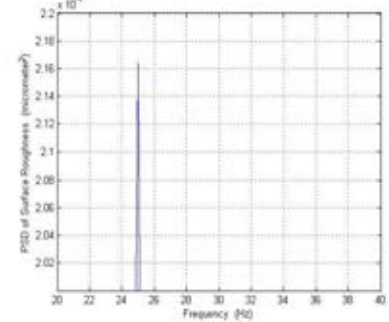
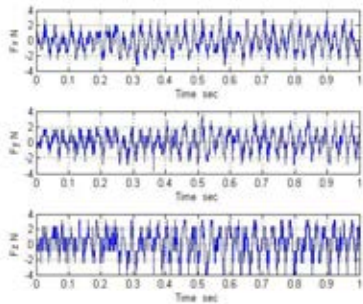
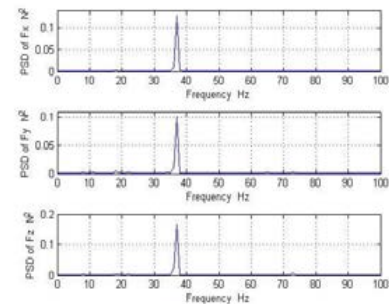
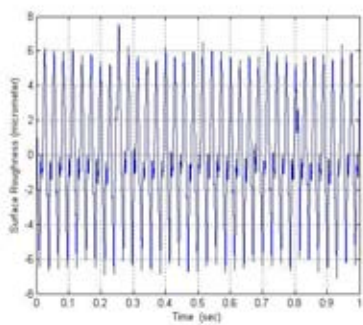
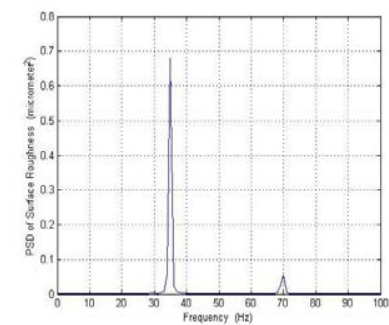
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
71	100	0.1	0.2	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
72	260	0.3	0.5	0.8	11
					
					

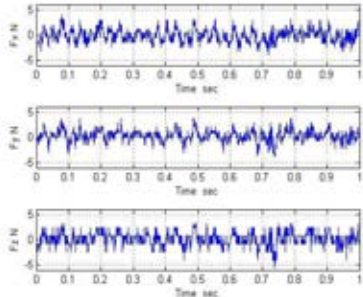
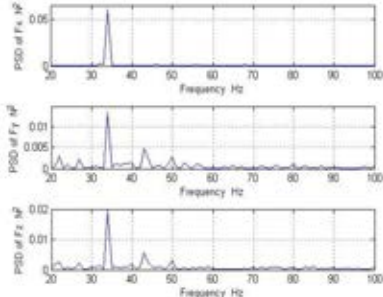
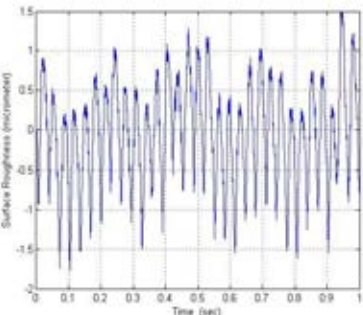
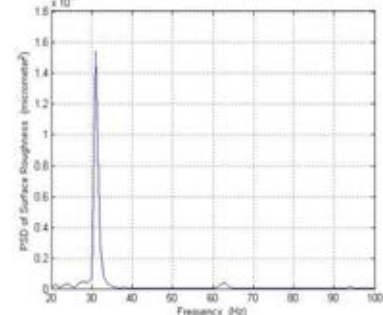
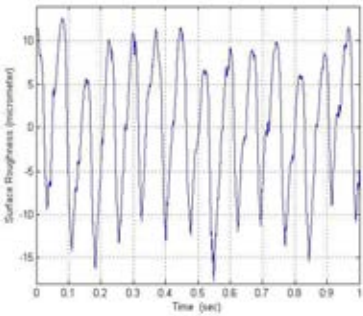
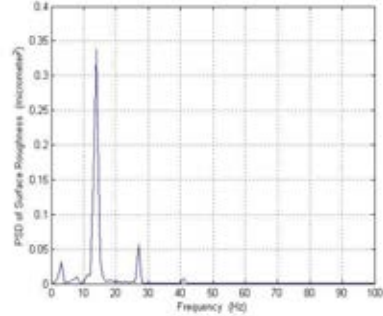
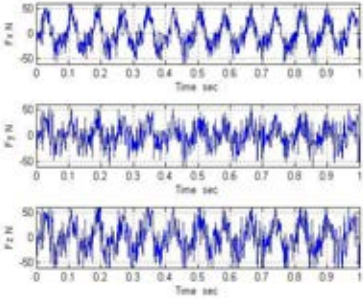
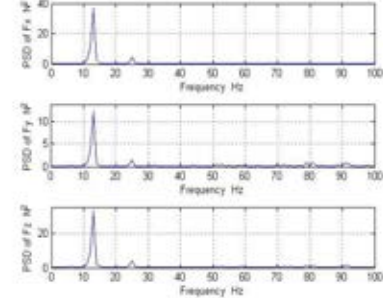
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
73	100	0.3	0.8	0.8	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
74	260	0.1	0.5	0.8	11
					
					

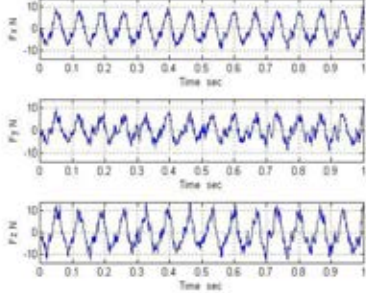
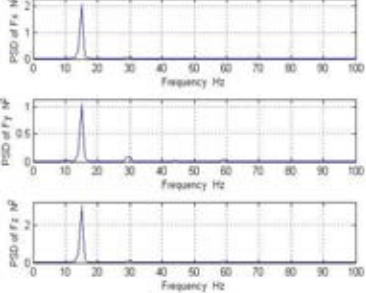
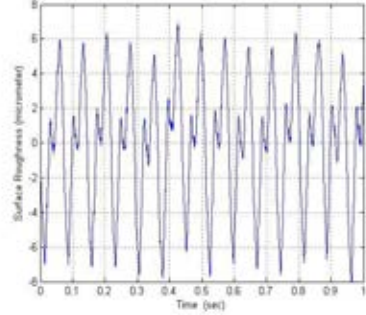
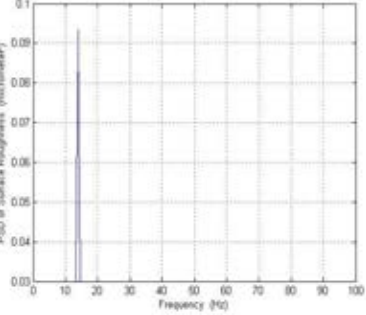
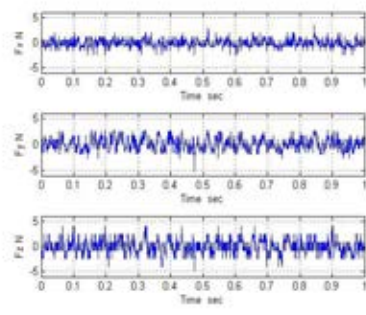
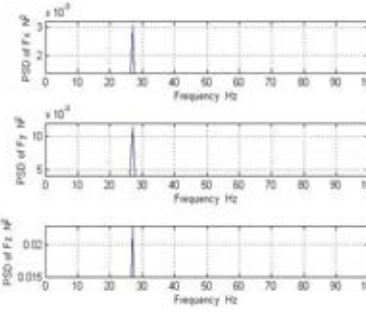
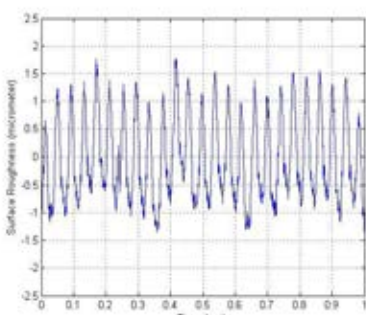
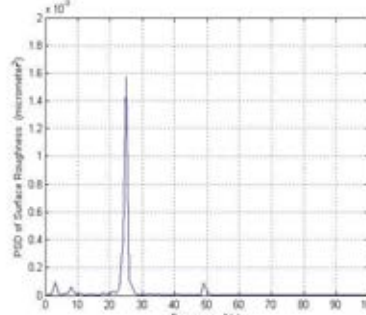
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
75	260	0.1	0.5	0.4	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
76	260	0.1	0.8	0.8	11
					
					

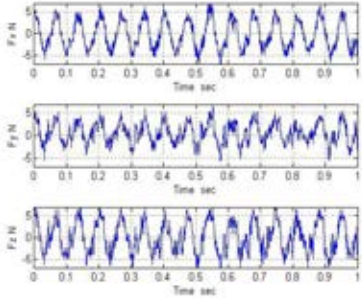
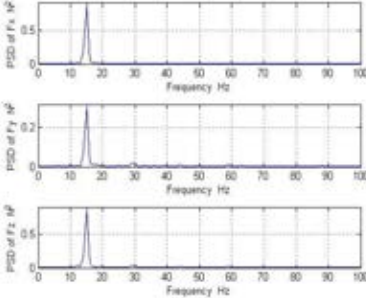
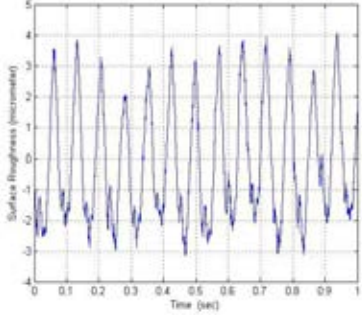
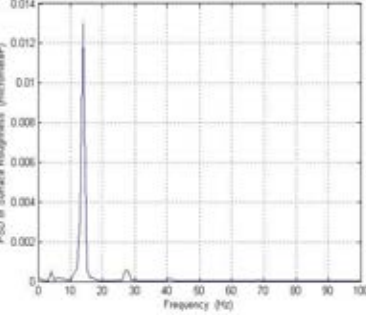
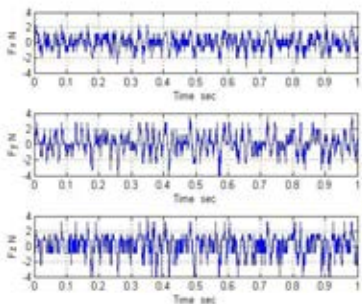
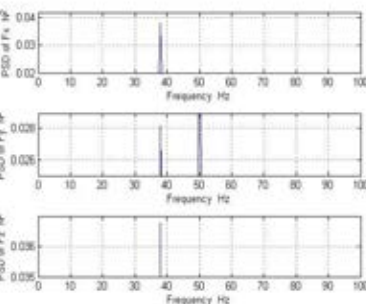
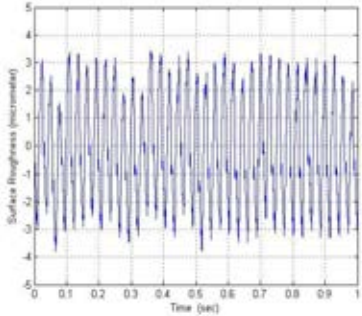
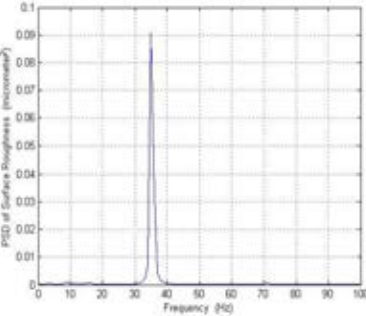
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
77	180	0.1	0.5	0.8	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
78	100	0.3	0.2	0.4	-6
					
					

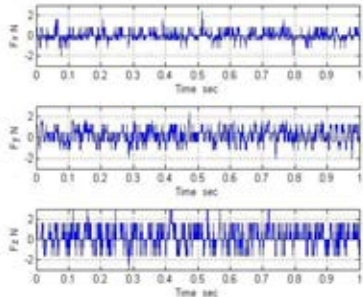
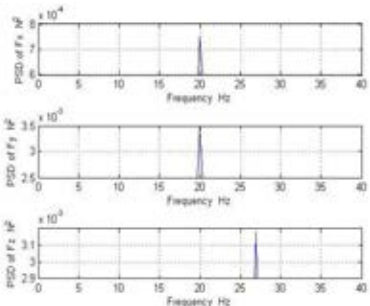
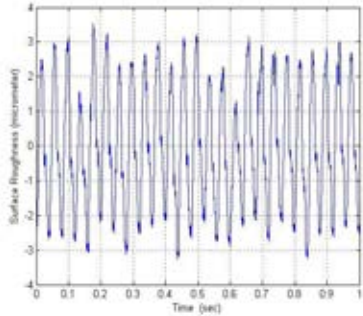
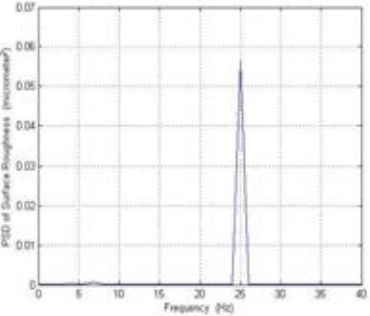
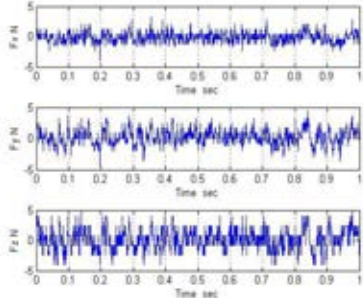
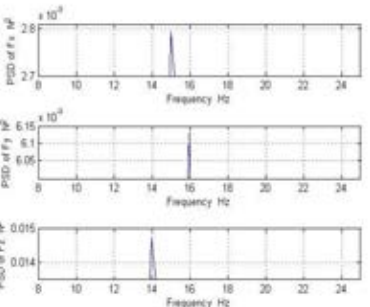
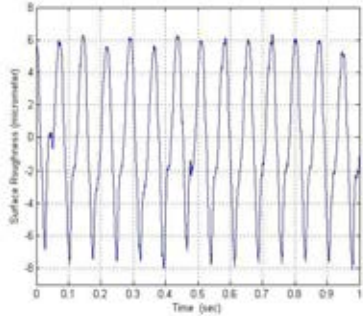
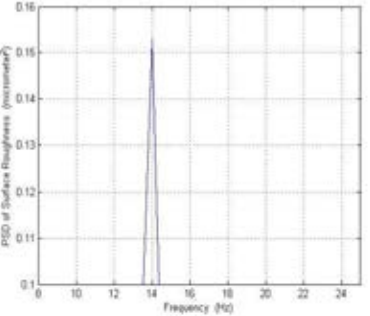
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
79	180	0.2	0.5	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
80	180	0.1	0.8	0.4	-6
					
					

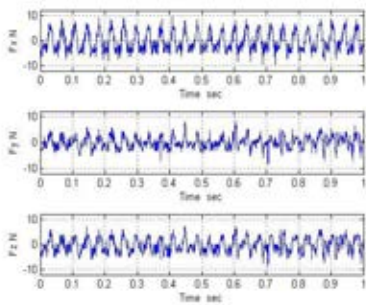
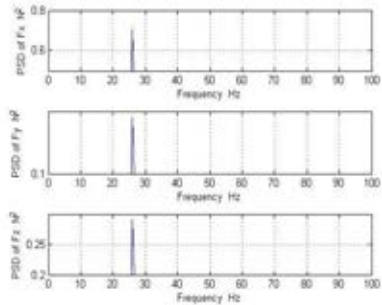
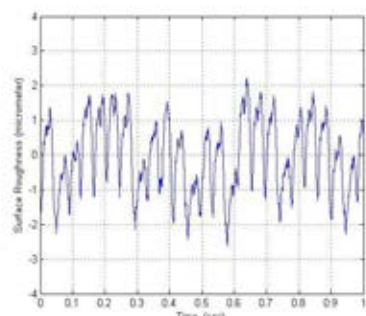
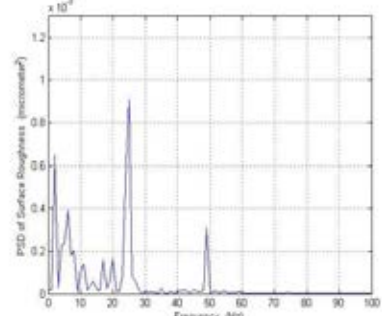
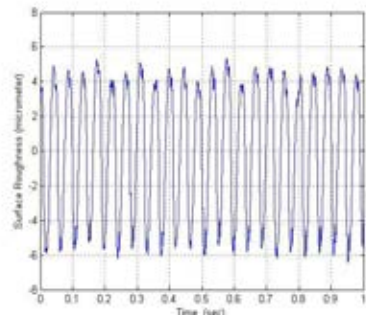
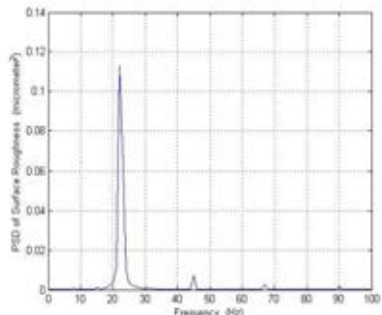
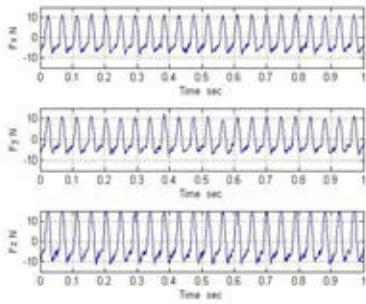
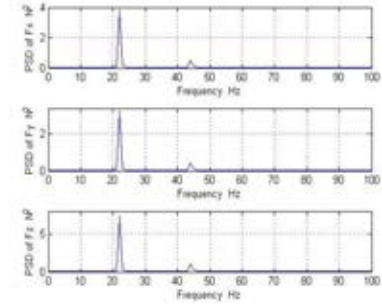
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
81	180	0.1	0.8	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
82	260	0.3	0.2	0.8	11
					
					

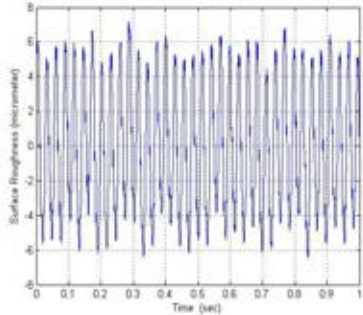
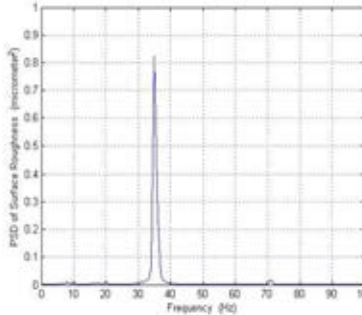
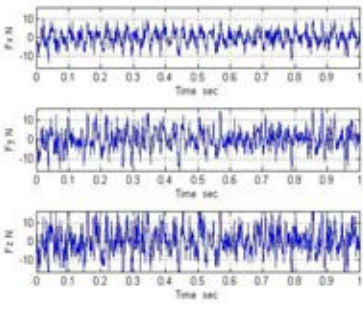
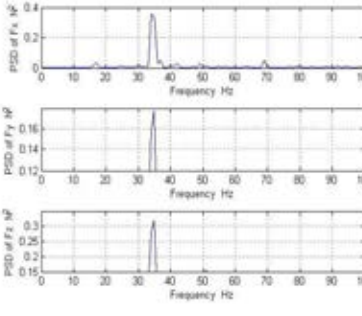
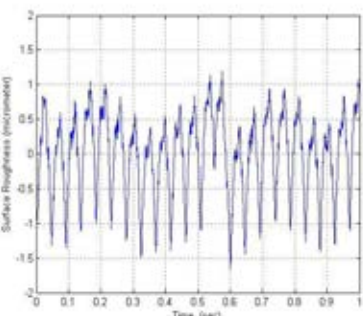
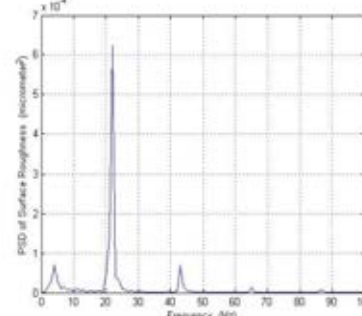
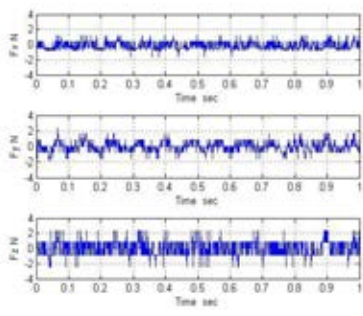
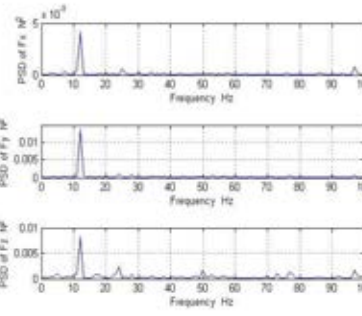
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
83	260	0.1	0.8	0.4	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
84	100	0.3	0.8	0.4	-6
					
					

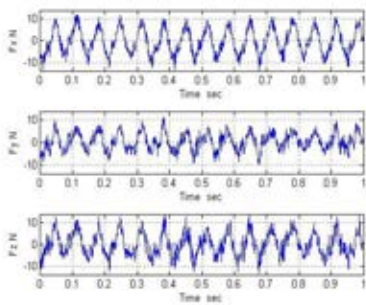
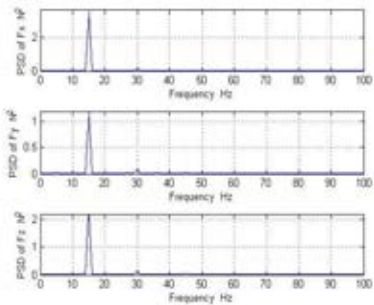
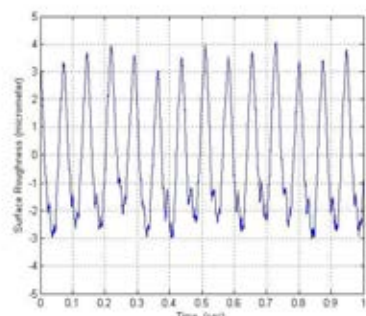
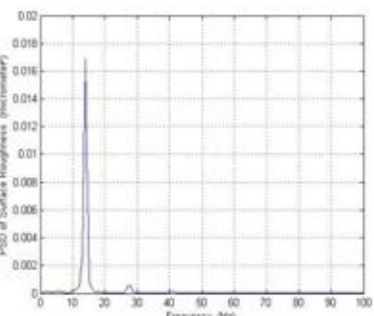
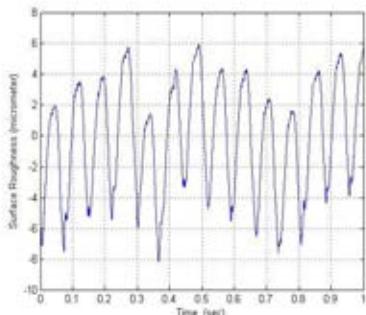
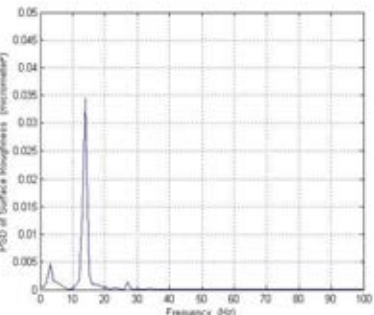
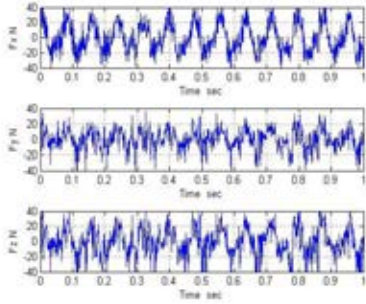
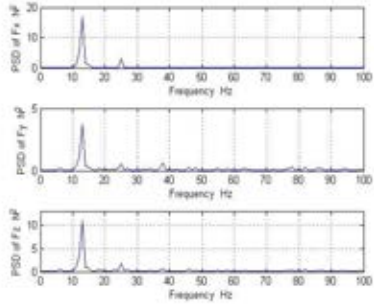
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
85	100	0.3	0.5	0.8	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
86	180	0.1	0.8	0.8	11
					
					

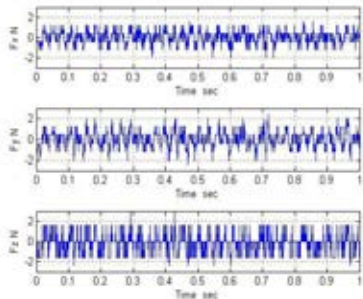
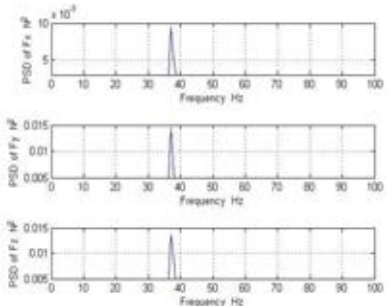
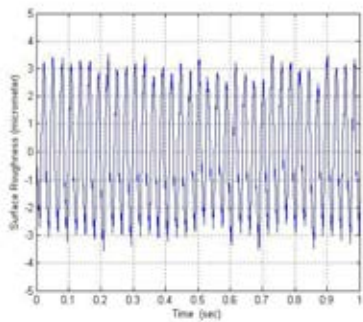
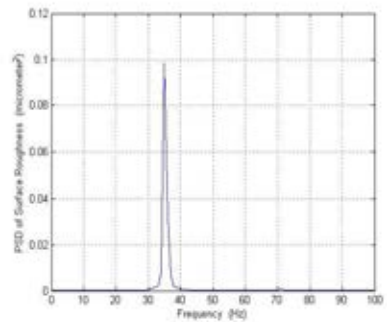
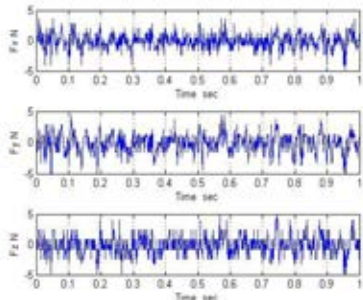
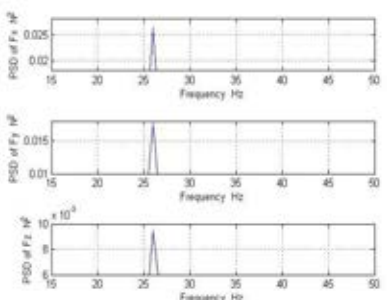
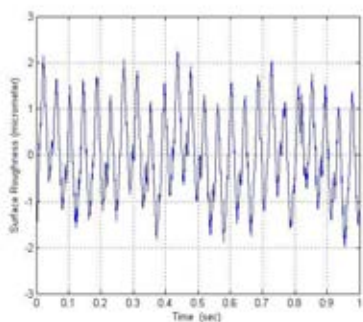
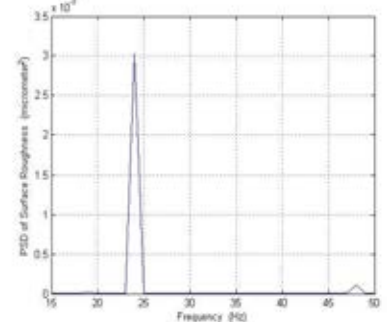
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
87	100	0.2	0.5	0.8	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
88	260	0.2	0.5	0.8	-6
					
					

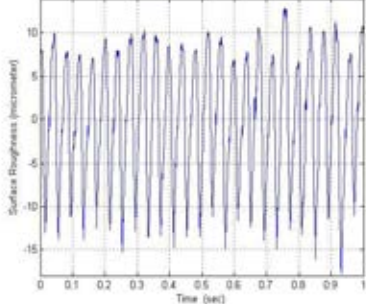
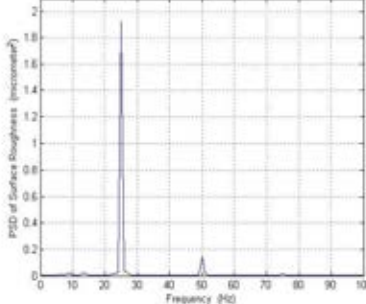
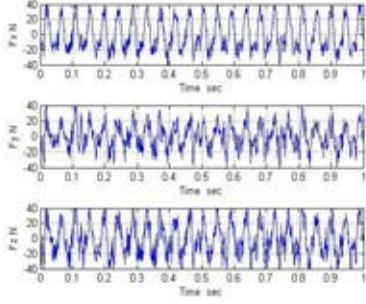
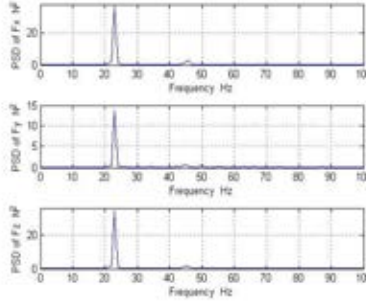
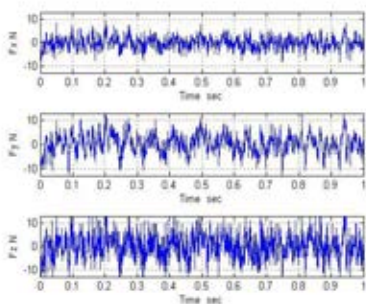
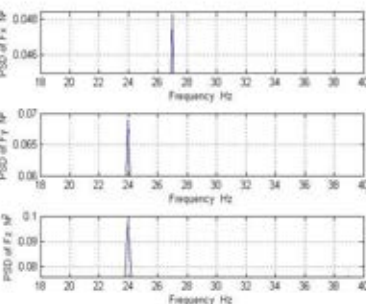
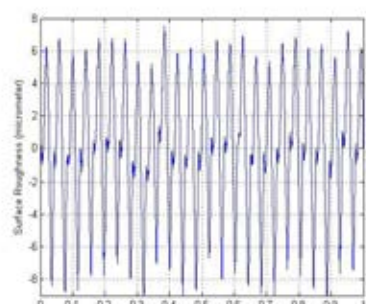
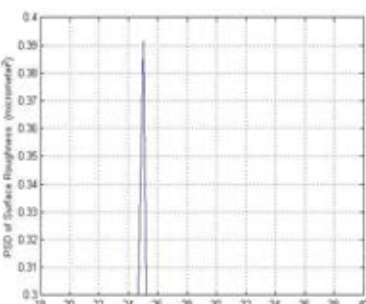
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
89	180	0.2	0.2	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
90	100	0.3	0.2	0.8	11
					
					

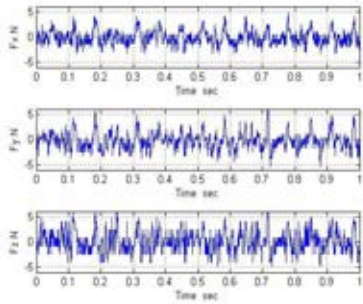
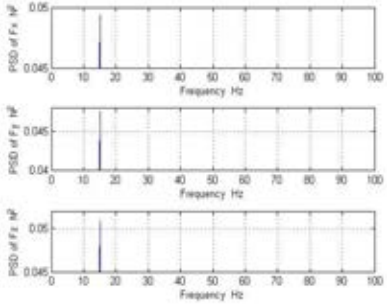
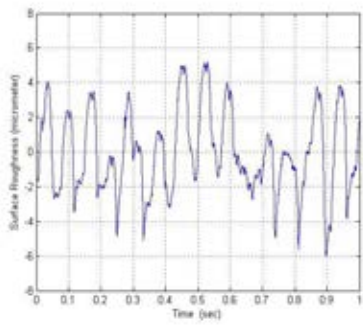
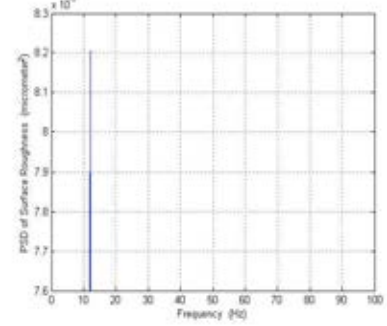
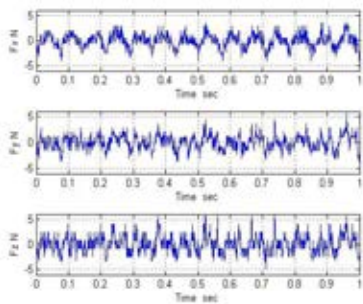
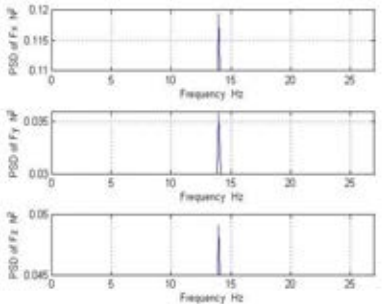
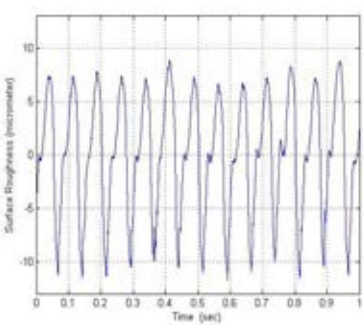
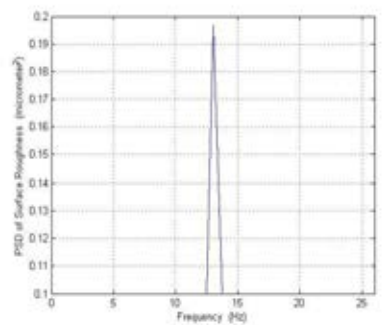
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
91	180	0.1	0.5	0.4	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
92	180	0.3	0.2	0.4	-6
					
					

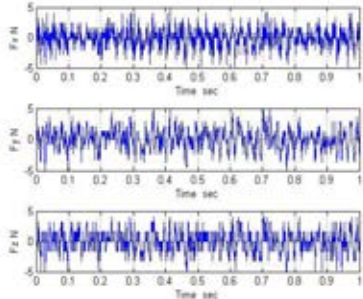
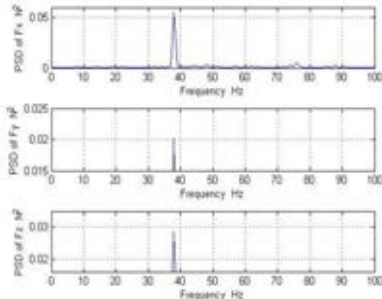
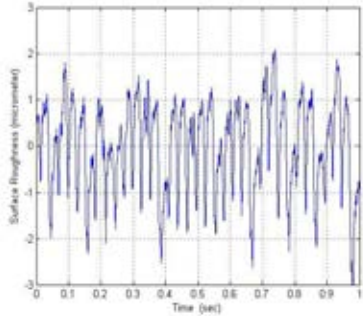
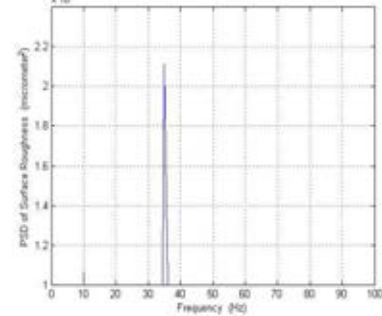
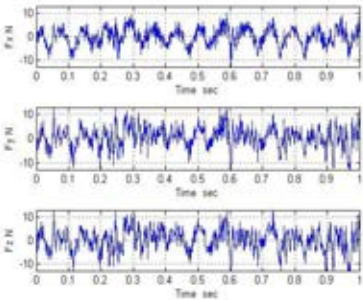
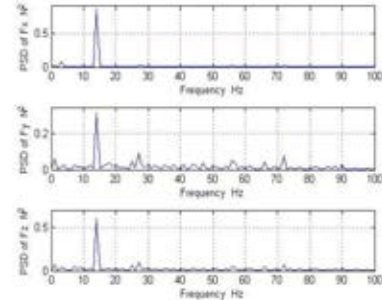
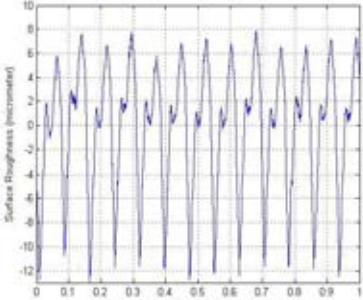
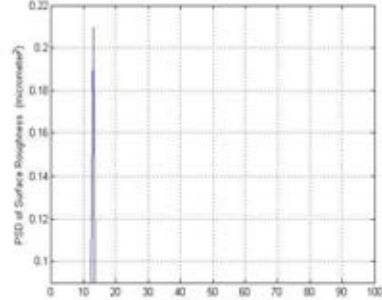
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
93	260	0.3	0.8	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
94	180	0.1	0.2	0.4	11
					
					

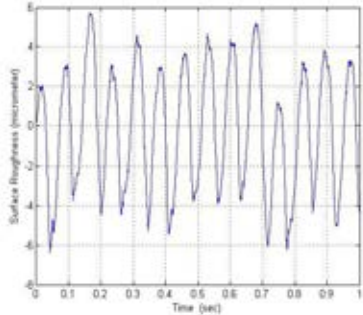
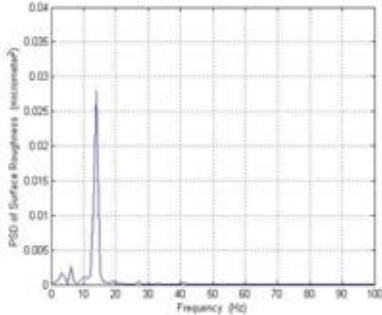
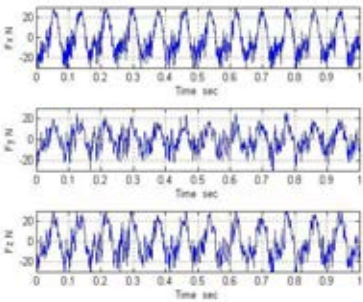
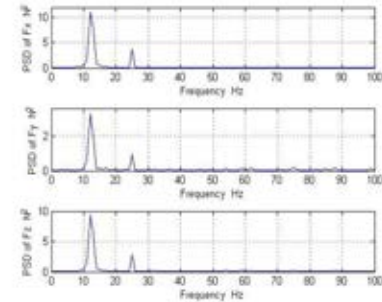
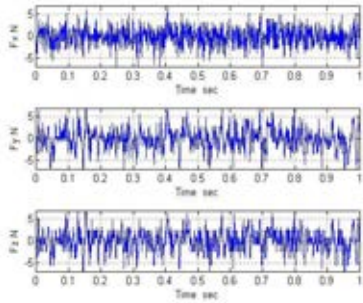
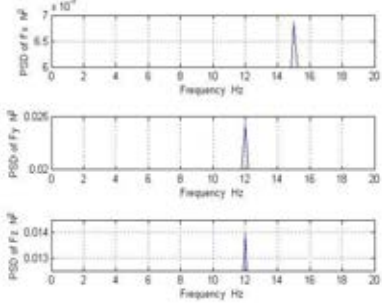
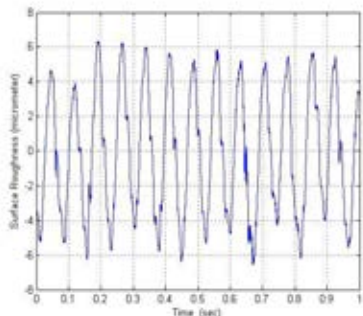
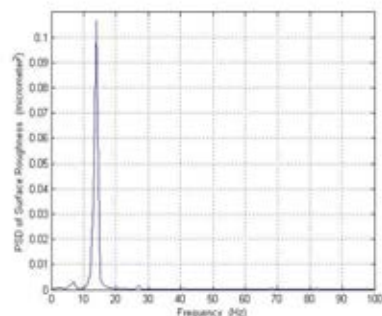
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
95	100	0.2	0.8	0.8	11
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
96	100	0.2	0.8	0.4	-6
					
					

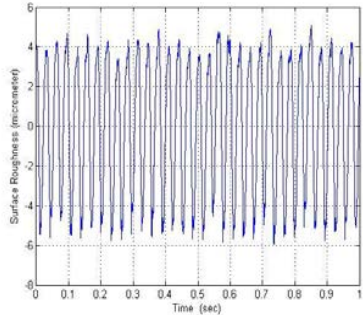
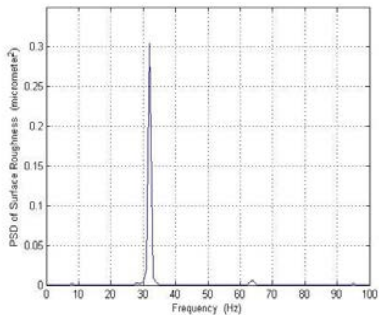
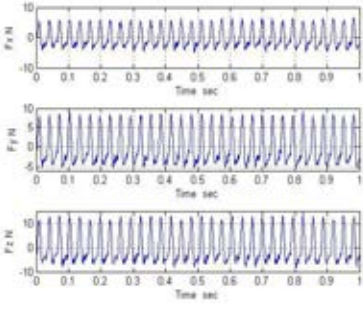
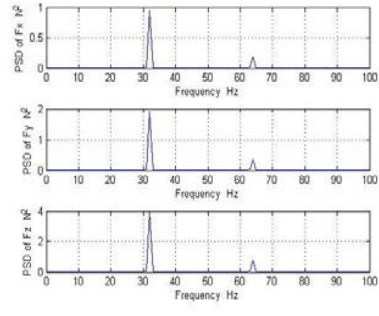
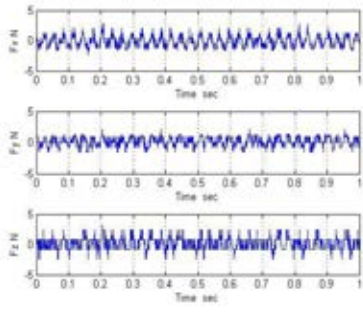
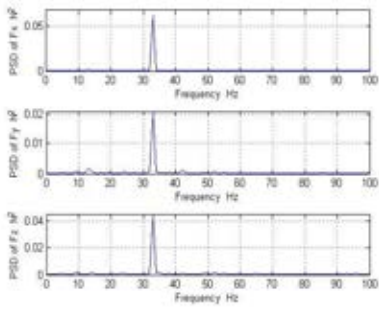
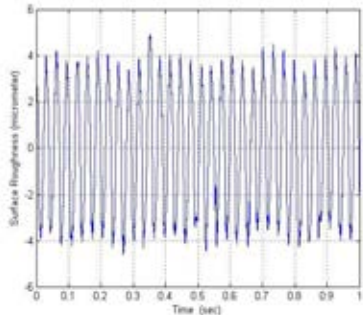
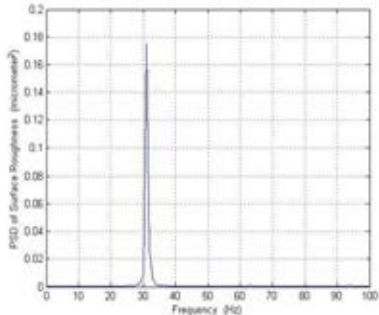
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
97	260	0.2	0.2	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมิด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
98	180	0.1	0.5	0.4	11
					
					

ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
99	180	0.3	0.8	0.4	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
100	180	0.3	0.8	0.8	11
					
					







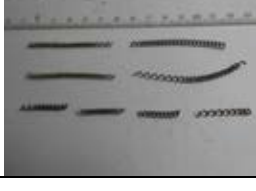
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
101	100	0.2	0.2	0.8	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
102	100	0.3	0.2	0.4	11
					
					








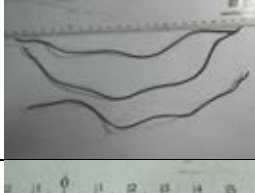

ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุมุมมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
103	260	0.1	0.5	0.4	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุมุมมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
104	100	0.3	0.5	0.4	11
					
					



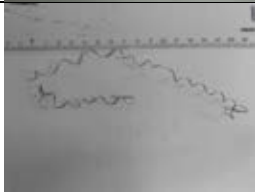






ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
105	100	0.2	0.5	0.4	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
106	100	0.3	0.5	0.8	-6
					
					







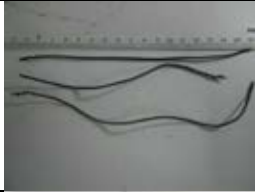


ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
107	260	0.2	0.2	0.4	-6
					
					
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึก ตัด (มม.)	รัศมีจุ่มกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
108	260	0.2	0.2	0.4	11
					
					







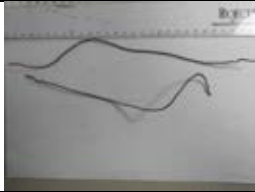


ภาคผนวก ง
เศษโลหะที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ






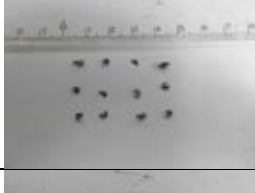



ลำดับ	ความเร็ว ตัด (ม/นาที)	อัตราการ ป้อนตัด (มม/รอบ)	ความ ลึกตัด (มม.)	รัศมีจุก มีด (มม.)	มุมคาย เศษโลหะ (องศา)	เศษโลหะ
1	180	0.2	0.2	0.8	11	
2	180	0.2	0.8	0.4	11	
3	180	0.3	0.2	0.4	11	
4	100	0.1	0.8	0.8	-6	
5	180	0.2	0.8	0.8	11	
6	100	0.1	0.2	0.8	11	
7	180	0.3	0.5	0.4	11	

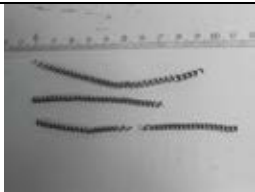




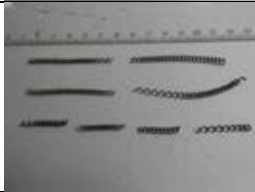
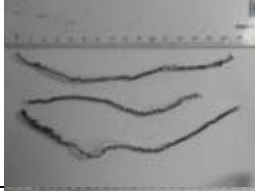

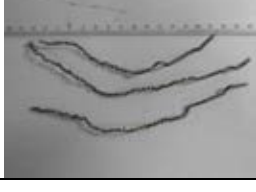
8	100	0.1	0.8	0.8	11	
9	260	0.2	0.5	0.4	11	
10	260	0.1	0.2	0.4	11	
11	100	0.1	0.2	0.4	-6	
12	100	0.2	0.2	0.8	11	
13	180	0.1	0.2	0.4	-6	
14	100	0.1	0.2	0.4	11	
15	180	0.3	0.5	0.8	-6	
16	260	0.1	0.8	0.4	-6	










17	260	0.2	0.8	0.8	-6	
18	260	0.1	0.2	0.4	-6	
19	260	0.1	0.2	0.8	-6	
20	260	0.1	0.2	0.8	11	
21	180	0.3	0.5	0.4	-6	
22	100	0.1	0.5	0.4	-6	
23	100	0.1	0.5	0.4	11	
24	100	0.3	0.2	0.8	-6	
25	180	0.2	0.5	0.4	-6	

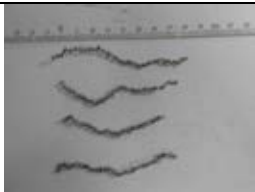





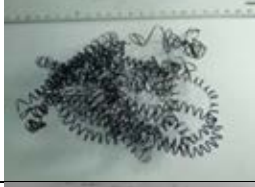

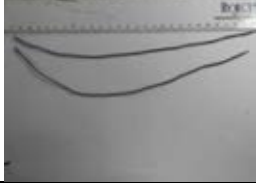
26	260	0.2	0.5	0.4	-6	
27	100	0.1	0.5	0.8	11	
28	260	0.2	0.2	0.8	11	
29	180	0.2	0.5	0.8	11	
30	100	0.2	0.8	0.8	-6	
31	100	0.2	0.2	0.4	-6	
32	260	0.3	0.5	0.8	-6	
33	180	0.1	0.8	0.4	11	
34	260	0.3	0.8	0.4	-6	










35	180	0.3	0.8	0.8	-6	
36	260	0.3	0.2	0.8	-6	
37	100	0.1	0.8	0.4	11	
38	100	0.3	0.8	0.4	11	
39	260	0.3	0.8	0.8	11	
40	100	0.1	0.8	0.4	-6	
41	100	0.2	0.5	0.4	11	
42	180	0.3	0.2	0.8	11	
43	260	0.1	0.8	0.8	-6	

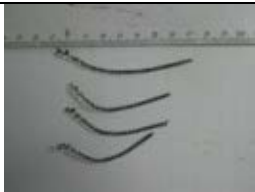








44	260	0.2	0.8	0.8	11	
45	260	0.2	0.5	0.8	11	
46	180	0.3	0.5	0.8	11	
47	260	0.3	0.8	0.4	11	
48	100	0.3	0.5	0.4	-6	
49	260	0.2	0.8	0.4	-6	
50	260	0.2	0.8	0.4	11	
51	180	0.2	0.8	0.4	-6	
52	260	0.1	0.5	0.8	-6	










53	180	0.2	0.5	0.4	11	
54	180	0.2	0.2	0.4	-6	
55	100	0.2	0.5	0.8	-6	
56	260	0.3	0.2	0.4	-6	
57	180	0.3	0.2	0.8	-6	
58	260	0.3	0.5	0.4	11	
59	100	0.1	0.5	0.8	-6	
60	180	0.2	0.2	0.4	11	
61	180	0.1	0.5	0.8	-6	

62	180	0.3	0.8	0.4	11	
63	100	0.2	0.8	0.4	11	
64	180	0.2	0.8	0.8	-6	
65	100	0.2	0.2	0.4	11	
66	260	0.3	0.5	0.4	-6	
67	180	0.1	0.2	0.8	11	
68	100	0.3	0.8	0.8	-6	
69	180	0.1	0.2	0.8	-6	
70	260	0.3	0.2	0.4	11	

71	100	0.1	0.2	0.8	-6	
72	260	0.3	0.5	0.8	11	
73	100	0.3	0.8	0.8	11	
74	260	0.1	0.5	0.8	11	
75	260	0.1	0.5	0.4	11	
76	260	0.1	0.8	0.8	11	
77	180	0.1	0.5	0.8	11	
78	100	0.3	0.2	0.4	-6	
79	180	0.2	0.5	0.8	-6	

80	180	0.1	0.8	0.4	-6	
81	180	0.1	0.8	0.8	-6	
82	260	0.3	0.2	0.8	11	
83	260	0.1	0.8	0.4	11	
84	100	0.3	0.8	0.4	-6	
85	100	0.3	0.5	0.8	11	
86	180	0.1	0.8	0.8	11	
87	100	0.2	0.5	0.8	11	
88	260	0.2	0.5	0.8	-6	

89	180	0.2	0.2	0.8	-6	
90	100	0.3	0.2	0.8	11	
91	180	0.1	0.5	0.4	-6	
92	180	0.3	0.2	0.4	-6	
93	260	0.3	0.8	0.8	-6	
94	180	0.1	0.2	0.4	11	
95	100	0.2	0.8	0.8	11	
96	100	0.2	0.8	0.4	-6	
97	260	0.2	0.2	0.8	-6	

98	180	0.1	0.5	0.4	11	
99	180	0.3	0.8	0.4	-6	
100	180	0.3	0.8	0.8	11	
101	100	0.2	0.2	0.8	-6	
102	100	0.3	0.2	0.4	11	
103	260	0.1	0.5	0.4	-6	
104	100	0.3	0.5	0.4	11	
105	100	0.2	0.5	0.4	-6	
106	100	0.3	0.5	0.8	-6	

107	260	0.2	0.2	0.4	-6	
108	260	0.2	0.2	0.4	11	

ภาคผนวก จ

โปรแกรมและตัวอย่างการวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตด้วยเวฟเล็ต

โปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตด้วยการแปลงเวฟเล็ก

```

force = textread('n56_6.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);

[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');

```

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);

Ax1 = upcoef('a',cAx1,'dmey',1,l_x1);

Ax2 = upcoef('a',cAx2,'dmey',2,l_x1);

Ax3 = upcoef('a',cAx3,'dmey',3,l_x1);

Ax4 = upcoef('a',cAx4,'dmey',4,l_x1);

Ax5 = upcoef('a',cAx5,'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);

Ay1 = upcoef('a',cAy1,'dmey',1,l_x1);

Ay2 = upcoef('a',cAy2,'dmey',2,l_x1);

Ay3 = upcoef('a',cAy3,'dmey',3,l_x1);

Ay4 = upcoef('a',cAy4,'dmey',4,l_x1);

Ay5 = upcoef('a',cAy5,'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);

```
Az1 = upcoef('a',cAz1,'dmey',1,l_x1);
Az2 = upcoef('a',cAz2,'dmey',2,l_x1);
Az3 = upcoef('a',cAz3,'dmey',3,l_x1);
Az4 = upcoef('a',cAz4,'dmey',4,l_x1);
Az5 = upcoef('a',cAz5,'dmey',5,l_x1);

time = 0.001:0.001:l_x1/1000;
t = 1/samp;
time = (0:t*(N-1));
max_TD = 100;
min_TD = -1*max_TD;

figure(1);
subplot(6,1,1);
plot(time,force(:,1));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Original Signal');ylim([-25 25]);
subplot(6,1,2)
plot(time,Dx1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-25
25]);
subplot(6,1,3)
plot(time,Dx2)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-25
25]);
subplot(6,1,4)
plot(time,Dx3)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-25
25]);
subplot(6,1,5)
```

```
plot(time,Dx4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D4');ylim([-25
25]);
subplot(6,1,6)
plot(time,Dx5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D5');ylim([-25
25]);

figure(2);
subplot(6,1,1);
plot(time,force(:,2));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force y (N)');title('Original Signal');ylim([-25 25]);
subplot(6,1,2)
plot(time,Dy1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-25
25]);
subplot(6,1,3)
plot(time,Dy2)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-25
25]);
subplot(6,1,4)
plot(time,Dy3)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-25
25]);
subplot(6,1,5)
plot(time,Dy4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D4');ylim([-25
25]);
subplot(6,1,6)
```

```
plot(time,Dy5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D5');ylim([-25
25]);

figure(3);
subplot(6,1,1);
plot(time,force(:,3));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Original Signal'); ylim([-25 25]);
subplot(6,1,2)
plot(time,Dz1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-25
25]);
subplot(6,1,3)
plot(time,Dz2)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-25
25]);
subplot(6,1,4)
plot(time,Dz3)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-25
25]);
subplot(6,1,5)
plot(time,Dz4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D4'); ylim([-25
25]);
subplot(6,1,6)
plot(time,Dz5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D5'); ylim([-25
25]);
```



```
%Fourier Transform%
[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;

figure(4);
subplot(6,1,1);
plot(fx0abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Original Signal');
xlim([000 500]); ylim([0 6.4]);
subplot(6,1,2);
plot(fx1abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D1');
xlim([000 500]); ylim([0 0.31]);
subplot(6,1,3);
plot(fx2abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D2');
xlim([000 500]); ylim([0 0.48]);
subplot(6,1,4);
```

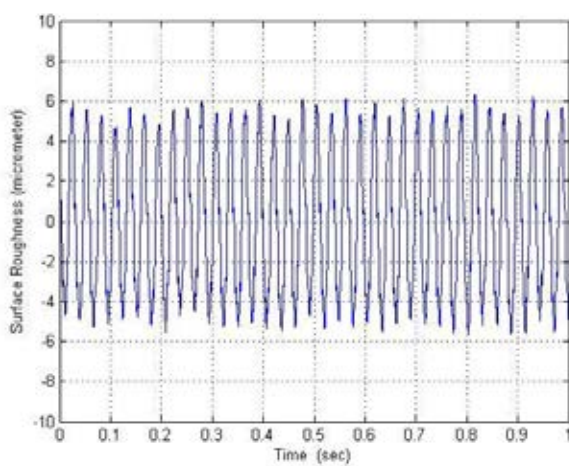
```
plot(fx3abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D3');
xlim([000 500]); ylim([0 0.97]);
subplot(6,1,5);
plot(fx4abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D4');
xlim([000 500]); ylim([0 3.4]);
subplot(6,1,6);
plot(fx5abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D5');
xlim([000 500]); ylim([0 3]);

figure(5);
subplot(6,1,1);
plot(fy0abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Original Signal');
xlim([000 500]); ylim([0 6.4]);
subplot(6,1,2);
plot(fy1abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D1');
xlim([000 500]); ylim([0 0.31]);
subplot(6,1,3);
plot(fy2abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D2');
xlim([000 500]); ylim([0 0.48]);
subplot(6,1,4);
plot(fy3abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D3');
xlim([000 500]); ylim([0 0.97]);
subplot(6,1,5);
plot(fy4abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D4');
xlim([000 500]); ylim([0 3.4]);
subplot(6,1,6);
plot(fy5abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D5');
xlim([000 500]); ylim([0 3]);
```

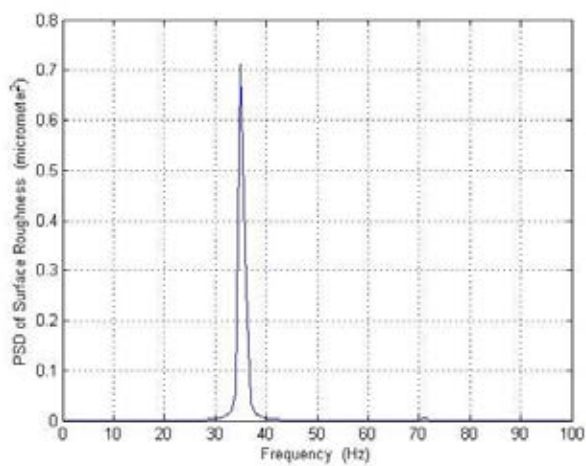
```
figure(6);
subplot(6,1,1);
plot(fy0abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Original Signal');
xlim([000 500]); ylim([0 6.4]);
subplot(6,1,2);
plot(fy1abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D1');
xlim([000 500]); ylim([0 0.31]);
subplot(6,1,3);
plot(fy2abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D2');
xlim([000 500]); ylim([0 0.48]);
subplot(6,1,4);
plot(fy3abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D3');
xlim([000 500]); ylim([0 0.97]);
subplot(6,1,5);
plot(fy4abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D4');
xlim([000 500]); ylim([0 3.4]);
subplot(6,1,6);
plot(fy5abs);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D5');
xlim([000 500]); ylim([0 3]);
```

เงื่อนไข	ความเร็วตัด	อัตราการป้อนตัด	ความลึกตัด	รัศมีจุ่มกมิด	มุมคายเศษโลหะ	ความถี่ความขรุขระผิวชิ้นงาน (Hz)
24	180	0.3	0.5	0.4	-6	35

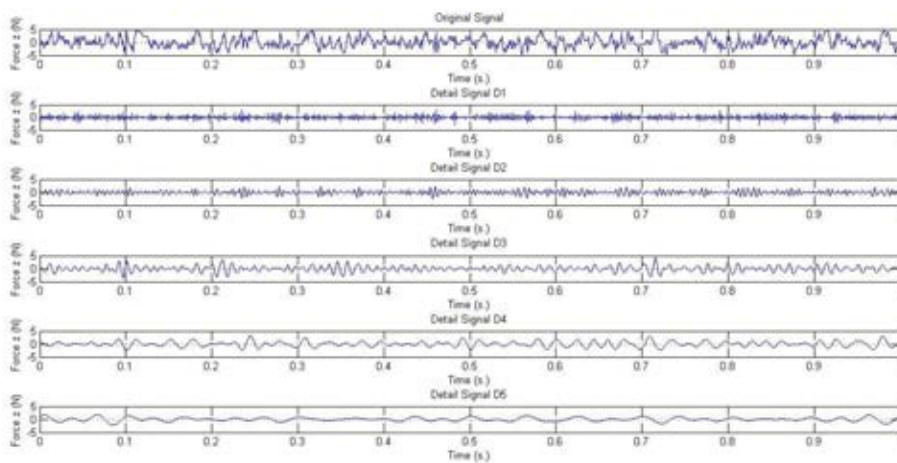
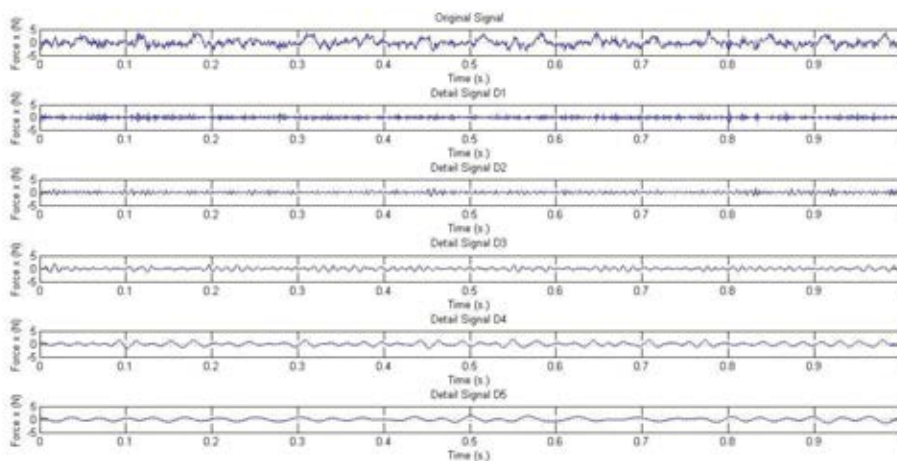
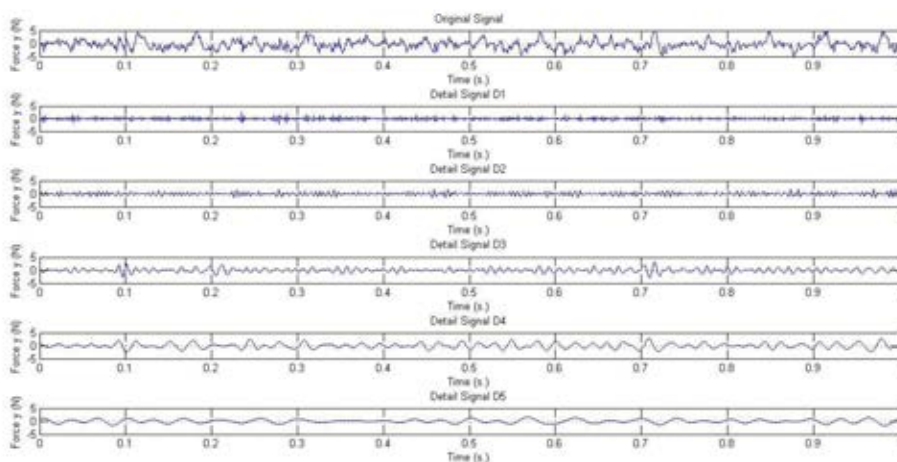
ความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนเวลา



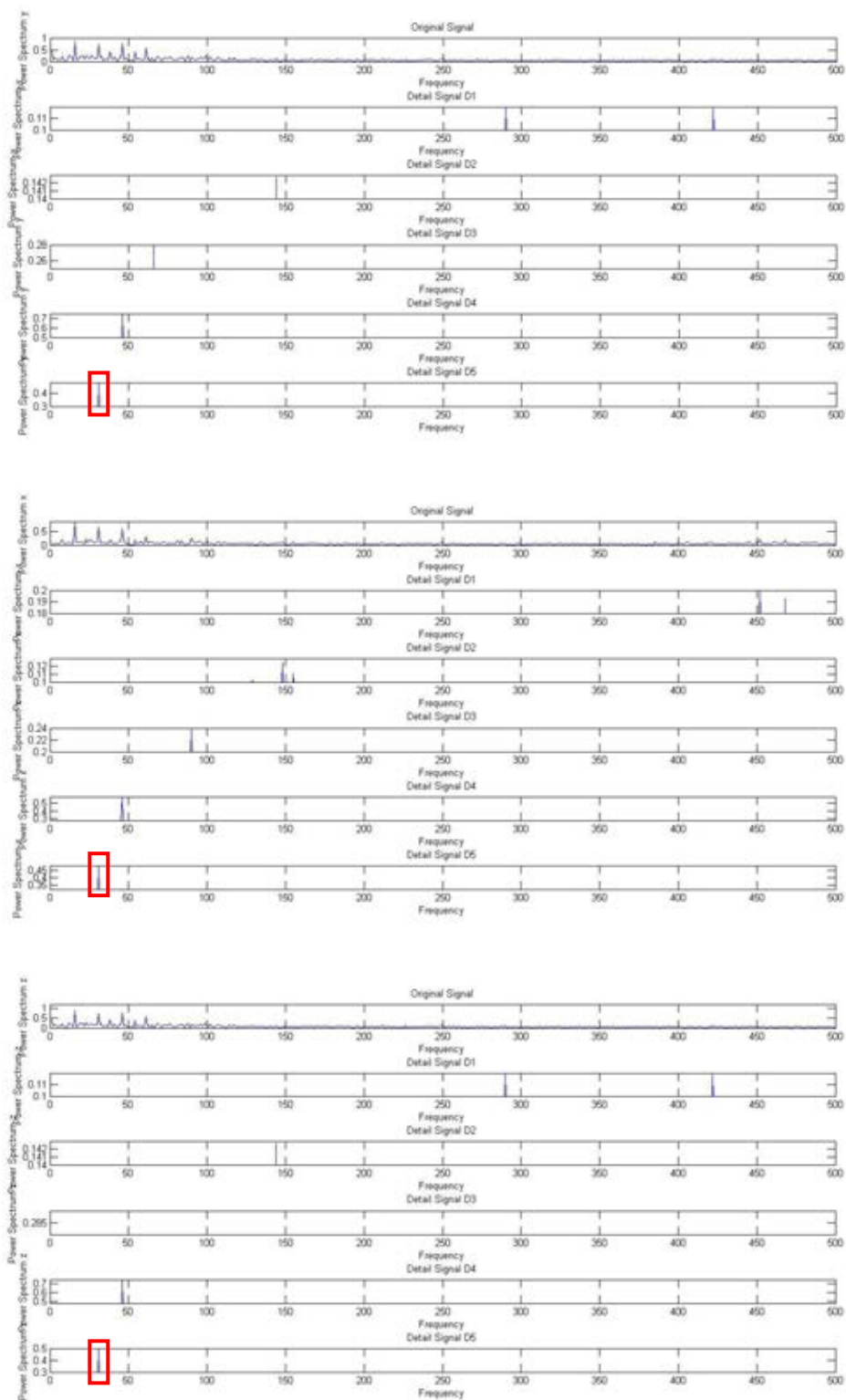
ความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนความถี่



สัญญาณแรงตึงพลวัตในโดเมนเวลาด้วยการแปลงเวฟเล็ต

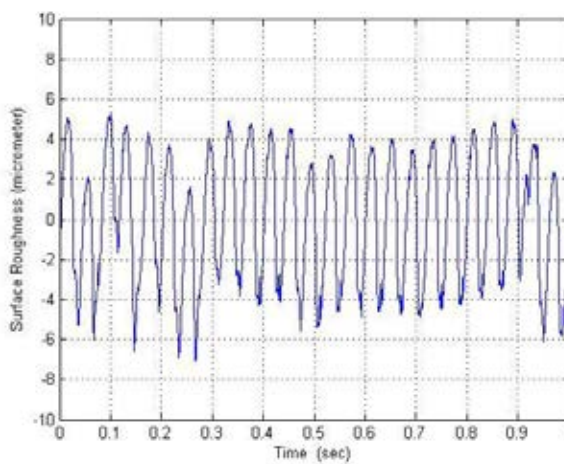


สัญญาณแรงดันพัลส์ในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงเวฟเฉีท

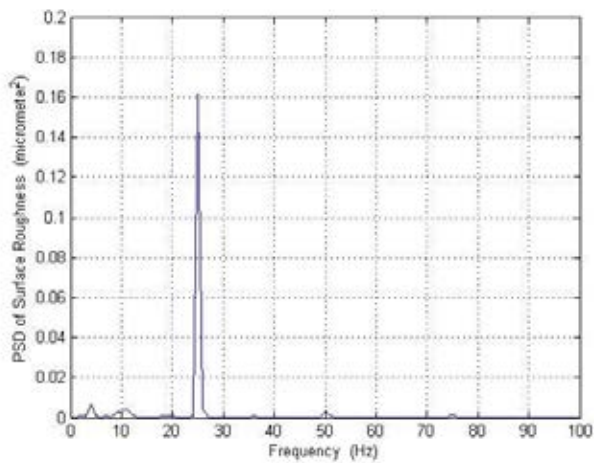


เงื่อนไข	ความเร็วตัด	อัตราการป้อนตัด	ความลึกตัด	รัศมีจุ่มกมิต	มุมคายเศษโลหะ	ความถี่ความขรุขระผิวชิ้นงาน (Hz)
25	180	0.2	0.5	0.4	-6	35

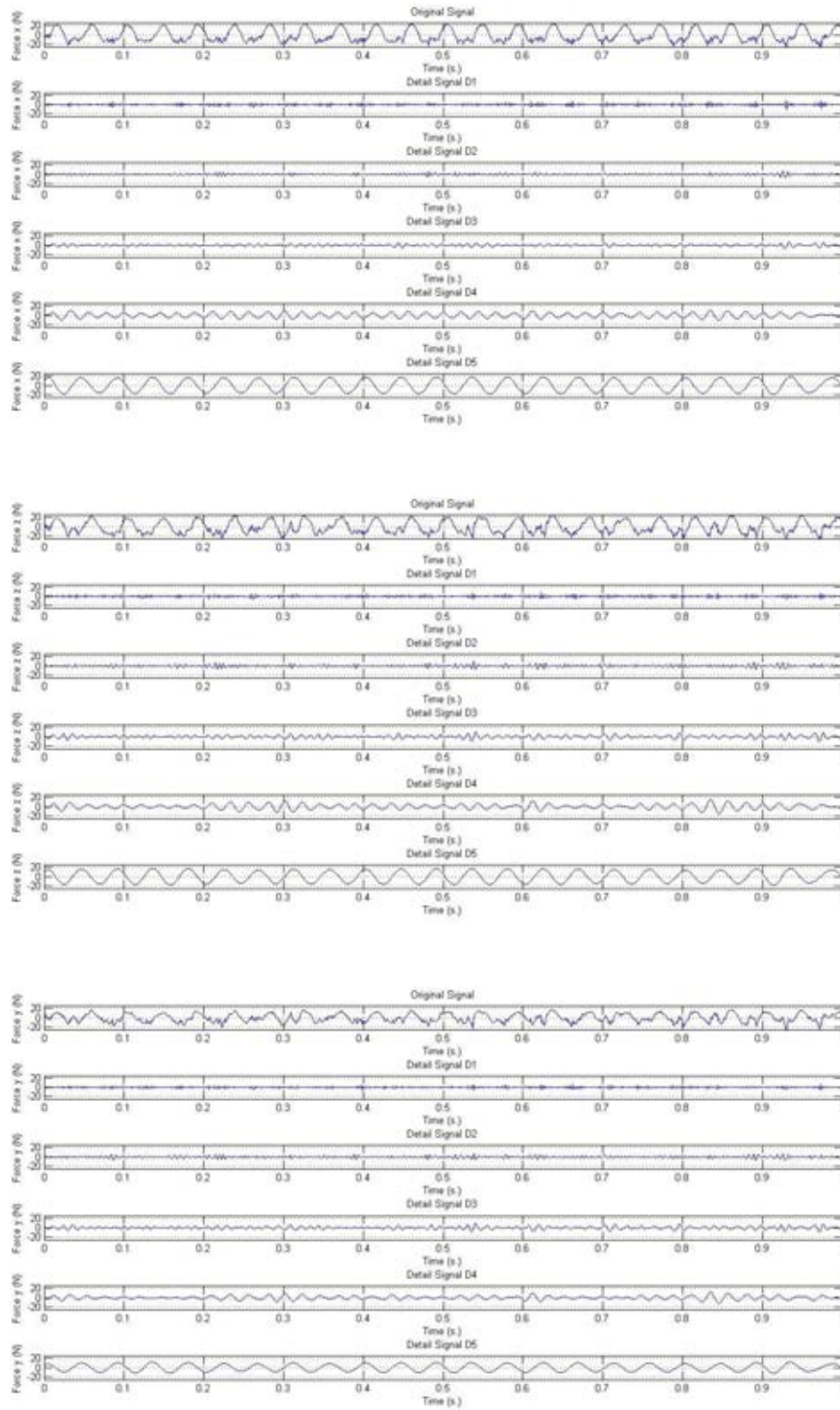
ความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนเวลา



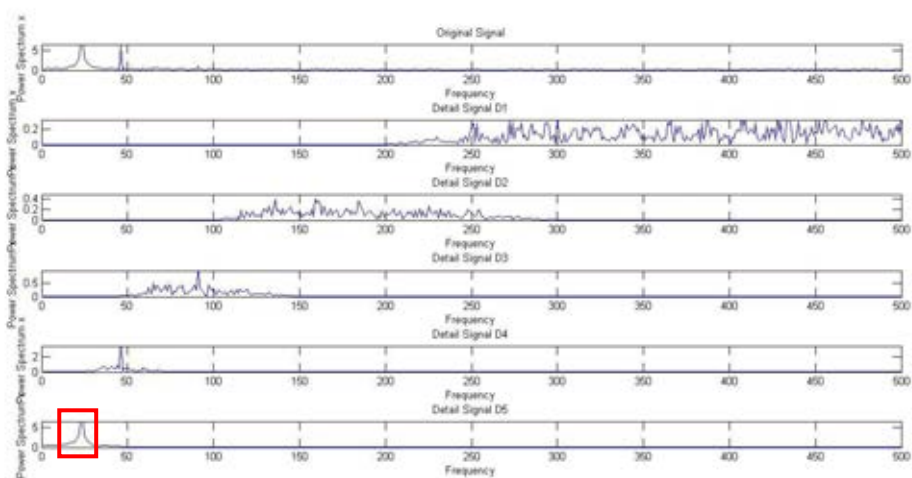
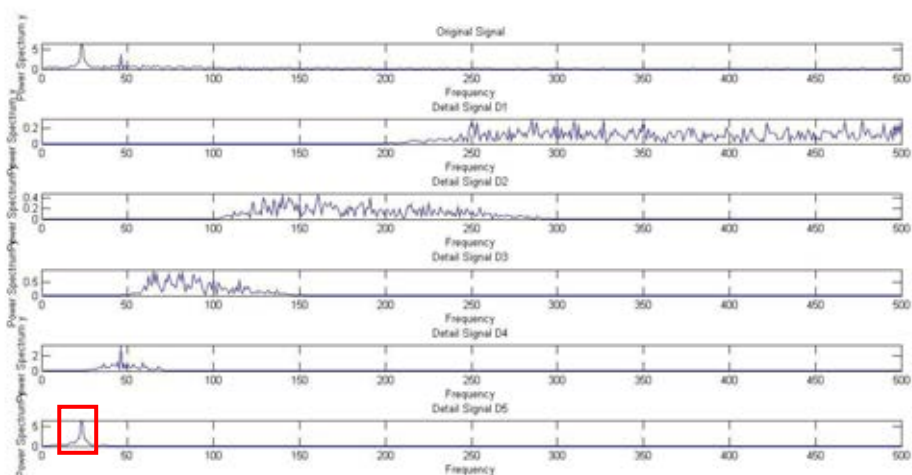
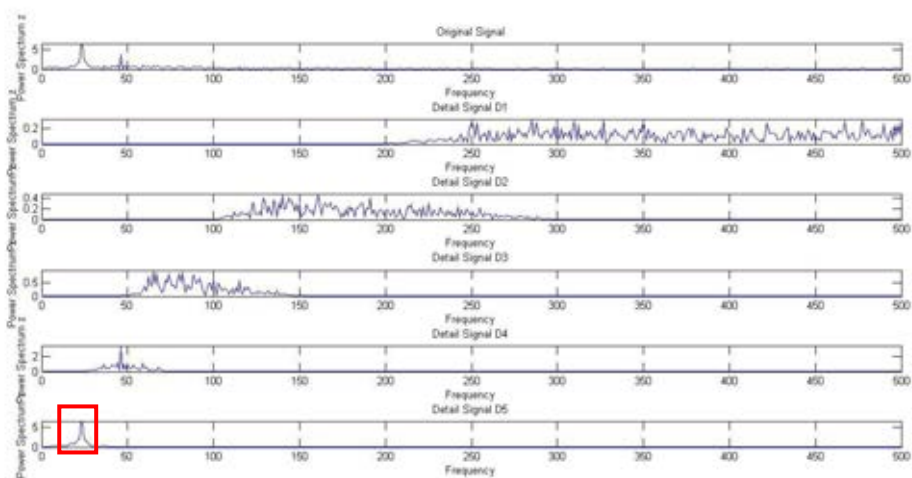
ความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนความถี่



สัญญาณแรงตึงพลวัตในโดเมนเวลาด้วยการแปลงเวฟเล็ต

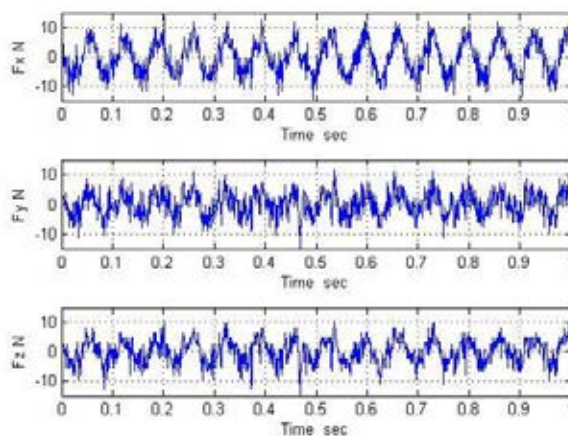


สัญญาณแรงดันพลวัตในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

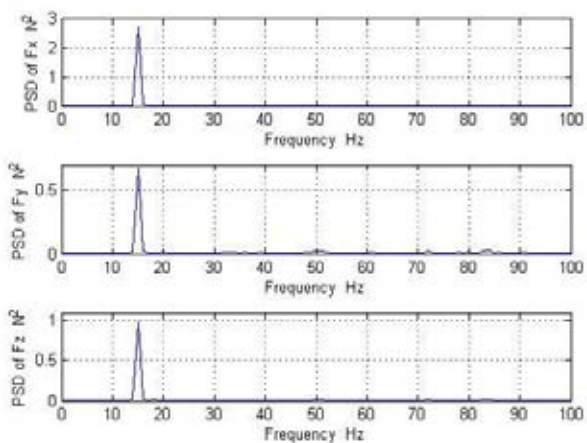


เงื่อนไข	ความเร็วตัด	อัตราการป้อนตัด	ความลึกตัด	รัศมีจุ่มกมิด	มุมคายเศษโลหะ	ความถี่ความขรุขระผิวชิ้นงาน (Hz)
40	100	0.1	0.8	0.4	-6	14

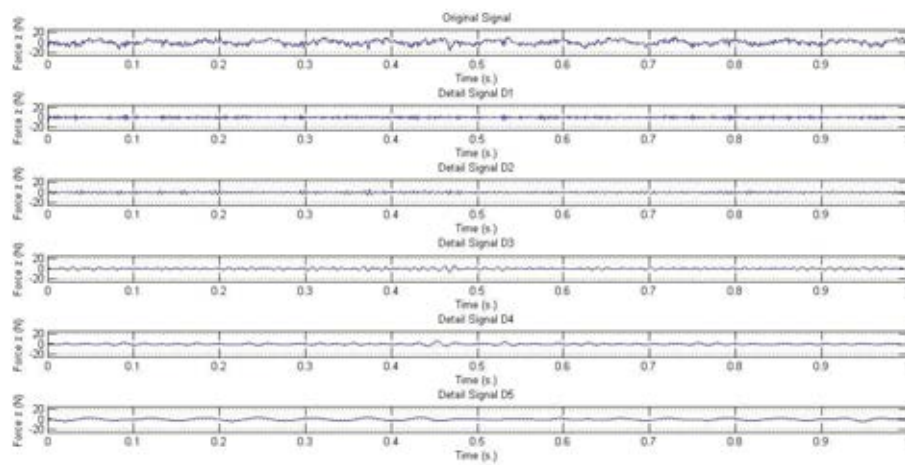
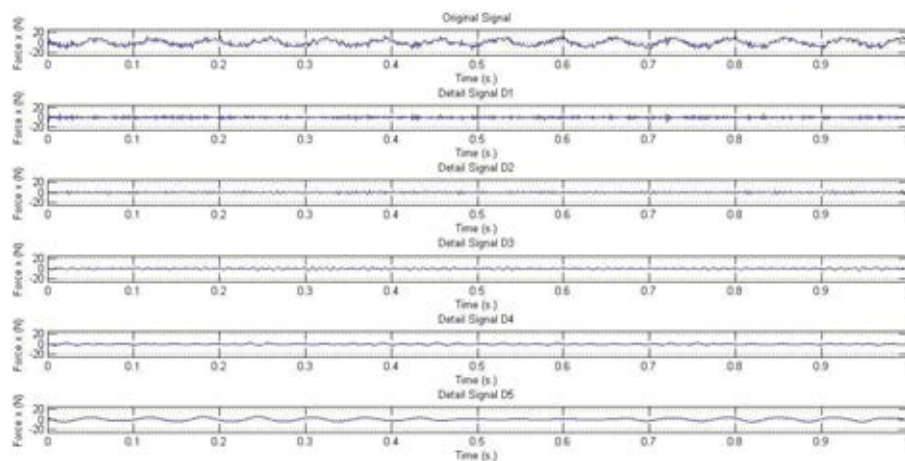
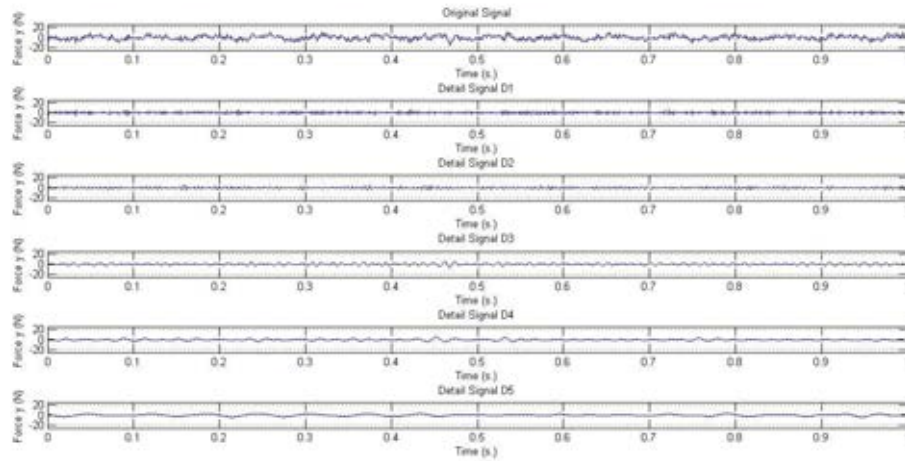
ความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนเวลา



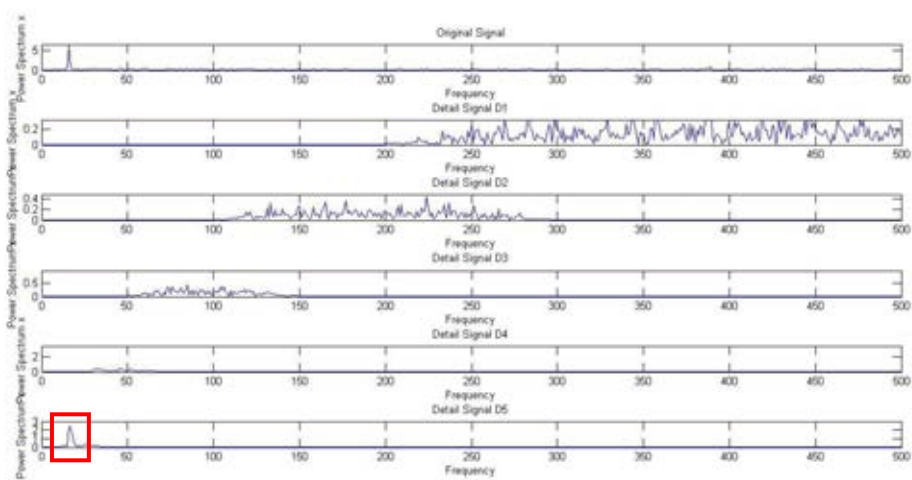
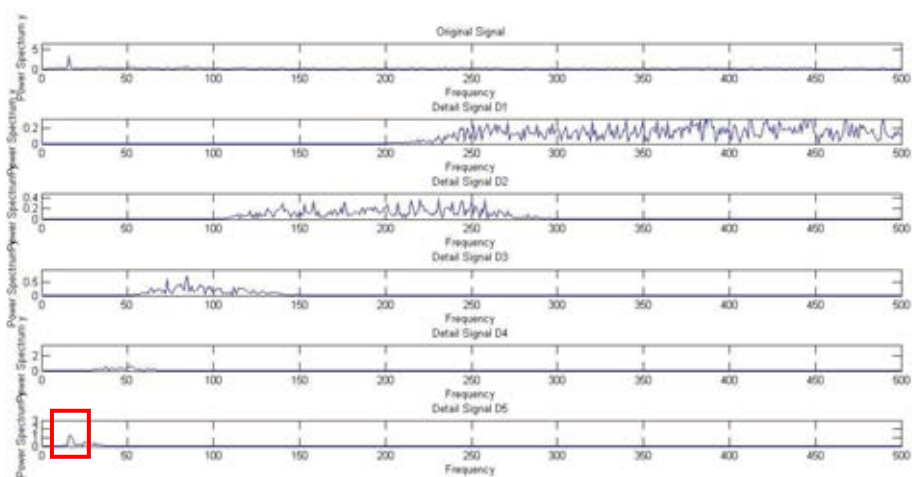
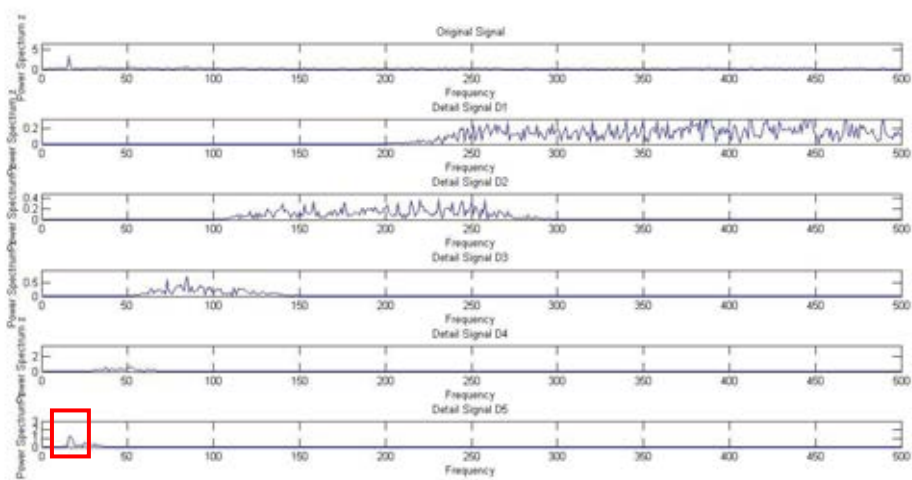
ความขรุขระผิวชิ้นงานในโดเมนความถี่



สัญญาณแรงตึงพลวัตในโดเมนเวลาด้วยการแปลงเวฟเล็ต



สัญญาณแรงดันพลวัตในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงเวฟเฉื่อย

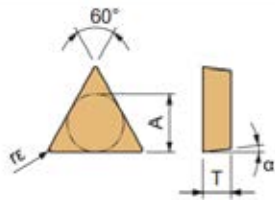


ภาคผนวก ข

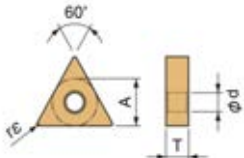
รูปทรงเรขาคณิตของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์ และค่าความไม่แน่นอนของอุปกรณ์การวัด

รูปทรงเรขาคณิตของเม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์

มุมมองพิเศษโลหะ : บวก

เม็ดมีดคาร์ไบด์ ไบต์	ขนาด นิ้ว (มม.)				การเคลือบ	ภาพประกอบ
	A	T	r_ϵ	α		
TPMR-160304-M	3/8	1/8	1/64 (0.4)	11°	CVD	
TPMR-160308-M			1/32 (0.8)			

มุมมองพิเศษโลหะ : ลบ

เม็ดมีดคาร์ไบด์ไบต์	ขนาด นิ้ว (มม.)				การเคลือบ	ภาพประกอบ
	A	T	r_ϵ	$\varnothing d$		
TNMG 160404 HQ	3/8	1/8	1/64 (0.4)	0.15	CVD	
TNMG 160408 HQ			1/32 (0.8)			

ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของอุปกรณ์การวัด

อุปกรณ์	รุ่น	ค่าความไม่แน่นอน
เซ็นเซอร์วัดแรงตัด	Kistler 9121	Fx 1.00 %
		Fy 1.20 %
		Fz 2.20 %
ออกซิไลสโคป	YOKOGAWA DL750	2.00 %
เครื่องขยายสัญญาณ	Kistler 5038A	0.1 %
เครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน	Mitutoyo SJ-400	0.2 ไมโครเมตร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกัญญาณต์ สมนามิตร เกิดเมื่อวันที่ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดชัยภูมิ สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนชัยภูมิภักดีชุมพล จังหวัดชัยภูมิ ต่อมาเข้า ศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2553 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554

