

การพัฒนาการทำนายค่าความตรงและความกลมของชิ้นงานในระบบการกลึงซีเอ็นซีโดยใช้การ  
แปลงเวฟเลข



นายมูอ์มิน ศาสน์สันติวงศ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF IN-  
PROCESS PREDICTION OF STRAIGHTNESS AND ROUNDNESS IN CNC TURNING BY  
USING WAVELET TRANSFORM

Mr. Mumin Sassantiwong



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาการทำนายค่าความตรงและความกลมของ  
ชิ้นงานในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีโดยใช้การแปลงเวฟ  
เลข

โดย

นายมุฮัมหมัด ศาสน์สันติวงศ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพ็ชร์)

มุธมลิน ศาสน์สันติวงศ์ : การพัฒนาการทำนายค่าความตรงและความกลมของชิ้นงานในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีโดยใช้การแปลงเวฟเลท (DEVELOPMENT OF IN-PROCESS PREDICTION OF STRAIGHTNESS AND ROUNDNESS IN CNC TURNING BY USING WAVELET TRANSFORM) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ, 358 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความกลมของชิ้นงานกับแรงตัด ภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆในกระบวนการกลึง เพื่อใช้ในการสร้างสมการทำนายความตรงและความกลมของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) โดยใช้ไดนามิเตอร์ในการตรวจวัดแรงในขณะตัดที่เกิดขึ้น และประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลทดอเบซีส์ในการแยกวิเคราะห์แรงตัดพลวัต เพื่อให้สามารถแยกสัญญาณสัญญาณแรงตัดออกจากสัญญาณจากเศษโลหะและสัญญาณรบกวนอื่นๆได้ จากการทดลองการแปลงเวฟเลทแรงตัดที่ได้จากการตัดภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด และมุมคานพิเศษโลหะ พบว่าความถี่จากการแตกหักของเศษโลหะจะมีความถี่ที่สูงและเกิดขึ้นในระดับชั้นเวฟเลทที่ต่ำกว่า แรง ในส่วนของความถี่สอดคล้องกับความตรงจะมีความถี่ต่ำและจะถูกแยกอยู่ในระดับที่ 8 จากการแปลงเวฟเลท ดังนั้นจึงนำแรงตัดในระดับที่ 8 ของการแปลงเวฟเลทมาใช้ในการสร้างสมการทำนายความกลมและความกลมชิ้นงานขณะตัดในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล

ผลการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการโดยการทดสอบที่เงื่อนไขการตัดใหม่ พบว่าสมการทำนายค่าความตรงและความกลมของชิ้นงานมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 92.14% และ 95.51% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าสมการทำนายความตรงและความกลมที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้มีความแม่นยำสูงและค่าความแม่นยำที่ได้สูงกว่างานวิจัยที่ผ่านมา

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ นิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

# # 5570337921 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: CNC TURNING / STRAIGHTNESS / ROUNDNESS/ CUTTING FORCE RATIO  
 MUMIN SASSANTIWONG: DEVELOPMENT OF IN-PROCESS PREDICTION OF  
 STRAIGHTNESS AND ROUNDNESS IN CNC TURNING BY USING WAVELET  
 TRANSFORM. ADVISOR: ASSOC. PROF. SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, 358  
 pp.

The aim of this research is to monitor the dynamic cutting forces in CNC turning process in order to investigate the relation between the straightness, the roundness and the dynamic cutting forces. The dynamic cutting forces occurred during the CNC turning process include the signals of straightness, roundness and noise. The Daubechies wavelet transform is employed to decompose the dynamic cutting forces into 10 levels in both time and frequency domains to determine the suitable level of the straightness and roundness signals, which is the 8th level. It is understood that the decomposed cutting forces, which are obtained from the 8th level, can be considered to predict the straightness and the roundness under various cutting conditions.

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 conducting the new cutting tests with the high accuracy of 92.14% for the straightness and 95.51% for the roundness, respectively.

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

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

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณอัลลอฮ์สำหรับทุกสิ่งในชีวิต ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดต่างๆ รวมทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณพ่อ แม่ และทุกๆคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือตลอดการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย .....	10
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	10
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	10
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	11
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	12
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	12
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	36
3.1 การออกแบบการทดลอง .....	36
3.2 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง .....	36
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	37
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย .....	40
3.5 การพัฒนาสมการทำนายความตรงและความกลมของชิ้นงานขณะตัด .....	46

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	47
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	49
4.1 ผลการทดลอง .....	49
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดกับค่าความตรง .....	57
4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและแรงตัด.....	66
4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตกับค่าความกลมในการตัดที่เกิดเศษ โลหะแบบต่อเนื่องและแตกหัก.....	68
4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงเบี่ยงศูนย์ของชิ้นงานและอัตราส่วนแรง ตัด.....	70
4.6 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานและอัตราส่วน ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต.....	71
4.7 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดต่างๆกับความตรงและความกลมของ ชิ้นงานและการเกิดเศษโลหะ.....	72
4.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	93
4.9 การทดสอบการกระจายแบบปกติ .....	95
4.10 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล.....	97
4.11 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน.....	98
4.12 สมการทำนายความตรงของชิ้นงาน .....	99
4.13 การทดสอบความแม่นยำของสมการ .....	102
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....	107
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	107
5.2 อภิปรายผลการวิจัย .....	108
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย.....	109



5.4 ข้อเสนอแนะ.....	110
รายการอ้างอิง.....	111
ภาคผนวก.....	115
ภาคผนวก ก โปรแกรมแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วสำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตัด .....	116
ภาคผนวก ข โปรแกรมแปลงเวฟเลทสำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตัด .....	120
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ความตรงและแรงตัดโดยการแปลงเวฟเลทสำหรับเงื่อนไขการตัดต่างๆ .....	137
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ความกลมและแรงตัดโดยการแปลงเวฟเลทสำหรับเงื่อนไขการตัดต่างๆ .....	246
ภาคผนวก จ ข้อกำหนดทางเทคนิคเครื่องมือวัด .....	355
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	358

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	ปัจจัยและระดับปัจจัยสำหรับการทดลอง .....	10
ตารางที่ 2.1	ลักษณะความผิดปกติของความกลม .....	24
ตารางที่ 2.2	วิธีการวัดค่าความกลม .....	25
ตารางที่ 3.1	แสดงระดับปัจจัยของการทดลอง .....	36
ตารางที่ 3.2	เงื่อนไขการทดลอง .....	42
ตารางที่ 4.1	ผลการทดลอง .....	50
ตารางที่ 4.2	เงื่อนไขการตัดเพื่อการทดสอบความแม่นยำสมการทำนายความตรงและความ กลม .....	102
ตารางที่ 4.3	ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำ .....	103

## สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	แรงตัดในแนวแกน 3 มิติ .....	3
รูปที่ 1.2	แนวคิดในการทำวิจัย .....	4
รูปที่ 1.3	ลักษณะสัญญาณแรงตัดพลวัตและความกลมในโดเมนเวลา .....	6
รูปที่ 1.4	ลักษณะสัญญาณแรงตัดพลวัตและความตรงในโดเมนเวลา .....	6
รูปที่ 1.5	ลักษณะสัญญาณแรงตัดพลวัตและความตรงในโดเมนความถี่ .....	6
รูปที่ 1.6	แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเลทในโดเมนเวลาของ $F_x$ .....	7
รูปที่ 1.7	แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเลทในโดเมนความถี่ของ $F_x$ .....	7
รูปที่ 1.8	แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเลทในโดเมนเวลาของ $F_y$ .....	8
รูปที่ 1.9	แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเลทในโดเมนความถี่ของ $F_y$ .....	8
รูปที่ 1.10	แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเลทในโดเมนเวลาของ $F_z$ .....	9
รูปที่ 1.11	แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเลทในโดเมนความถี่ของ $F_z$ .....	9
รูปที่ 2.1	กระบวนการกลิ้ง.....	13
รูปที่ 2.2	เงื่อนไขการตัดของกระบวนการกลิ้ง[8].....	13
รูปที่ 2.3	แบบจำลองการตัด.....	15
รูปที่ 2.4	แสดงลักษณะมุมคายแบบ positive (ซ้าย) and negative (ขวา) .....	15
รูปที่ 2.5	สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น .....	17
รูปที่ 2.6	การคำนวณแรงป้อนตัดสถิตและแรงป้อนตัดพลวัต .....	18
รูปที่ 2.7	การคำนวณค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัต .....	19
รูปที่ 2.8	ตัวอย่างการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาเป็นเมนความถี่.....	20
รูปที่ 2.9	เวฟเลทที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า $a$ และ $b$ ต่าง ๆ กัน .....	21
รูปที่ 2.10	ลักษณะของเวฟเลทในแฟมิลีต่างๆ .....	21
รูปที่ 2.11	ความตรงแบบ Endpoints.....	22

รูปที่ 2.12 ความตรงแบบ Linear Regression .....	22
รูปที่ 2.13 การสร้างเส้นตรงด้วยวิธีการ Least Square.....	23
รูปที่ 2.14 ความตรงแบบ ISO 1101 .....	23
รูปที่ 2.15 ความเบี่ยงเบนของรูปทรงเลขาคณิต .....	24
รูปที่ 2.16 การวัดความกลมแบบ Circumferential Confining Gauge .....	26
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างเครื่องมือวัดความกลม Detector rotating type[8].....	27
รูปที่ 2.18 การวัดชิ้นงานแบบ Rotating on centers .....	27
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างเครื่องมือวัดค่าความกลมแบบ Table rotating type[8] .....	27
รูปที่ 2.20 การวัดความกลมแบบโดยใช้ V-block[8] .....	28
รูปที่ 3.1 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer).....	38
รูปที่ 3.2 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope).....	38
รูปที่ 3.3 เครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier).....	38
รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความขรุขระผิว (Roughness tester) .....	39
รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความกลม (Roundness Tester).....	39
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	40
รูปที่ 4.1 ลักษณะเศษโลหะจากการตัดภายใต้เงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด 200 ม.ต่อ นาที่ อัตราป้อนตัด 0.15 มม.ต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.4 มม. รัศมีจุกมีด 0.4 มม. และ มุมคายเศษโลหะ 11.....	57
รูปที่ 4.2 สัญญาณความตรงชิ้นงานในโดเมนเวลาและความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว .....	57
รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงตัดในโดเมนเวลาและความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว .....	57
รูปที่ 4.4 การแปลงเวฟเลขในโดเมนเวลาของแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องแกน X... 58	58
รูปที่ 4.5 การแปลงเวฟเลขในโดเมนความถี่ของแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องแกน X.....	58

รูปที่ 4.6 การแปลงเวฟเลทในโดเมนเวลาของแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องในแกน Y.....	59
รูปที่ 4.7 การแปลงเวฟเลทในโดเมนความถี่ของแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องในแกน Y.....	59
รูปที่ 4.8 การแปลงเวฟเลทในโดเมนเวลาของแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องในแกน Z.....	60
รูปที่ 4.9 การแปลงเวฟเลทในโดเมนความถี่ของแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องในแกน Z.....	60
รูปที่ 4.10 ลักษณะเศษโลหะจากการตัดภายใต้เงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด 100 ม.ต่อ นาที่ อัตราป้อนตัด 0.25 มม.ต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. และ มุมคายเศษโลหะ -6 .....	61
รูปที่ 4.11 สัญญาณความตรงของชิ้นงานในโดเมนเวลาและความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์แบบ เร็ว .....	61
รูปที่ 4.12 สัญญาณแรงตัดในโดเมนเวลาและความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว .....	62
รูปที่ 4.13 การแปลงเวฟเลทแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักในแกน X ...	63
รูปที่ 4.14 การแปลงเวฟเลทแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักในแกน X.....	63
รูปที่ 4.15 การแปลงเวฟเลทแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักในแกน Y ...	64
รูปที่ 4.16 การแปลงเวฟเลทแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักในแกน Y.....	64
รูปที่ 4.17 การแปลงเวฟเลทแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักในแกน Z ...	65
รูปที่ 4.18 การแปลงเวฟเลทแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักในแกน Z.....	65
รูปที่ 4.19 ลักษณะเศษโลหะ สัญญาณแรงตัดพลวัตและสัญญาณความกลมที่ได้จากการตัด ที่ความเร็วตัด 200 ม/นาที่ อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา .....	67

รูปที่ 4.20 ลักษณะเศษโลหะ สัญญาณแรงตัดพลวัตและสัญญาณความกลมที่ได้จากการตัดที่ความเร็วตัด 150 ม/นาที่ อัตราป้อนตัด 0.25 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา .....	67
รูปที่ 4.21 การแปลงเวฟเลขของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่มีการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องในโดเมนเวลาของแกน X ซึ่งมีเงื่อนไขการตัดดังนี้ได้แก่ ความเร็วตัด 200 ม/นาที่ อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา .....	68
รูปที่ 4.22 การแปลงเวฟเลขของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่มีการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องในโดเมนเวลาของแกน Y ซึ่งมีเงื่อนไขการตัดดังนี้ได้แก่ ความเร็วตัด 200 ม/นาที่ อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา .....	69
รูปที่ 4.23 การแปลงเวฟเลขของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่มีการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักในโดเมนเวลาของแกน X ซึ่งมีเงื่อนไขการตัดดังนี้ได้แก่ ความเร็วตัด 150ม/นาที่ อัตราป้อนตัด 0.25 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา .....	69
รูปที่ 4.24 การแปลงเวฟเลขของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่มีการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักในโดเมนเวลาของแกน Y ซึ่งมีเงื่อนไขการตัดดังนี้ได้แก่ ความเร็วตัด 150ม/นาที่ อัตราป้อนตัด 0.25 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา .....	70
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงศูนย์ของชิ้นงานและอัตราส่วนแรงป้อนตัด .....	71
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานและอัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงพลวัต .....	71
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงเบี่ยงศูนย์กับความเร็วตัดที่ 100, 150 และ 250 เมตรต่อนาที โดยมีความลึกตัด 0.4, 0.6 และ 0.8 มม. อัตราป้อนตัด 0.15 มม. และรัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ -6 องศา .....	72
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางกับความเร็วตัดที่ 100, 150 และ 250 เมตรต่อนาที โดยมีความลึกตัด 0.4, 0.6 และ 0.8 มม. อัตราป้อนตัด 0.15 มม. และ รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ -6 องศา .....	72
รูปที่ 4.29 การวิเคราะห์ความตรงเบี่ยงศูนย์ ณ เงื่อนไขการตัด ที่อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา .....	73

รูปที่ 4.30 การวิเคราะห์พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด อัตราป้อนตัด 0.15 มม.  
 ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา ..... 73

รูปที่ 4.31 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลขทในกระบวนการกลึงที่ความเร็วตัด 100  
 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุมูกมีด  
 0.8 และ มุมคายเศษโลหะ 11 องศา ..... 74

รูปที่ 4.32 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลขทในกระบวนการกลึงที่ความเร็วตัด 200  
 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุมูกมีด  
 0.8 และ มุมคายเศษโลหะ 11 องศา ..... 75

รูปที่ 4.33 การเกิดเศษโลหะเงื่อนไขการตัด ความเร็วตัด 100, 150 และ 200 ม./นาที อัตรา  
 ป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุมูกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา... 76

รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงเบี่ยงศูนย์กลางกับอัตราป้อนตัดที่ 0.15,  
 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที ความ  
 ลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา ..... 76

รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางกับอัตราป้อนตัดที่  
 0.15, 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที  
 ความลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา..... 77

รูปที่ 4.36 การวิเคราะห์ความตรงเบี่ยงศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัดที่อัตราป้อนตัดที่ 0.15 และ  
 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจุมูกมีด  
 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา..... 77

รูปที่ 4.37 การวิเคราะห์พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัดที่อัตราป้อนตัดที่ 0.15 และ  
 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจุมูกมีด  
 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา..... 78

รูปที่ 4.38 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลขทในกระบวนการกลึงที่อัตราป้อนตัดที่  
 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจุมูกมีด  
 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา..... 78

รูปที่ 4.39 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลทในระบบการกลึงที่อัตราป้อนตัดที่ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	79
รูปที่ 4.40 การเกิดเศษโลหะเนื่องจากการตัด อัตราป้อนตัด 0.15, 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 ม./นาที ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	79
รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงเบี่ยงศูนย์กับความลึกตัดที่ 0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิเมตร โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มม.ต่อรอบ และ รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	80
รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางกับความลึกตัดที่ 0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิเมตร โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มม.ต่อรอบ และ รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา .....	80
รูปที่ 4.43 การวิเคราะห์ความตรงเบี่ยงศูนย์ ณ เนื่องจากการตัดที่ความลึกตัด 0.4 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัดที่ 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ และ รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	81
รูปที่ 4.44 การวิเคราะห์พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ การเนื่องจากการตัดที่ความลึกตัด 0.4 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัดที่ 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ และ รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	81
รูปที่ 4.45 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลทในระบบการกลึงที่ความลึกตัด 0.4 มม. ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัดที่ 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ และ รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	82
รูปที่ 4.46 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลทในระบบการกลึงที่ความลึกตัด 0.8 มม. ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัดที่ 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ และ รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	83
รูปที่ 4.47 การเกิดเศษโลหะเนื่องจากการตัด ได้แก่ ความลึกตัด 0.4, 0.6 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	83



รูปที่ 4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงเบี่ยงศูนย์กับรัศมีจุมูกมีดที่ 0.4 และ 0.8 มม. โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มม. และ มุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	84
รูปที่ 4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางกับรัศมีจุมูกมีดที่ 0.4 และ 0.8 มม. โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มม. และ มุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	84
รูปที่ 4.50 การวิเคราะห์ความตรงเบี่ยงศูนย์ ณ เงื่อนไขการตัดที่รัศมีจุมูกมีดที่ 0.4 และ 0.8 มม. โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มม. และ มุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	85
รูปที่ 4.51 การวิเคราะห์พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัดที่รัศมีจุมูกมีดที่ 0.4 และ 0.8 มม. โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มม. และ มุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	85
รูปที่ 4.52 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเฟสในกระบวนการกลึงที่รัศมีจุมูกมีดที่ 0.4 มม. โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มม. และ มุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	86
รูปที่ 4.53 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเฟสในกระบวนการกลึงที่รัศมีจุมูกมีดที่ 0.8 มม. โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มม. และ มุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	87
รูปที่ 4.54 การเกิดเศษโลหะเงื่อนไขการตัด ได้แก่ รัศมีจุมูกมีด 0.4 และ 0.8 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	88
รูปที่ 4.55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงเบี่ยงศูนย์กับมุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม.ต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม.....	88
รูปที่ 4.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางกับมุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม.ต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจุมูกมีด 0.8 มม.....	89

รูปที่ 4.57 การวิเคราะห์ความตรงเบี่ยงศูนย์ ณ เงื่อนไขการตัดมุมคายพิเศษโลหะ -6 และ 11 องศา โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มม.ต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มม. และ รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. .... 89

รูปที่ 4.58 การวิเคราะห์พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัดมุมคายพิเศษโลหะ -6 และ 11 องศา โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มม.ต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มม. และ รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. .... 90

รูปที่ 4.59 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลขในกระบวนการกลึงที่เงื่อนไขการตัดมุมคายพิเศษโลหะ -6 องศา โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มม.ต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มม. และ รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. .... 91

รูปที่ 4.60 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลขในกระบวนการกลึงที่เงื่อนไขการตัดมุมคายพิเศษโลหะ 11 องศา โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มม.ต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มม. และ รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. .... 92

รูปที่ 4.61 การเกิดเศษโลหะเงื่อนไขการตัด ได้แก่ มุมคายพิเศษโลหะ -6 และ 11 องศา รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม.ความลึกตัด 0.6 มม. ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม. .... 92

รูปที่ 4.62 กราฟอันตรกิริยาระหว่างความตรงชิ้นงานและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ..... 93

รูปที่ 4.63 กราฟอันตรกิริยาระหว่างความกลมชิ้นงานและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ..... 94

รูปที่ 4.64 ผลหลัก (Main effect) ของความตรงและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ..... 94

รูปที่ 4.65 ผลหลัก (Main effect) ของความกลมและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ..... 95

รูปที่ 4.66 Normal Probability Plot ข้อมูลความตรงของชิ้นงาน..... 96

รูปที่ 4.67 Normal Probability Plot ข้อมูลความกลมชิ้นงาน ..... 96

รูปที่ 4.68 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับการเก็บข้อมูลความตรงชิ้นงาน ..... 97

รูปที่ 4.69 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับการเก็บข้อมูลความกลมชิ้นงาน ..... 97

รูปที่ 4.70 แสดงการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนความตรงของชิ้นงาน ..... 98

รูปที่ 4.71 แสดงการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนความกลมชิ้นงาน ..... 98

รูปที่ 4.72 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอยของสมการความตรง ..... 100

รูปที่ 4.73 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอยของสมการความกลม ..... 100

รูปที่ 4.74 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการความตรง..... 101

รูปที่ 4.75 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการความกลม..... 101

รูปที่ 4.76 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความตรง..... 105

รูปที่ 4.77 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความกลมชิ้นงาน ..... 106



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

#### 1.1.1 อุตสาหกรรมการผลิตของประเทศไทย

ภาคอุตสาหกรรมมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย จากการศึกษาพบว่า สัดส่วนมูลค่าผลผลิตอุตสาหกรรมต่อผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ และมูลค่าการส่งออกสินค้าอุตสาหกรรมต่อมูลค่าการส่งออกรวม มีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะกลุ่มสินค้าอุตสาหกรรมที่ต้องใช้เทคโนโลยีระดับกลางและสูง เช่น ยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น[1]

ประเทศไทยได้ทำการเข้าร่วมในกลุ่มประชาคมอาเซียน (ASEAN Economic Community, AEC) หรือการรวมกันเป็นตลาดเดียว (Single Market) ในปี พ.ศ. 2558 หากพิจารณาถึงกลุ่ม ASEAN+3 ซึ่งประกอบไปด้วยประเทศในกลุ่มอาเซียน 10 ประเทศ รวมกับประเทศจีน เกาหลีใต้และญี่ปุ่น ประเทศไทยจัดอยู่ในกลุ่มประเทศที่กลุ่มประเทศที่มีการพัฒนา ระดับกลาง หากเปรียบเทียบกับประเทศในกลุ่มที่มีทรัพยากรจำนวนมากและมีการใช้แรงงาน ค่าแรงต่ำเช่น พม่า ลาว เวียดนาม กัมพูชา อินโดนีเซีย จะพบว่าประเทศในกลุ่มนี้มีความได้เปรียบทางด้านกิจกรรมที่เน้นทรัพยากรและกิจกรรมที่ใช้แรงงานเป็นหลักเนื่องจากต้นทุนแรงงานที่ต่ำกว่า ในขณะที่เดียวกันเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกลุ่มประเทศที่มีเทคโนโลยีและทุนที่สูงกว่าเช่น สิงคโปร์ เกาหลีใต้ และญี่ปุ่น พบว่าประเทศในกลุ่มนี้ก็มีมีความได้เปรียบในกิจกรรมที่เน้นปัจจัยทุนเป็นหลัก เนื่องจากมีการผลิตที่ใช้เทคโนโลยีในระดับที่สูงกว่า ด้วยเหตุนี้เองประเทศที่มีการพัฒนา อยู่ในระดับกลางอย่างประเทศไทยจึงติดอยู่ในกับดักที่เรียกว่ากับดักรายได้ปานกลาง (Middle-income trap) ทำให้สูญเสียความได้เปรียบในการแข่งขันทั้งกับกลุ่มประเทศที่มีต้นทุนแรงงานในการผลิตต่ำและกลุ่มประเทศที่มีทุนและเทคโนโลยีสูงกว่า[2]

ดังนั้น ประเทศไทยจึงจำเป็นต้องเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรม ด้วยการส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้เพื่อให้เกิดนวัตกรรม (Innovation) ขึ้นภายในประเทศ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพทางการผลิตให้ไล่ตามความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในระดับโลกได้ และเพื่อเพิ่มขีดความสามารถทางการแข่งขันระหว่างประเทศ

### 1.1.2 อุตสาหกรรมงานขึ้นรูปความเที่ยงตรงสูง

อุตสาหกรรมงานขึ้นรูปความเที่ยงตรงสูง (Precision Machining Industry)[3] เป็นอุตสาหกรรมซึ่งผลิตชิ้นงานความเที่ยงตรงสูงให้อุตสาหกรรมอย่างเช่น อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น นำชิ้นส่วนที่ผลิตไปใช้ในการผลิตขั้นต่อไป เนื่องจากผลิตภัณฑ์ในปัจจุบัน เช่น ระบบเครื่องยนต์ คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สื่อสาร นั้นล้วนแต่ผลิตด้วยเทคโนโลยีที่ต้องการความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรงสูง (Precision) อีกทั้งประเทศไทยมีการผลิตชิ้นงานความเที่ยงตรงสูง เช่น เพลาล้ออัลลอย คอปวงมาลัย ล้อตุ้มกำลัง คลัตช์ ลูกสูบ ฯลฯ เพื่อป้อนสู่อุตสาหกรรมยานยนต์ และขึ้นชิ้นได้แก่ ไมโครมอเตอร์ตัวลู่ขนาดเล็ก ฮาร์ดดิสก์ ฯลฯ สำหรับอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นงานความเที่ยงตรงสูงนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก

ในอุตสาหกรรมงานขึ้นรูปความเที่ยงตรงสูงในโรงงานขนาดเล็กและมีกำลังการผลิตไม่มากนักอาจมีการใช้เครื่องระบบ Manual อยู่บ้าง แต่ส่วนใหญ่จะใช้เครื่องจักรที่เป็นระบบ CNC เนื่องจากให้ความเที่ยงตรงและแม่นยำสูง เครื่องจักรกลอัตโนมัติที่สามารถทำงานได้โดยการป้อนชุดโปรแกรมคำสั่งอย่างเครื่องจักรกลซีเอ็นซี (Computer Numerical Control) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องกลึงซีเอ็นซีเซ็นเตอร์ (CNC Turning Center: TC) เนื่องจากการกลึงเป็นปฏิบัติการขั้นพื้นฐานในงานอุตสาหกรรมที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเป็นการตัดโลหะที่ให้ชิ้นงานหมุนรอบตัวเองและมีดกลึงเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน เครื่องกลึงซีเอ็นซีสามารถทำงานที่ต้องการความเที่ยงตรงและความละเอียดสูงได้ดีกว่าเครื่องจักรที่ควบคุมแบบ Manual มาก อีกทั้งสามารถรองรับการผลิตที่มีความหลากหลายได้ และเมื่อนำไปทำงานร่วมกับระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing System, IMS) สามารถลดข้อเสียที่จะเกิดขึ้นได้โดยใช้เซนเซอร์ในระบบการตรวจติดตามการผลิตซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้ว่าเกิดข้อผิดพลาดในการผลิตขึ้นหรือไม่ เป็นผลให้สามารถที่จะหยุดหรือดำเนินการผลิตต่อหรือปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการได้อย่างทันท่วงที

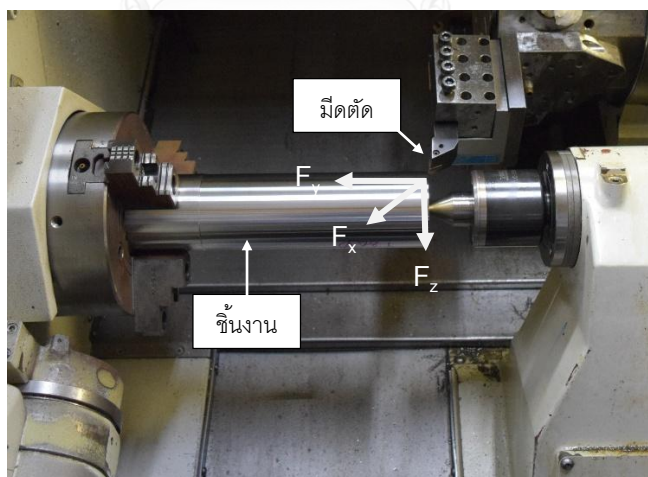
### 1.1.3 ความสำคัญของความตรงและความกลมในกระบวนการผลิต

การผลิตชิ้นงานรูปร่างทรงกระบอกซึ่งเป็นรูปร่างพื้นฐานสำหรับป้อนให้อุตสาหกรรมอื่นๆ นำชิ้นส่วนความเที่ยงตรงสูงนี้ไปประกอบการผลิตขั้นต่อไป เช่น กระบอกลูกสูบสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ แกนสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ แกนเลื่อนของเครื่องจักรสำหรับอุตสาหกรรมสร้างเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมสร้างเครื่องมือ

อุปกรณ์ทางการแพทย์ และอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ เป็นต้น ซึ่งในการผลิตชิ้นงานลักษณะนี้จะใช้เครื่องกลึง CNC การผลิตชิ้นงานให้มีความตรง (Straightness) และความกลม (Roundness) ที่ถูกต้องแม่นยำนั้นมีความสำคัญอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นงานที่ต้องนำไปประกอบกัน หากมีความคลาดเคลื่อนของรูปร่างชิ้นงานเกินกว่ากำหนด อาจทำให้ประกอบกันได้ไม่สมบูรณ์ ในชิ้นส่วนที่มีการหมุนหรือการเคลื่อนที่อาจส่งผลให้เกิดการเสียดสีและการสั่นสะเทือน อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องจักรได้ ปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการควบคุมความตรงและความกลม ในกระบวนการกลึง เช่น สัญญาณแรงตัด ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด รัศมีงูมกมิต ความลึกกัด และมุมคายเศษโลหะ[4-6] ซึ่งการตรวจวัดความตรงและความกลมชิ้นงานในกระบวนการผลิตสามารถทำได้หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตแล้วเท่านั้น ทำให้สูญเสียเวลา ต้องใช้เครื่องมือวัดความละเอียดสูง ชิ้นงานได้รับความเสียหายจากการทดสอบ อีกทั้งการตรวจติดตามในกระบวนการผลิตไม่สามารถตรวจติดตามชิ้นงานที่ผลิตได้ทั้งหมด

#### 1.1.4 การตรวจติดตามกระบวนการผลิตด้วยการใช้เซนเซอร์

การตรวจติดตามกระบวนการผลิตโดยใช้เซนเซอร์ เป็นการตรวจติดตามทางอ้อม (Indirect monitoring process) โดยนำสัญญาณที่ตรวจจับได้ในกระบวนการผลิตมาแปลงค่าเพื่อให้ทราบสถานะของกระบวนการผลิต โดยไม่ต้องหยุดกระบวนการผลิตเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้น[7]



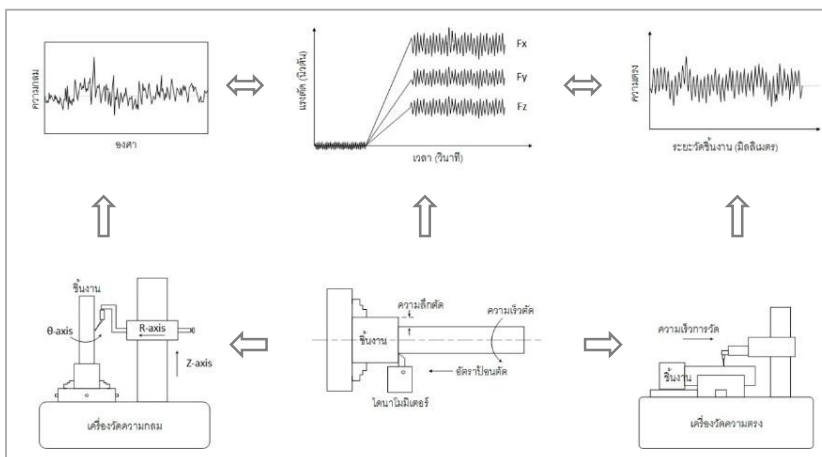
รูปที่ 1.1 แรงตัดในแนวแกน 3 มิติ

การใช้เซนเซอร์เพื่อช่วยในการติดตามแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง ทำได้โดยการใช้ไดนาโมมิเตอร์วัดแรงตัดที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งแรงที่ได้สามารถแบ่งออกเป็น 3 แรง ได้แก่ แรงตัดในแนวรัศมี (Radius force,  $F_R$  หรือ  $F_x$ ) แรงในทิศขนานกับการป้อนตัด หรือแรงป้อน

ตัด (Feed force,  $F_f$  หรือ  $F_y$ ) และแรงในทิศทางกับทิศของความเร็วตัด หรือแรงตัดหลัก (Main force,  $F_c$  หรือ  $F_z$ )

สัญญาณแรงตัดที่ได้จากระบบการกลึงนี้ สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ติดตามสถานะกระบวนการผลิต หรือควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ในระหว่างการกลึงได้ ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา [8-10] ได้มีการประยุกต์ใช้สัญญาณแรงตัดเพื่อใช้ในการติดตาม ควบคุม และสร้างแบบจำลองที่สามารถนำไปพยากรณ์ลักษณะของชิ้นงานในกระบวนการกลึงได้ เช่น ความคลาดเคลื่อนของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความกลม ความขรุขระผิว ความตรง เป็นต้น แสดงให้เห็นว่าการใช้สัญญาณแรงตัดมาประยุกต์ใช้ควบคุมคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการกลึง สามารถใช้ตรวจสอบในขณะทำงานได้โดยไม่ต้องหยุดหรือรอให้เสร็จสิ้นกระบวนการผลิตก่อน ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากกับภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากกระบวนการผลิตในปัจจุบันเป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง จากแนวคิดพัฒนาการตรวจติดตามคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการผลิตด้วยการใช้เซนเซอร์ตรวจวัดสัญญาณ จึงได้เสนอแนวคิดการทำวิจัยดังรูปที่ 1.2 โดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ตรวจวัดแรงที่เกิดขึ้นขณะตัด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดที่เกิดกับความตรงและความกลมชิ้นงาน

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ของแรงขณะตัดที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานรูปทรงกระบอกในกระบวนการกลึง จากการตรวจสอบความกลมและความตรงจะพบว่า แอมพลิจูดแรงตัดรัศมี ( $F_x$ ) มีทิศทางเดียวกับการตรวจสอบความกลมและเป็นแรงที่ส่งผลต่อรูปร่างความกลมชิ้นงาน ส่วนแรงป้อนตัด ( $F_y$ ) เป็นแรงที่ส่งผลต่อรูปร่างชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับการวัดความตรงและความกลม ซึ่งเมื่อวัดความตรงและความกลมของชิ้นงานนั้นพบว่ามีความโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือในชิ้นงานที่มีค่าความตรงที่ดีหรือมีค่าความตรงเบี่ยงศูนย์ต่ำ ชิ้นงานนั้นจะมีค่าความกลมที่ดีหรือมีค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่ำด้วย



รูปที่ 1.2 แนวคิดในการทำวิจัย

### 1.1.5 ที่มาของงานวิจัย

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดในกระบวนการกลึงกับเงื่อนไขการตัดต่างๆ ได้แก่ สัญญาณแรงตัด ความเร็วตัด ความลึกตัด อัตราป้อนตัด มุมคายเศษโลหะ และรัศมีจุมกมีด เป็นต้น ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานในกระบวนการกลึง[11-15] งานวิจัยที่ศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงตัดกับความตรงโดยนำสัญญาณแรงตัดพลวัตมาทำการแปลงค่าจากโดเมนเวลาให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) จากนั้นหาสัญญาณที่มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดกับค่าความตรง แล้วนำสัญญาณที่มีความสัมพันธ์กันไปใช้สร้างสมการจำลองความตรงขณะตัด พบว่าแรงตัดพลวัตมีความสัมพันธ์กับความตรงและสามารถนำค่ามาวิเคราะห์หาสมการทำนายความตรงได้[8] และยังมีงานวิจัยที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดกับความกลม โดยใช้อัตราค่าส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัตมาใช้สร้างสมการทำนายความกลมชิ้นงานขณะตัด พบว่าแรงตัดพลวัตกับความกลมนั้นมีความสัมพันธ์กันและสามารถนำไปใช้สร้างสมการทำนายความกลมของชิ้นงานขณะตัดได้[9] งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นมีข้อจำกัดคือในการนำค่าแรงตัดพลวัตมาใช้วิเคราะห์สร้างสมการ ไม่ได้ทำการแยกสัญญาณแตกหักของเศษโลหะและสัญญาณรบกวนอื่นออกจากสัญญาณของแรงตัดก่อน ส่งผลให้สมการที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

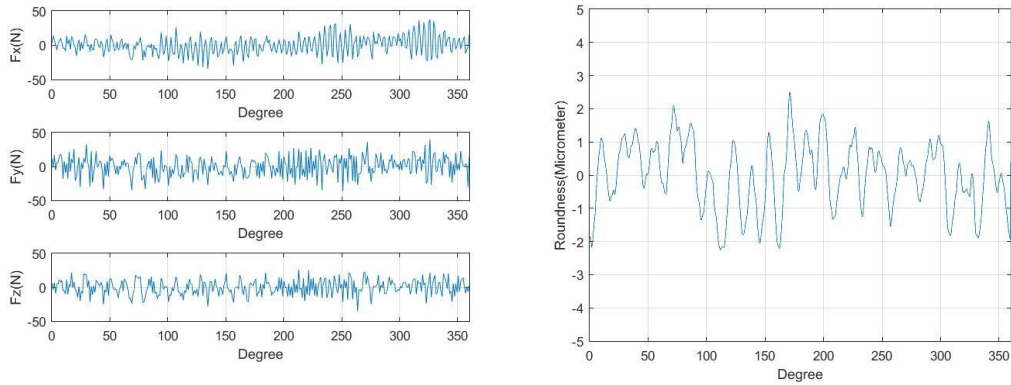
ผลการวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในกระบวนการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักโดยมีเงื่อนไขการตัดดังนี้คือ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อวินาที อัตราการป้อน 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมีด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายโลหะ 11

จากรูปที่ 1.3 จะเห็นได้ว่าลักษณะการเกิดรูปคลื่นของแรงตัดพลวัตและความกลมนั้นมีลักษณะรูปคลื่นที่คล้ายคลึงและสอดคล้องกัน เมื่อทำการแปลงสัญญาณแรงตัดและความตรงจากโดเมนเวลาในรูปที่ 1.4 ให้อยู่ในโดเมนความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 สัญญาณเกิดความถี่ที่ใกล้เคียงกันคือที่ความถี่ 32 Hz ดังรูปที่ 1.5 ในส่วนของการแปลงข้อมูลแรงตัดโดยใช้วิธีเวฟเลททำการแยกย่อยสัญญาณออกเป็น 10 ระดับ จากรูปที่ 1.6 - 1.11 ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถแยกความถี่แรงตัดและความถี่อื่นๆที่ปะปนอยู่ออกจากกันได้ โดยความถี่ของความตรงจะอยู่ที่ระดับ 8

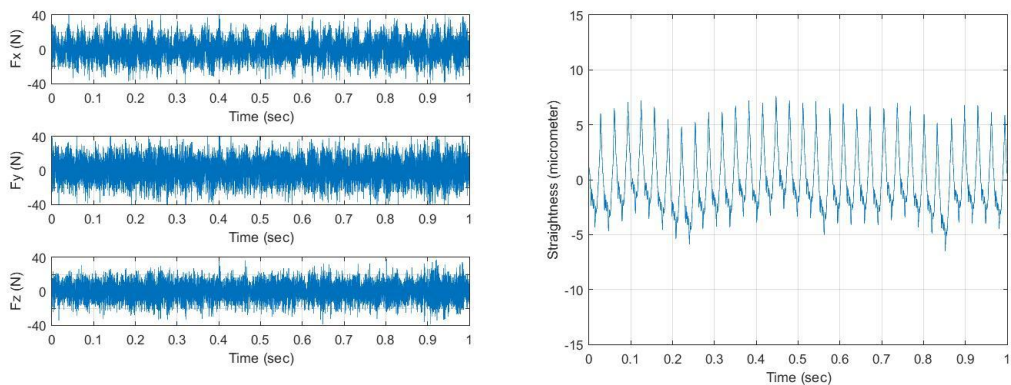
จากงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถนำแรงตัดพลวัตมาใช้สร้างสมการทำนายความกลมและความตรงได้ และจากข้อมูลผลการทดลองเบื้องต้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ซึ่งเสนอการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแรงตัดพลวัตกับความตรงและความกลมของชิ้นงาน โดยใช้



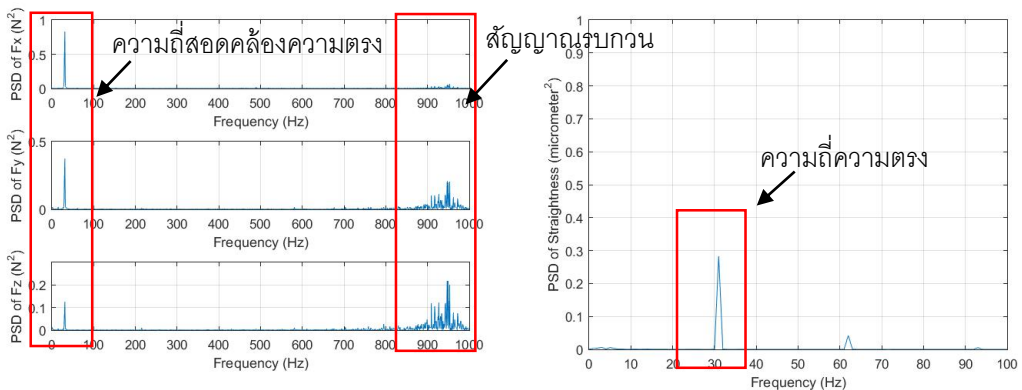
การวิเคราะห์เวฟเลต (Wavelet Transform) เพื่อแยกสัญญาณการแตกหักของเศษโลหะและสัญญาณรบกวนอื่นออกจากสัญญาณของแรงตัดก่อน แล้วจึงนำสัญญาณแรงตัดที่ระดับ 8 ไปใช้สร้างสมการทำนายความตรงและความกลมซึ่งจะทำให้ได้สมการมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นและยังสามารถทำนายได้ทั้งความตรงและความกลมของชิ้นงานขณะตัดได้อีกด้วย



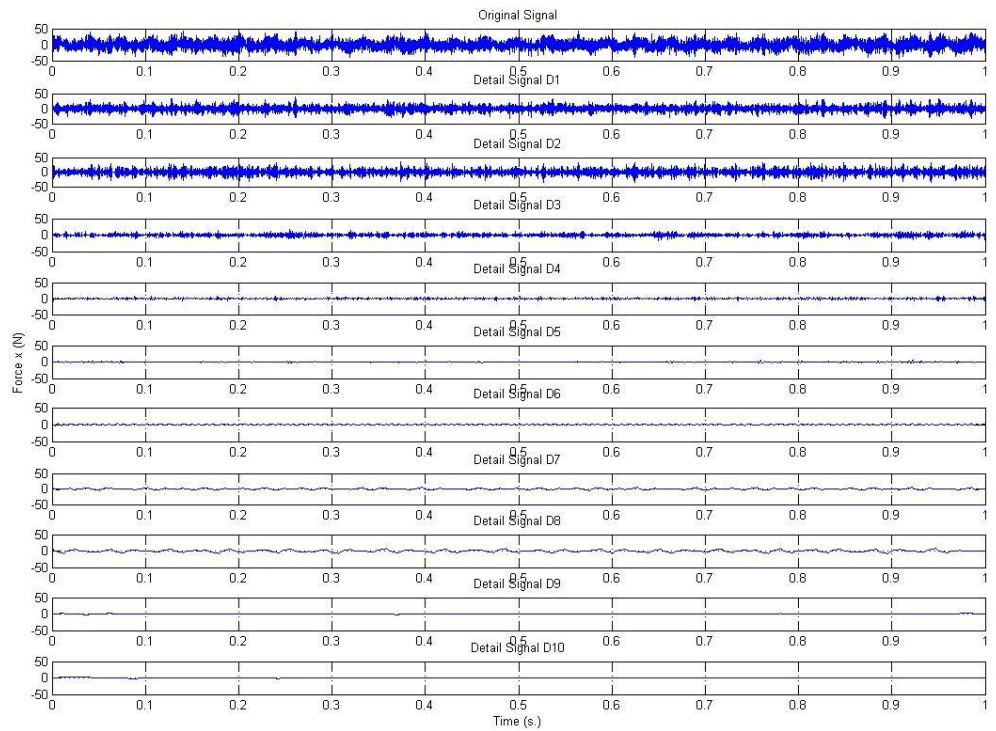
รูปที่ 1.3 ลักษณะสัญญาณแรงตัดพลวัตและความกลมในโดเมนเวลา



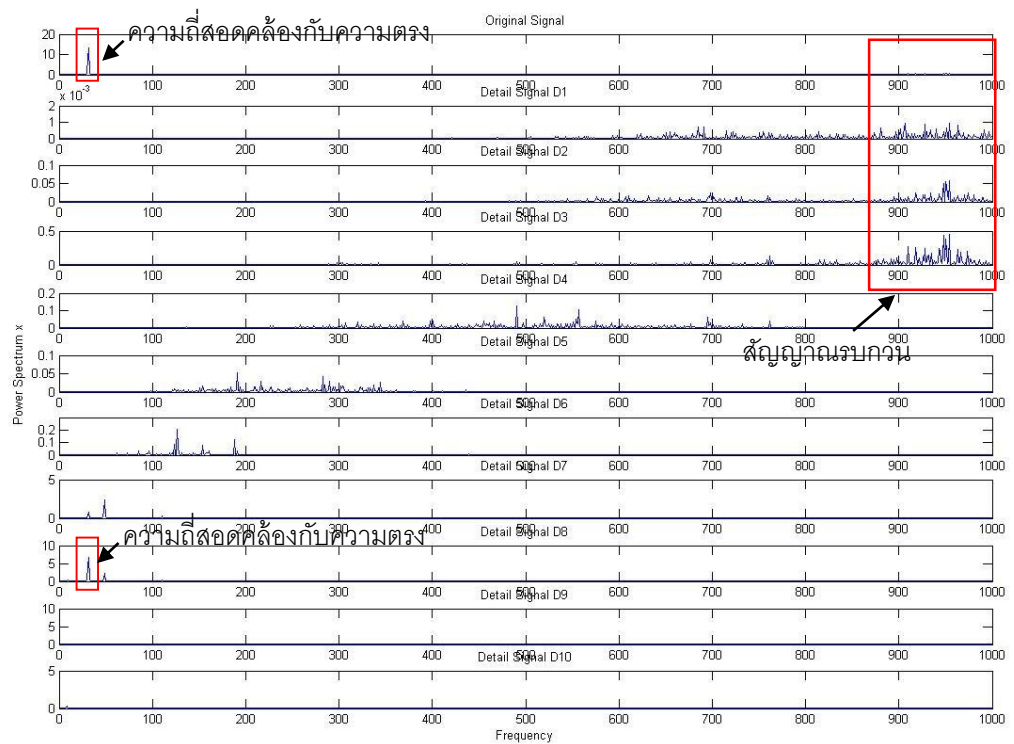
รูปที่ 1.4 ลักษณะสัญญาณแรงตัดพลวัตและความตรงในโดเมนเวลา



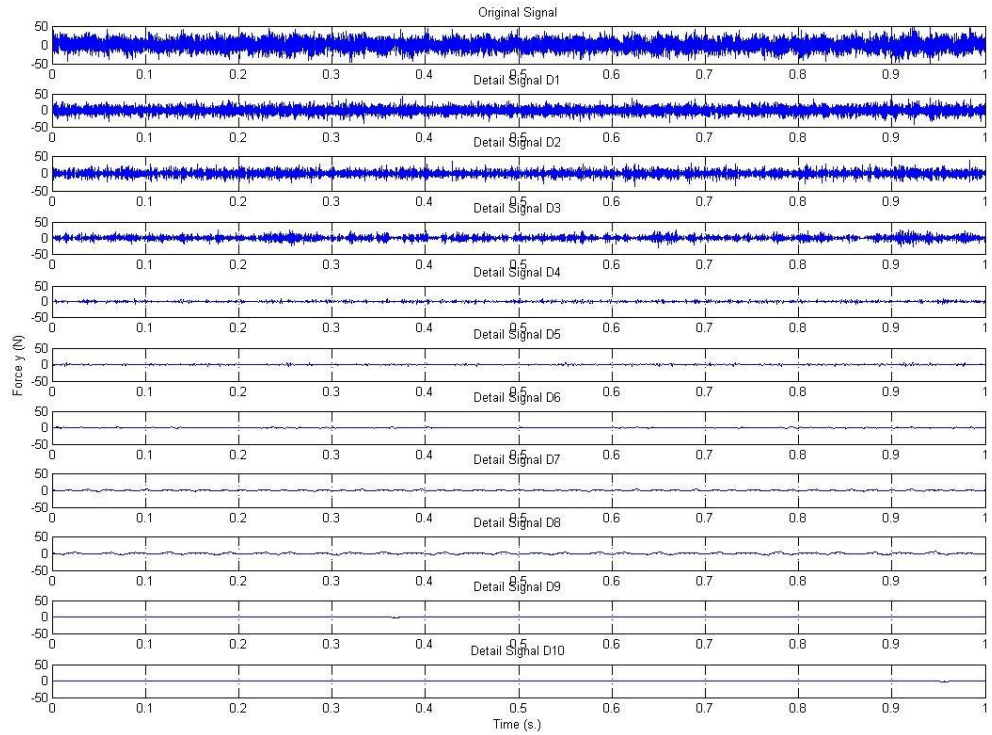
รูปที่ 1.5 ลักษณะสัญญาณแรงตัดพลวัตและความตรงในโดเมนความถี่



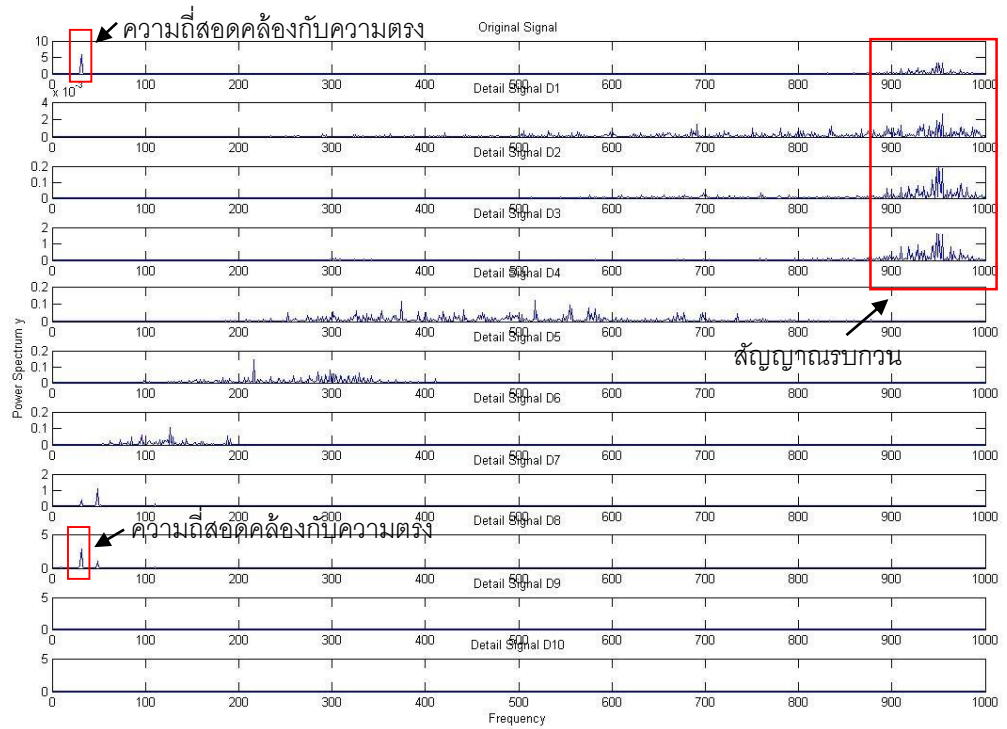
รูปที่ 1.6 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเลขในโดเมนเวลาของ Fx



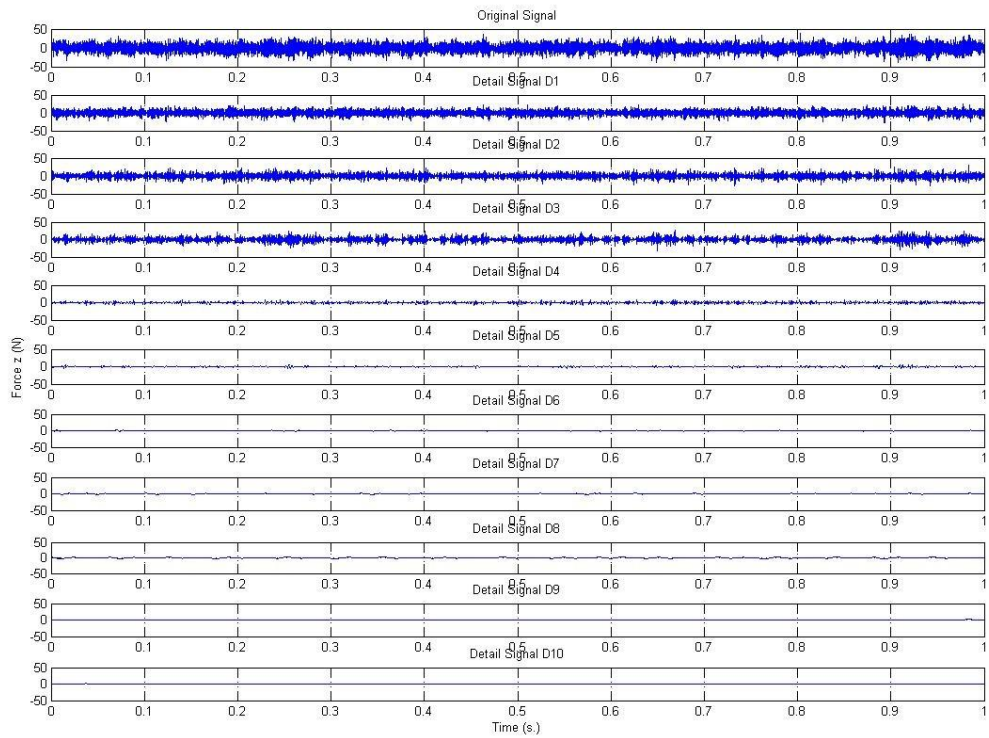
รูปที่ 1.7 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเลขในโดเมนความถี่ของ Fx



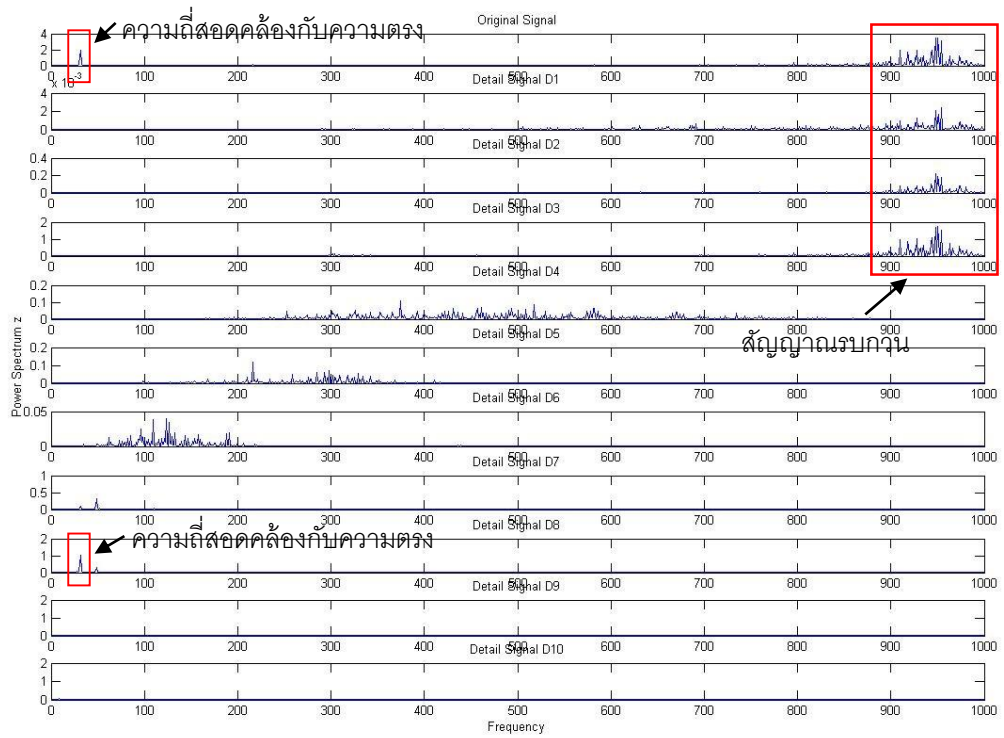
รูปที่ 1.8 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเลขในโดเมนเวลาของ  $F_y$



รูปที่ 1.9 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเลขในโดเมนความถี่ของ  $F_y$



รูปที่ 1.10 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเลทในโดเมนเวลาของ Fz



รูปที่ 1.11 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเลทในโดเมนความถี่ของ Fz

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความกลมของชิ้นงานกับแรงตัดภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆโดยใช้เทคนิคการแปลงเวฟเลท
2. พัฒนาสมการทำนายความตรงและความกลมของชิ้นงานขณะกลึง ไม่ว่าจะเศษโลหะที่เกิดขึ้นจะเป็นชนิดใดและเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนไปอย่างไรก็ตาม

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการกลึงปลอกโดยใช้การตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) ด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซี ยี่ห้อ Mazak รุ่น NEXUS 200MY/MSY
  2. ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กกล้าคาร์บอน S45S เส้นผ่านศูนย์กลาง 34 – 40 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร
  3. ด้ามมีดกลึง (Tool Holder) ที่ใช้ ได้แก่ ด้ามมีดเบอร์ PDJNR2525M-15 (ด้ามมีดลบ) และ ด้ามมีดเบอร์ SDJCR2525M-11 (ด้ามมีดบวก)
  4. เม็ดมีดแบบคาร์ไบด์เคลือบผิว (Coated Carbide)
  5. ปัจจัยและระดับปัจจัยสำหรับการทดลอง ดังตารางที่ 1.1
  6. วัดแรงตัดที่เกิดขึ้นขณะตัดชิ้นงานโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์วัดแรง 3 ทิศทาง (3-Component Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9121
- ตารางที่ 1.1 ปัจจัยและระดับปัจจัยสำหรับการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ
ความเร็วตัด	100, 150 และ 200 (เมตร/นาที)
อัตราป้อนตัด	0.15, 0.20 และ 0.25 (มิลลิเมตร/รอบ)
ความลึกตัด	0.4, 0.6 และ 0.8 (มิลลิเมตร)
รัศมีจมูกมีด	0.4 และ 0.8 (มิลลิเมตร)
มุมคายเศษโลหะ	-6 และ +11 (องศา)

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆ ที่มีความแม่นยำมากขึ้น เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความตรงและความกลมของชิ้นงานในขณะกลึง

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) พัฒนาเครื่องกลึงซีเอ็นซีอัจฉริยะ เพื่อรองรับระบบการผลิตอัจฉริยะในอนาคต
- 2) เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการตรวจติดตามความตรงและความกลมของผิวชิ้นงานในขณะตัดสำหรับกระบวนการตัดอื่น ๆ

### 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาการใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซี วิธีเก็บสัญญาณ รวมทั้งการแปลงข้อมูลที่ได้
- 2) ศึกษาข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ การเก็บข้อมูลสำหรับแรงตัด และวิธีการใช้งานพื้นฐานสำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซี
- 3) ออกแบบการทดลอง และกำหนดเงื่อนไขการตัด
- 4) ทำการทดลอง
- 5) วัดและเก็บค่าแรงตัดในขณะตัด และค่าความตรงของชิ้นงานหลังจากทำการตัดตามเงื่อนไขที่กำหนด
- 6) ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดกับความตรงและความกลมของชิ้นงานด้วยวิธีการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform)
- 7) วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้โดยใช้หลักการทางสถิติ
- 8) สรุปผลการดำเนินการวิจัย และข้อเสนอแนะ
- 9) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

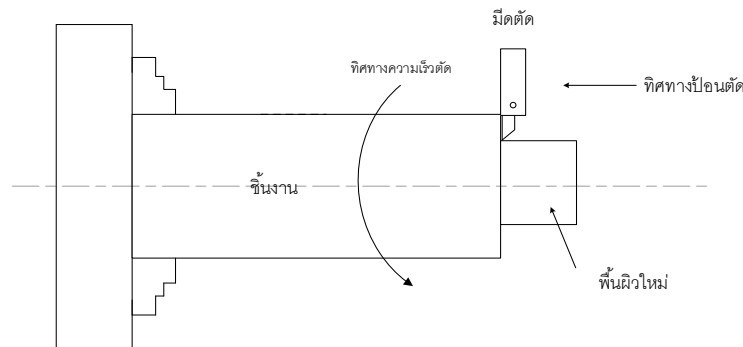
#### 2.1.1 กระบวนการตัดเฉือน (Machining Process)

กระบวนการตัดเฉือน (Machining Process) [7] หมายถึง การผลิตโดยใช้เครื่องมือตัด (Cutting tool) ในการกำจัดเนื้อวัสดุออกเพื่อให้มีขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการ โดยกระบวนการตัด ประกอบไปด้วย 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ การกลึง การเจาะ และการกัด ส่วนกระบวนการตัดอื่นๆประกอบด้วย การไส (Shaping) การไสยาว (Planing) การแทงขึ้นรูป (Broaching) และการเลื่อย (Sawing) รวมถึงกระบวนการใช้ผงขัด (Abrasive) ในการกำจัดเนื้อวัสดุออก เช่น การเจียรไน (Grinding)

นอกจากการแบ่งกระบวนการตัดตามชนิดของเครื่องมือตัดเพียงอย่างเดียวแล้ว ยังสามารถแบ่งตามลักษณะของกระบวนการตัด ได้แก่ กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) หมายถึง กระบวนการตัดที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ของวัสดุในแนวตั้งฉากกับคมตัด และกระบวนการตัดเฉียง (Oblique Cutting) หมายถึง กระบวนการตัดที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ของวัสดุทำมุมกับคมตัด

#### 2.1.2 กระบวนการกลึง (Turning)

กระบวนการกลึง[7, 8] เป็นกระบวนการตัดแบบต่อเนื่อง (Continuous Cut) โดยที่เม็ดตัดจะเคลื่อนที่ขนานไปกับแกนหมุนและตัดผิวด้านนอกออก ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานมีขนาดลดลง ตัวแปรทางเรขาคณิตที่สำคัญของกระบวนการกลึง คือ รัศมีจมูกมีดตัด (Nose radius) ด้านข้างมุมคาย (Side rake) ด้านหลังมุมคาย (Back rake) และด้านข้างของมุมตัด (Side cutting edge angle) เศษโลหะจะไหลออกมาที่หน้ามุมคาย (Rake face) ของมีดตัด



รูปที่ 2.1 กระบวนการกลึง

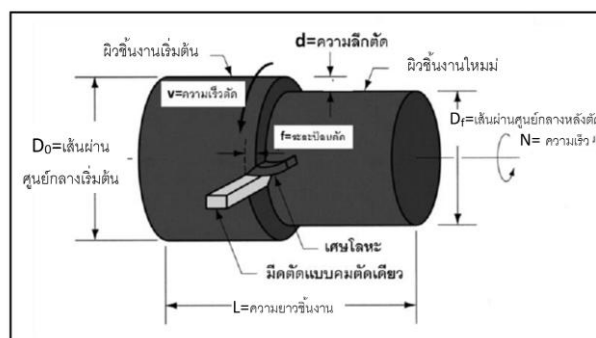
ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการกลึง ประกอบไปด้วยปัจจัยดังต่อไปนี้

- 1) อัตราการป้อนตัด (Feed rate) คือ อัตราเร็วของการเดินมีดในทิศทางตามแกนหมุนของชิ้นงาน หรือระยะที่ใบมีดกลึงเคลื่อนที่ไปได้ต่อการหมุนของชิ้นงาน 1 รอบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อรอบ (mm/r) หรือนิ้วต่อรอบ (in/r)
- 2) ความเร็วตัด (Cutting speed) คือ ความเร็วของผิวของชิ้นงานที่ต้องทำการตัดออกเคลื่อนที่ผ่านคมมีดตัดของมีดกลึง มีหน่วยเป็นเมตรต่อนาที (m/min) หรือฟุตต่อนาที (ft/min)
- 3) ความลึกตัด (Depth of cut) คือ ความหนาของชิ้นงานที่ต้องการตัดในแนวรัศมีและตั้งฉากกันแกนการหมุนของชิ้นงาน มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) หรือนิ้ว (in)

ซึ่งผลที่ได้จากการตัดก็คือ ขนาดของชิ้นงาน (Dimension) ความละเอียดของผิว (Surface roughness) เศษกลึง (Chip) และการสึกหรอของมีดกลึง (Tool wear)

### 2.1.3 เงื่อนไขการตัด (Cutting Conditions)

เงื่อนไขการตัด (Cutting Conditions) [6, 8, 16] ประกอบไปด้วย ความเร็วตัด (Cutting speed,  $v$ ) อัตราการป้อนตัด (Feed rate,  $f$ ) และความลึกตัด (Depth of cut,  $d$ ) ซึ่งความเร็วตัดจะเป็นผลรวมของเวกเตอร์ของความเร็วก่อเกิดจากการหมุน และการป้อน



รูปที่ 2.2 เงื่อนไขการตัดของกระบวนการกลึง[8]



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

โดยที่  $V_c$  = ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

$V$  = ความเร็วผิว (เมตร/นาที)

$\theta$  = มุมระหว่างความเร็วตัดและความเร็วผิวของชิ้นงาน (องศา)

แต่ความเร็วที่เกิดขึ้นจากการป้อนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความเร็วผิวของชิ้นงาน จึงทำให้  $\cos\theta \rightarrow 1$  จึงสามารถประมาณได้ว่า

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

และความสัมพันธ์ของความเร็วตัดและความเร็วรอบ (Spindle speed) แสดงได้ดังนี้

$$v = \frac{\pi D N_w}{1,000} \quad (2.3-3)$$

โดยที่  $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

$N_w$  = ความเร็วรอบของชิ้นงาน (รอบ/นาที)

อัตราการป้อนตัด เมื่อกำหนดให้มีดกึ่งมีมุมข้างคมตัด (Side cutting edge angle) เท่ากับ  $\theta_s$  และกำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราการป้อนตัด  $f$  สามารถคำนวณหาความหนาของเศษวัสดุก่อนตัด  $f_a$  และความกว้างของการตัด  $b$  หาได้จาก

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

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

โดยที่  $f$  = อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)

$d$  = ความลึกในการตัด (มิลลิเมตร)

ความเร็วป้อน (Feed speed) คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของมีดตัด คำนวณได้จาก

$$V_f = f N_w \quad (2.3-6)$$

โดยที่  $V_f$  = ความเร็วป้อน (มิลลิเมตร/นาที)

อัตราการกำจัดโลหะ (Metal removal rate) คือ ปริมาณของวัสดุที่ตัดต่อหน่วยเวลา สามารถคำนวณได้จาก

$$Z_w = 1,000 f d V \quad (2.3-7)$$

โดยที่  $Z_w$  = อัตราการกำจัดโลหะ (ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที)

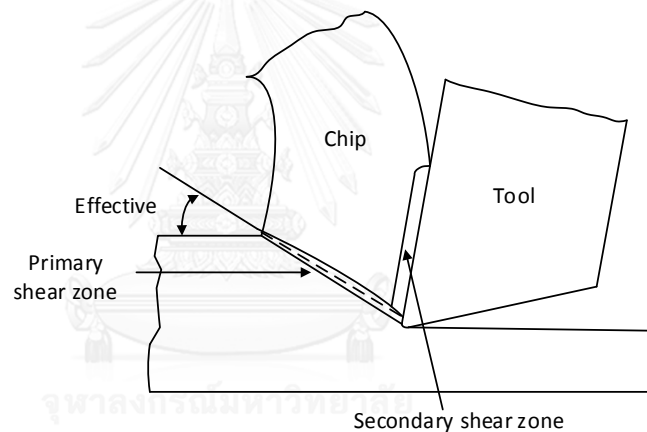
เวลาในการตัด (Cutting time) คือ เวลาที่เครื่องมือตัดใช้ในการเคลื่อนย้ายจากจุดตำแหน่งเริ่มต้น ไปยังตำแหน่งสุดท้ายของการตัด สามารถคำนวณได้จาก

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

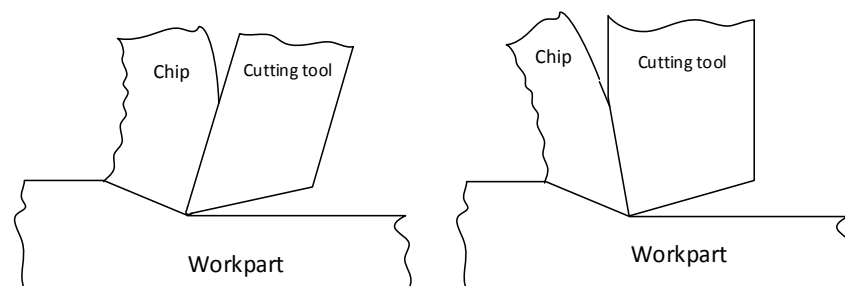
โดยที่  $T_m$  = เวลาในการตัด (นาทีก)  
 $L$  = ความยาวของส่วนที่ต้องการกลึง (มิลลิเมตร)

### 2.1.4 การเกิดเศษโลหะ[8]

ในกระบวนการตัด ชิ้นงานจะรับแรงกระทำจากเครื่องมือตัดผ่านคมตัด ซึ่งมีผลให้ชิ้นงานเกิดความเค้นขึ้นหลายลักษณะ ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 จุดที่ 1 เป็นบริเวณที่วัสดุอยู่ในสภาวะไม่มีความเค้น เมื่อเคลื่อนที่มาถึงจุดที่ 2 จึงรับความเค้นจากแรงตัด ความเค้นจึงเพิ่มสูงขึ้นจากการแปรรูปยืดหยุ่น (Elastic deformation region) จนเข้าไปถึงเขตการแปรรูปถาวร (Plastic deformation region) เมื่อมาถึงจุดที่ 3 ความเค้นจะเพิ่มสูงขึ้นจนเกิดการแปรรูปอย่างถาวร ซึ่งจะถือว่าเป็นเศษวัสดุเมื่อเคลื่อนที่ถึงจุดที่ 4 ซึ่งในจุดนี้เศษวัสดุจะมีความแข็งมากกว่าชิ้นงาน เนื่องจากเกิด Work hardening ที่จุดที่ 5 ถือว่าเศษวัสดุเคลื่อนที่พ้นเขตการแปรรูปออกมาแล้ว ความเค้นเริ่มลดลงและเมื่อมาถึงจุดที่ 6 เศษโลหะจะไม่มี ความเค้นจากคมตัด



รูปที่ 2.3 แบบจำลองการตัด



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะมุมคายุแบบ positive (ซ้าย) and negative (ขวา)

มีดตัดประกอบด้วยมุม คือ มุมคายุ (Rake angle,  $\alpha$ ) และมุมหลบ (Clearance angle) โดยมุมคายุจะเป็นตัวกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของเศษโลหะ ส่วนมุมหลบจะเป็นมุมระหว่าง

ผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงแล้วกับผิวหลบ (flank face) โดยระหว่างการตัด คมตัดของมีดกลึงจะถูกตั้งไว้ในตำแหน่งที่แน่นอนระยะต่ำกว่าพื้นผิวของชิ้นงาน รูปแบบเศษโลหะที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความลึกตัด ( $t_1$ ) ในขณะที่เศษโลหะก่อตัวตามระนาบเฉือน ความหนาเศษโลหะจะเพิ่มขึ้นเป็น  $t_2$  อัตราส่วนระหว่าง  $t_1$  กับ  $t_2$  เรียกว่า อัตราส่วนความหนาของเศษโลหะ (Chip thickness ratio,  $r$ ) ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ 2.4-1 และอัตราส่วนนี้จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ เนื่องจากความหนาของเศษโลหะหลังการตัดจะมากกว่าความหนาก่อนการตัดเสมอ

$$r = \frac{t_1}{t_2} \quad (2.4-1)$$

และความยาวของระนาบเฉือนสามารถคำนวณได้จาก

$$l = \frac{t_1}{\sin\phi} = \frac{t_2}{\cos(\phi-\alpha)} \quad (2.4-2)$$

โดยที่

- $l$  = ความยาวระนาบเฉือน (มิลลิเมตร)
- $t_1$  = การป้อน หรือความลึกในการตัดแล้วแต่กรณี (มิลลิเมตร)
- $t_2$  = ความหนาของเศษโลหะ (มิลลิเมตร)
- $\phi$  = มุมระนาบเฉือน (องศา)
- $\alpha$  = มุมคายเศษโลหะ (องศา)

จากสมการที่ 2.4-2 จะได้

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\sin\phi}{\cos(\phi-\alpha)} \quad (2.4-3)$$

จากความสัมพันธ์

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

แทนค่าลงในสมการที่ 2.4-3 จะได้

$$\tan\phi = \frac{\left(\frac{t_1}{t_2}\cos\alpha\right)}{1 - \left(\frac{t_1}{t_2}\right)\sin\alpha} \quad (2.4-4)$$

จากสมการที่ 2.4-1 แทนค่าลงในสมการ 2.4-4 จะได้

$$\tan\phi = \frac{r\alpha\cos\alpha}{1 - r\alpha\sin\alpha} \quad (2.4-5)$$

จากสมการที่ 2.4-5 มุมคายเศษวัสดุเป็นตัวแปรที่มีผลต่อมุมระนาบเฉือนในกรณีที่มุมคายเศษวัสดุมีค่ามากขึ้น จะมีผลให้ความหนาของเศษวัสดุมีค่าลดลง และมุมระนาบเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นค่าของมุมระนาบเฉือนสามารถใช้คำนวณค่าที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง คือ พื้นที่ระนาบเฉือนได้ดังนี้

$$A_s = \frac{t_1 b}{\sin\phi} \quad (2.4-6)$$

โดยที่  $A_s$  = พื้นที่ระนาบเฉือน (ตารางมิลลิเมตร)

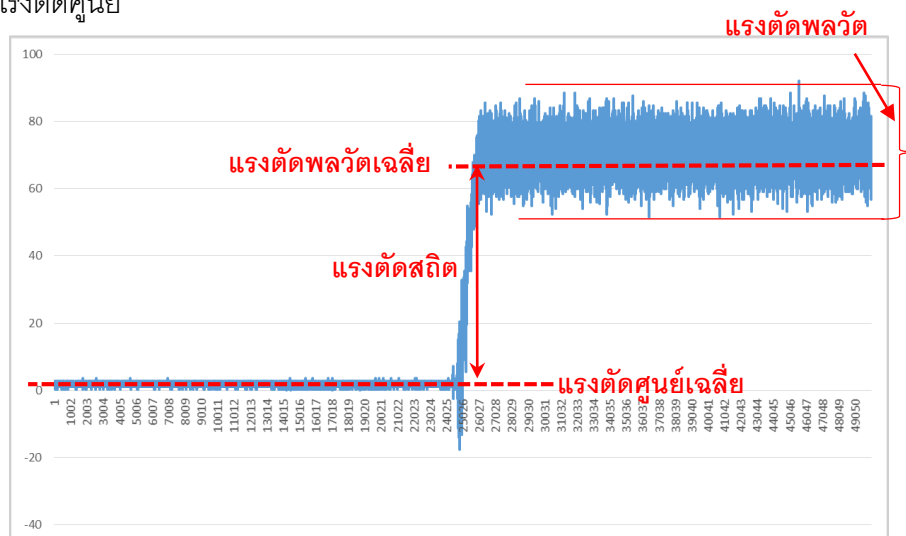
$b$  = ความกว้างของการตัด (มิลลิเมตร)

เศษโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดอาจมีลักษณะได้หลายรูปแบบ ซึ่งเศษโลหะที่เกิดขึ้นนี้มีความคม อาจเกิดการขีดสีที่ผิวของชิ้นงาน ทำให้คุณภาพผิวจากการตัดไม่ดี และเศษโลหะอาจเกาะติดอยู่ที่มุมของปลายมีด ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเศษโลหะ ได้แก่ วัสดุของชิ้นงาน เรขาคณิตของมีดตัด สารหล่อเย็น การเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ของเครื่องกลึง และเงื่อนไขการตัด แต่เศษโลหะที่เกิดขึ้นนี้สามารถบังคับให้เกิดการแตกหักได้โดย ตัวหักเศษโลหะ (Chip breaker) ซึ่งจะอยู่บนมุมคายของมีดตัด โดยวางตัวขวางกับทิศทางการไหลของเศษโลหะ เพื่อบังคับให้เศษโลหะเกิดการโค้งงอ เกิดความเค้นดึงในเศษโลหะและเกิดการแตกหัก[17, 18]

### 2.1.5 แรงในการตัดและสัญญาณแรงตัด

แรงในการตัดและสัญญาณแรงตัดแบ่งได้เป็น 3 แรงหลัก คือ แรงตัดที่เกิดในแนวรัศมี (แรงรัศมี,  $F_r$  หรือ  $F_x$ ) แรงในทิศทางขนานกับทิศของการป้อน (แรงป้อนตัด,  $F_f$  หรือ  $F_y$ ) และแรงในทิศทางขนานกับทิศของความเร็วตัด (แรงตัดหลัก,  $F_c$  หรือ  $F_z$ ) โดยในการวัดแรงตัดที่เกิดขึ้นจะใช้เครื่องไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) และใช้แอมพลิไฟเออร์ (Charge Amplifier) ในการขยายสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น โดยแรงตัดในเบื้องต้นจะอยู่ในรูปของสัญญาณแรงตัดซึ่งเป็นแบบอนาล็อกดังรูปที่ 2.6 ซึ่งประกอบไปด้วย 3 แรงที่สำคัญ คือ

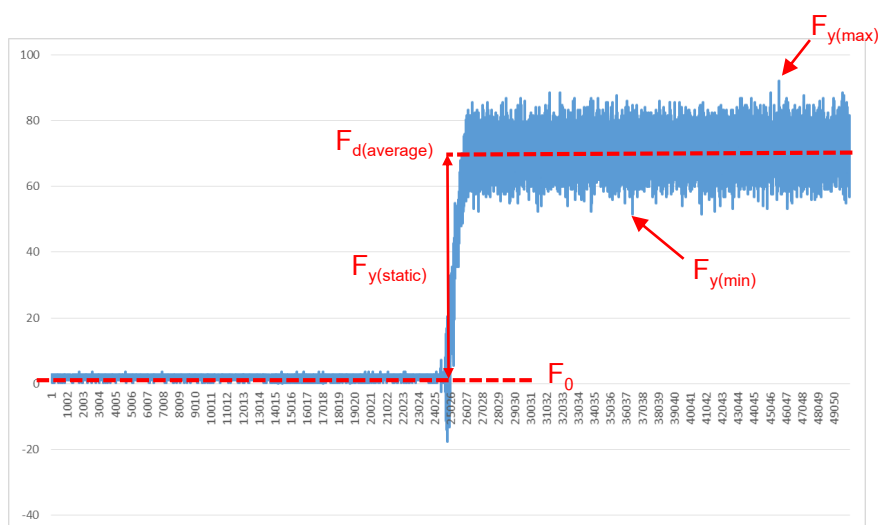
- แรงตัดศูนย์ คือ แรงที่ยังไม่เกิดการตัดจริง เกิดจากสัญญาณรบกวน (Noise) ของอุปกรณ์
- แรงตัดพลวัต (Dynamic force) คือ แรงที่เกิดขึ้นจริงขณะทำการตัด
- แรงตัดสถิต (Static force) คือ เกิดจากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงตัดพลวัตและค่าเฉลี่ยแรงตัดศูนย์



รูปที่ 2.5 สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น

## 2.1.6 การคำนวณแรงป้อนตัดสถิตและแรงป้อนตัดพลวัตสำหรับทำนายความตรง ชิ้นงานขณะตัด

การคำนวณค่าของแรงตัดจากโดเมนเวลา[9] จะพิจารณาที่ค่าแอมพลิจูดของแรงป้อนตัดพลวัตนั้นคือค่าแรงป้อนตัดพลวัตที่มากที่สุด ( $F_{y(max)}$ ) ลบด้วยค่าแรงป้อนตัดพลวัตที่น้อยที่สุด ( $F_{y(min)}$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับความตรงของชิ้นงานที่พิจารณาความสูงของความขรุขระผิวที่สูงที่สุด (Max) กับค่าน้อยที่สุด (min) ซึ่งวิธีการพิจารณาการคำนวณแรงตัดเพื่อหาอัตราส่วนแรงนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 การคำนวณแรงป้อนตัดสถิตและแรงป้อนตัดพลวัต

อย่างไรก็ตาม ขนาดของแรงตัดพลวัตอาจเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกัน ซึ่งกระทบต่อขนาดและผิวสำเร็จของชิ้นงาน ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างแรงป้อนตัดพลวัตและแรงป้อนตัดสถิต จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อประมาณค่าความตรงของชิ้นงาน โดยสันนิษฐานว่าอัตราส่วนแรงตัดสามารถคำนวณความตรงของชิ้นงานได้โดยไม่แปรเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขการตัด โดยการประยุกต์ใช้อัตราส่วนระหว่างแรงทั้งสอง ทำให้สามารถอธิบายความตรงของชิ้นงานได้แม้เงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไป

## 2.1.7 การคำนวณค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัตสำหรับการทำนาย ความกลมในขณะตัด

ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัด (Average Variances) [9] คำนวณโดยแบ่งแรงขณะตัดออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่ค่าแรงเป็นบวก และส่วนที่ค่าแรงเป็นลบ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของแรงค่าบวก ลบด้วยค่าเฉลี่ยของแรงค่าลบดังรูปที่ 2.8 สมการที่ได้ดังสมการที่ 2.7-1 ถึง 2.7-3 คือ

$$AVF_x = X_1 - X_2 \quad (2.7-1)$$

โดยที่

$$AVF_x = \text{ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงรัศมี (นิวตัน)}$$

$$X_1 = \text{ค่าเฉลี่ยของแรงรัศมีค่าบวก (นิวตัน)}$$

$$X_2 = \text{ค่าเฉลี่ยของแรงรัศมีค่าลบ (นิวตัน)}$$

$$AVF_y = Y_1 - Y_2 \quad (2.7-2)$$

โดยที่

$$AVF_y = \text{ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงป้อนตัด (นิวตัน)}$$

$$Y_1 = \text{ค่าเฉลี่ยของแรงป้อนตัดค่าบวก (นิวตัน)}$$

$$Y_2 = \text{ค่าเฉลี่ยของแรงป้อนตัดค่าลบ (นิวตัน)}$$

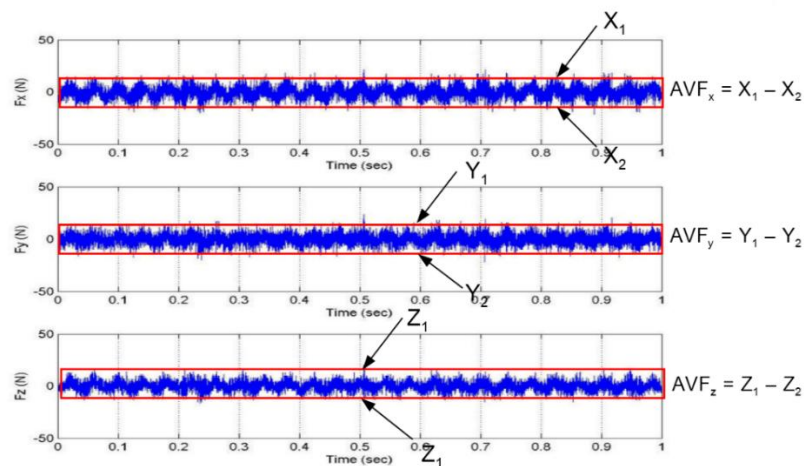
$$AVF_z = Z_1 - Z_2 \quad (2.7-3)$$

โดยที่

$$AVF_z = \text{ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดหลัก (นิวตัน)}$$

$$Z_1 = \text{ค่าเฉลี่ยของแรงตัดหลักค่าบวก (นิวตัน)}$$

$$Z_2 = \text{ค่าเฉลี่ยของแรงตัดหลักค่าลบ (นิวตัน)}$$

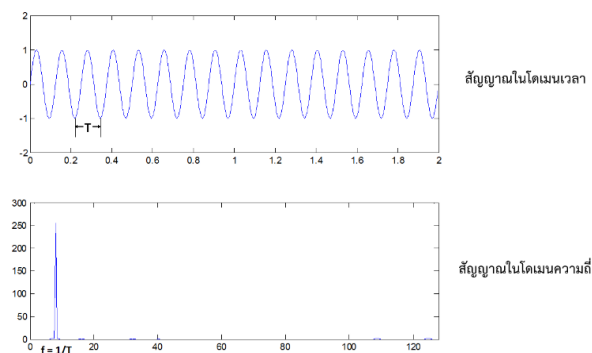


รูปที่ 2.7 การคำนวณค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัดพลวัต

### 2.1.8 การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform)

การวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analysis) เป็นสิ่งสำคัญในการประมวลผลของสัญญาณนั้น ซึ่งถ้ารู้ถึงองค์ประกอบต่างๆของสัญญาณว่าส่วนไหนสำคัญ ส่วนไหนสามารถตัดทิ้งได้โดยไม่ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากนัก ก็สามารถที่จะประมวลผลสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain)

ข้อมูลโดยทั่วไปที่อยู่ในโดเมนเวลา (Time domain) สามารถแสดงในโดเมนความถี่ (Frequency domain) ได้โดยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว โดยที่เมื่อนำข้อมูลสัญญาณมาพล็อตเทียบกับเวลาจะได้รูปแบบของข้อมูลที่อยู่ในลักษณะของคลื่นไซน์ (Sine wave) จะเห็นได้ว่าข้อมูลเกิดการแกว่งขึ้นลงเป็นรูปแบบซ้ำๆ โดยรูปแบบที่แกว่งขึ้นลงครบหนึ่งรอบใช้เวลา  $T$  ซึ่งเรียกว่าคาบ คาบมีความสัมพันธ์กับความถี่คือ  $f = 1/T$  คือ จำนวนของคาบคลื่นใน 1 วินาที โดยข้อมูลดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ในเชิงความถี่ได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาเป็นเมนความถี่

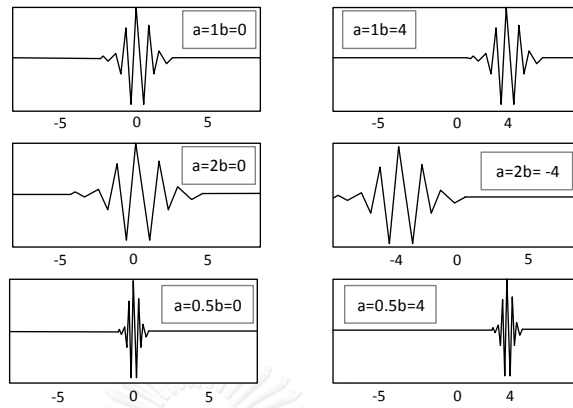
### 2.1.9 การวิเคราะห์สัญญาณแรงตึงพัลส์ด้วยการแปลงเวฟเลท

เงื่อนไขการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหัก แรงตึงจะมีค่าสูงจากอิทธิพลของแรงเศษโลหะแตกหัก การนำแรงตึงที่เกิดขึ้นมาคำนวณอาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำนายความตรงของชิ้นงาน ดังนั้น การแปลงสัญญาณแรงตึงพัลส์ด้วยการวิเคราะห์เวฟเลทจะทำให้สามารถใช้แรงตึงพัลส์อธิบายความตรงของชิ้นงานได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น ในกรณีที่แรงตึงเกิดจากเงื่อนไขที่ให้เศษโลหะเป็นแบบแตกหัก

การแปลงเวฟเลท (Wavelet Transform) เป็นการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปสู่โดเมนความถี่เช่นเดียวกับการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) และสามารถแปลงจากโดเมนความถี่ไปเป็นโดเมนเวลาได้ โดยการแปลงกลับ (Inverse Transform) หลักการของทั้ง 2 วิธีที่นี้มีคล้ายคลึงกัน คือฟังก์ชันสามารถแทนได้ด้วยผลรวมเชิงเส้นของสัมประสิทธิ์ (Coefficient) และฟังก์ชันพื้นฐาน (Basic function)

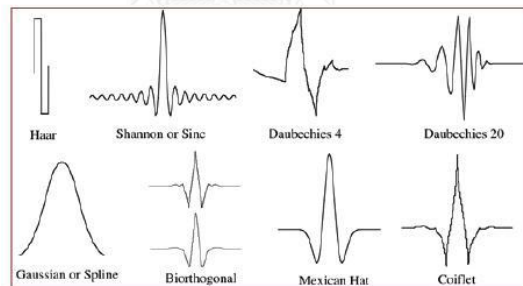
การแปลงเวฟเลทในส่วนฟังก์ชันพื้นฐานส่วนใหญ่เรียกว่าฟังก์ชันเวฟเลทแม่ (Mother Wavelet Function) มีคุณสมบัติในการการหดเข้า (Compressing) หรือขยายออก (Dilation) สเกลและเลื่อนตำแหน่งพารามิเตอร์ เวฟเลทที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า  $a$  และ  $b$  ต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งจากสมการจะพบว่ามีการปรับค่าเพื่อให้สัญญาณที่ได้หลังจากปรับสเกล

แล้วมีพลังงานเท่ากับเวฟเลทแม่ด้วยการคูณ  $\frac{1}{\sqrt{a}}$  การวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณด้วยกระบวนการแปลงเวฟเลท คือการแยกสัญญาณให้ออกมาดังรูปของเวฟเลทแม่ที่การปรับสเกลและตำแหน่งที่แตกต่างกันไป[9, 10]



รูปที่ 2.9 เวฟเลทที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า a และ b ต่าง ๆ กัน

เวฟเลทแบ่งออกเป็นลักษณะต่างๆเรียกว่า แฟมมิลี (Family) โดยมีรูปแบบคลื่นสัญญาณที่แตกต่างกันออกไป เช่น เวฟเลทแบบคอบเบชีส์, เวฟเลทแบบเมเยอร์ และเวฟเลทแบบฮาร์ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 ลักษณะของเวฟเลทในแฟมมิลีต่างๆ

ในการพิจารณาวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตจากตัวอย่างการทดลอง ให้พิจารณาจากลักษณะสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับลักษณะเวฟเลทในแฟมมิลีใด จากนั้นจึงเลือกใช้ฟังก์ชันดังกล่าวในการแปลงสัญญาณแรงตัดพลวัตนั้น

#### 2.1.10 ความตรง (Straightness)

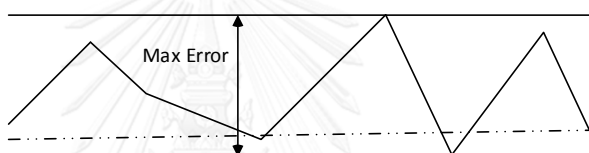
ความตรง (Straightness) [18-20] คือระยะระหว่างเส้นที่ขนานกันสองเส้นที่ครอบคลุมจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของเส้นที่พิจารณา ถ้ากำหนดให้แนวทางเดินในอุดมคติเป็นเส้นตรง การเกิดข้อผิดพลาดแนวตรง หมายถึง การเบี่ยงเบนใด ๆ จากเส้นตรงแนวอนเรียกว่า ความตรง



แนวนอน (Horizontal Straightness) และในแนวตั้งฉากเรียกว่า ความตรงแนวตั้งฉาก (Vertical Straightness)

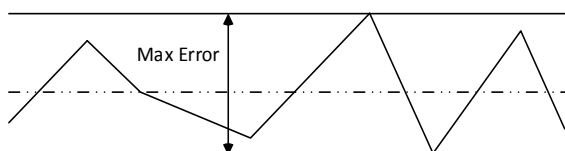
ความตรงมีผลต่อคุณสมบัติ และประสิทธิภาพในการทำงานของชิ้นงานนั้น ๆ เช่น ลูกสูบที่มีลักษณะบิดงอมากจะทำให้เกิดการเสียดสีขึ้นขณะใช้งาน ทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นจากส่วนพวงแกนล้อ หรือชิ้นส่วนประเภทงานสวม จำเป็นจะต้องมีค่าความแม่นยำสำหรับความตรงของชิ้นงานเป็นอย่างมาก เพื่อให้สามารถประกอบเข้ากับชิ้นงานอื่นได้ ซึ่งหากรูปร่างของชิ้นงานไม่สมบูรณ์ อาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการประกอบล่าช้า และประสิทธิภาพของชิ้นส่วนนั้น ๆ ลดลงอีกด้วย ในปัจจุบันความตรงที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบได้แก่

1. ความตรงแบบ Endpoints เกิดจากการลากเส้นตรง (เส้นประ) จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้ายดังรูปที่ 2.11 ค่าความตรงแบบ Endpoints คือค่าระยะระหว่างเส้นคู่ขนานที่ขนานกับเส้นประ โดยเส้นหนึ่งลากผ่านสุดสูงสุดและอีกเส้นหนึ่งลากผ่านจุดต่ำสุด

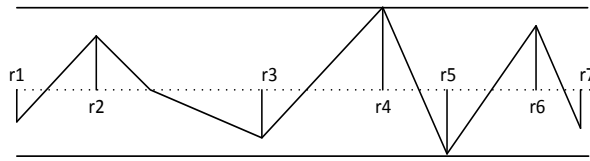


รูปที่ 2.11 ความตรงแบบ Endpoints

2. ความตรงแบบ Linear Regression เกิดจากการสร้างเส้นตรง (เส้นประ) ด้วยวิธีการ Least Square โดยการสร้างเส้นตรงให้เป็นตัวแทนของข้อมูลโดยการเฉลี่ย โดยตั้งสมมติฐานว่าเส้นตรง (เส้นประ) นั้นมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น  $(X$  แปรผันตรงกับ  $Y)$  จากรูปที่ 2.13-2.14 สามารถอธิบายแบบง่ายๆ ว่า ขนาดของ  $(r_1)^2 - (r_2)^2 + (r_3)^2 + (r_4)^2 - (r_5)^2 + (r_6)^2$  มีค่าน้อยที่สุด ถ้ากรณีค่าน้อยที่สุดมีค่าเป็นศูนย์จะได้ว่า  $(r_1)^2 - (r_2)^2 + (r_3)^2 + (r_4)^2 - (r_5)^2 + (r_6)^2 = 0$  หรือ  $(r_1)^2 + (r_3)^2 + (r_4)^2 + (r_6)^2 = (r_2)^2 + (r_5)^2$  ค่าความตรงแบบ Linear Regression คือค่าระยะระหว่างเส้นขนานที่ขนานกับเส้นประ โดยเส้นหนึ่งลากผ่านสุดสูงสุดและอีกเส้นหนึ่งลากผ่านจุดต่ำสุด

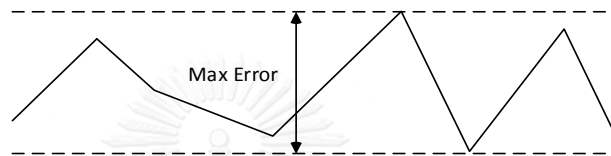


รูปที่ 2.12 ความตรงแบบ Linear Regression



รูปที่ 2.13 การสร้างเส้นตรงด้วยวิธีการ Least Square

3. ความตรงแบบ ISO 1101 หรือแบบ Minimum Zone เกิดจากการสร้างเส้นตรงคู่ขนาน (เส้นประ) โดยให้เส้นที่เราพิจารณานั้นอยู่ภายในเส้นคู่ขนานดังรูปที่ 2.15 ค่าความตรงแบบ ISO 1101 คือ ค่าระยะระหว่างเส้นขนานที่สั้นที่สุด



รูปที่ 2.14 ความตรงแบบ ISO 1101

### 2.1.11 ความตรงของพื้นผิวทรงกระบอก (Straightness of a cylindrical surface)

ความตรงถูกนำไปใช้กับพื้นผิวของรูปทรงกระบอก ซึ่งคล้ายกับพื้นผิวเรียบพร้อมกัน ข้อยกเว้นอีกอย่างหนึ่ง นับตั้งแต่พื้นผิวที่กลม องค์ประกอบของเส้นของพื้นผิวตรงข้ามจะต้องได้รับการพิจารณาเมื่อตรวจสอบความตรง พิกัดความเผื่อของความตรงแบบเต็มรูปแบบอาจไม่สามารถใช้ได้ สำหรับองค์ประกอบเหล่านี้ เนื่องจากเงื่อนไขเช่น การสูญเสียนอกจากนี้พิกัดความเผื่อของความตรงไม่ได้เป็นตัวเพิ่มพิกัดความเผื่อของขนาด[21, 22]

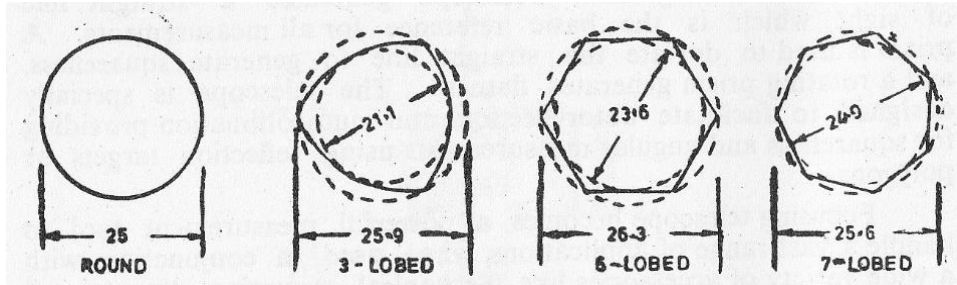
พิจารณาเส้นตรงบนผิวงานทรงกระบอกทั้ง 3 แบบ ที่พื้นผิวของทรงกระบอกในแนวตั้ง พบว่าสามารถเกิดลักษณะของเส้นตรงได้ดังต่อไปนี้

- เกิดจากเส้นตรงในแนวตั้ง (Vertical Generators are straight)
- เกิดจากรวงกลมเสมือนเป็นเส้นตรง (Generating circles are intrinsically straight)
- เกิดจากเกลียวขดเป็นเส้นตรง (Helixes are intrinsically straight)

### 2.1.12 ความกลม (Roundness)

ในการประกอบชิ้นส่วนวงกลมหรือทรงกระบอก หากนำชิ้นส่วนมาทำการวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 จุด ที่อยู่ตรงข้ามกันด้วยเครื่องมืออย่างเช่น ไมโครมิเตอร์ จะพบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละมุมที่ทำการวัดมีขนาดไม่เท่ากัน อันมีสาเหตุมาจากความกลมที่ไม่สมบูรณ์[4] นั้นแสดงให้เห็นว่าการควบคุมเพียงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานเพียงอย่าง

เดี๋ยวนั้นไม่เพียงพอ แต่ต้องพิจารณาความถูกต้องทางรูปทรงเรขาคณิตด้วย โดยการตรวจสอบข้อผิดพลาดโดยการหมุนชิ้นงานไปรอบๆ เพื่อหาความเบี่ยงเบนของชิ้นงาน



รูปที่ 2.15 ความเบี่ยงเบนของรูปทรงเลขาคณิต

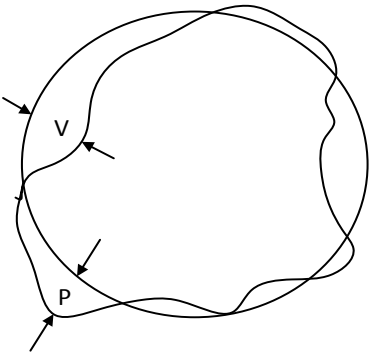
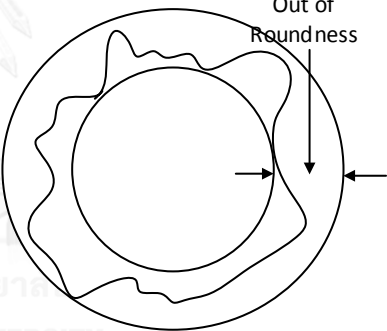
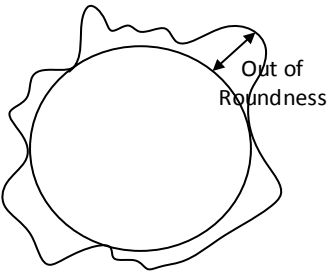
โดยความเบี่ยงเบนของความกลมที่เกิดขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เช่น การจับยึดชิ้นงาน ความเยื้องศูนย์ของเครื่องจักร สิ่งสกปรกหรือเศษโลหะที่ตกค้างอยู่บริเวณที่ยึดจับชิ้นงาน ความไม่สมดุลของเครื่องจักร ความร้อน การสั่นสะเทือน และโค้งของชิ้นงานเมื่อถูกเครื่องมือตัดกระทำขณะผลิต เป็นต้น ซึ่งความผิดปกติของความกลมที่สามารถพบได้โดยทั่วไป มีดังตารางที่ 2.1

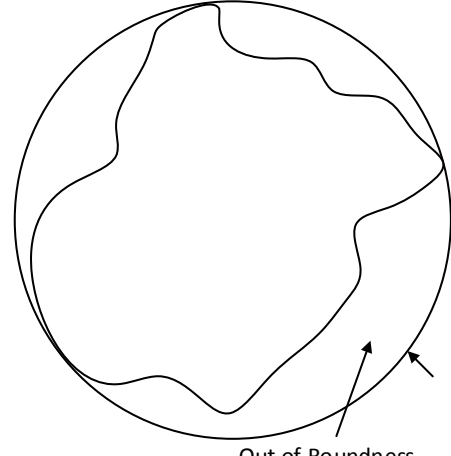
ตารางที่ 2.1 ลักษณะความผิดปกติของความกลม

ความผิดปกติที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการวัดแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน	ความผิดปกติที่รูปแบบชิ้นงานที่ไม่ได้รูปทรงวงกลม	ความผิดปกติที่ไม่มีรูปแบบเฉพาะเจาะจง

ในกระบวนการผลิตที่ต้องการความละเอียดสูง ความกลมของชิ้นงานส่งผลโดยตรงต่อการประกอบ ในชิ้นส่วนที่มีการหมุนความกลมส่งผลกระทบทำให้เกิดเสียง การสั่นสะเทือน และส่งผลกระทบโดยตรงต่อจุดศูนย์กลางในการหมุนของชิ้นส่วนของเครื่องจักร ในชิ้นส่วนที่ต้องมีการเคลื่อนที่ ความกลมส่งผลต่อการเสียดสี และการสึกหรอของชิ้นส่วนได้ การวัดค่าความกลมมี 4 วิธี แบ่งตามลักษณะการอ้างอิงจากวงกลมในอุดมคติที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.2

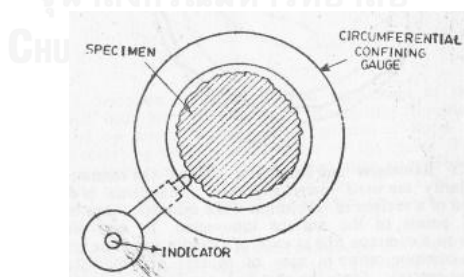
ตารางที่ 2.2 วิธีการวัดค่าความกลม

วิธีการวัดค่าความกลม	รูปแสดงลักษณะการวัด
<p>1) การหาความกลมด้วยวิธีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยสุด (Least square circle : LSC) คือ ผลรวมของกำลังสองของระยะรัศมี ที่ทำการวัดระยะห่างของมุมเท่าๆกัน แล้วทำให้เกิดวงกลมในอุดมคติที่ดีที่สุด จุดศูนย์กลางของวงกลมดังกล่าว จะเรียกว่า Least square center (L.S.C.) ความคลาดเคลื่อนของความกลมจะสามารถหาได้จากระยะห่างมากที่สุดของผิว (Peak : P) ที่อยู่นอกวงกลม ในอุดมคติที่เกิดขึ้น บวกกับระยะน้อยสุดของผิว (Valley : V) ที่อยู่ในวงกลมในอุดมคติที่เกิดขึ้น</p>	
<p>2) การหาความกลมด้วยวิธีการวงกลมพื้นที่น้อยสุด (Minimum zone circle : MZC) วิธีการนี้เป็นการหาวงกลม 2 วงที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน โดยประกอบด้วยวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด และเล็กที่สุดเมื่อเทียบจากผิวของชิ้นงาน และค่าความกลมที่ได้คือความแตกต่างระหว่างวงกลมใหญ่สุด และเล็กสุด</p>	
<p>3) การหาความกลมด้วยวิธีวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด (Maximum inscribed circle : MIC) วิธีการนี้เป็นการสร้างวงกลมที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถวาดภายในผิวของชิ้นงาน จุดศูนย์กลางและรัศมีสามารถหาได้โดยการลองผิดลองถูก (Trial and error) ค่าความกลมของวิธีการนี้คือระยะของผิวชิ้นงานที่สูงที่สุด (Peak : P) ผิวงกลม ซึ่งวิธีการนี้ ระยะที่น้อยสุดของผิว (Valley : V) มีค่าเท่ากับศูนย์นั่นเอง</p>	

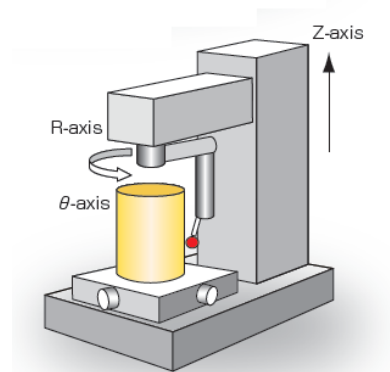
วิธีการวัดค่าความกลม	รูปแสดงลักษณะการวัด
<p>4) การวัดความกลมด้วยวิธีวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางเล็กสุด (Minimum circumscribed circle : MCC) วิธีการนี้เป็นการสร้างวงกลมที่เล็กที่สุดที่สามารถวาดภายในผิวของชิ้นงาน ค่าความกลมของวิธีการนี้คือระยะที่น้อยสุดของผิว (Valley : V) และระยะของผิวชิ้นงานที่สูงที่สุด (Peak : P) ของวิธีการนี้มีค่าเท่ากับศูนย์</p>	

#### วิธีการในการวัดความกลม[8, 23]

- 1) วิธีการวัดความกลมแบบ Diametral Method เป็นวิธีการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลายๆ จุด โดยทำการวัดจุดที่อยู่ตรงข้าม 180 องศา วิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพหรือค่าความกลมที่ไม่น่าเชื่อถือ
- 2) วิธีการวัดความกลมแบบ Circumferential Confining Gauge เป็นการหมุนเครื่องมือวัดรอบชิ้นงานที่ทำการวัด โดยระยะห่างระหว่างเครื่องมือวัดและชิ้นงานมีความสำคัญต่อความน่าเชื่อถือ แต่วิธีการนี้ไม่สามารถใช้ในการวัดความร่วมศูนย์ (Concentricity) ความเรียบ (Flatness) ได้

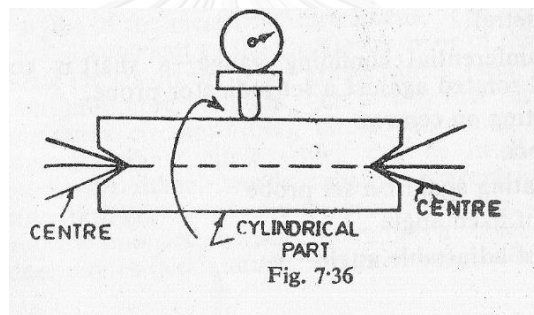


รูปที่ 2.16 การวัดความกลมแบบ Circumferential Confining Gauge

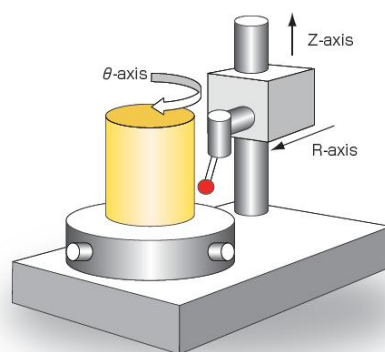


รูปที่ 2.17 ตัวอย่างเครื่องมือวัดค่าความกลม Detector rotating type[8]

- 3) Rotating on centers ตัวอย่างของชิ้นงานที่นิยมใช้วิธีนี้ในการวัด ได้แก่ เฟลา เป็นต้น เพื่อใช้ในการตรวจสอบค่าความกลมขณะหมุนอยู่บนศูนย์ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากความเยื้องศูนย์ของตัววัดชิ้นงาน ความได้ระนาบของชิ้นงาน

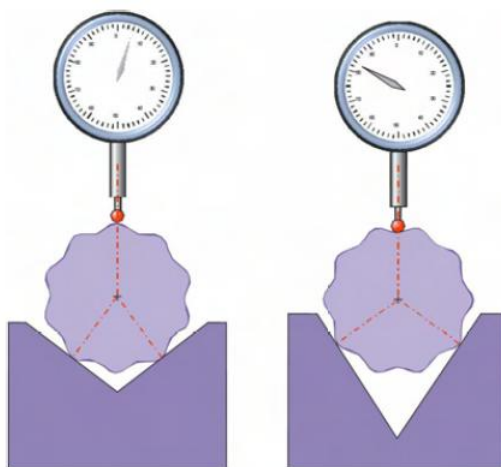


รูปที่ 2.18 การวัดชิ้นงานแบบ Rotating on centers



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างเครื่องวัดค่าความกลมแบบ Table rotating type[8]

- 4) Assessment using a V-block วิธีการนี้จะวาง V-block ไว้บนพื้นเรียบ หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ต้องการวัดมาวางบน V-block อีกทีหนึ่ง ยึดเครื่องมือวัดไว้กับที่ หลังจากนั้นหมุนชิ้นงานไปโดยรอบจนครบ 360 องศา โดยที่มุมของ V-block 60 องศา หรือ 90 องศา ให้ผลการวัดเช่นเดียวกัน[24]



รูปที่ 2.20 การวัดความกลมแบบโดยใช้ V-block[8]

### 2.1.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ในกรณีที่ต้องการศึกษาค่าเฉลี่ยของประชากร 2 ชุด แต่ต้องการทดลองเพียงครั้งเดียว สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) โดยอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนอง หรือคุณลักษณะทางคุณภาพ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

- 1) ความแตกต่างที่สามารถอธิบายได้ (Explained Variation) คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงในการออกแบบการทดลองจากวิธีการปฏิบัติหรือปัจจัย บางครั้งเรียกว่า ความแตกต่างระหว่างกลุ่ม (Between group variation)
- 2) ความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้ (Unexplained Variation) คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถอธิบายได้ เนื่องจากขาดความรู้ ซึ่งบางครั้งเกิดจากผู้ศึกษา ทราบถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลอง ซึ่งในการวิเคราะห์ความแปรปรวนกล่าวถึงในรูปความผิดพลาดที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ (Error residual) หากผู้ทำการทดลองมีความรู้ความสามารถมากขึ้น ความผิดพลาดในส่วนนี้จะลดลง

### 2.1.14 การวิเคราะห์ความถดถอย (Multiple Regression)

#### รูปแบบสมการความถดถอยเชิงพหุคูณ

การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Regression Analysis)[25] เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปกับตัวแปรตาม 1 ตัว การวิเคราะห์นั้นจะต้องหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation Coefficient) เพื่อให้ทราบว่าตัวแปรอิสระกับตัวแปรมีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณจะต้องหา

สมการถดถอย เพื่อใช้ในการพยากรณ์ตัวแปรตาม (Y) รวมทั้งหาค่าสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่เป็นไปได้ สูงสุดระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม รูปแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ ที่มีตัวแปรถดถอย k ตัว มีรูปแบบดังสมการที่ 2.12-1

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_x x_x + e \quad (2.12-1)$$

พารามิเตอร์  $\beta_j, j = 0, 1, \dots, k$  ถูกเรียกว่าสัมประสิทธิ์การถดถอย แบบจำลองนี้ แสดงระนาบแบบเกิน (Hyper plane) ที่มีมิติ k ของตัวแปรถดถอย  $x_j$  พารามิเตอร์  $\beta_j$  แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตาม y ต่อหนึ่งหน่วยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดกับ  $x_j$  เมื่อตัวแปรอิสระที่เหลือ  $x_i (i \neq j)$  มีค่าคงตัว

#### สมมติฐานหรือเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ

- 1) ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ
- 2) ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์ นั่นคือ  $E(e) = 0$
- 3) ค่าความแปรปรวนความคลาดเคลื่อนเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า  $v(e) = \sigma_e^2$
- 4)  $e_i$  และ  $e_j$  เป็นอิสระต่อกัน ; ( $i \neq j$ ) นั่นคือ covariance ( $e_i, e_j$ ) = 0

#### 2.1.15 การวิเคราะห์ผล

##### การใช้ P-Value ทดสอบสมมติฐาน

วิธีหนึ่งในการสรุปผลการทดสอบสมมติฐาน คือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธ ที่ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) ที่กำหนดหรือไม่ โดย P-Value จะแสดงถึงค่าที่จะใช้ในการปฏิเสธ  $H_0$  และผู้ตัดสินใจสามารถสรุปผลการทดลองที่ระดับนัยสำคัญอื่นๆได้

โดยปกติเมื่อสมมติฐานหลัก  $H_0$  ถูกปฏิเสธ เราจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็น  $\alpha$  ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ เมื่อรู้ค่า P-Value แล้ว ผู้ทดลองก็จะสามารถทราบว่าข้อมูลมีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

##### การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: $R^2$ )

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอยหรือตัวแปรอิสระในสมการว่า สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าตอบสนองหรือตัวแปรตาม ได้ในสัดส่วนเท่าใด ยิ่งมีค่ามาก ก็แสดงว่าสมการมีความเหมาะสมในการใช้อธิบายตัวแปรตามมาก แต่ในทางปฏิบัตินิยมใช้ค่าที่ทำการปรับค่าแล้ว ( $R_{adj}^2$ ) แทน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจมีความไวในการเปลี่ยนแปลงของจำนวนตัวแปรอิสระในสมการ [26]



## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เด็อนพรธณ จันทนา (2558)[8]

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแรงและพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยใช้แรงตัดที่ภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆ ประกอบไปด้วยปัจจัยในการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิต และมุมคายเศษโลหะ เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ไปพัฒนาสมการทำนายความกลมของชิ้นงาน โดยประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงตัดในกระบวนการกลึง เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ด้วย ใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไทเทเนียมคาร์บอนไนไตรด์ (TiCN) จากผลวิจัยแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต ( $AVF_x/AVF_y$ ) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด โดยพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้นั้นได้มากจากการเพิ่มความเร็วตัด ลดอัตราการป้อน ลดความลึกตัด เพิ่มขนาดรัศมีจุมกมิต และใช้มุมคายเศษโลหะที่มีค่า สมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้ตั้งสมการที่ 2.2-2 มีความแม่นยำเท่ากับ 95.43%

$$R_0 = e^{2.35} \cdot V^{-0.0935} \cdot f^{0.163} \cdot D^{0.0681} \cdot R_n^{-0.0494} \cdot e^{-0.00393\gamma} \cdot \left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)^{0.296} \quad (2.2-2)$$

ธรรรัตน์ ชาญสูงเนิน (2558)[9]

ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงซีเอ็นซี โดยใช้ไดนาโมมิเตอร์วัดแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดและความตรงของชิ้นงาน ภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิต และมุมคายเศษโลหะ

จากการทดลองแสดงพบว่าความตรงของชิ้นงานมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อใช้ ความเร็วตัด รัศมีจุมกมิต และมุมคายเศษโลหะมากขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตและความตรงซึ่งได้จากการพิจารณาในโดเมนความถี่ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) พบว่าความถี่ของสัญญาณทั้งสองเกิดขึ้นที่ค่าเดียวกัน ดังนั้น อัตราส่วนแรงตัดจึงสามารถนำมาใช้ในการทำนายความตรงของชิ้นงานได้ในขณะตัดแม้เงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนไป

อัตราส่วนแรงตัดถูกนำมาใช้เพื่อทำนายความตรงของชิ้นงานในระหว่างกระบวนการกลึงในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถดถอยพหุคูณของแบบจำลองที่ใช้ในการพยากรณ์ความตรงของชิ้นงานในขณะตัด ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองพบว่าแบบจำลองสามารถพยากรณ์ค่าความตรงได้อย่างแม่นยำภายใน  $\pm 10\%$  ของค่าความตรงที่วัดได้ โดยค่าความแม่นยำการทำนายความตรงชิ้นงานของสมการที่ 2.2-1 เท่ากับ 91.85 %

$$S_t = 91.84 \cdot V^{-0.202} \cdot f^{0.53} \cdot D^{0.133} \cdot R_n^{-0.355} \cdot e^{-0.00672\gamma} \cdot \left( \frac{F_y(\max) - F_y(\min)}{F_y(s)} \right)^{0.493} \quad (2.2-1)$$

กันยกานต์ สมานมิตร (2013)[10]

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดกับอัตราส่วนแรงตัด พลวัตบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี เพื่อนำเสนอสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในระหว่างการกลึง เหล็กกล้าคาร์บอนด้วยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว จากงานวิจัยพบว่าความขรุขระผิวชิ้นงานและแรงตัดพลวัตจะแสดงความถี่ที่สัมพันธ์กันในโดเมนความถี่ พื้นที่ใต้กราฟของแรงป้อนตัดพลวัตต่อแรงตัดหลักถูกใช้เพื่อสร้างสมการทำนายความขรุขระผิวขณะตัดที่สามารถทำนายได้แม้เงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป

ฟังก์ชันเอกโปเนนเชียลถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัดซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีความขรุขระผิว โดยมีพารามิเตอร์ ได้แก่ ความเร็วตัด 100-260 เมตรต่อ นาที ความลึกตัด 0.2-0.8 มิลลิเมตร อัตราป้อนตัด 0.1-0.3 มิลลิเมตรต่อรอบ มุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา รัศมีจุมุมมีด 0.4-0.8 มิลลิเมตร และอัตราส่วนพื้นที่แรงตัดพลวัต จากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อสร้างสมการถดถอยพหุคูณ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ยมีค่าความแม่นยำ 91.89% และสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุดมีค่าความแม่นยำ 91.97%

W. Polini, U. Prisco (2003)[5]

ได้ศึกษาแบบจำลองแรงตัด (cutting force model) เพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าความผิดพลาดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานจากกระบวนการกลึง โดยเปรียบเทียบแบบจำลองซึ่งประกอบด้วย Kronenberg's model และ Amarego's model ผลที่ได้พบว่า Amarego's model ให้ผลที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าการทดลองมากที่สุด จึงสรุปว่า Amarego's model เหมาะสมที่จะนำมาพยากรณ์ค่าความผิดพลาดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานมากที่สุด

S. Tangitsitcharoen (2011)[14]

งานวิจัยนี้พิสูจน์ได้ว่าความขรุขระผิวของชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด และอัตราส่วนแรงตัดสถิต โดยใช้ไดนามิเตอร์ในการตรวจวัดแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดจริงและใช้สมการถดถอยพหุคูณเพื่อแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากงานวิจัยนี้พบว่า เมื่อความลึกตัดและอัตราป้อนตัดมากขึ้น ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการสั่นสะเทือนของมีดตัดเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วตัด รัศมีจุมกมิดและอัตราส่วนแรงตัดสูงขึ้นไป ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวจากสมการกับค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจริง พบว่าค่าความขรุขระผิวสูงสุดและความขรุขระผิวเฉลี่ยมีความแม่นยำอยู่ที่ 86.5% และ 87.3% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าสมการดังกล่าวมีความแม่นยำในระดับที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความไม่เป็นเส้นตรง (out-of-straightness) ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน เช่น อายุการใช้งานของชิ้นงาน การสึกหรอ รวมถึงประสิทธิภาพของการทำงานที่ด้อยลง และกล่าวถึงลักษณะของชิ้นงานที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น ชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีการระบุค่าความคลาดเคลื่อนในหน่วยไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) ดังนั้นความตรงจึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของชิ้นงาน

S. Tangjitsitcharoen (2012)[15]

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงตัดพลวัตกับความขรุขระผิวชิ้นงานที่เกิดขึ้นขณะตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยค่าความขรุขระผิวจะถูกแสดงในรูปสมการถดถอยพหุคูณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดของสัดส่วนแรงตัดพลวัต เ็ื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และรัศมีจุมกมิด ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% จากการทดลองโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ในการวัดแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นจริงในขณะตัด และการวัดค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจริงจากการตัด พบว่าค่าความถี่ทั้งสองมีความสอดคล้องใกล้เคียงกันในโดเมนความถี่ จึงนำค่าความสัมพันธ์ในโดเมนเวลามาวิเคราะห์โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูคำนวณพื้นที่แรงตัดพลวัตและสร้างแบบจำลองทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัด แบบจำลองที่ได้นี้มีค่าความแม่นยำ 90.3%

H. Saglam, F. Unsacar & Yaldiz[16]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและความขรุขระของผิวชิ้นงานบนเครื่องเจียรระโน (Grinding) กับพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการกัดชิ้นงาน โดยกำหนดพารามิเตอร์ ได้แก่ ความลึกตัด ความเร็วตัด และอัตราการป้อน และแรงสถิต (Static force) ที่เกิดขึ้นจริงในขณะตัดบนเครื่องเจียรระโนโดยใช้เซ็นเซอร์วัดแรงตัดวัดแรงที่แท้จริง โดยใช้ตารางแนวฉาก (Orthogonal arrays : OAs) เพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยหลายปัจจัย และใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของความกลม และความขรุขระของผิวที่พารามิเตอร์

ต่างๆ จากการทำการทดลองพบว่า การควบคุมความกลมและความขรุขระผิวของชิ้นงานนั้นควรทำการควบคุมที่ความเร็วตัด และความลึกตัด

Salah Hamed Ramadan Ali, Hassan Hassan Mohamad, Mohamed Kamal Bedewy[27]

งานวิจัยมีเป้าหมายในการนำเครื่องวัดจุดโคออร์ดิเนต (Coordinate Measurement Machines : CMM) ในการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของความกลม ความตรง และความร่วมศูนย์ในรูกระบอกสูบเครื่องยนต์ดีเซล ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างชิ้นงาน ที่ไม่ตรงกับการออกแบบและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการทำงานของเครื่องยนต์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงการวัดขนาด และรูปทรงเลขาคณิตด้วยเครื่องมือที่มีความแม่นยำ เพื่อตรวจสอบและติดตามความรุนแรงของการสึกหรอ จนทำให้เกิดการชำรุดในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ อันเนื่องมาจากการเสียดสีของรูปทรงเลขาคณิตของวงกลมในทิศทางตามขวาง และตามยาว

โดยการวัดความกลม ความตรง และความร่วมศูนย์ของชิ้นงานในระดับไมโครเมตร โดยใช้เครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำ ทำให้สามารถศึกษาการสึกหรอของชิ้นส่วนได้อย่างละเอียด เป็นแรงผลักดันเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนวัตกรรมเพื่อป้องกัน ลดความสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากแรงเสียดทาน และความสึกหรอในกระบอกสูบให้ลดลง เพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน และลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

Suleyman Yaldiz, Faruk Unsaçar (2005)[28]

ได้ศึกษาแรงตัดที่เกิดจากการตัดโลหะที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อการเกิดความร้อนในระหว่างกระบวนการ การสึกหรอมัดตัด คุณภาพผิวชิ้นงาน และความแม่นยำของรูปร่างชิ้นงาน ในการศึกษานี้ใช้ไดนาโมมิเตอร์สำหรับการกลึง ซึ่งสามารถวัดแรงตัดสถิต (static cutting force) และแรงตัดพลวัต (Dynamic cutting force) ได้ โดยใช้ Strain gauge และ Piezo-electric accelerometer ตามลำดับ นำสัญญาณแรงที่ถูกตรวจจับมาประมวลผลการใช้งานกับระบบการจับเก็บข้อมูล จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไดนาโมมิเตอร์สามารถใช้ในการวัดแรงตัดแบบสถิตและพลวัตได้ โดย Strain gauge ถูกเชื่อมต่อกับข้อมูลของระบบที่ประกอบด้วยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ไดนาโมมิเตอร์สามารถวัดองค์ประกอบแรงตัดได้ทั้ง 3 แกนที่ตั้งฉากกันในระหว่างที่ทำการตัด โดยวัดค่าเป็นข้อมูลเชิงตัวเลข และสามารถเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ ในกระบวนการกลึงผลลัพธ์ที่เหมาะสมจะได้ออกจากการวัดแรงตัด ซึ่งผลที่ได้รับจากการทดสอบเครื่องจักรที่การตัดที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าไดนาโมมิเตอร์สามารถเชื่อถือได้สำหรับการวัดแรงตัด

P. Venkataramaiah, K. DharmaReddy, P. Meramma (2014)[29]

ได้ทำการศึกษาอิทธิพลอัตราป้อนตัดและเรขาคณิตของมีดตัดต่อแรงตัดในระหว่างกระบวนการกลึงโดยใช้ Taguchi Method ในการทดลองกลึงชิ้นงานอลูมิเนียมด้วยมีดตัด HSS ที่มีองศาในทางเรขาคณิต และอัตราป้อนตัดที่แตกต่างกัน จากนั้นบันทึกผลตอบสนองของนั้นคือ แรงตัด ส่วน Fuzzy Rule ถูกนำมาพัฒนาเพื่อทำนายแรงตัดสำหรับค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จาก Taguchi method และการยืนยันผลการทดลองโดยนำ Fuzzy logic ทำนายค่าของตัวแปรที่ดีที่สุดที่ใช้ในการตัด และพบว่าค่าความผิดพลาดของการทำนายอยู่ที่ 4.56% และเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำอยู่ที่ 95.44 % ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA ถูกใช้ในการตรวจสอบ และพิสูจน์ได้ว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงป้อนตัด คือ มุมคายเศษโลหะ อัตราป้อนตัด และ แรงตัดหลัก และแรงในแนวรัศมี คือ มุมคายเศษโลหะ อัตราป้อนตัดและมุมของมีดตัด ตามลำดับ แรงตัดหลัก คือ อัตราป้อนตัด มุมของมีดตัด และมุมคายเศษโลหะตามลำดับ และสำหรับแรงในแนวรัศมี คือ มุมของมีดตัด มุมคายเศษโลหะและอัตราป้อนตัดตามลำดับ

T. Moriwaki, T. Shibasaka, T. Somkiat (2004)[30]

งานวิจัยนี้พัฒนาขึ้นเพื่อตรวจติดตามการสึกหรอของมีดตัดในกระบวนการกลึงสำหรับเครื่องซีเอ็นซี โดยการใช้สมการฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการตัดเฉพาะและอัตราส่วนป้อนตัด โดยค่าดัชนี  $a$  ในฟังก์ชันถูกกำหนดเป็นตัวชี้วัดการสึกหรอของมีดตัด มีค่าเทียบเท่ากับอัตราส่วนความต้านทานการตัดเฉพาะที่อัตราการป้อนตัดศูนย์และอนันต์ และได้ทำการแทรกคำสั่งตัดในกระบวนการตัดจริงเพื่อตรวจสอบหาขนาดความสึกหรอของมีดตัดจริง โดยเปลี่ยนอัตราการป้อนตัดในกระบวนการตัดปกติให้เป็นอัตราการป้อนตัดแบบขึ้นหรือลง ที่อัตราการป้อนตัดต่ำๆเพื่อวัดแรงตัด และใช้ไดนาโมมิเตอร์วัดแรงตัดในขณะกลึงชิ้นงาน เพื่อระบุอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านทานการตัดเฉพาะ จากผลการทดลองการประมาณการสึกหรอของมีดตัดในระหว่างกระบวนการตัดจริง ได้พิสูจน์ว่าดัชนี  $a$  เป็นตัวชี้วัดที่ดีในการประมาณขนาดของการสึกหรอของมีดตัด แม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะแตกต่างกันออกไป

S. Tangjitsitcharoen, P. Tangpornprasert, Ch. Virulsri, N.Rojanarowan (2011)[31]

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาระบบตรวจติดตาม ควบคุมตำแหน่งของเพลลาและแหวนในการประกอบชิ้นส่วนของมอเตอร์ฮาร์ดดิสค์ ด้วยพิกัดความคลาดเคลื่อน 2.5 m โดยการสร้างเครื่องตรวจจับความชันที่ถูกออกแบบและพัฒนาเพื่อตรวจวัดและหาอนุพันธ์ของแรงกดในขณะทำงาน โดยการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงเป็นตัวชี้วัดในการควบคุมการทำงานของเครื่องจักร และเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง โดยการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์วัดแรงเพื่อทำการ

ตรวจวัดแรงกดขณะทำการประกอบ ซึ่งเครื่องที่ได้รับการออกแบบพัฒนานี้สามารถช่วยลดปัญหาในการผลิตเพลาส่งได้

Guo Jianliang, Han Rongdi (2006) [32]

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของ follower rest ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของการกลิ้งในกระบวนการผลิตชิ้นงานแท่งแบบเรียวยาว (slender bar) มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชิ้นงานกลิ้งที่มีรูปร่างเป็นแท่งเรียวยาว เกิดการโก่งตัวหรือเสียรูปในกระบวนการกลิ้งกับเงื่อนไขการกลิ้งต่างๆ ต่อความผิดพลาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และพัฒนาแบบจำลองทำนายความผิดพลาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน ซึ่งแบบจำลองที่นำเสนอ ประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 3 อย่างคือ การพิจารณาทางเรขาคณิตของความผิดพลาดเส้นผ่านศูนย์กลาง แบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element model) ของการเสียรูปของชิ้นงาน และแบบจำลองทางสถิติของแรงตัด พบว่าค่าการพยากรณ์และค่าจากการวัดจริงเป็นที่ยอมรับได้ และยังพบว่าความผิดพลาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานแบบแท่งขึ้นอยู่กับที่ตั้ง follower rest ความลึกตัด และอัตราป้อนตัด ความเร็วตัดมีผลกระทบเพียงเล็กน้อย ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือ แบบจำลองไม่เหมาะกับชิ้นงานกลิ้งที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 20

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design) โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความกลมของชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและแรงตัดสถิต รวมถึงเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ เพื่อนำไปพัฒนาสมการเพื่อทำนายความตรงและความกลมของชิ้นงานในกระบวนการกลึง

#### 3.2 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตรงและความกลมของชิ้นงาน

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [5-13] ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของชิ้นงาน เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน ความตรง ความกลม ความเรียบผิว เป็นต้น ซึ่งก็คือเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ เช่น ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุกมีด และมุมคายเศษโลหะของมีดตัด ดังนั้นเงื่อนไขการตัดจึงถูกเลือกมาเพื่อพิจารณาหาความสัมพันธ์กับความตรงและความกลมของชิ้นงาน เพื่อนำไปพัฒนาสมการการทำนายความตรงและความกลมของชิ้นงานในกระบวนการกลึงโดยประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงป้อนตัด

##### 3.2.2 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

การกำหนดระดับของปัจจัย (Level) จะพิจารณาจากคู่มือการแนะนำของผู้ผลิตเครื่องมือตัด ประกอบกับพิจารณาให้เป็นเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องด้วย เพื่อให้ได้คุณภาพผิวของชิ้นงานที่ดี ซึ่งสามารถแบ่งเป็นระดับต่างๆ ได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงระดับปัจจัยของการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ
ความเร็วตัด	100, 150 และ 200 เมตร/นาที
อัตราป้อน	0.15, 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตร/รอบ
ความลึกตัด	0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิเมตร
รัศมีจุกมีด	0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร
มุมคายเศษโลหะ	-6 และ 11 องศา

- 1) ความเร็วตัด ทำการกำหนดระดับปัจจัยความเร็วตัดเป็น 3 ระดับ คือ 100 150 และ 200 เมตร/นาที การกำหนด 3 ระดับ เนื่องจากมีความเป็นไปได้ว่าความสัมพันธ์อาจไม่เป็นเชิงเส้นตรง นอกจากนี้ยังเป็นความเร็วตัดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม และเป็นความเร็วที่เหมาะสมตามคู่มือแนะนำของผู้ผลิตเครื่องมือตัด
- 2) อัตราการป้อนตัด เนื่องจากต้องการทราบแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าความสัมพันธ์อาจไม่เป็นเชิงเส้นตรง จึงทำการกำหนดระดับอัตราการป้อนตัดเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 0.15 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตร/รอบ
- 3) ความลึกตัด เนื่องจากต้องการทราบแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าความสัมพันธ์อาจไม่เป็นเชิงเส้นตรง จึงทำการกำหนดระดับปัจจัยของความลึกตัดเป็น 3 ระดับ คือ 0.4 0.6 และ 0.8 มิลลิเมตร ทั้งนี้ตามปกติแล้ว จะเลือกใช้ความลึกตัดที่น้อยเพื่อให้ได้ผิวที่ดี แต่หากน้อยเกินไปจะถูกอิทธิพลของรัศมีงูมูกมีดมาบดบัง

### 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ชิ้นงาน (Work piece material) เหล็กกล้าคาร์บอน S45C ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 30-40 มิลลิเมตร (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานในการทำวิจัยมีขนาดไม่เกิน 30-40 มิลลิเมตร และยาวไม่เกิน 300 มิลลิเมตร เนื่องจากข้อจำกัดของระยะเวลาการวัด และการติดตั้งชิ้นงานของเครื่องวัดความตรงและความกลม)
- 2) เม็ดมีด (Insert) แบบคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยสารเคลือบไทเทเนียมคาร์บอนไนไตรด์ (TiCN) ยี่ห้อ Kennametal
  - มูมคายเศษโลหะ -6 องศา คาร์ไบด์เคลือบผิว เกรด KC9110 ยี่ห้อKENNAMETAL
  - รหัสเม็ดมีด DNMG 150604 FN รัศมีงูมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร
  - รหัสเม็ดมีด DNMG 150608 FN รัศมีงูมูกมีด 0.8 มิลลิเมตร
  - มูมคายเศษโลหะ +11 องศา คาร์ไบด์เคลือบผิว เกรด CA5525 ยี่ห้อ KYOCERA
  - รหัสเม็ดมีด DCMT 11T304 HQ รัศมีงูมูกมีด 0.4 มิลลิเมตร
  - รหัสเม็ดมีด DCMT 11T308 HQ รัศมีงูมูกมีด 0.8 มิลลิเมตร
- 3) ด้ามมีดกลึง เบอร์ SDJCR2525M-11 และ PDJNR2525M-15
  - รหัสด้ามมีด PDJNR2525M-15 ยี่ห้อ KENNAMETAL
  - รหัสด้ามมีด SDJCR2525M-11 ยี่ห้อ KYOCERA
- 4) เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC turning machine) ยี่ห้อ Mazak รุ่น NEXUS 200MY/MSY

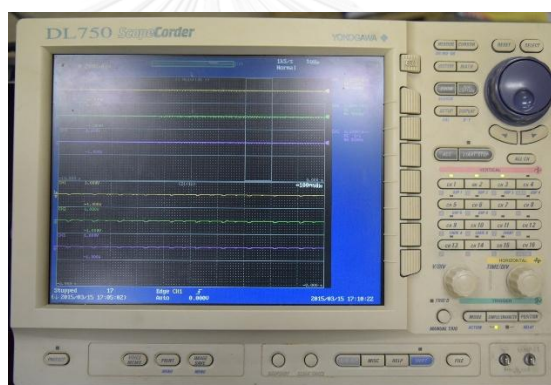


- 5) ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ยี่ห้อ Kister รุ่น 9121 สำหรับวัดแรงตัด  $F_x$ ,  $F_y$  และ  $F_z$  โดยมีค่าความไม่แน่นอนของการวัดแรงตัด  $F_x$ ,  $F_y$  และ  $F_z$  เท่ากับ 1.00, 1.20 และ 2.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)

- 6) ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL750 ใช้สำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการตัด



รูปที่ 3.2 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

- 7) เครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier)



รูปที่ 3.3 เครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier)

- 8) เครื่องวัดความขรุขระผิว (Roughness tester) ยี่ห้อ MITUTOYO รุ่น SJ400 ใช้สำหรับวัดค่าความตรงของชิ้นงาน ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความขรุขระผิว (Roughness tester)

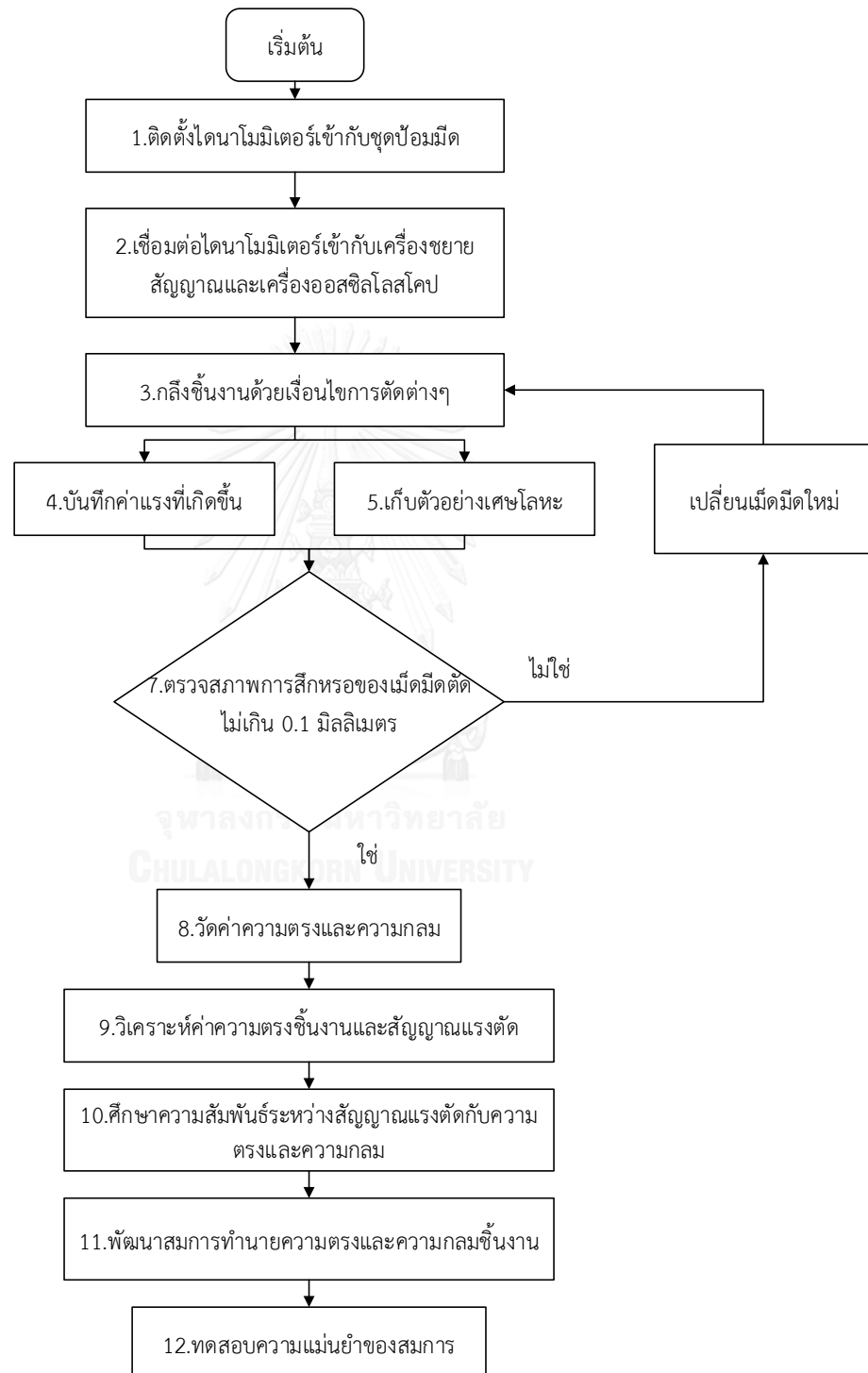
- 9) เครื่องวัดความกลม (Roundness Tester) ยี่ห้อ TOKYO SEIMITSU CO.,LTD รุ่น ROUND COM 43C ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความกลม (Roundness Tester)

### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นกระบวนการกลึงแบบแห้งโดยมีขั้นตอนการทดลองในแต่ละเงื่อนไขการตัด ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เข้ากับชุดปั๊มมีด จากนั้นต่อสายสัญญาณวัดแรงตัดเข้าเครื่องขยายสัญญาณ แล้วทำการต่อเครื่องขยายสัญญาณเข้ากับออสซิลโลสโคป เพื่อใช้แสดงผลและบันทึกค่าแรงตัดที่เกิดขึ้น
- 2) เตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการตัด โดยการกลึงผิวของชิ้นงานให้เสมอกัน เนื่องจากความสูงของผิวชิ้นงานที่ไม่เท่ากัน จะทำให้ความลึกตัดที่ใช้ในการทดลองคลาดเคลื่อน ส่งผลโดยตรงต่อแรงตัดที่เกิดขึ้น และควบคุมตำแหน่งของชิ้นงานให้ขนานกับทิศทางการตัด เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนของความกลมอันเนื่องมาจากการเยื้องศูนย์
- 3) ทำการกลึงชิ้นงานด้วยเงื่อนไขการตัดต่างๆ ตามตารางที่ 3.4
- 4) สัญญาณแรงตัดพลวัตที่วัดได้จากไดนาโมมิเตอร์ จะถูกขยายสัญญาณด้วยเครื่องขยายสัญญาณ และถูกกรองสัญญาณความถี่ที่ 5,000 เฮิรท์ออก โดยเก็บข้อมูลที่อัตรา 10,000 ค่าต่อวินาที
- 5) เก็บเศษโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง
- 6) ทำการตรวจสภาพการสึกหรอของเม็ดมีด โดยความลึกหรือที่ใช้จะต้องไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร
- 7) วัดค่าความตรงวัดค่าความตรงเบี่ยงศูนย์ของชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยใช้ความเร็วในการลากเข็มวัด 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาทีและใช้อัตราการสุ่มเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที โดยระยะที่ทำการวัดเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร
- 8) วัดค่าความกลมผิวชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความกลมผิวชิ้นงาน โดยใช้เงื่อนไขการวัดดังนี้คือ
  - Analysis item = Roundness
  - Measurement magnification=X2,000
  - Filter type=2RC filter
  - Measurement method=Manual
  - Speed=6 radius/min
  - Invalid angle=5.0 Degree
- 9) วิเคราะห์เงื่อนไขการตัด
- 10) พัฒนาสมการความตรงและความกลมของชิ้นงาน
- 11) ทำการทดสอบความแม่นยำสมการความตรงและความกลมที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดลอง

ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
1	200	0.25	0.6	0.8	-6
2	100	0.20	0.4	0.8	11
3	150	0.15	0.4	0.8	11
4	100	0.20	0.6	0.8	11
5	100	0.15	0.6	0.8	-6
6	100	0.20	0.8	0.8	-6
7	100	0.25	0.8	0.8	-6
8	150	0.20	0.4	0.8	11
9	150	0.15	0.8	0.4	-6
10	100	0.15	0.8	0.8	11
11	150	0.25	0.8	0.4	11
12	200	0.25	0.8	0.8	-6
13	150	0.25	0.8	0.8	-6
14	150	0.25	0.4	0.8	11
15	100	0.20	0.4	0.8	-6
16	150	0.25	0.8	0.4	-6
17	100	0.15	0.6	0.8	11
18	150	0.25	0.6	0.8	-6
19	100	0.25	0.6	0.4	-6
20	200	0.20	0.8	0.8	11
21	100	0.15	0.8	0.4	11
22	200	0.25	0.4	0.8	-6
23	150	0.15	0.6	0.8	-6
24	150	0.15	0.8	0.4	11
25	150	0.25	0.8	0.8	11

ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
26	150	0.25	0.4	0.4	-6
27	200	0.15	0.4	0.8	11
28	150	0.15	0.4	0.4	-6
29	150	0.20	0.6	0.4	11
30	200	0.25	0.4	0.4	-6
31	200	0.15	0.8	0.4	-6
32	100	0.25	0.4	0.4	11
33	200	0.20	0.6	0.4	11
34	100	0.15	0.4	0.4	11
35	200	0.15	0.6	0.4	11
36	100	0.20	0.8	0.4	11
37	200	0.15	0.8	0.4	11
38	100	0.20	0.4	0.4	-6
39	200	0.25	0.6	0.4	-6
40	200	0.15	0.8	0.8	11
41	200	0.15	0.4	0.4	11
42	200	0.25	0.4	0.8	11
43	100	0.20	0.6	0.4	-6
44	100	0.25	0.6	0.8	-6
45	150	0.20	0.4	0.4	11
46	150	0.15	0.8	0.8	11
47	100	0.20	0.6	0.4	11
48	100	0.25	0.4	0.8	11
49	150	0.25	0.4	0.4	11
50	200	0.20	0.6	0.8	11
51	100	0.15	0.8	0.8	-6

ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
52	150	0.20	0.6	0.8	11
53	200	0.20	0.4	0.4	11
54	150	0.15	0.6	0.8	11
55	200	0.15	0.6	0.8	11
56	100	0.15	0.8	0.4	-6
57	200	0.25	0.6	0.8	11
58	200	0.20	0.8	0.4	11
59	150	0.15	0.8	0.8	-6
60	100	0.25	0.4	0.4	-6
61	150	0.15	0.4	0.8	-6
62	200	0.15	0.4	0.4	-6
63	100	0.25	0.6	0.8	11
64	150	0.15	0.4	0.4	11
65	200	0.25	0.6	0.4	11
66	200	0.15	0.8	0.8	-6
67	200	0.15	0.6	0.8	-6
68	150	0.25	0.6	0.8	11
69	200	0.25	0.8	0.8	11
70	100	0.20	0.4	0.4	11
71	100	0.25	0.8	0.4	11
72	150	0.20	0.6	0.8	-6
73	200	0.20	0.4	0.4	-6
74	150	0.20	0.8	0.4	-6
75	200	0.20	0.6	0.8	-6
76	150	0.20	0.8	0.8	11
77	200	0.15	0.4	0.8	-6

ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
78	150	0.20	0.4	0.8	-6
79	200	0.25	0.8	0.4	-6
80	150	0.20	0.8	0.8	-6
81	200	0.20	0.8	0.4	-6
82	150	0.25	0.6	0.4	-6
83	200	0.20	0.4	0.8	11
84	100	0.15	0.4	0.8	11
85	100	0.20	0.8	0.8	11
86	150	0.15	0.6	0.4	11
87	150	0.15	0.6	0.4	-6
88	200	0.15	0.6	0.4	-6
89	150	0.20	0.6	0.4	-6
90	150	0.20	0.8	0.4	11
91	150	0.25	0.4	0.8	-6
92	150	0.20	0.4	0.4	-6
93	200	0.20	0.6	0.4	-6
94	100	0.25	0.8	0.4	-6
95	100	0.20	0.6	0.8	-6
96	200	0.20	0.8	0.8	-6
97	100	0.15	0.4	0.4	-6
98	200	0.20	0.4	0.8	-6
99	100	0.15	0.4	0.8	-6
100	100	0.20	0.8	0.4	-6
101	100	0.25	0.4	0.8	-6
102	150	0.25	0.6	0.4	11
103	100	0.15	0.6	0.4	-6



ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมูกมีด (มม.)	มุมคายเศษ โลหะ (องศา)
104	100	0.25	0.6	0.4	11
105	100	0.25	0.8	0.8	11
106	200	0.25	0.4	0.4	11
107	200	0.25	0.8	0.4	11
108	100	0.15	0.6	0.4	11

### 3.5 การพัฒนาสมการทำนายความตรงและความกลมของชิ้นงานขณะตัด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการพัฒนาสมการทำนายตรงของชิ้นงานขณะตัด [8] และงานวิจัยที่พัฒนาสมการทำนายกลมของชิ้นงานขณะตัด [9] โดยสมการที่ใช้อยู่ในรูปฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล ซึ่งอ้างอิงตามทฤษฎีการหาค่าความขรุขระของผิวชิ้นงาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาสมการทำนายความตรงและความกลมของชิ้นงานในขณะตัดโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและแรงตัดสถิตในทิศทางป้อนตัดและเงื่อนไขการตัดต่างๆในรูปแบบสมการเอกซ์โปเนนเชียลดังนี้

$$R_0 = C_1 \cdot (V)^{a_1} \cdot (f)^{a_2} \cdot (D)^{a_3} \cdot (R_n)^{a_4} \cdot (e)^{a_5} \cdot \gamma \cdot \left( \frac{AVF_x}{AVF_y} \right)^{a_6} \quad (3.4-1)$$

$$S_t = C_2 \cdot (V)^{a_7} \cdot (f)^{a_8} \cdot (D)^{a_9} \cdot (R_n)^{a_{10}} \cdot (e)^{a_{11}} \cdot \gamma \cdot \left( \frac{F_y(max) - F_y(min)}{F_y(s)} \right)^{a_{12}} \quad (3.4-2)$$

โดยที่	$R_0$	= ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)
	$S_t$	= ความตรงเบี่ยงศูนย์กลางของชิ้นงาน (ไมโครเมตร)
	$V$	= ความเร็วตัดชิ้นงาน (เมตรต่อนาที)
	$f$	= อัตราการป้อน (มิลลิเมตรต่อรอบ)
	$D$	= ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
	$R_n$	= รัศมีจุมูกมีด (มิลลิเมตร)
	$\gamma$	= มุมคายเศษโลหะ (องศา)
	$AVF_x$	= ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงรัศมี (นิวตัน)

$AVF_y$  = ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงป้อนตัด (นิวตัน)

$$\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_{y(s)}} = \text{อัตราส่วนระหว่างแรงป้อนตัดพลวัตและแรงป้อนตัดสถิต}$$

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, C_1, C_2$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการ จากสมการแบบไม่เชิงเส้นถูกแปลงและนำเสนอในรูปแบบสมการถดถอยพหุคูณด้วยการใช้ การแปลงลอการิทึม ดังนี้

$$\ln R_0 = \ln C_1 + a_1 \ln V + a_2 \ln f + a_3 \ln D + a_4 \ln R_n + a_5 \gamma + a_6 \ln \left( \frac{AVF_x}{AVF_y} \right) \quad (3.4-3)$$

$$\ln S_t = \ln C_2 + a_7 \ln V + a_8 \ln f + a_9 \ln D + a_{10} \ln R_n + a_{11} \gamma + a_{12} \ln \left( \frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_{y(s)}} \right) \quad (3.4-4)$$

จากสมการถดถอยพหุคูณสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

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

$$y_2 = \beta_7 + \beta_8 x_1 + \beta_9 x_2 + \beta_{10} x_3 + \beta_{11} x_4 + \beta_{12} x_5 + \beta_{13} x_7 \quad (3.4-6)$$

โดยที่

$$y_1 \quad \text{แทนค่า} \quad \ln R_0$$

$$y_2 \quad \text{แทนค่า} \quad \ln S_t$$

$$x_1 \quad \text{แทนค่า} \quad \ln V$$

$$x_2 \quad \text{แทนค่า} \quad \ln f$$

$$x_3 \quad \text{แทนค่า} \quad \ln D$$

$$x_4 \quad \text{แทนค่า} \quad \ln R_n$$

$$x_5 \quad \text{แทนค่า} \quad \ln \gamma$$

$$x_6 \quad \text{แทนค่า} \quad \ln \left( \frac{AVF_x}{AVF_y} \right)$$

$$x_7 \quad \text{แทนค่า} \quad \ln \left( \frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_{y(s)}} \right)$$

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8, \beta_9, \beta_{10}, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13}$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ของสมการซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณ โดยใช้การประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสอง น้อยที่สุด (least square method)

### 3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

1) จากข้อมูลผลการทดลอง ได้แก่ เงื่อนไขการตัดต่างๆ ความตรงเบี่ยงศูนย์ของชิ้นงาน สัญญาณแรงตัด และเศษโลหะที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการตัดต่างๆ จากนั้นนำความตรงเบี่ยงศูนย์

ของชิ้นงานและสัญญาณแรงตัดพลวัตมาแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ โดยใช้วิธีการแปลงเวฟเลท

2) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงศูนย์ของชิ้นงาน ความกลม และแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ เมื่อพบว่ามีความสอดคล้องกัน จะนำผลการทดลองจากเงื่อนไขการตัดนั้น ๆ มาใช้วิเคราะห์ต่อไป

3) วิเคราะห์ความสัมพันธ์เงื่อนไขการตัดต่างๆ ในการทำวิจัย

4) คำนวณค่าอัตราส่วนของแรง ซึ่งแรงป้อนตัดพลวัตเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับความตรงเบี่ยงศูนย์และความกลมของชิ้นงาน สามารถคำนวณแรงตัดพลวัตได้จากค่าแอมพลิจูดของสัญญาณแรงป้อนตัดในโดเมนเวลา เมื่อได้ค่าแรงตัดพลวัตแล้วจึงนำไปใช้ในการพัฒนาสมการความสัมพันธ์ โดยจะอยู่ในรูปของอัตราส่วนของแรงป้อนตัดพลวัตต่อแรงป้อนตัดสถิต

5) ทดสอบการกระจายแบบปกติ (Normality) โดยการสร้าง Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน (Residual)

6) ทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent)

7) ทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance stability)

8) พัฒนาสมการทำนายความตรงและความกลม โดยวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple linear regression analysis) และใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอย

9) ทดสอบความแม่นยำของสมการ

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทที่ 4 จะแสดงผลที่ได้จากการทดลองและทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของสัญญาณแรงตัดกับความตรงและความกลม เพื่อนำไปสู่การพัฒนาสมการทำนายความตรงและความกลมของชิ้นงาน โดยประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลขชนิดดอเบซีส์วิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นขณะกลึงชิ้นงาน ซึ่งจะแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตออกเป็นหลายๆระดับชั้น เพื่อให้สามารถแยกแยะได้ว่าระดับชั้นใดเป็นสัญญาณแรงตัดพลวัตที่สอดคล้องกับความตรงและความกลม สัญญาณระดับชั้นใดเป็นสัญญาณแตกหักของเศษโลหะ หรือสัญญาณรบกวนอื่นในเงื่อนไขการตัดต่างๆ โดยมีปัจจัยในการตัดซึ่งเป็นตัวแปรอิสระดังต่อไปนี้ คือ ความเร็วตัด (V) อัตราการป้อนตัด (F) ความลึกตัด (D) รัศมีจุมกมีด (Rn) มุมคายเศษโลหะ (Rake angle) โดยการวิเคราะห์จะแสดงให้เห็นในแต่ละหัวข้อดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยการกลึงชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน S45C จำนวนทั้งสิ้น 108 เงื่อนไข ซึ่งประกอบด้วยปัจจัย ดังนี้ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด มุมคายเศษโลหะ ภายใต้เงื่อนไขต่างๆที่กำหนดไว้ตามตารางที่ 3.1 และทำการบันทึกผลที่ได้จากการทดลองรวมถึงค่าความตรงและความกลมในแต่ละเงื่อนไข คำนวณหาอัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตต่อแรงตัดสถิต  $(F_{y_{max}} - F_{y_{min}}) / F_s$  และอัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนของแรงตัด  $(AVF_x / AVF_y)$  ทั้งเงื่อนไขการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องและเงื่อนไขการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหัก แสดงในตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง

ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	ความตรง (ไมโครเมตร)	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	ความกลม (ไมโครเมตร)
1	200	0.25	0.6	0.8	-6	0.112	15.376	1.247	5.576
2	100	0.20	0.4	0.8	11	0.166	10.262	1.329	4.793
3	150	0.15	0.4	0.8	11	0.257	7.211	1.204	4.657
4	100	0.20	0.6	0.8	11	0.147	9.568	1.590	5.541
5	100	0.15	0.6	0.8	-6	0.100	11.407	1.402	5.381
6	100	0.20	0.8	0.8	-6	0.051	13.426	1.467	5.573
7	100	0.25	0.8	0.8	-6	0.096	17.079	1.639	5.825
8	150	0.20	0.4	0.8	11	0.299	9.945	1.216	4.659
9	150	0.15	0.8	0.4	-6	0.102	13.772	1.233	5.691
10	100	0.15	0.8	0.8	11	0.141	9.127	2.361	5.873
11	150	0.25	0.8	0.4	11	0.147	27.332	2.522	7.162
12	200	0.25	0.8	0.8	-6	0.206	15.395	1.373	5.586
13	150	0.25	0.8	0.8	-6	0.229	15.563	2.026	6.375
14	150	0.25	0.4	0.8	11	0.262	12.072	1.298	4.976
15	100	0.20	0.4	0.8	-6	0.091	14.97	1.399	5.749

ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจูนกมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	ความตรง (ไมโครเมตร)	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	ความกลม (ไมโครเมตร)
16	150	0.25	0.8	0.4	-6	0.130	32.634	2.065	6.233
17	100	0.15	0.6	0.8	11	0.127	6.836	1.889	5.976
18	150	0.25	0.6	0.8	-6	0.157	16.952	1.369	5.814
19	100	0.25	0.6	0.4	-6	0.078	25.448	1.372	5.857
20	200	0.20	0.8	0.8	11	0.063	10.701	0.961	4.722
21	100	0.15	0.8	0.4	11	0.107	16.456	1.271	5.55
22	200	0.25	0.4	0.8	-6	0.108	14.54	1.049	4.606
23	150	0.15	0.6	0.8	-6	0.113	12.967	1.112	5.297
24	150	0.15	0.8	0.4	11	0.153	15.658	2.316	6.119
25	150	0.25	0.8	0.8	11	0.140	13.837	1.779	5.85
26	150	0.25	0.4	0.4	-6	0.498	26.107	1.961	6.25
27	200	0.15	0.4	0.8	11	0.161	7.966	0.730	4.017
28	150	0.15	0.4	0.4	-6	0.334	10.724	1.612	5.873
29	150	0.20	0.6	0.4	11	0.080	19.097	1.823	5.59
30	200	0.25	0.4	0.4	-6	0.285	26.821	1.626	5.492
31	200	0.15	0.8	0.4	-6	0.080	13.541	1.276	5.057

ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมิต (มม.)	มุมดาพิเศษโลหะ (องศา)	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	ความตรง (ไมโครเมตร)	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	ความกลม (ไมโครเมตร)
32	100	0.25	0.4	0.4	11	0.138	23.999	1.320	5.375
33	200	0.20	0.6	0.4	11	0.095	18.103	1.208	4.991
34	100	0.15	0.4	0.4	11	0.093	14.982	1.598	5.736
35	200	0.15	0.6	0.4	11	0.110	12.486	1.144	4.781
36	100	0.20	0.8	0.4	11	0.113	18.895	1.425	5.719
37	200	0.15	0.8	0.4	11	0.117	12.619	1.197	4.231
38	100	0.20	0.4	0.4	-6	0.332	17.732	1.746	6.449
39	200	0.25	0.6	0.4	-6	0.111	27.109	1.740	5.998
40	200	0.15	0.8	0.8	11	0.066	12.466	0.955	3.944
41	200	0.15	0.4	0.4	11	0.189	12.23	0.727	4.047
42	200	0.25	0.4	0.8	11	0.198	12.746	1.151	4.17
43	100	0.20	0.6	0.4	-6	0.088	19.616	1.187	5.502
44	100	0.25	0.6	0.8	-6	0.142	16.942	1.749	6.234
45	150	0.20	0.4	0.4	11	0.225	16.029	1.149	4.788
46	150	0.15	0.8	0.8	11	0.069	9.512	1.258	4.894
47	100	0.20	0.6	0.4	11	0.079	17.012	1.073	4.602

ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุมุมี่ด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	ความตลง (ไมโครเมตร)	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	ความกลม (ไมโครเมตร)
48	100	0.25	0.4	0.8	11	0.208	11.908	1.414	5.154
49	150	0.25	0.4	0.4	11	0.238	26.991	1.207	5.246
50	200	0.20	0.6	0.8	11	0.235	8.234	1.019	4.55
51	100	0.15	0.8	0.8	-6	0.050	12.106	1.022	5.395
52	150	0.20	0.6	0.8	11	0.206	8.564	1.346	5.23
53	200	0.20	0.4	0.4	11	0.161	16.916	0.747	4.057
54	150	0.15	0.6	0.8	11	0.203	7.314	1.279	4.759
55	200	0.15	0.6	0.8	11	0.215	6.645	1.339	4.768
56	100	0.15	0.8	0.4	-6	0.096	14.201	1.721	5.976
57	200	0.25	0.6	0.8	11	0.241	12.175	1.258	4.567
58	200	0.20	0.8	0.4	11	0.118	21.252	1.319	5.011
59	150	0.15	0.8	0.8	-6	0.189	9.2	1.585	5.358
60	100	0.25	0.4	0.4	-6	0.322	24.738	1.308	6.01
61	150	0.15	0.4	0.8	-6	0.109	10.416	1.055	5.019
62	200	0.15	0.4	0.4	-6	0.238	11.216	1.288	4.635
63	100	0.25	0.6	0.8	11	0.136	14.077	1.619	5.608



ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	ความตรง (ไมโครเมตร)	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	ความกลม (ไมโครเมตร)
64	150	0.15	0.4	0.4	11	0.211	12.11	1.139	4.686
65	200	0.25	0.6	0.4	11	0.133	26.069	1.219	5.194
66	200	0.15	0.8	0.8	-6	0.174	9.121	1.322	5.428
67	200	0.15	0.6	0.8	-6	0.063	9.624	1.069	5.181
68	150	0.25	0.6	0.8	11	0.214	11.443	1.508	5.608
69	200	0.25	0.8	0.8	11	0.072	14.066	1.270	4.754
70	100	0.20	0.4	0.4	11	0.098	18.009	1.159	4.837
71	100	0.25	0.8	0.4	11	0.106	24.947	1.495	5.962
72	150	0.20	0.6	0.8	-6	0.132	14.203	1.301	5.661
73	200	0.20	0.4	0.4	-6	0.272	17.245	1.365	5.107
74	150	0.20	0.8	0.4	-6	0.092	18.724	1.494	6.13
75	200	0.20	0.6	0.8	-6	0.077	12.549	1.089	5.397
76	150	0.20	0.8	0.8	11	0.083	11.786	1.480	5.112
77	200	0.15	0.4	0.8	-6	0.088	9.462	0.873	4.099
78	150	0.20	0.4	0.8	-6	0.113	14.985	1.083	5.122
79	200	0.25	0.8	0.4	-6	0.111	30.941	1.892	6.101

ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีงูมิต (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	ความตง (ไมโครเมตร)	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	ความกลม (ไมโครเมตร)
80	150	0.20	0.8	0.8	-6	0.178	12.09	1.854	5.667
81	200	0.20	0.8	0.4	-6	0.113	18.4	1.476	6.018
82	150	0.25	0.6	0.4	-6	0.121	28.534	2.328	6.725
83	200	0.20	0.4	0.8	11	0.171	10.314	1.047	4.047
84	100	0.15	0.4	0.8	11	0.194	9.216	1.300	4.674
85	100	0.20	0.8	0.8	11	0.151	12.506	2.486	6.147
86	150	0.15	0.6	0.4	11	0.104	13.25	1.195	5.249
87	150	0.15	0.6	0.4	-6	0.104	13.201	1.738	5.67
88	200	0.15	0.6	0.4	-6	0.076	12.643	1.143	5.644
89	150	0.20	0.6	0.4	-6	0.092	18.227	2.028	6.291
90	150	0.20	0.8	0.4	11	0.123	22.428	2.427	6.578
91	150	0.25	0.4	0.8	-6	0.139	15.467	1.269	5.621
92	150	0.20	0.4	0.4	-6	0.509	18.919	1.732	6.174
93	200	0.20	0.6	0.4	-6	0.084	18.85	1.377	5.749
94	100	0.25	0.8	0.4	-6	0.112	32.141	2.502	6.519
95	100	0.20	0.6	0.8	-6	0.121	12.64	1.722	6.102

ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราป้อนตัด (มม./รอบ)	ความลึกตัด (มม.)	รัศมีจุกมีด (มม.)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	ความตรง (ไมโครเมตร)	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	ความกลม (ไมโครเมตร)
96	200	0.20	0.8	0.8	-6	0.196	11.41	1.369	5.55
97	100	0.15	0.4	0.4	-6	0.300	14.438	2.009	6.481
98	200	0.20	0.4	0.8	-6	0.097	10.918	0.950	4.156
99	100	0.15	0.4	0.8	-6	0.087	9.793	1.299	5.309
100	100	0.20	0.8	0.4	-6	0.126	20.58	2.158	6.46
101	100	0.25	0.4	0.8	-6	0.111	19.305	1.523	6.06
102	150	0.25	0.6	0.4	11	0.142	13.931	2.851	7.41
103	100	0.15	0.6	0.4	-6	0.113	13.646	1.172	5.364
104	100	0.25	0.6	0.4	11	0.084	23.592	1.551	5.641
105	100	0.25	0.8	0.8	11	0.102	13.916	2.388	5.873
106	200	0.25	0.4	0.4	11	0.191	23.259	0.978	4.686
107	200	0.25	0.8	0.4	11	0.116	28.063	1.492	6.118
108	100	0.15	0.6	0.4	11	0.094	27.235	1.438	5.105

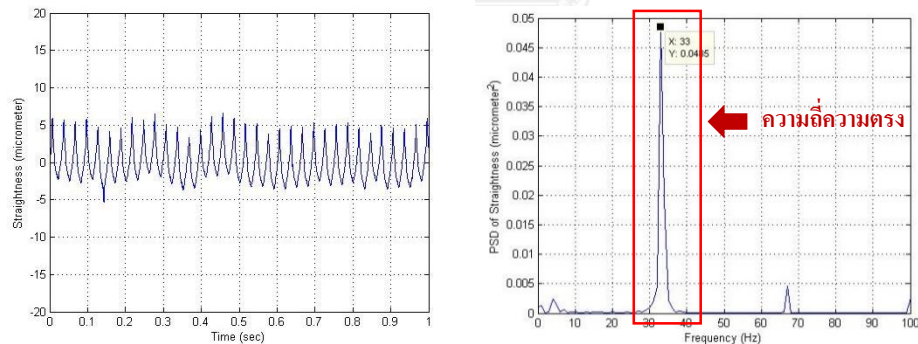
## 4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดกับค่าความตรง

### 4.2.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตและความตรงในการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง

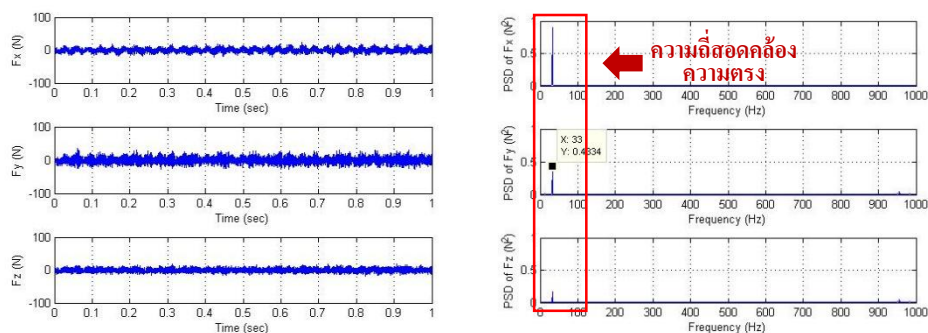
จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและแรงตัดพลวัต มีเงื่อนไขการตัดคือ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุมุกมีด 0.4 มิลลิเมตรและมุมคายเศษโลหะ 11 ซึ่งเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องดังรูปที่ 4.1



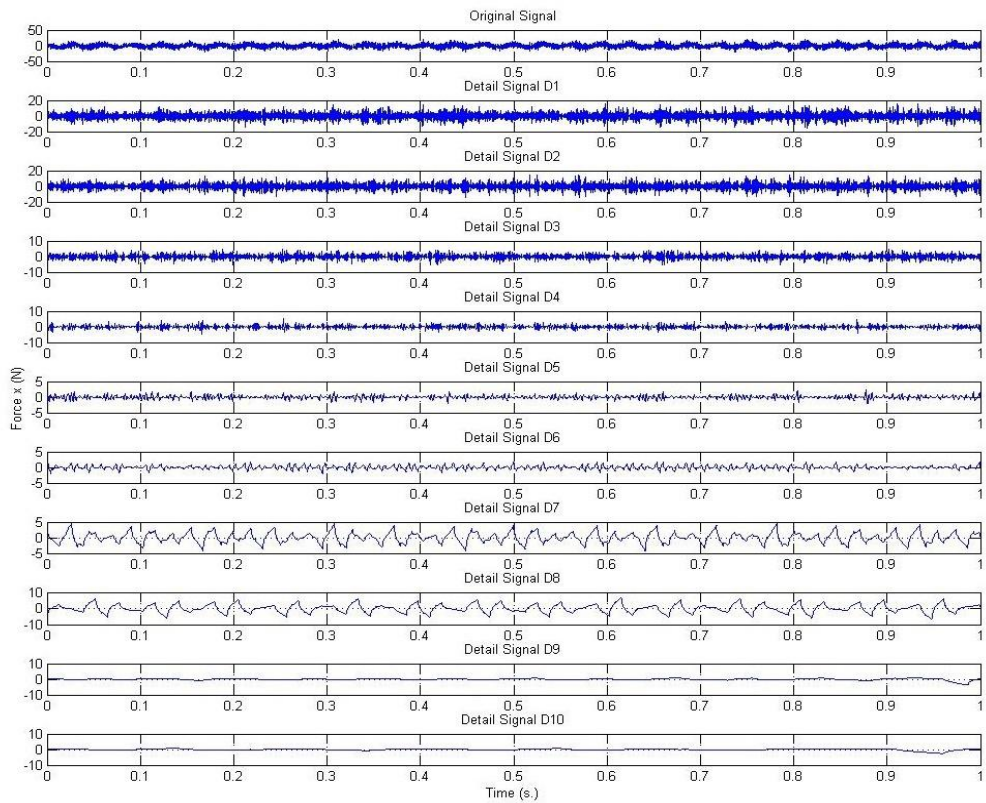
รูปที่ 4.1 ลักษณะเศษโลหะจากการตัดภายใต้เงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด 200 ม.ต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม.ต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.4 มม. รัศมีจุมุกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11



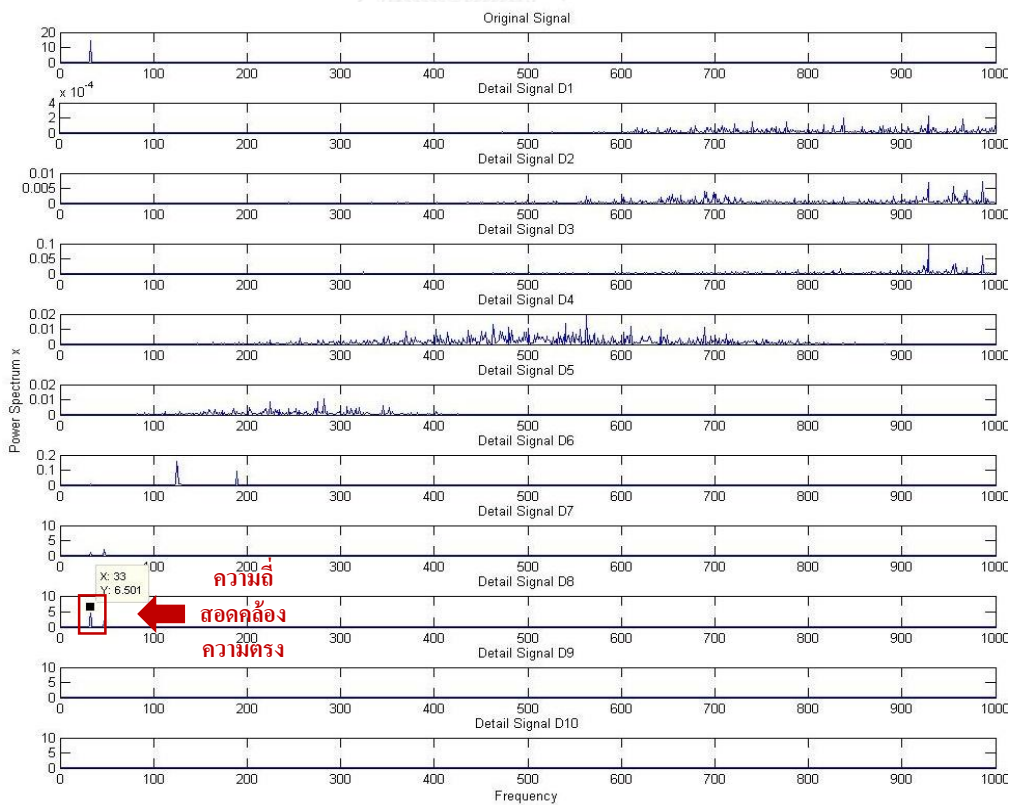
รูปที่ 4.2 สัญญาณความตรงขึ้นงานในโดเมนเวลาและความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว



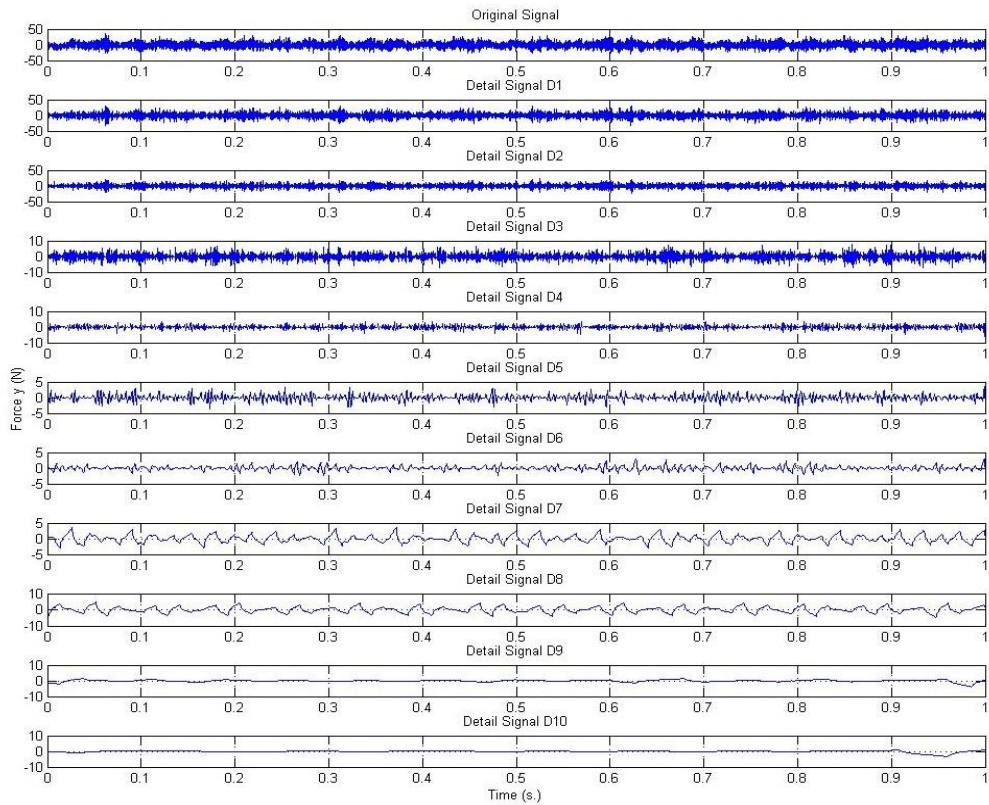
รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงตัดในโดเมนเวลาและความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว



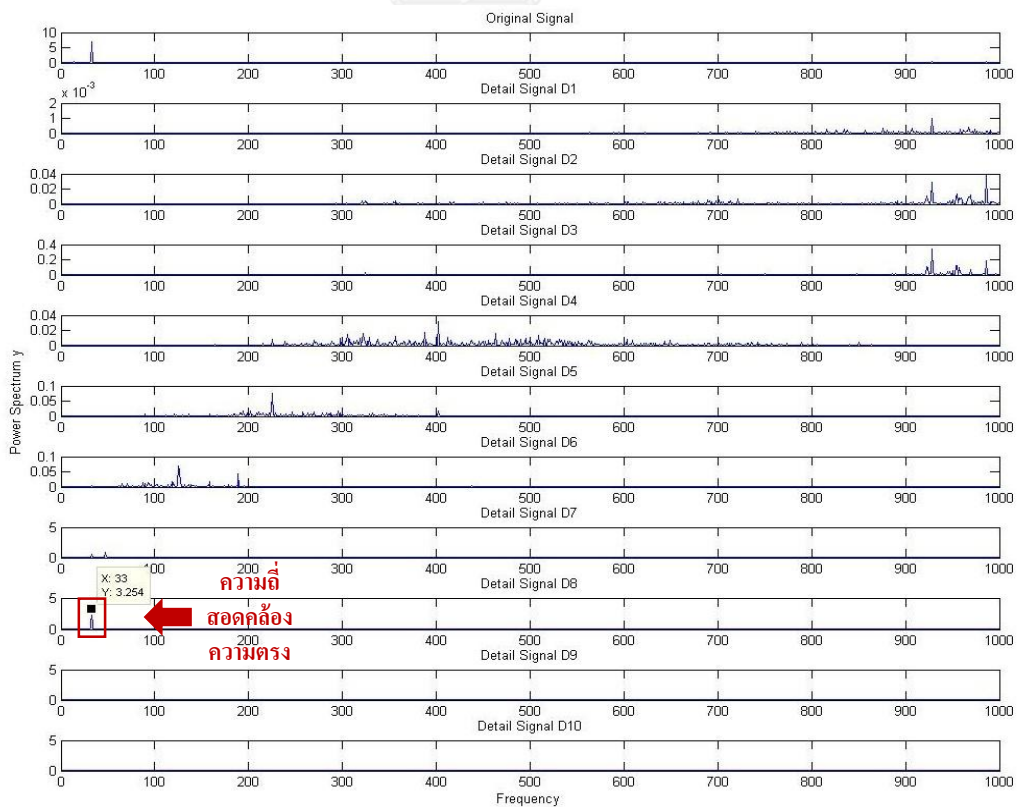
รูปที่ 4.4 การแปลงเวฟเลทในโดเมนเวลาของแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องแกน X



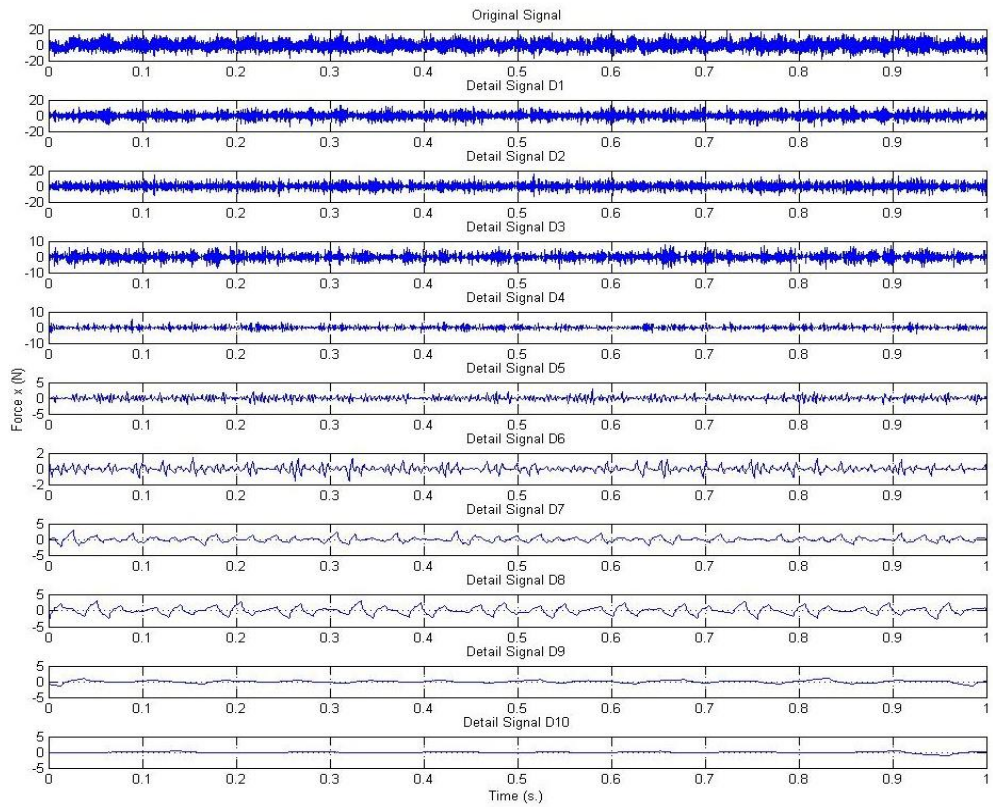
รูปที่ 4.5 การแปลงเวฟเลทในโดเมนความถี่ของแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องแกน X



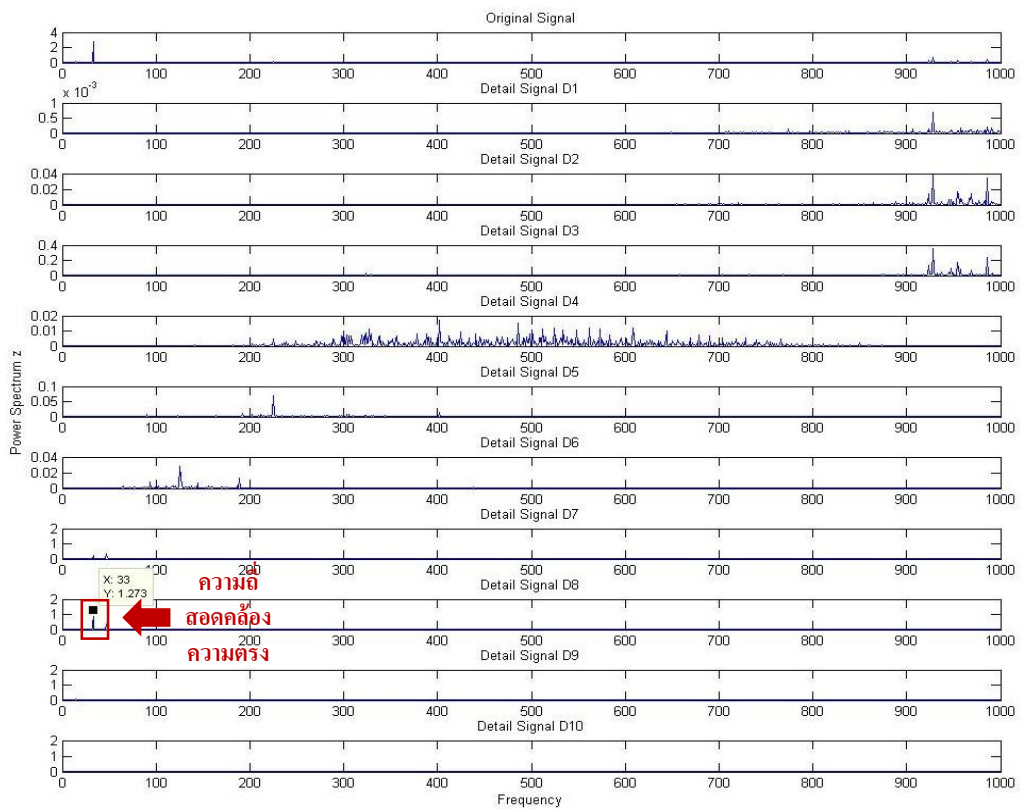
รูปที่ 4.6 การแปลงเวฟเลขในโดเมนเวลาของแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องในแกน Y



รูปที่ 4.7 การแปลงเวฟเลขในโดเมนความถี่ของแรงตัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องแกน Y



รูปที่ 4.8 การแปลงเวฟเลทในโดเมนเวลาของแรงดัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องในแกน Z



รูปที่ 4.9 การแปลงเวฟเลทในโดเมนความถี่ของแรงดัดพลวัตที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องแกน Z

จากผลการวัดค่าความตรงชิ้นงานเมื่อนำสัญญาณที่ได้ไปแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว พบว่ามีความถี่ความตรงที่ความถี่ 33 Hz ดังรูปที่ 4.2-4.3 เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงตัดซึ่งถูกแปลงด้วยวิธีเวฟเลทของทั้ง 3 แกน ได้แก่ แกน  $F_x$ ,  $F_y$  และ  $F_z$  โดยแยกสัญญาณของข้อมูลออกเป็น 10 ระดับดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.9 เมื่อพิจารณาสัญญาณแรงตัดที่โดเมนความถี่พบว่าค่าความถี่ของสัญญาณแรงตัดในระดับที่ 8 จากทั้ง 3 แกน มีค่าความถี่ 33 Hz ซึ่งสอดคล้องกับค่าความถี่ที่ได้จากเครื่องวัดความตรงชิ้นงาน

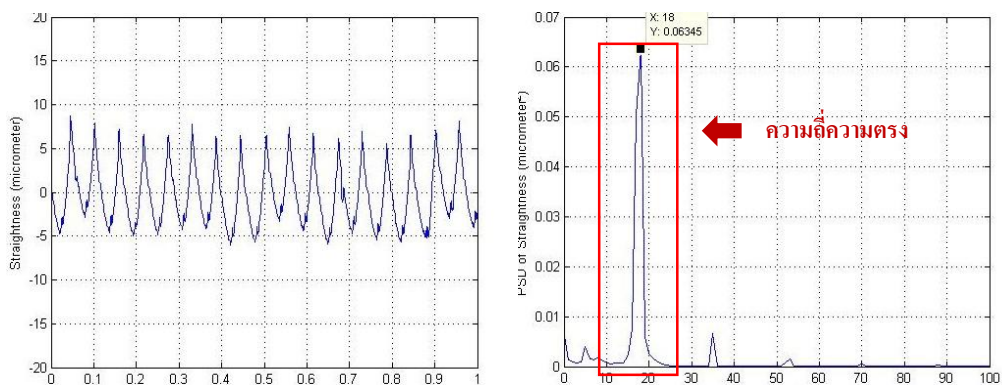
#### 4.2.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้น โลหะแบบแตกหัก

จากผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นโลหะแบบแตกหัก โดยมีเงื่อนไขการตัด ดังนี้ ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา ซึ่งเกิดเศษโลหะแบบแตกหักดังแสดงในรูปที่ 4.10



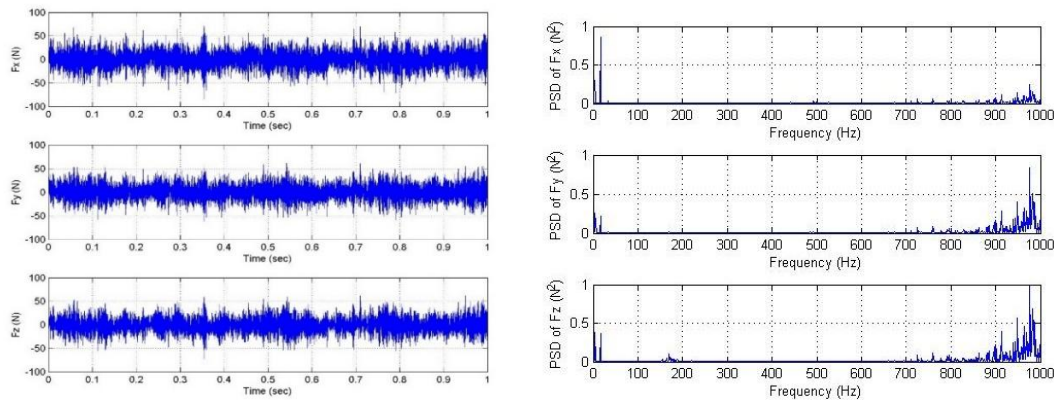
รูปที่ 4.10 ลักษณะเศษโลหะจากการตัดภายใต้เงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด 100 ม.ต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มม.ต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษ

#### โลหะ -6



รูปที่ 4.11 สัญญาณความตรงของชิ้นงานในโดเมนเวลาและความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

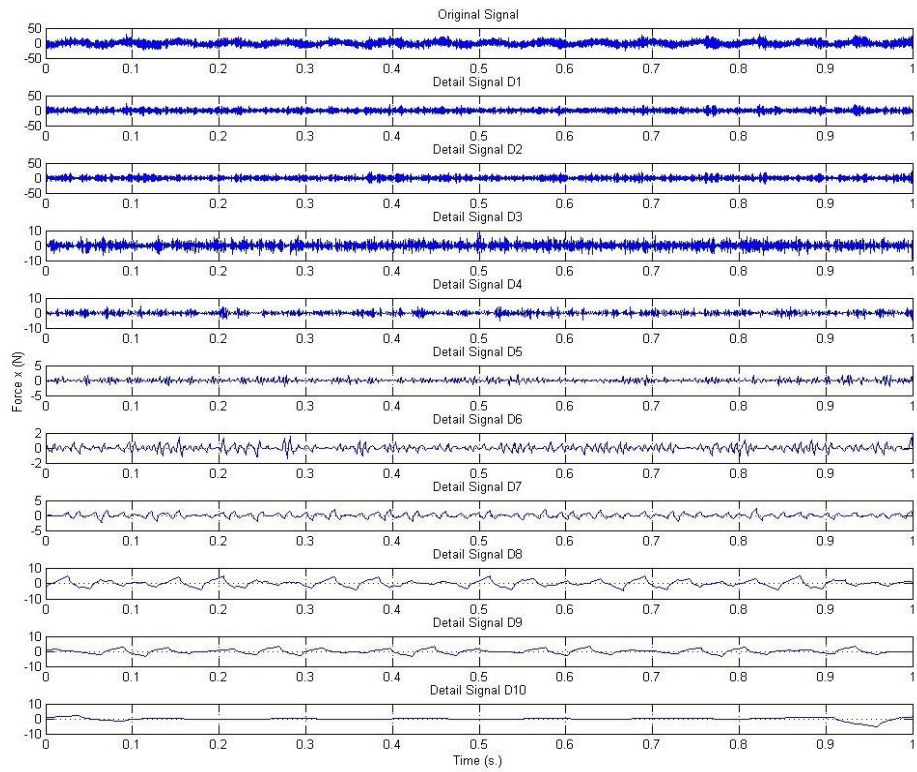




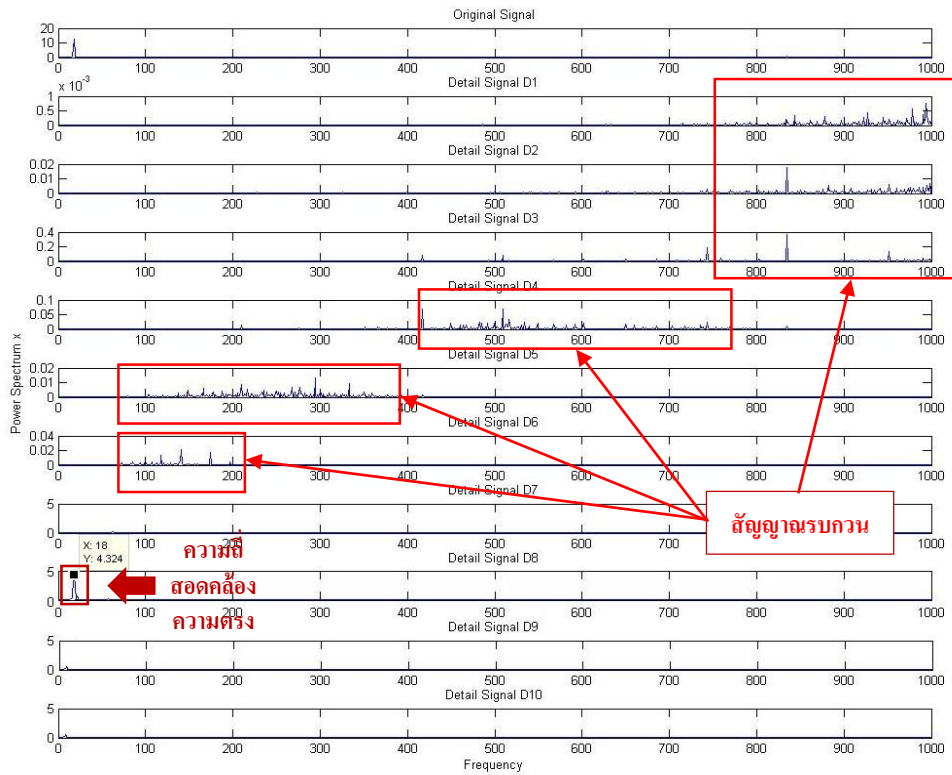
รูปที่ 4.12 สัญญาณแรงตัดในโดเมนเวลาและความถี่โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าในโดเมนความถี่สัญญาณความตรงที่ได้จากเครื่องวัดความตรงมีความถี่เท่ากับ 18 Hz ดังรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณาสัญญาณแรงตัดที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) จะพบว่ามี การปะปนกันของความถี่ความตรงและความถี่ที่เกิดจากการแตกหักดังรูปที่ 4.12 ซึ่งการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วไม่สามารถแยกสัญญาณความตรงออกจากสัญญาณรบกวนอื่นๆได้

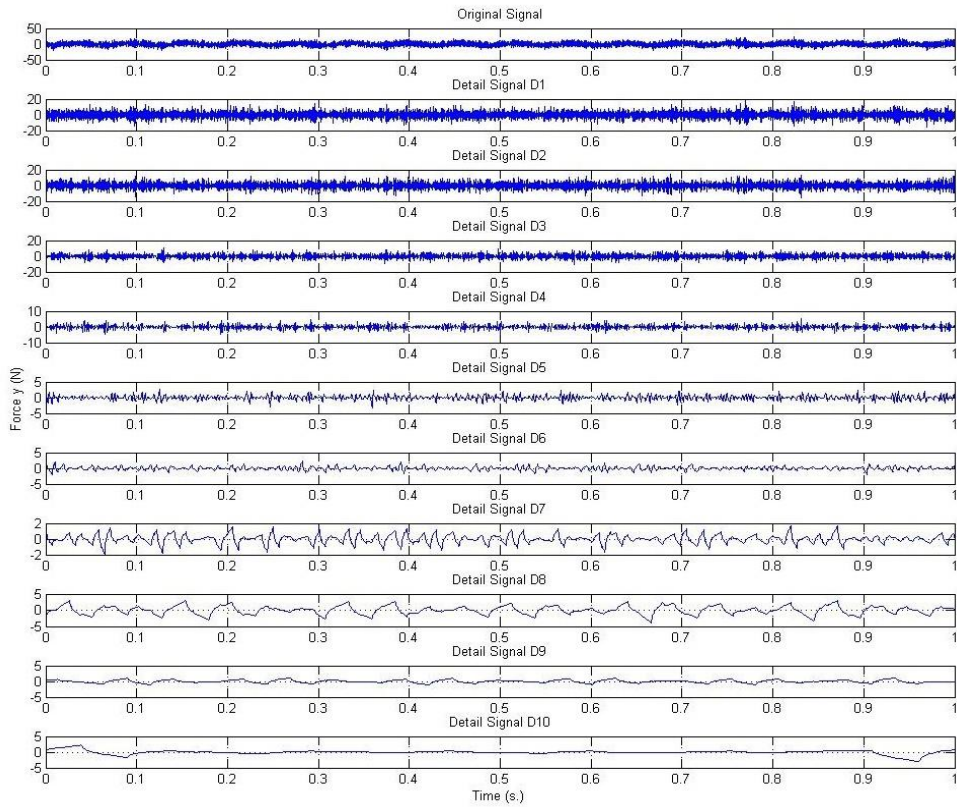
ดังนั้นจึงนำวิธีการแปลงเวฟเลทมาประยุกต์ใช้ โดยทำการแยกย่อยสัญญาณออกเป็น 10 ระดับ ซึ่งสัญญาณการแตกหักของเศษโลหะและสัญญาณรบกวนอื่นๆ จะถูกตรวจจับและแยกออกจากสัญญาณแรงตัดพลวัตในขั้นที่แตกต่างกันของการแปลงเวฟเลท ทำให้สามารถแยกความถี่ของความตรงออกจากความถี่ที่เกิดจากการแตกหักได้



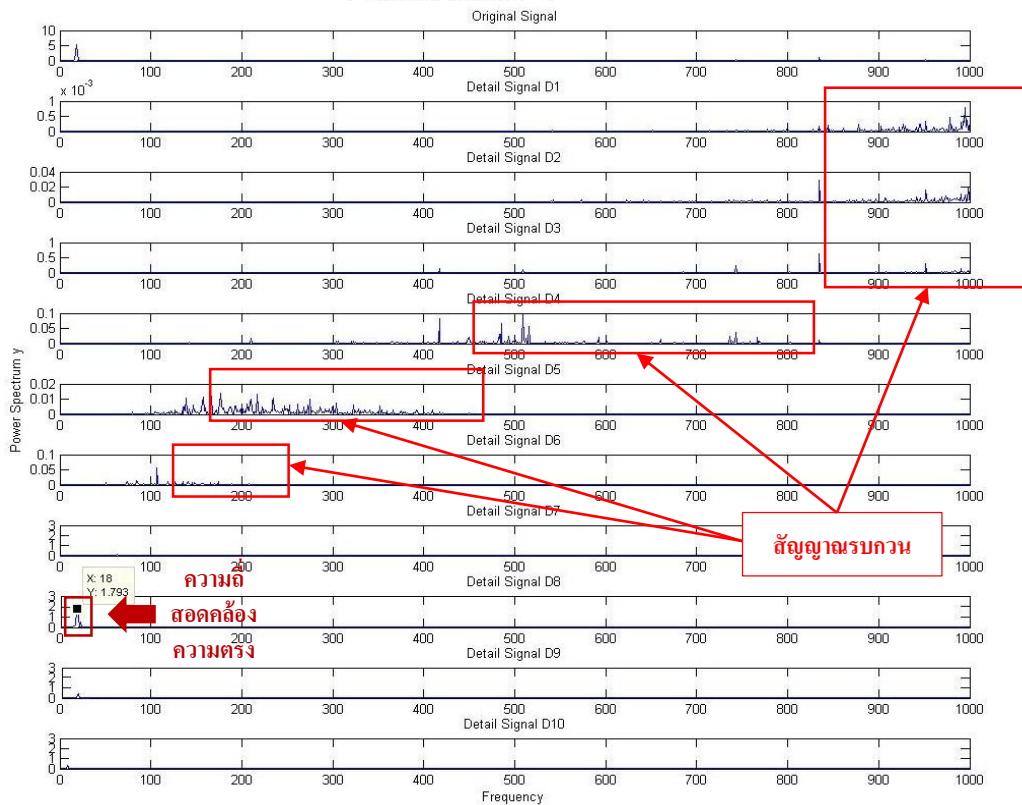
รูปที่ 4.13 การแปลงเวฟเลทแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักในแกน X



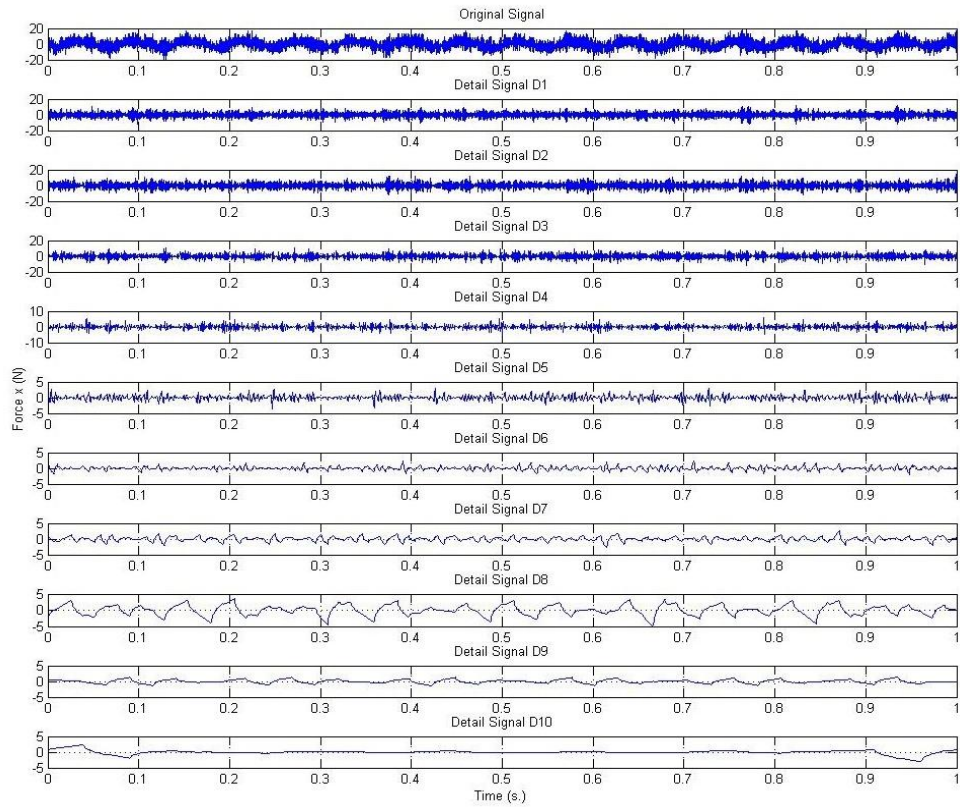
รูปที่ 4.14 การแปลงเวฟเลทแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักในแกน X



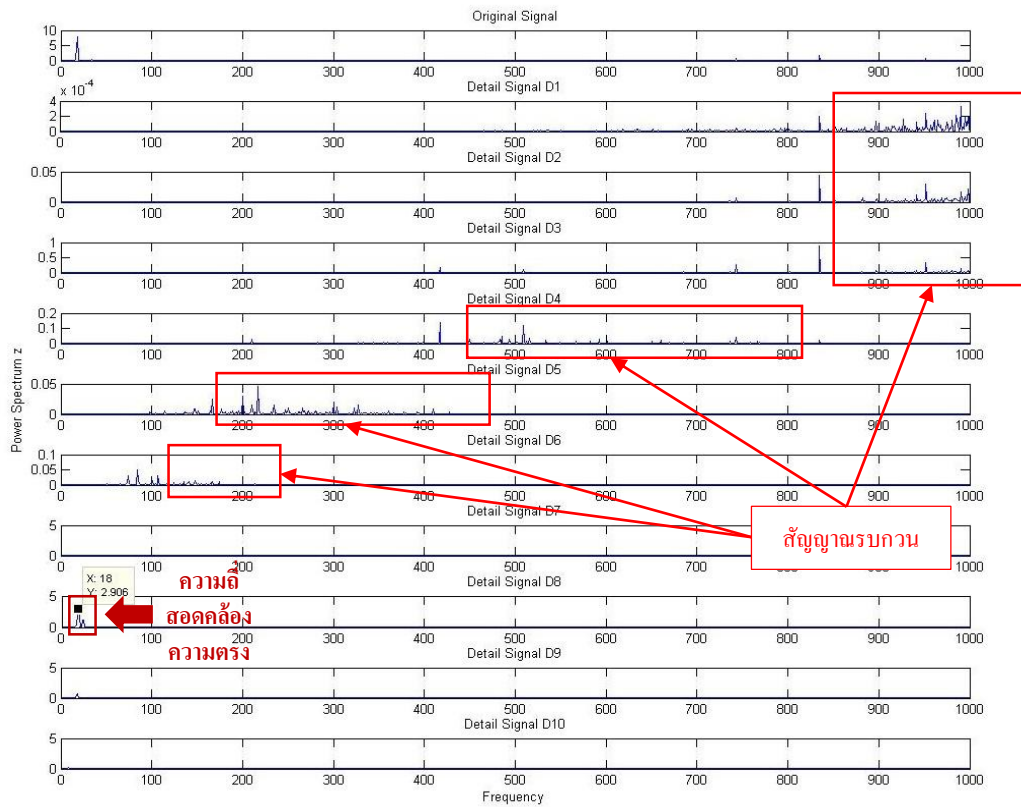
รูปที่ 4.15 การแปลงเวฟเลทแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลาที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักในแกน Y



รูปที่ 4.16 การแปลงเวฟเลทแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักในแกน Y



รูปที่ 4.17 การแปลงเวฟเลขแรงตักพลวัตในโดเมนเวลาที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักในแกน Z



รูปที่ 4.18 การแปลงเวฟเลขแรงตักพลวัตในโดเมนความถี่ที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักในแกน Z

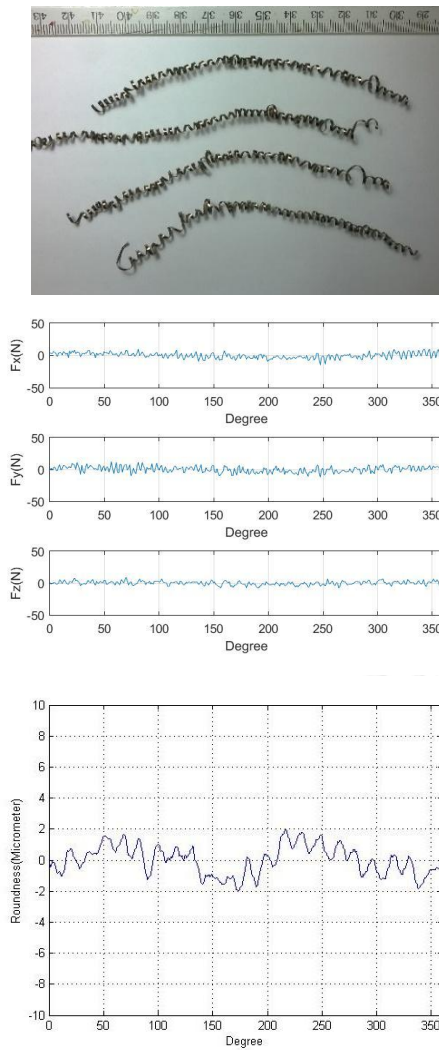
จากรูปที่ 4.13 -4.18 แสดงการแปลงเวฟเลขของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่มีการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักโดยแบ่งออกเป็น 10 ระดับในแกน X,Y และ Z ในโดเมนเวลาจะพบว่าความหนาแน่นของแรงในโดเมนเวลาที่ระดับชั้น (level) ที่ต่ำกว่านั้นมีความหนาแน่นของแรงสูงกว่าในระดับชั้น(level)ที่สูง ส่วนโดเมนความถี่จะเห็นได้ว่าสามารถแยกแรงตัดที่มีสัญญาณความถี่ตรงกับค่าที่ได้จากเครื่องวัดความตริงที่ความถี่ 18 Hz ในระดับที่ 8 ทั้งในแกน X, Y และ Z

จากการทดลองพบว่าในระดับชั้นที่ต่ำของการแปลงเวฟเลขสามารถตรวจจับความถี่ของการแตกหักของเศษโลหะได้และในระดับชั้นที่ 8 ของการแปลงเวฟเลข สามารถตรวจสอบความถี่ของความตริงขึ้นงานได้ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแปลงเวฟเลขเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่สามารถแยกสัญญาณแรงพลวัตที่มีความสอดคล้องกับสัญญาณความตริง ออกจากสัญญาณรบกวนอื่นๆในกระบวนการกลึงด้วยเครื่องซีเอ็นซีได้ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ ไม่ว่าจะเงื่อนไขการตัดจะเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องหรือแตกหัก ดังนั้นการเลือกระดับชั้นสัญญาณเวฟเลขที่เหมาะสมมาทำการแยกสัญญาณแรงตัดพลวัตซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณความตริงออกจากสัญญาณรบกวนต่างๆ จะทำให้ได้ผลการทำนายค่าความตริงของชิ้นงานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

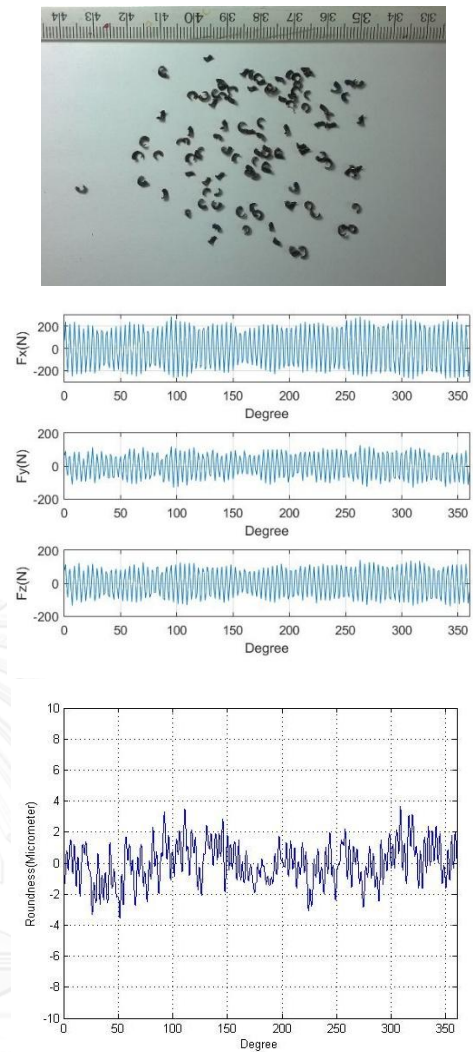
#### 4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความกลมและแรงตัด

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากระบบการกลึงพบว่า แรงตัดรัศมี ( $F_x$ ) แรงป้อนตัด ( $F_y$ ) และแรงตัดหลัก ( $F_z$ ) มีการเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแรงตัดพลวัตนี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางในลักษณะแปรผันไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อแอมพลิจูดแรงตัดพลวัตมีค่าสูงมากขึ้น ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัดและชิ้นงาน จึงส่งผลให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตรวจสอบได้ก็จะมีสูงมากขึ้นตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 4.19

จากรูปที่ 4.19-4.20 พบว่า แรงตัดมีการเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในการตัดซึ่งเกิดโลหะแบบแตกหัก เศษโลหะที่เกิดขึ้นขณะตัดจะพุ่งชนมีดตัดและชิ้นงาน ส่งผลให้แอมพลิจูดของแรงตัดพลวัตและค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นด้วย การเปลี่ยนแปลงแรงตัดพลวัตนี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความกลมในลักษณะแปรผันไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อแอมพลิจูดแรงตัดพลวัตมีค่าสูงมากขึ้นเนื่องจากการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัดและชิ้นงาน ส่งผลให้พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตรวจสอบได้ก็จะมีสูงมากขึ้นตามไปด้วย



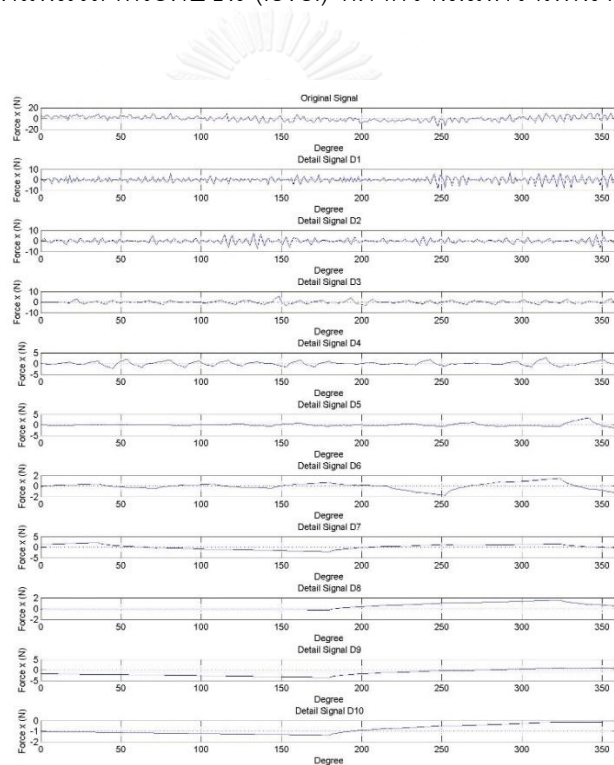
รูปที่ 4.19 ลักษณะเศษโลหะ สัญญาณแรงตัดพลวัตและสัญญาณความกลมที่ได้จากการตัดที่ความเร็วตัด 200 ม/นาที่ อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุกมิด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



รูปที่ 4.20 ลักษณะเศษโลหะ สัญญาณแรงตัดพลวัตและสัญญาณความกลมที่ได้จากการตัดที่ความเร็วตัด 150 ม/นาที่ อัตราป้อนตัด 0.25 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุกมิด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

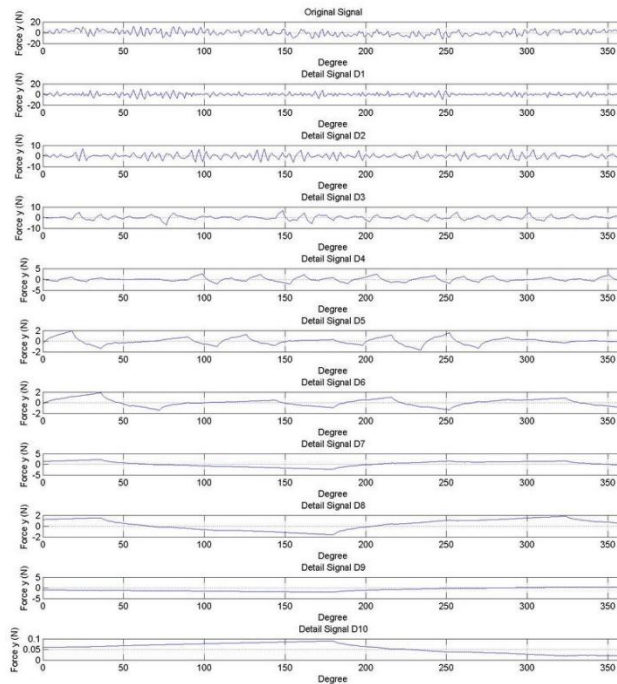
#### 4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตกับค่าความกลมในการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องและแตกหัก

รูปที่ 4.21-4.24 แสดงการแปลงเวฟเลทในโดเมนเวลาของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่มีการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องและแตกหัก โดยแบ่งออกเป็น 8 ระดับในแกน X และ Y จะเห็นได้ว่ารูปที่ 4.21-4.22 ซึ่งเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง มีแอมพลิจูดสัญญาณแรงตัดที่ต่ำกว่ารูปที่ 4.23-4.24 ซึ่งเกิดเศษโลหะแบบแตกหัก สอดคล้องกับการเปรียบเทียบแอมพลิจูดสัญญาณความกลมชิ้นงานระหว่างเงื่อนไขการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องกับเงื่อนไขการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหัก ดังรูปที่ 4.19-4.20 และเมื่อวิเคราะห์ที่แรงในระดับชั้นต่างๆจากการแปลงเวฟเลท พบว่าความหนาแน่นของแรงในโดเมนเวลาที่ระดับชั้น (level) ที่ต่ำกว่านั้นมีความหนาแน่นของแรงสูงกว่าในระดับชั้น(level)ที่สูง

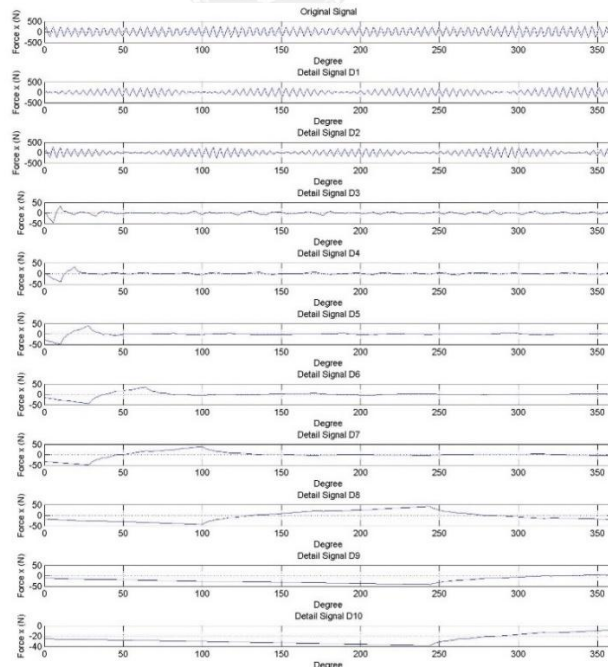


รูปที่ 4.21 การแปลงเวฟเลทของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่มีการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องในโดเมนเวลาของแกน X ซึ่งมีเงื่อนไขการตัดดังนี้ได้แก่ ความเร็วตัด 200 ม/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม.

ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

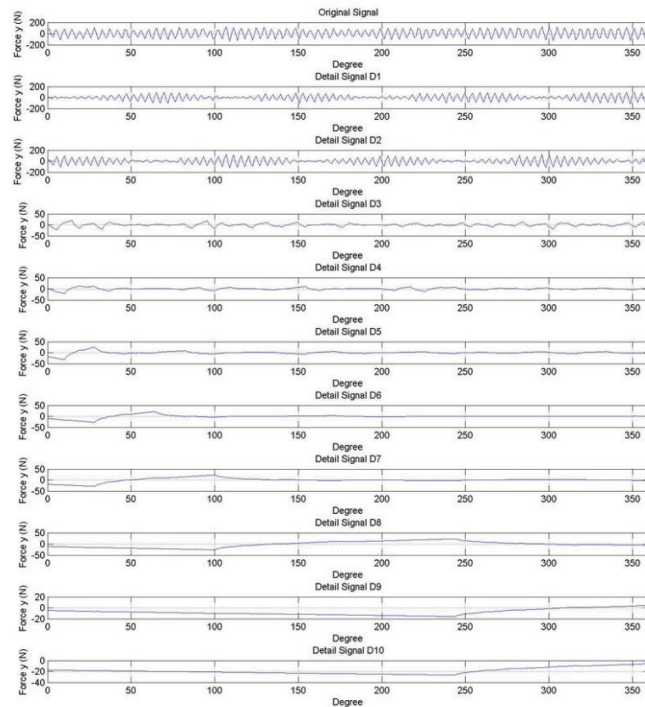


รูปที่ 4.22 การแปลงเวฟเลทของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่มีการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องในโดเมนเวลาของแกน Y ซึ่งมีเงื่อนไขการตัดดังนี้ได้แก่ ความเร็วตัด 200 ม/นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



รูปที่ 4.23 การแปลงเวฟเลทของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่มีการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักในโดเมนเวลาของแกน X ซึ่งมีเงื่อนไขการตัดดังนี้ได้แก่ ความเร็วตัด 150ม/นาที อัตราป้อนตัด 0.25 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



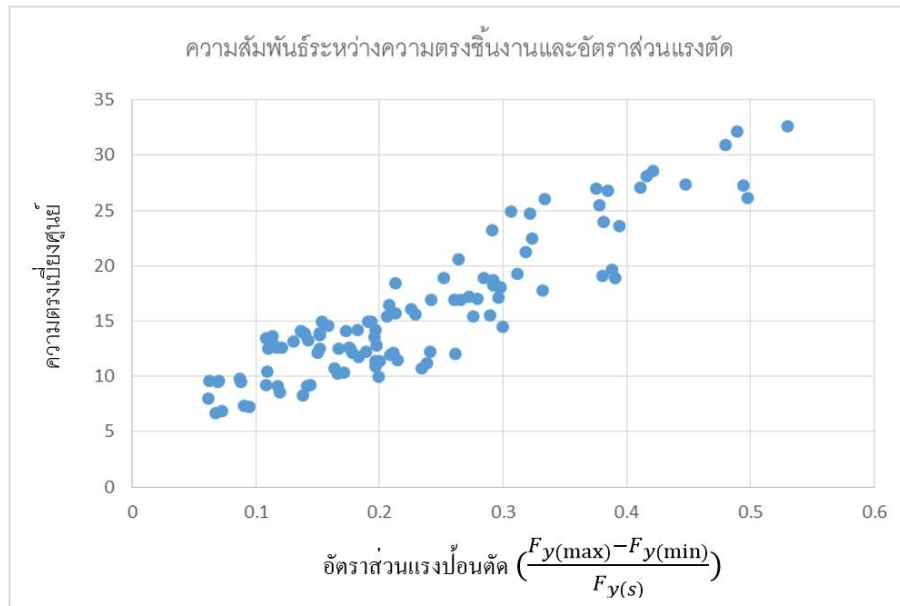


รูปที่ 4.24 การแปลงเวฟเลทของสัญญาณแรงตัดพลวัตที่มีการเกิดเศษโลหะแบบแตกหักในโดเมนเวลาของแกน Y ซึ่งมีเงื่อนไขการตัดดังนี้ได้แก่ ความเร็วตัด 150ม/นาที อัตราป้อนตัด 0.25 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและแรงตัดพลวัตในหัวข้อที่ผ่านมาได้พบว่าในระดับขั้นที่ต่ำของการแปลงเวฟเลทสามารถตรวจจับความถี่ของการแตกหักของเศษโลหะได้ และความถี่ที่สอดคล้องกับความถี่ความตรงเกิดในระดับที่ 8 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำค่าที่ได้จากการแยกความถี่ด้วยเวฟเลทในระดับที่ 8 ซึ่งได้ทำการแยกสัญญาณรบกวนจากการเกิดเศษโลหะแตกหักออกแล้วไปใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแรงตัดพลวัตและความกลม เพื่อให้สามารถทำนายค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางขณะตัดได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

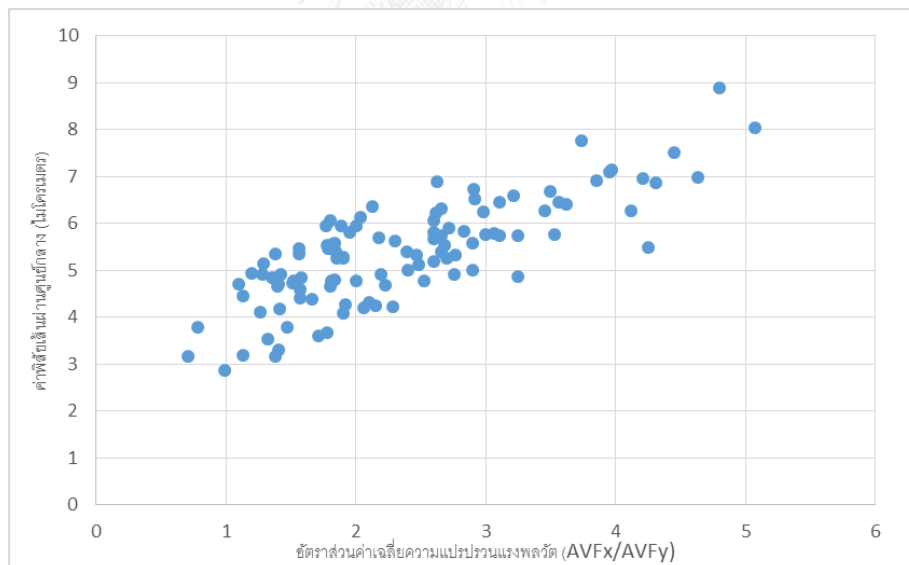
#### 4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงเบี่ยงศูนย์ของชิ้นงานและอัตราส่วนแรงตัด

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงเบี่ยงศูนย์ที่วัดได้จากผิวชิ้นงานและอัตราส่วนแรงป้อนตัด พบว่าเมื่ออัตราส่วนแรงป้อนตัดเพิ่มขึ้น ค่าความตรงเบี่ยงศูนย์ของชิ้นงานจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นั่นคือความตรงเบี่ยงศูนย์ชิ้นงานแปรผันตามอัตราส่วนแรงป้อนตัดดังแสดงในรูปที่ 4.25 จากลักษณะดังกล่าวจึงทำการสรุปได้ว่า แม้เงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรค่าอัตราส่วนแรงป้อนตัดก็จะมีอิทธิพลต่อความตรงของชิ้นงานและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงศูนย์ของชิ้นงานและอัตราส่วนแรงป้อนตัด

#### 4.6 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางกลางชิ้นงานและอัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต



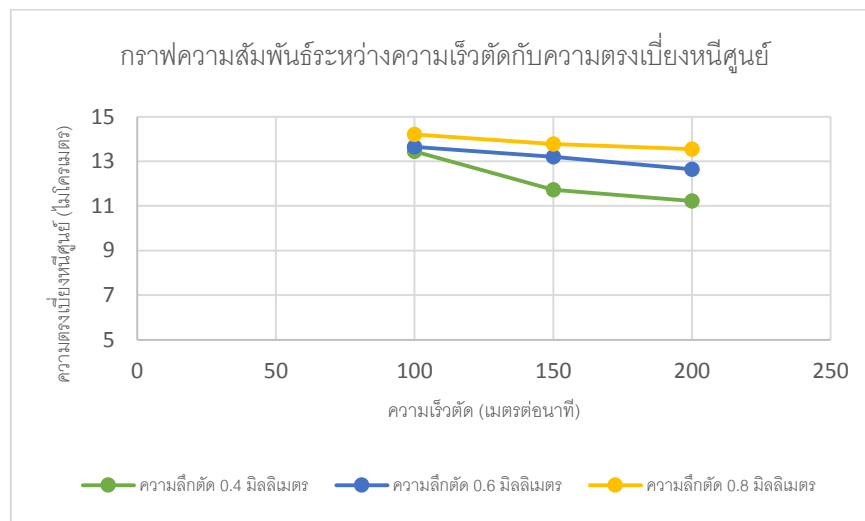
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานและอัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงพลวัต

จากรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต ( $AVF_x/AVF_y$ ) มีค่าสูงขึ้น ค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้ก็จะมีขนาดพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นตามไปด้วย จากความสัมพันธ์ดังกล่าว สรุปได้ว่า อัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงพลวัต

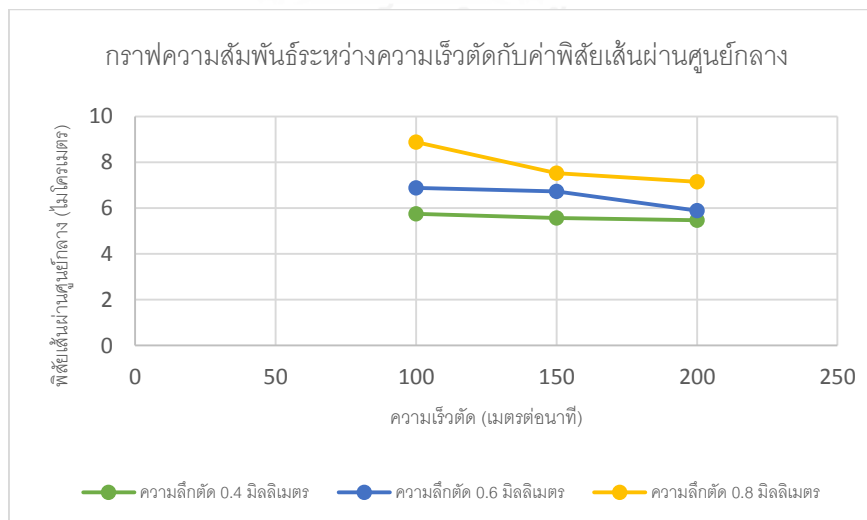
มีอิทธิพลต่อค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป

#### 4.7 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการตัดต่างๆกับความตรงและความกลมของชิ้นงานและการเกิดเศษโลหะ

##### 4.7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดกับความตรงและความกลมของชิ้นงาน

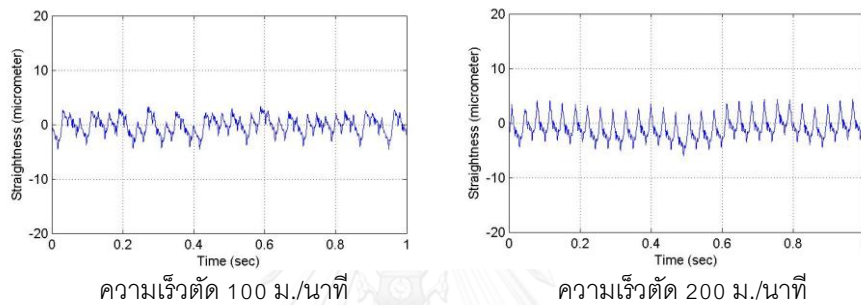


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงเบี่ยงศูนย์กลางกับความเร็วตัดที่ 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที โดยมีความลึกตัด 0.4, 0.6 และ 0.8 มม. อัตราป้อนตัด 0.15 มม. และ รัศมี จมูกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

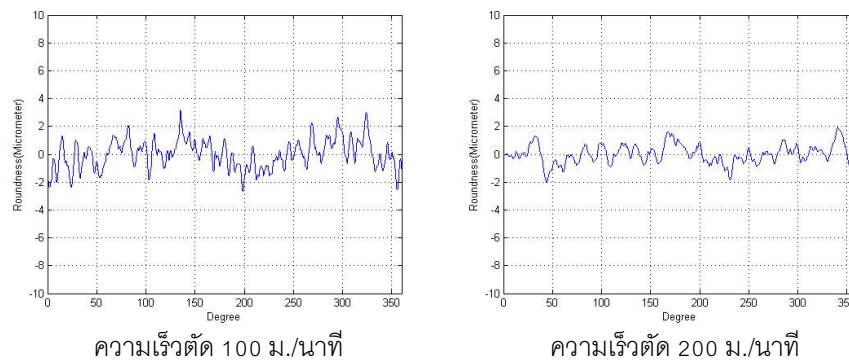


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางกับความเร็วตัดที่ 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที โดยมีความลึกตัด 0.4, 0.6 และ 0.8 มม. อัตราป้อนตัด 0.15 มม. และ รัศมี จมูกมีด 0.4 มม. มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

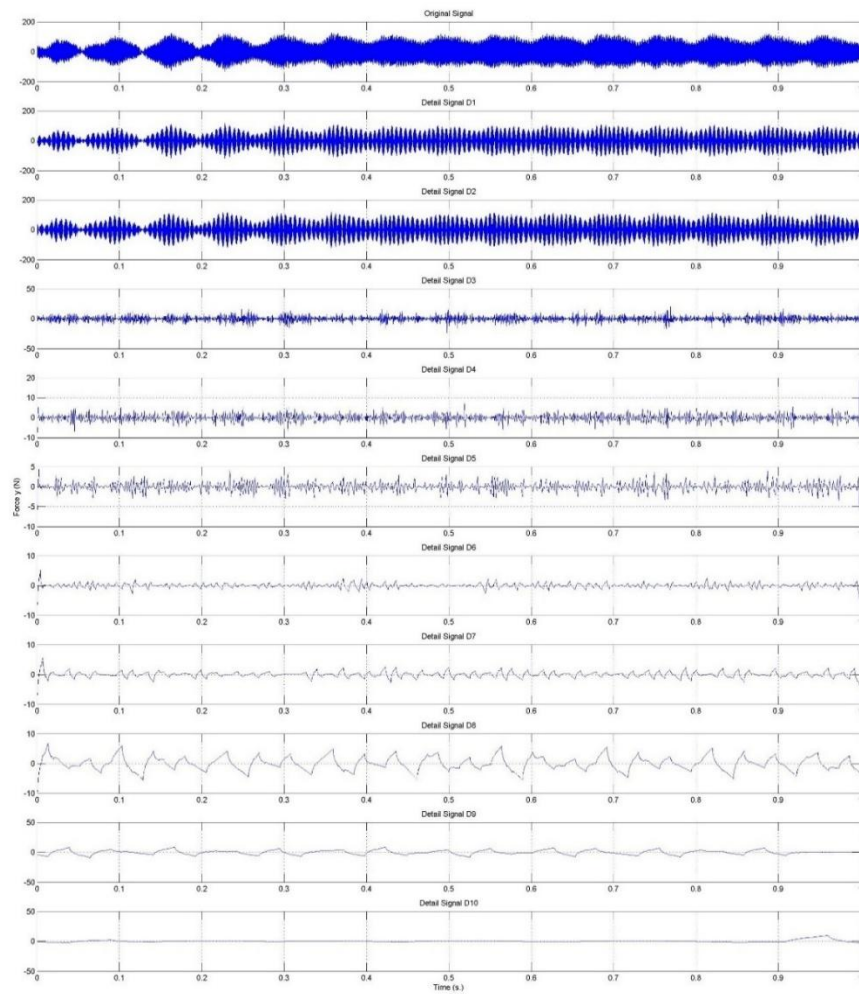
จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความกลมของชิ้นงาน กับความเร็วตัดที่เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้นความตรงเบี่ยงศูนย์และพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.29-4.30 แสดงว่าความตรงและความกลมของชิ้นงานมีลักษณะที่ดีขึ้น เนื่องจากความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิในขณะตัดจึงสูงขึ้น และทำให้ชิ้นงานมีลักษณะอ่อนนุ่มง่ายต่อการตัด แรงที่ใช้ในการตัดจึงน้อยลงดังรูปที่ 4.31-4.32 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้นแรงที่ใช้ในการตัดลดลง และยังสอดคล้องกับค่าความตรงเบี่ยงศูนย์และพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานที่ลดลงอีกด้วย



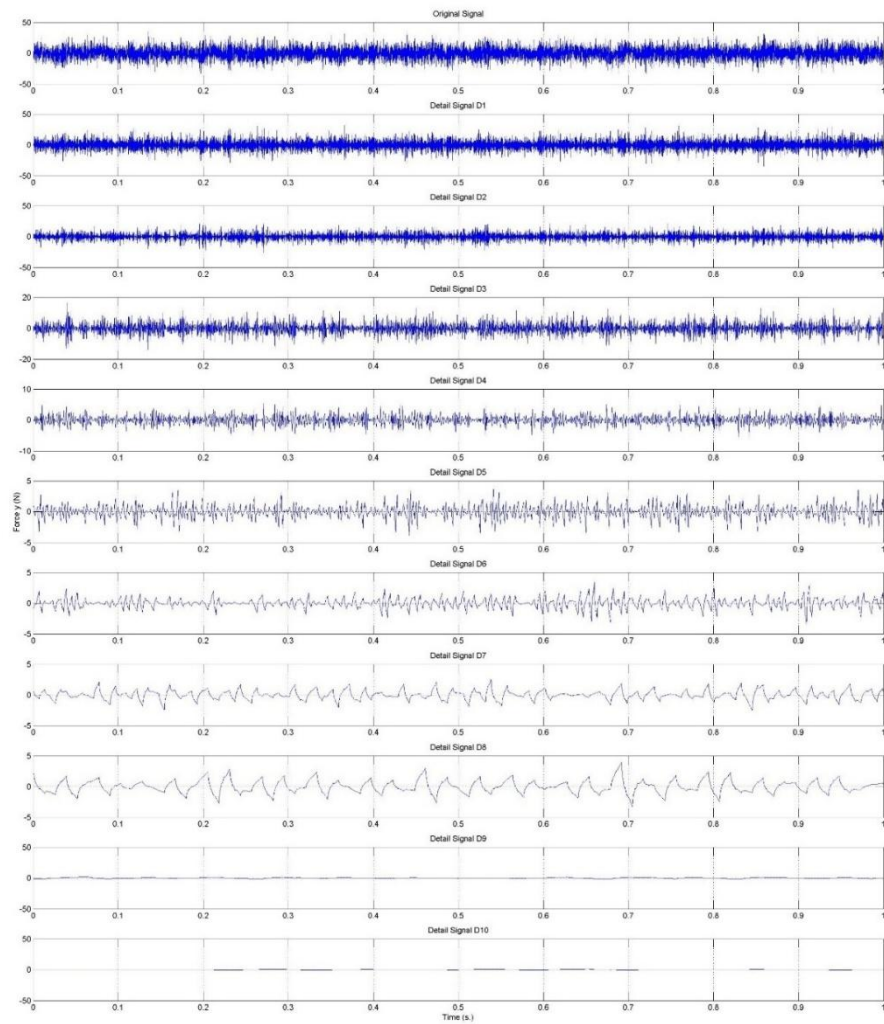
รูปที่ 4.29 การวิเคราะห์ความตรงเบี่ยงศูนย์ ณ เงื่อนไขการตัด ที่อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุกมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



รูปที่ 4.30 การวิเคราะห์พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัด อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุกมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

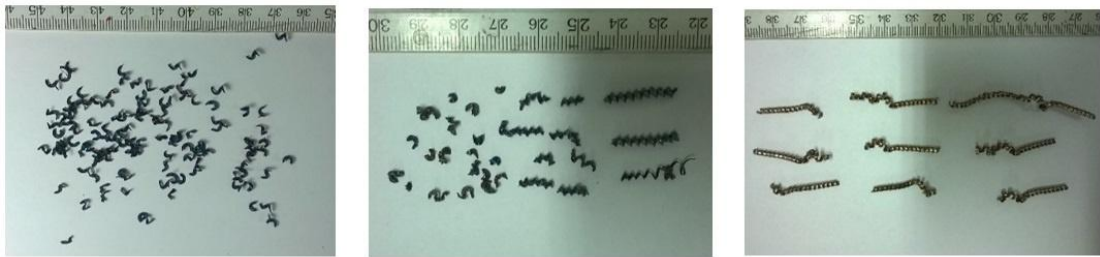


รูปที่ 4.31 แสดงสัญญาณแรงตึงจากการแปลงเวฟเลทในระบบการกลิ้งที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจุ่มกมิต 0.8 และ คุมคายเศษโลหะ 11 องศา



รูปที่ 4.32 แสดงสัญญาณแรงตึงจากการแปลงเวฟเลทในกระบวนการกลึงที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร รัศมีจมูกมีด 0.8

และ คุมคายเศษโลหะ 11 องศา



ความเร็วตัด 100 ม./นาที

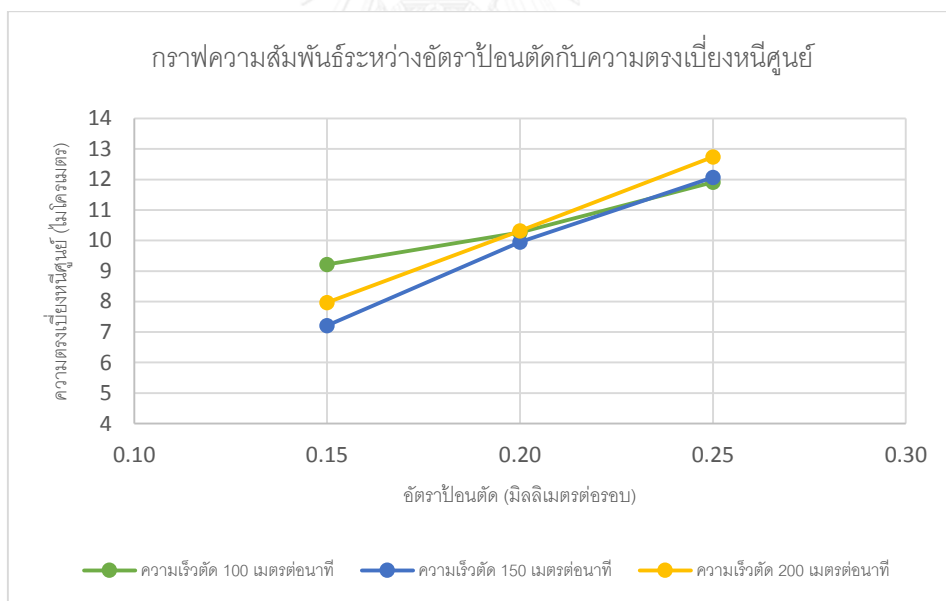
ความเร็วตัด 150 ม./นาที

ความเร็วตัด 200 ม./นาที

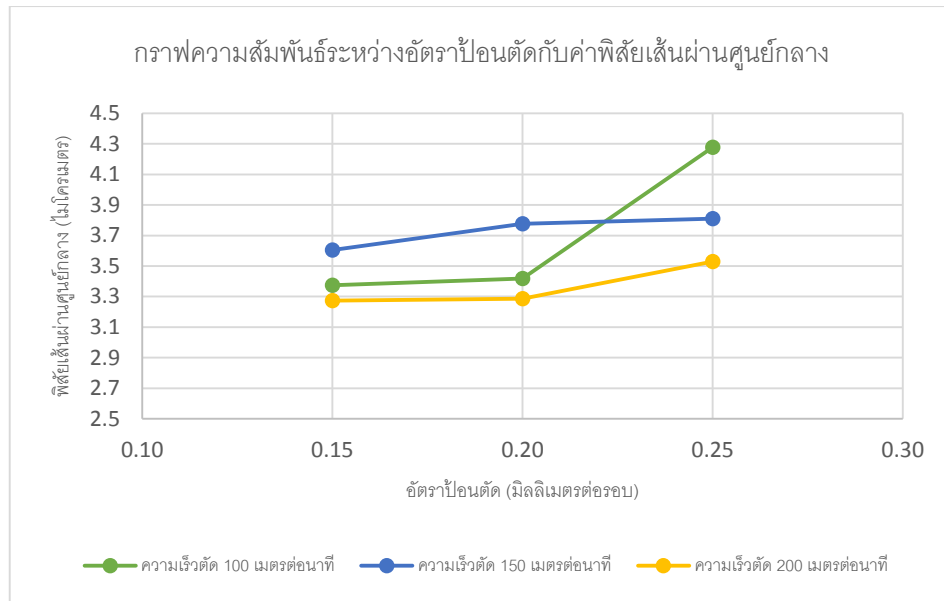
รูปที่ 4.33 การเกิดเศษโลหะเนื่องจากการตัด ความเร็วตัด 100, 150 และ 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ความลึกตัด 0.4 มม. รัศมีจมูกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

จากรูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์เศษโลหะพบว่า เมื่อความเร็วตัดเพิ่มสูงขึ้น เศษโลหะจะมีความยาวต่อเนื่องมากขึ้น เนื่องจากเมื่อความเร็วตัดเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิการตัดสูงขึ้น เนื้อวัสดุอ่อนนุ่มมากขึ้น แรงตัดพลวัตลดลง จึงทำให้เศษวัสดุสามารถเคลื่อนตัวออกมาได้อย่างต่อเนื่อง

#### 4.7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนตัดกับความตรงและความกลมของชิ้นงาน

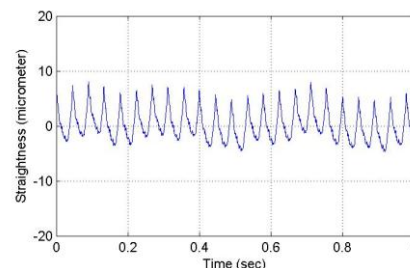
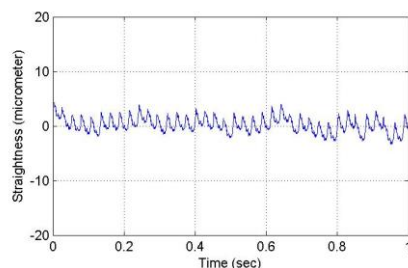


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงเบี่ยงศูนย์กับอัตราป้อนตัดที่ 0.15, 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจมูกมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



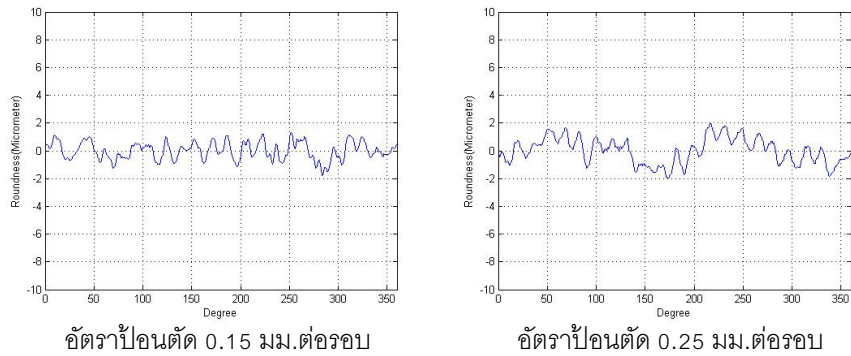
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางกับอัตราป้อนตัดที่ 0.15, 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจุ่มกมิต 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

จากรูปที่ 4.34-4.35 พบว่าที่อัตราการป้อนแปรผันตรงกับค่าความตรงและความกลมของชิ้นงาน กล่าวคือ เมื่ออัตราป้อนตัดเพิ่ม ความตรงเบี่ยงศูนย์และค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.36-4.37 เนื่องจากอัตราการป้อนตัดที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มขึ้น แรงที่ใช้ในการตัดจึงมากขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.38-4.39 แรงตัดที่สูงขึ้นนี้จะส่งผลให้เครื่องมือตัด และชิ้นงานเกิดการสั่นสะเทือน จึงส่งผลให้ความตรงเบี่ยงศูนย์และค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าสูงมากขึ้นตามไป



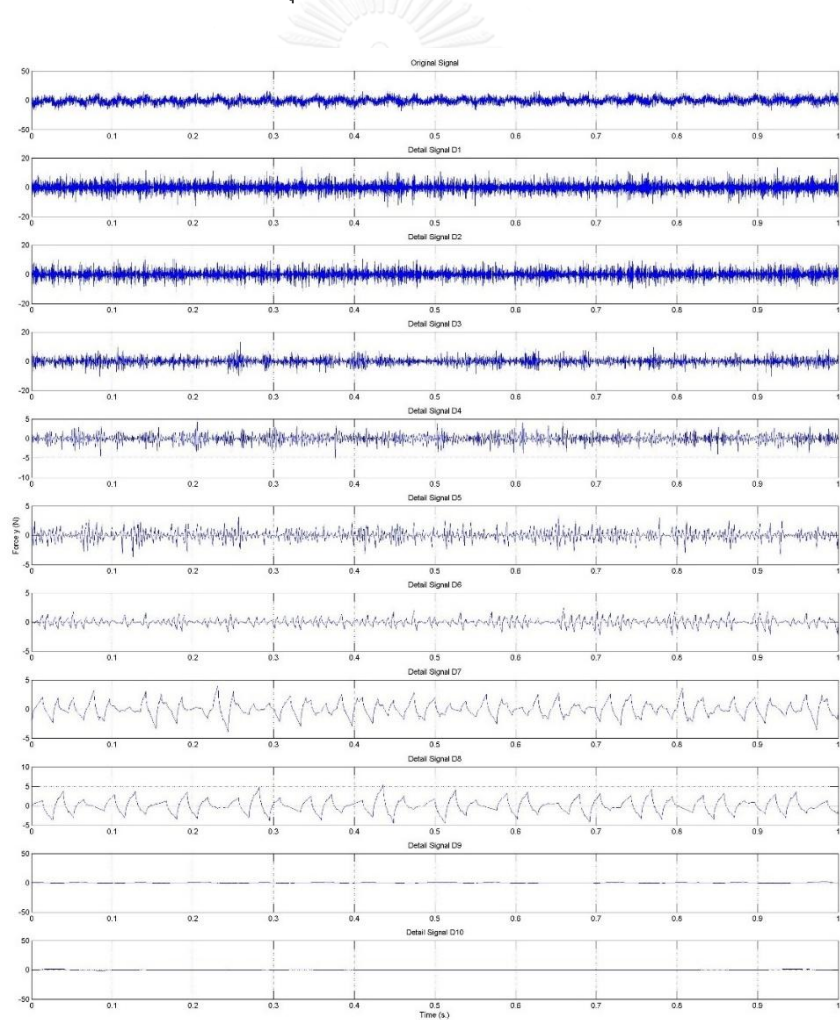
รูปที่ 4.36 การวิเคราะห์ความตรงเบี่ยงศูนย์ ณ เงื่อนไขการตัดที่อัตราป้อนตัดที่ 0.15 และ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจุ่มกมิต 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา





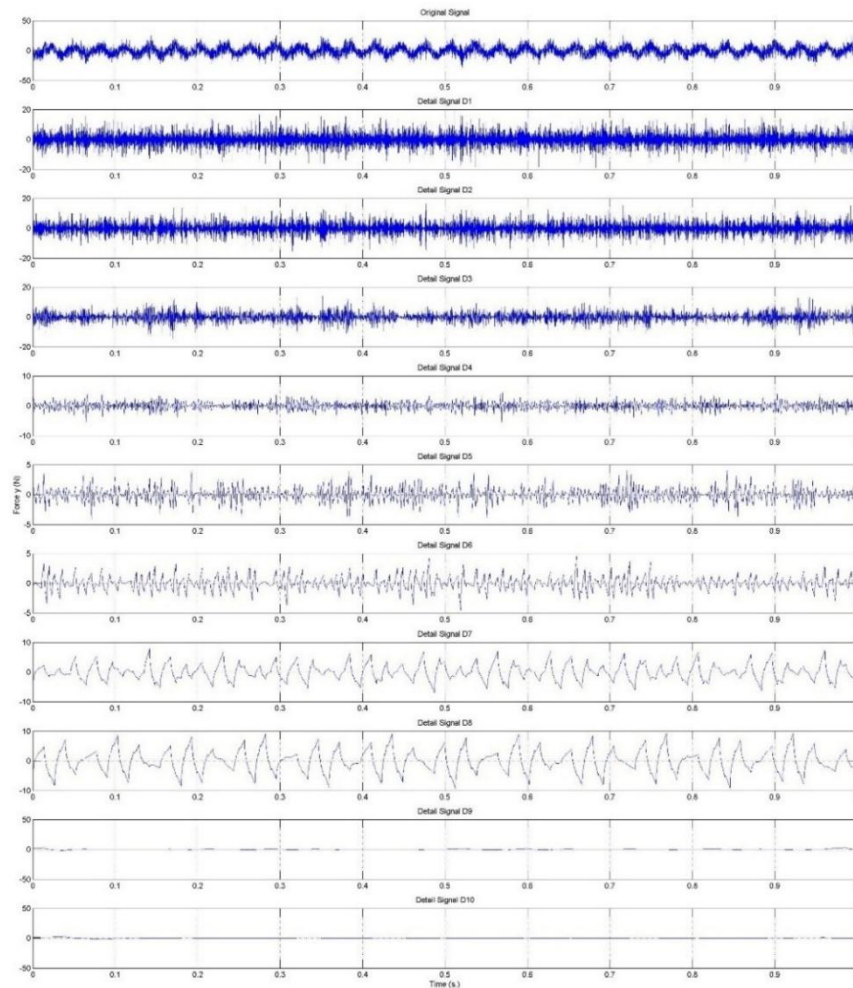
รูปที่ 4.37 การวิเคราะห์พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัดที่อัตราป้อนตัดที่ 0.15 และ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจุ่มกมิด 0.8 มม.

มุมมองพิเศษโลหะ 11 องศา

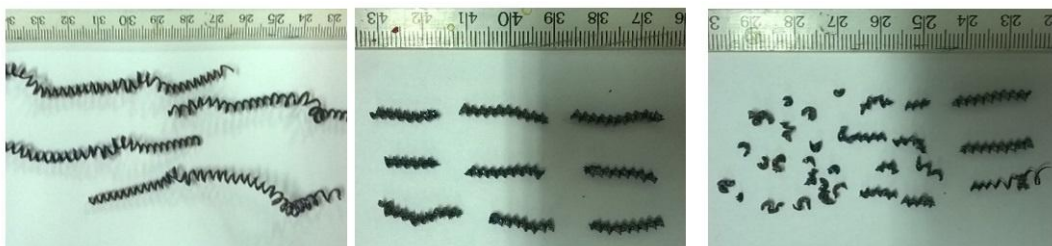


รูปที่ 4.38 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลทในกระบวนการกลึงที่อัตราป้อนตัดที่ 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจุ่มกมิด 0.8 มม.

มุมมองพิเศษโลหะ 11 องศา



รูปที่ 4.39 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลขในกระบวนการกลึงที่อัตราป้อนตัดที่ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจุกมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



อัตราป้อนตัด 0.15 มม./รอบ

อัตราป้อนตัด 0.20 มม.ต่อรอบ

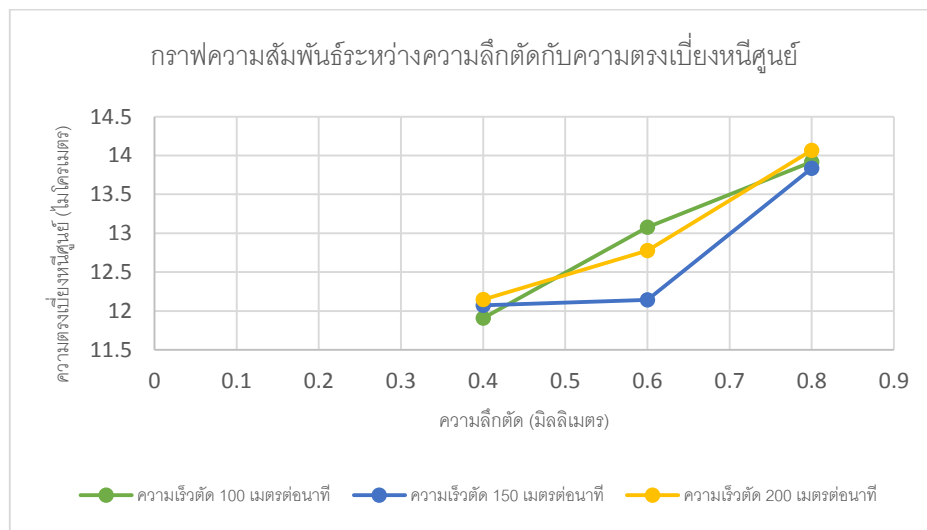
อัตราป้อนตัด 0.25 มม.ต่อรอบ

รูปที่ 4.40 การเกิดเศษโลหะเนื่องจากการตัด อัตราป้อนตัด 0.15, 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 200 ม./นาที ความลึกตัด 0.8 มม. รัศมีจุกมีด 0.4 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

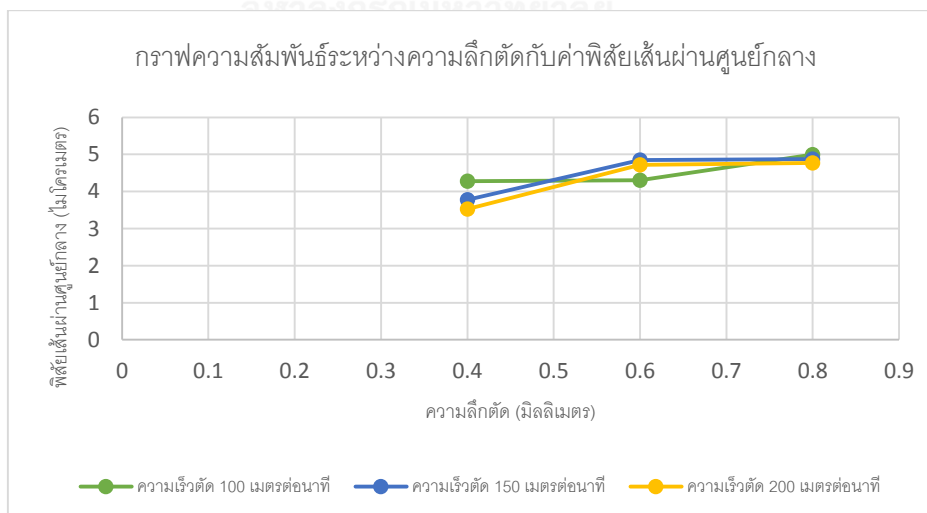
องศา

จากรูปที่ 4.40 พบว่า เมื่ออัตราการป้อนตัดสูงมากขึ้น ความยาวเศษโลหะที่เกิดขึ้นจะมีขนาดสั้นกว่าอัตราการป้อนตัดที่ต่ำกว่า เนื่องจาก เมื่อใช้อัตราการป้อนตัดสูงมากขึ้น พื้นที่การตัดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เศษโลหะมีความหนาเพิ่มขึ้น เกิดการโค้งงอส่งผลให้ความกว้างของเศษโลหะเพิ่มขึ้น เกิดการโค้งงอ และเคลื่อนชนกับหน้าคายเศษโลหะของมีดตัด ทำให้เกิดการแตกหักของเศษโลหะได้ง่ายกว่า

#### 4.7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดกับความตรงและความกลมของชิ้นงาน

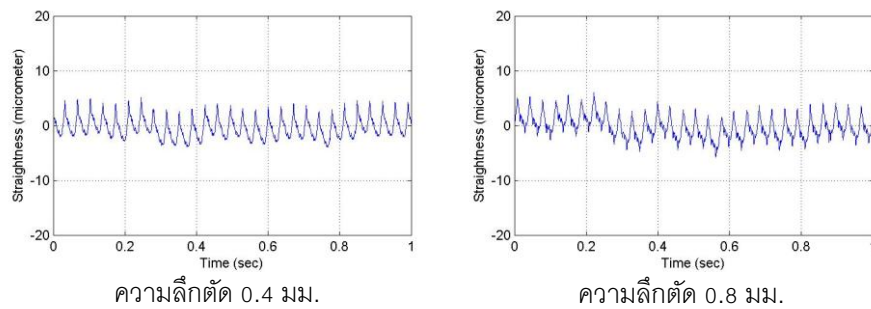


รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงเบี่ยงศูนย์กับความลึกตัดที่ 0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิเมตร โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มม.ต่อรอบ และ รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



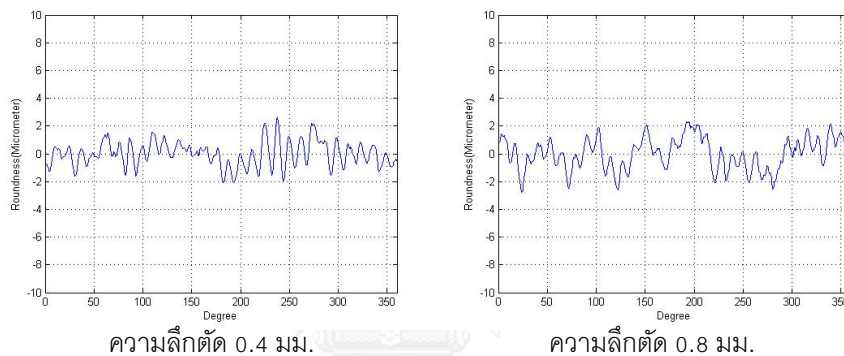
รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางกับความลึกตัดที่ 0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิเมตร โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มม.

ต่อรอบ และ รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



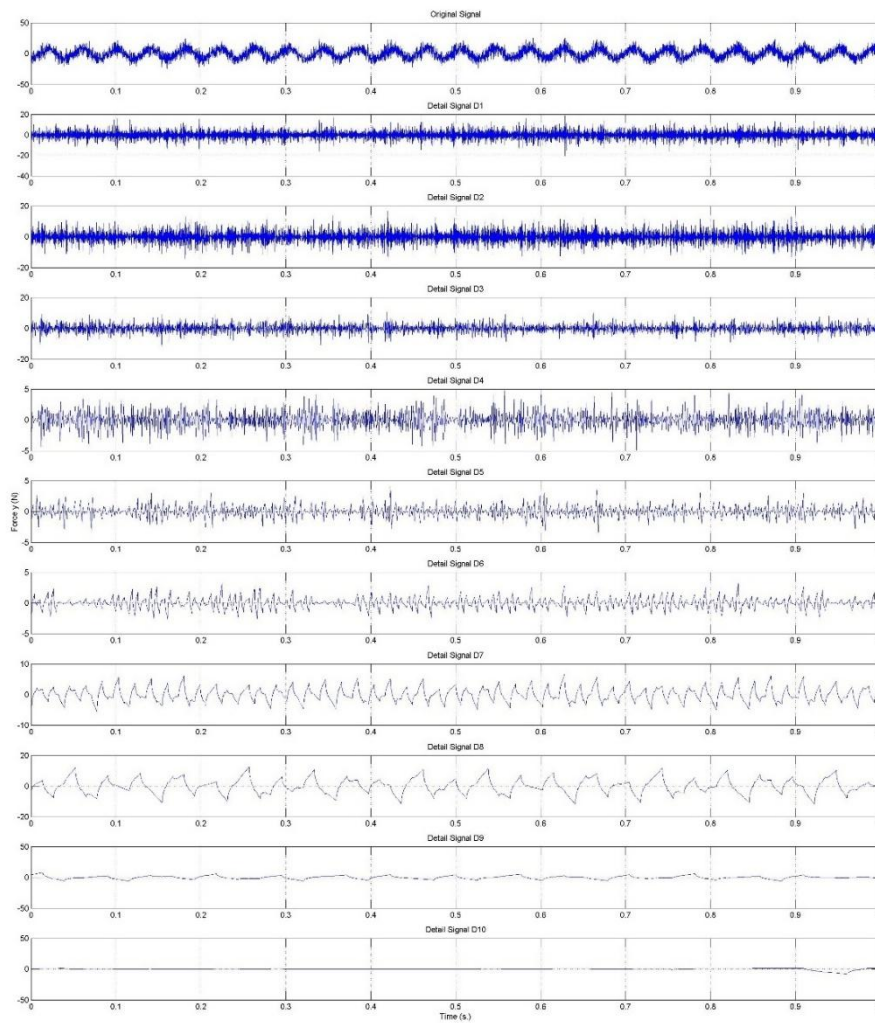
รูปที่ 4.43 การวิเคราะห์ความตรงเบี่ยงศูนย์ ณ เงื่อนไขการตัดที่ความลึกตัด 0.4 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 150 เมตรต่ออนาที อัตราป้อนตัดที่ 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ และ รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม.

มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



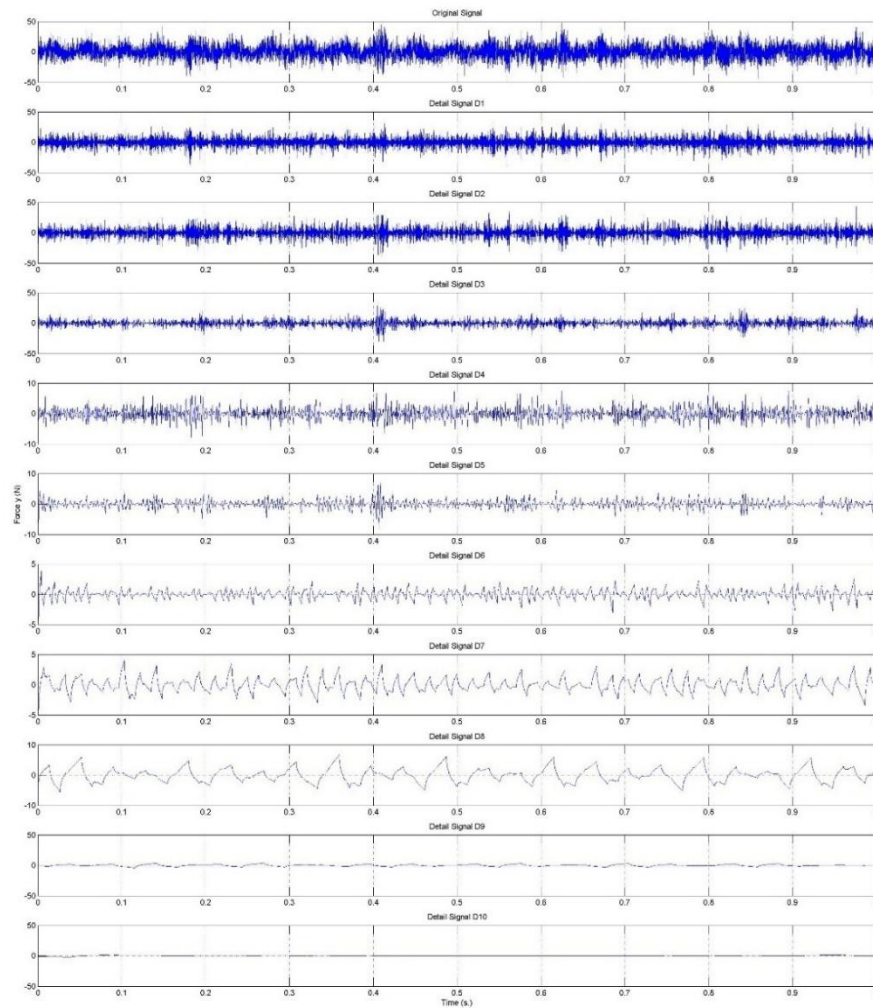
รูปที่ 4.44 การวิเคราะห์พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัดที่ความลึกตัด 0.4 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 150 เมตรต่ออนาที อัตราป้อนตัดที่ 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ และ รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม. มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

จากรูป 4.41-4.44 แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดในแต่ละกับความตรงเบี่ยงศูนย์และค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง พบว่าที่ค่าความลึกตัดที่สูงขึ้นนั้นจะให้ค่าความตรงเบี่ยงศูนย์และค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น เนื่องจากความลึกตัดที่เพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ในการตัดมากขึ้น แรงที่ใช้ในการตัดจึงมากขึ้น ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนในกระบวนการตัดสูง ส่งผลให้แรงตัดพลวัตมีค่าสูงมากขึ้นตามความลึกตัดด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.45-4.46 และความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดความขรุขระผิวสูงสุดที่ลดลงในแต่ละความลึกตัดที่เท่ากัน เนื่องจากการใช้ความเร็วในการตัดที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดจึงสูงขึ้นส่งผลให้ผิววัสดุอ่อนนุ่มและการตัดโดยใช้ความเร็วตัดที่สูงนั้นเป็นผลให้ใช้แรงในการตัดน้อยลงทำให้โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดการสั่นสะเทือนต่ำจึงทำให้วัสดุมีความเรียบผิวสูง ดังนั้น การใช้ความลึกตัดที่ต่ำและความเร็วตัดที่สูงจะทำให้ได้ผิวของวัสดุที่มีความตรงและความกลมมากขึ้น



รูปที่ 4.45 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลทในระบบการกลิ้งที่ความลึกตัด 0.4 มม. ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัดที่ 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ และ รัศมีจุกมีด 0.8 มม.

มุมคายเศษโลหะ 11 องศา



รูปที่ 4.46 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลทในกระบวนการกลึงที่ความลึกตัด 0.8 มม. ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัดที่ 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ และ รัศมีจุกมีด 0.8 มม.

มุ่มคายเศษโลหะ 11 องศา



ความลึกตัด 0.4 มม.

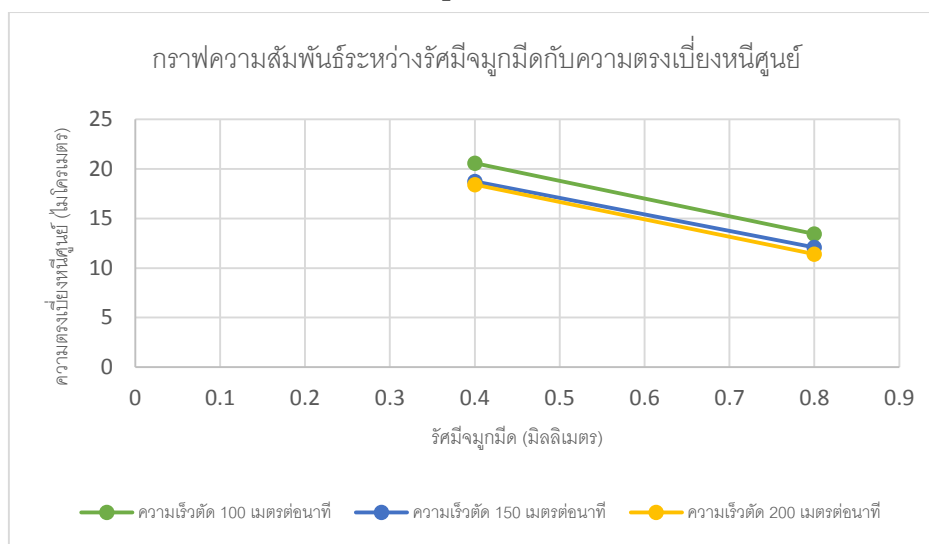
ความลึกตัด 0.6 มม.

ความลึกตัด 0.8 มม.

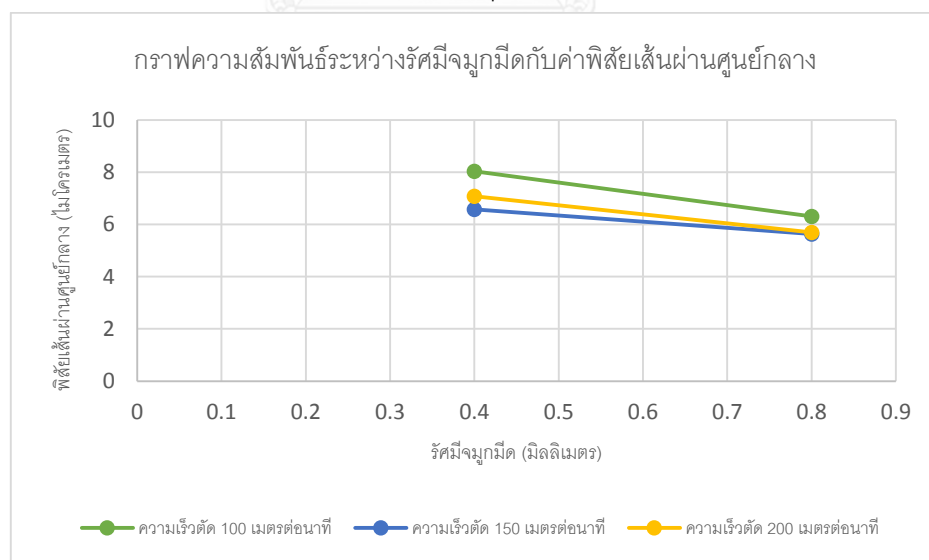
รูปที่ 4.47 การเกิดเศษโลหะเนื่องจากการตัด ได้แก่ ความลึกตัด 0.4, 0.6 และ 0.8 มม. ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.2 มม. รัศมีจุกมีด 0.8 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

จากรูปที่ 4.47 พบว่า เมื่อความลึกตัดสูงมากขึ้น ความยาวเศษโลหะมีขนาดสั้นลง เนื่องจากเมื่อความลึกตัดสูงมากขึ้น เศษโลหะจะมีความกว้าง และความหนามากขึ้น เมื่อเคลื่อนที่ชนกับหน้าคายเศษโลหะ จึงเกิดการแตกหักได้ง่ายกว่าการใช้ความลึกตัดที่ต่ำกว่า

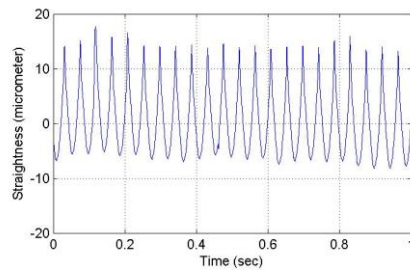
#### 4.7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีจุกมิดกับความตรงและความกลมของชิ้นงาน



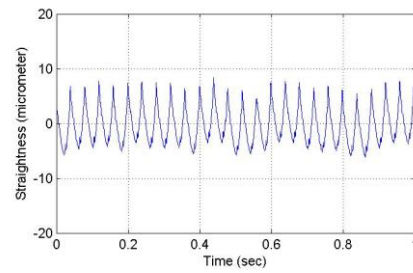
รูปที่ 4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงเบี่ยงศูนย์กลางกับรัศมีจุกมิดที่ 0.4 และ 0.8 มม. โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มม. และ มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



รูปที่ 4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางกับรัศมีจุกมิดที่ 0.4 และ 0.8 มม. โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มม. และ มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



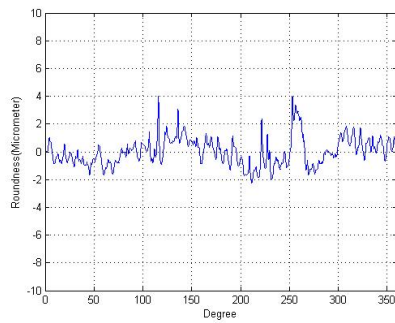
รัศมีจุ่มกมิต 0.4 มม.



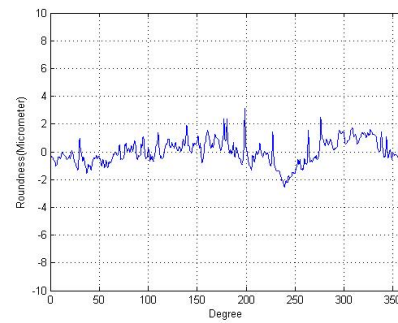
รัศมีจุ่มกมิต 0.8 มม.

รูปที่ 4.50 การวิเคราะห์ความตรงเบี่ยงศูนย์ ณ เงื่อนไขการตัดที่รัศมีจุ่มกมิตที่ 0.4 และ 0.8 มม. โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มม.

และ มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



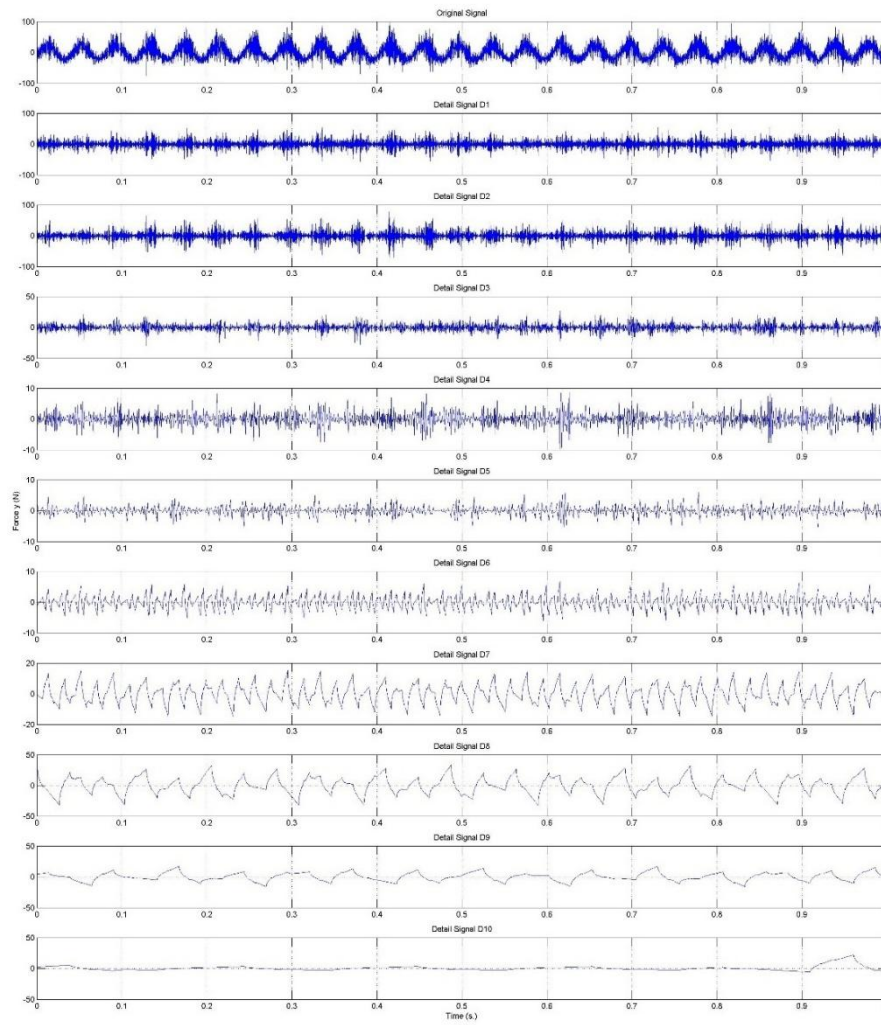
รัศมีจุ่มกมิต 0.4 มม.



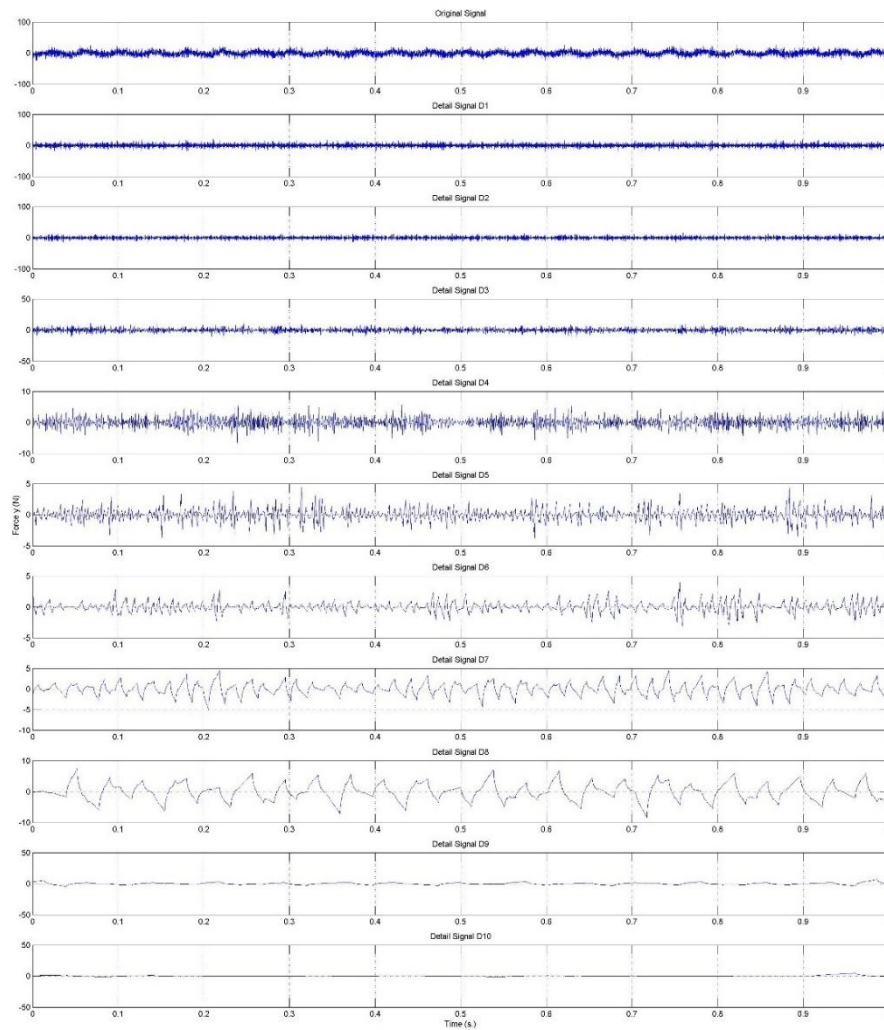
รัศมีจุ่มกมิต 0.8 มม.

รูปที่ 4.51 การวิเคราะห์พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัดที่รัศมีจุ่มกมิตที่ 0.4 และ 0.8 มม. โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มม. และ มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



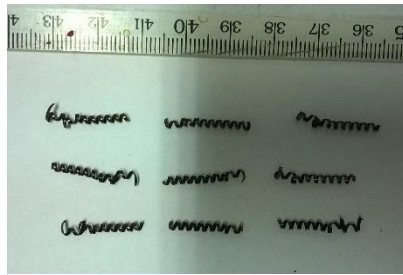


รูปที่ 4.52 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลทในระบบการกลึงที่รัศมีจุ่มมีดที่ 0.4 มม. โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มม. และ มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



รูปที่ 4.53 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลทในกระบวนการกลึงที่รัศมีจุกมีดที่ 0.8 มม. โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มม. และ มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

จากรูปที่ 4.48 - 4.51 แสดงความสัมพันธ์ของรัศมีจุกมีดเงื่อนไขการตัดต่างๆกับความตรงเบี่ยงศูนย์และพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง พบว่าเมื่อรัศมีจุกมีดมีขนาดใหญ่มากขึ้น ค่าความตรงเบี่ยงศูนย์และพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางจะน้อยลง เนื่องจากการใช้รัศมีจุกมีดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้พื้นที่การตัดลดลง ส่งผลให้แรงตัดพลวัตมีค่าลดลงดังรูปที่ 4.52-4.53 การสั่นสะเทือนน้อยลง และการใช้รัศมีจุกมีดที่มีขนาดใหญ่จะช่วยบรรเทาตัดที่เกิดจากการป้อนตัดที่เกิดขึ้น จึงทำให้ผิวมีความเรียบมากขึ้น ส่งผลให้ความตรงเบี่ยงศูนย์และค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง



รัศมีจุ่มกมิด 0.4 มม.

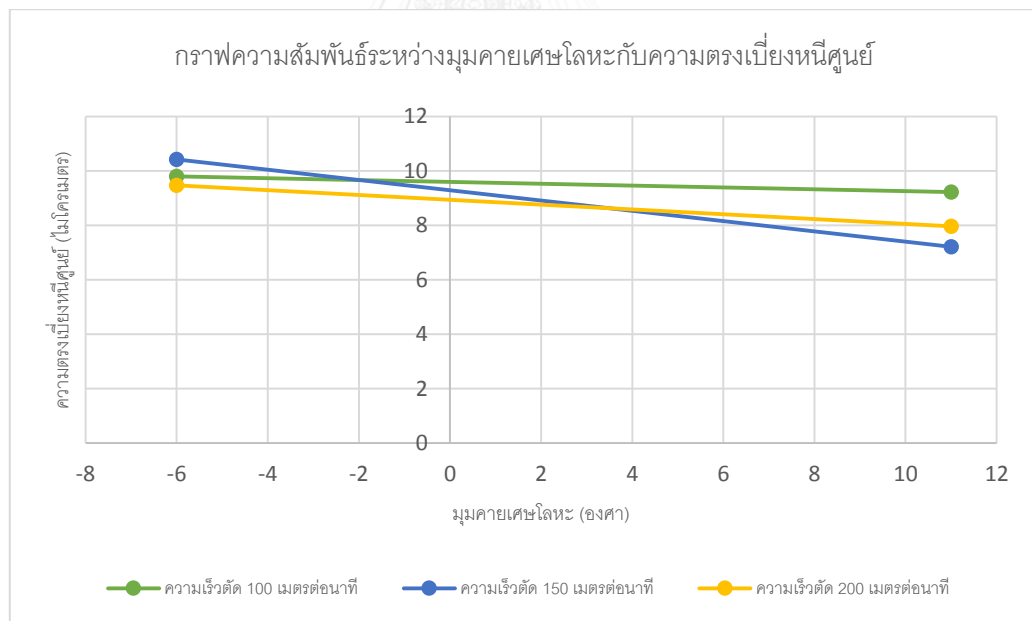


รัศมีจุ่มกมิด 0.8 มม.

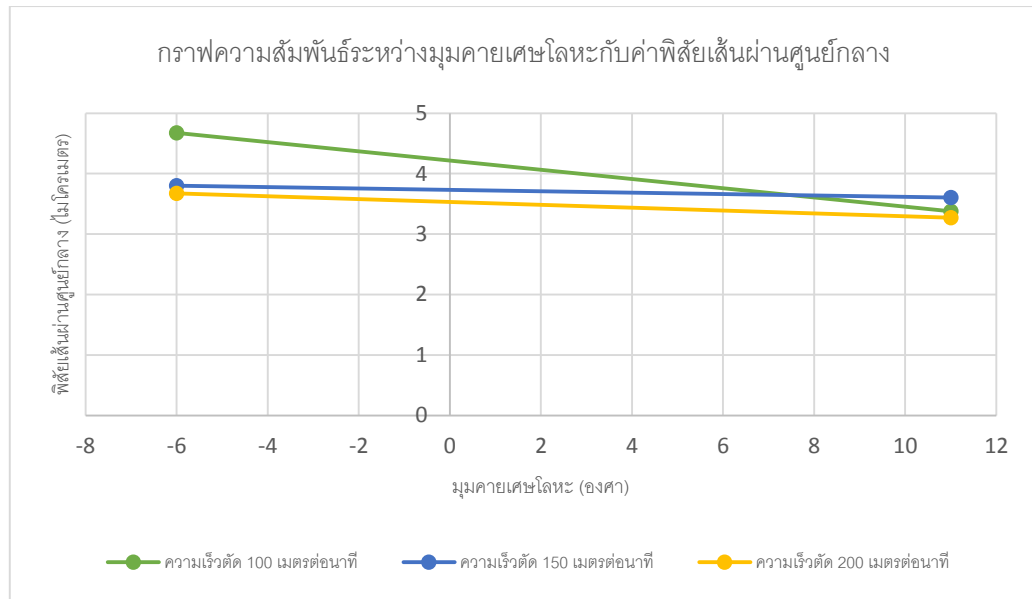
รูปที่ 4.54 การเกิดเศษโลหะเนื่องจากการตัด ได้แก่ รัศมีจุ่มกมิด 0.4 และ 0.8 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.20 มม. และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา

จากรูปที่ 4.54 พบว่า เมื่อรัศมีจุ่มกมิดมีขนาดใหญ่มากขึ้น เศษโลหะที่เกิดขึ้นจะมีความยาวต่อเนื่อง เนื่องจากการใช้รัศมีจุ่มกมิดที่มีขนาดเล็ก จะส่งผลให้เศษโลหะมีความหนา เมื่อเคลื่อนที่ชนกับหน้าคายเศษโลหะ จึงทำให้เกิดการแตกหักได้ง่ายมากกว่า จึงส่งผลให้เศษโลหะเมื่อรัศมีจุ่มกมิดมีขนาดเล็กจึงมีขนาดความยาวที่สั้นมากกว่า

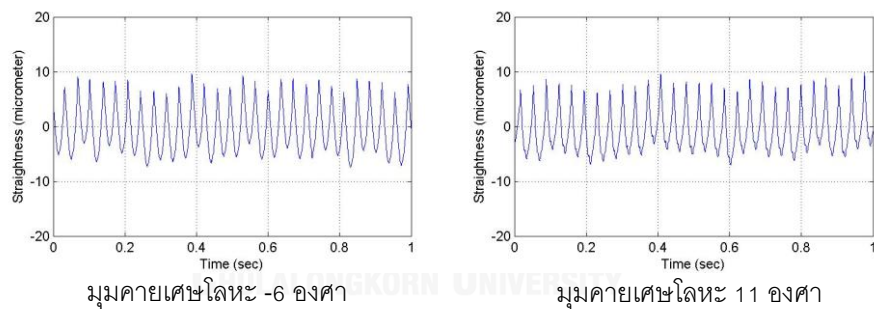
#### 4.7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมคายเศษโลหะกับความตรงและความกลมของชิ้นงาน



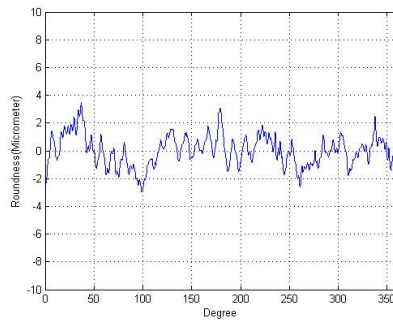
รูปที่ 4.55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงเบี่ยงศูนย์กับมุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม. ต่รอบ ความลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจุ่มกมิด 0.8 มม.



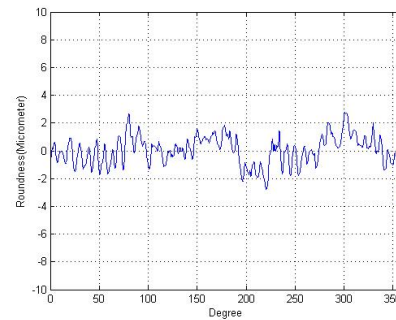
รูปที่ 4.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางกับมุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา โดยมีความเร็วตัด 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม.ต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มม. และ รัศมีจุมุมมีด 0.8 มม.



รูปที่ 4.57 การวิเคราะห์ความตรงเบี่ยงศูนย์ ณ เงื่อนไขการตัดมุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มม.ต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มม. และ รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม.



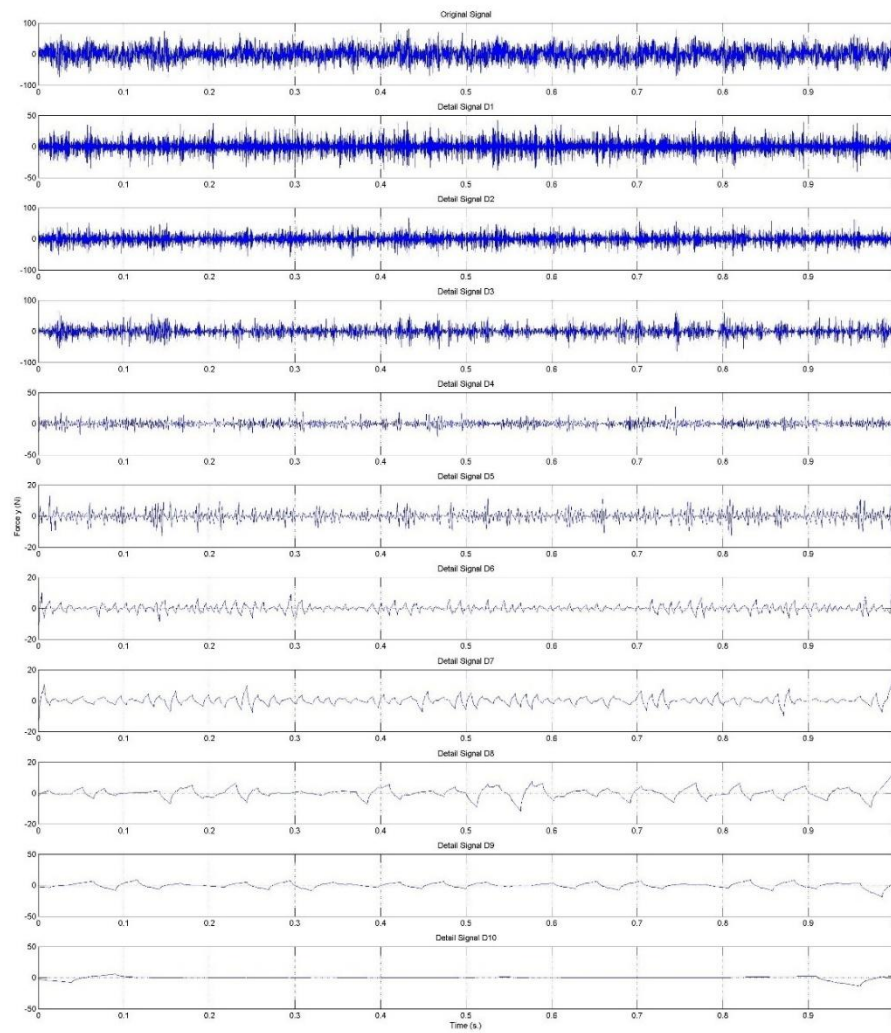
มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



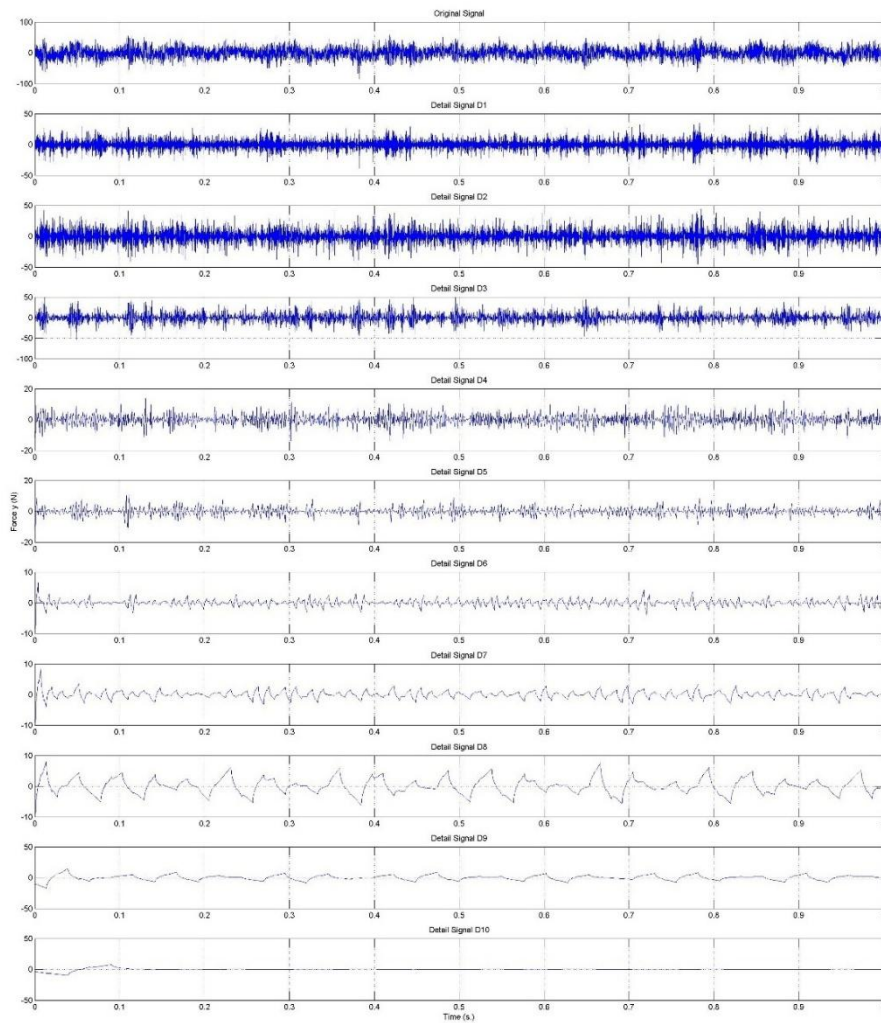
มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.58 การวิเคราะห์พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เงื่อนไขการตัดมุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มม.ต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มม. และ รัศมีจุมุมมีด 0.4 มม.

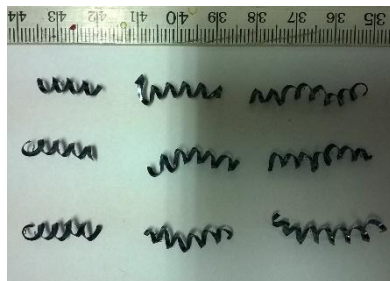
จากรูป 4.55-4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกับมุมคายเศษโลหะที่ค่าต่างๆกับค่าความตรงและความกลมของชิ้นงานตามลำดับ พบว่าเมื่อมุมคายเศษโลหะมีค่ามากขึ้น ค่าความตรงเบี่ยงศูนย์และค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางจะลดลง เนื่องจากมุมคายเศษโลหะมีค่ามากขึ้นเศษโลหะที่เกิดในขณะตัดสามารถเคลื่อนที่ออกได้ง่ายขึ้น ความต้านทานการเคลื่อนที่ของมีดตัดจะน้อย ดังนั้น คุณภาพผิวชิ้นงาน ความตรงและความกลมของชิ้นงานที่ได้จะมีค่าที่ดีขึ้นดังรูปที่ 4.57-4.58 อีกทั้งแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดก็จะน้อยลงไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.59-4.60



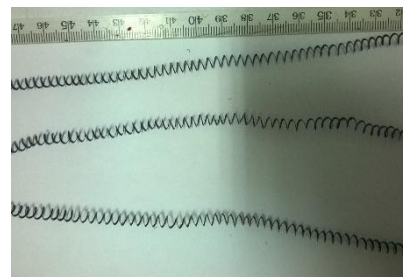
รูปที่ 4.59 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลทในกระบวนการกลึงที่เงื่อนไขการตัดมุม  
 คายเศษโลหะ -6 องศา โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มม.ต่อรอบ  
 ความลึกตัด 0.8 มม. และ รัศมีจุ่มกมิด 0.4 มม.



รูปที่ 4.60 แสดงสัญญาณแรงตัดจากการแปลงเวฟเลทในกระบวนการกลึงที่เงื่อนไขการตัดมุมคายเศษโลหะ 11 องศา โดยมีความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.20 มม.ต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มม. และ รัศมีจุกมิด 0.4 มม.



มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



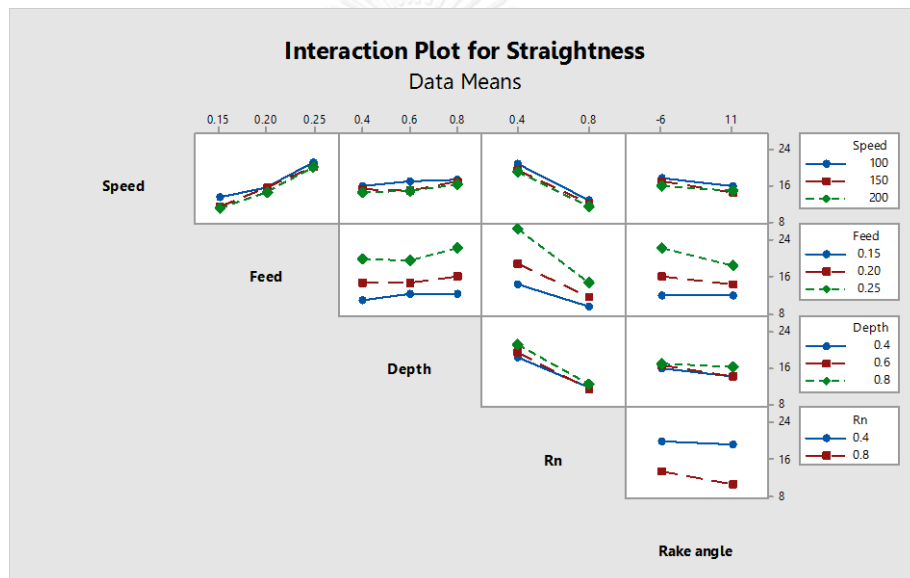
มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.61 การเกิดเศษโลหะเงื่อนไขการตัด ได้แก่ มุมคายเศษโลหะ -6 และ 11 องศา รัศมีจุกมิด 0.8 มม. ความลึกตัด 0.6 มม. ความเร็วตัด 200 ม./นาที อัตราป้อนตัด 0.15 มม.

จากการทดลองพบว่ามุมคายเศษโลหะที่มีค่ามาก ลักษณะเศษโลหะที่เกิดขึ้นจะมีความยาวต่อเนื่องมากกว่ามุมคายเศษโลหะที่มีค่าน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.61 เนื่องจากมุมคายเศษโลหะที่มีค่าวกเศษโลหะที่เกิดขึ้น สามารถเคลื่อนตัวผ่านหน้ามีดตัดออกไปได้ดีกว่ามุมคายเศษโลหะที่มีค่าลบ เศษโลหะที่เกิดขึ้นจึงมีความยาวต่อเนื่อง

#### 4.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

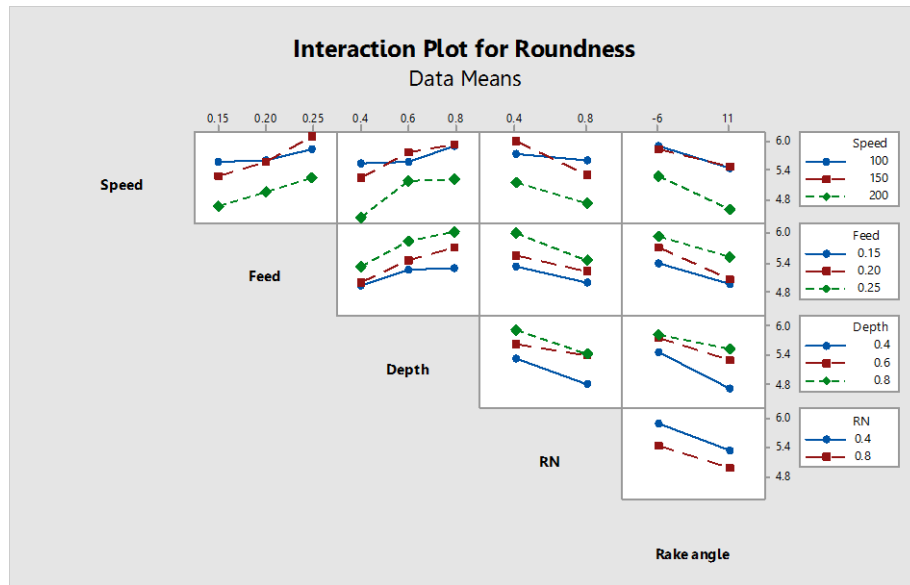
การวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างความตรงและความกลมขึ้นงานกับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ที่ระดับของแต่ละปัจจัย วิเคราะห์โดยหากเส้นกราฟที่เกิดขึ้นมีลักษณะขนานกัน จะบ่งบอกถึงการไม่มีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันของแต่ละปัจจัย แต่หากเส้นกราฟที่เกิดขึ้นไม่ขนานหรือเกิดจุดตัดกันจะบ่งบอกถึงการมีอันตรกิริยาต่อกันของแต่ละปัจจัย



รูปที่ 4.62 กราฟอันตรกิริยาระหว่างความตรงขึ้นงานและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

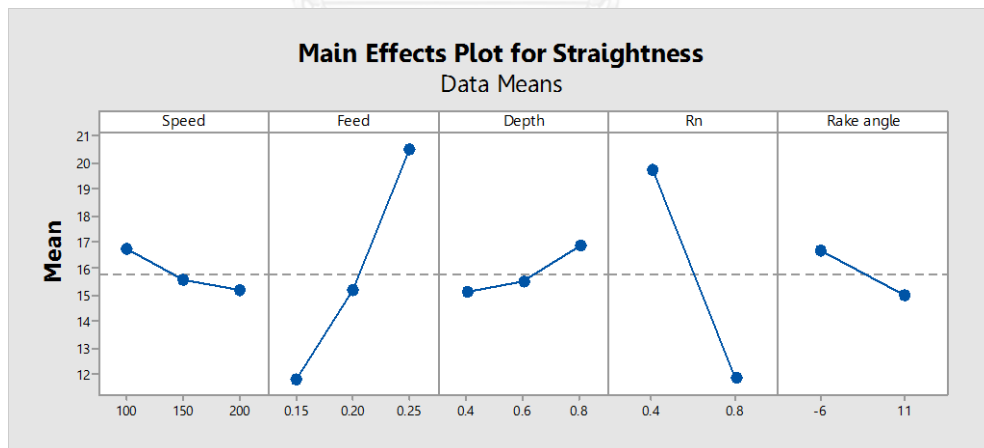
จากรูปที่ 4.62 แสดงให้เห็นว่าแสดงให้เห็นว่าความตรงขึ้นงานที่เกิดในแต่ละความเร็วตัดมีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละระดับปัจจัยต่างๆ โดยความเร็วตัดมีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราการป้อน ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด และมุมคายเศษโลหะ



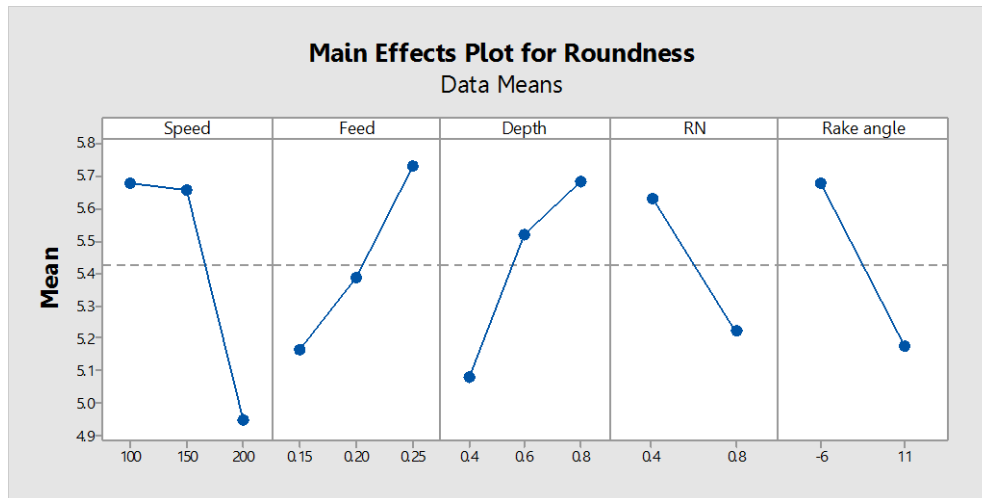


รูปที่ 4.63 กราฟอันตรกิริยาระหว่างความกลมชิ้นงานและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปที่ 4.63 แสดงให้เห็นว่าความกลมชิ้นงานที่เกิดขึ้นบนระดับของความเร็วตัดมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับของปัจจัยอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าความเร็วตัดมี อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการทดลอง ได้แก่ อัตราการป้อน ความลึกตัด รัศมีจุ่มกมิต และมุมคายเศษโลหะ แต่เมื่อกำหนดให้ปัจจัยอื่นๆ คงเดิมและทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วตัดก็จะพบว่า เมื่อความเร็วตัดที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลต่อความกลมชิ้นงาน แสดงว่าความเร็วตัดมีผลอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.64 ผลหลัก (Main effect) ของความตรงและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.65 ผลหลัก (Main effect) ของความกลมและปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปที่ 4.64-4.65 แสดงผลหลักของความตรงและความกลมขึ้นงานกับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

- ความเร็วตัดเพิ่มสูงมากขึ้นทำให้ความตรงและความกลมขึ้นงานลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเร็วดัดทำให้อุณหภูมิการตัดเพิ่มสูงมากขึ้น วัสดุจะอ่อนนุ่มลง แรงตัดจึงลดลง ส่งผลให้ความตรงและความกลมขึ้นงานมีค่าลดลง

- อัตราการป้อนตัดเพิ่มขึ้นทำให้ความตรงและความกลมขึ้นงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากการการเพิ่มอัตราการป้อนตัดทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มขึ้น แรงตัดเพิ่มขึ้น เกิดการสั่นสะเทือนที่มีดัดและขึ้นงาน นอกจากนี้ยังทำให้เกิดรอยป้อนตัดที่มีสันสูงขึ้น ความตรงและความกลมขึ้นงานจึงเพิ่มขึ้น

- ความลึกตัดเพิ่มขึ้นทำให้ความตรงและความกลมขึ้นงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากการการเพิ่มความลึกตัดทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มขึ้น แรงตัดเพิ่มขึ้น เกิดการสั่นสะเทือนที่มีดัดและขึ้นงาน

- รัศมีงูมมีดเพิ่มขึ้นทำให้ความตรงและความกลมขึ้นงานลดลง เนื่องจากการเพิ่มขนาดรัศมีงูมมีดจะทำให้พื้นที่การตัดลดลง แรงตัดลดลง ความตรงและความกลมขึ้นงานจึงลดลง

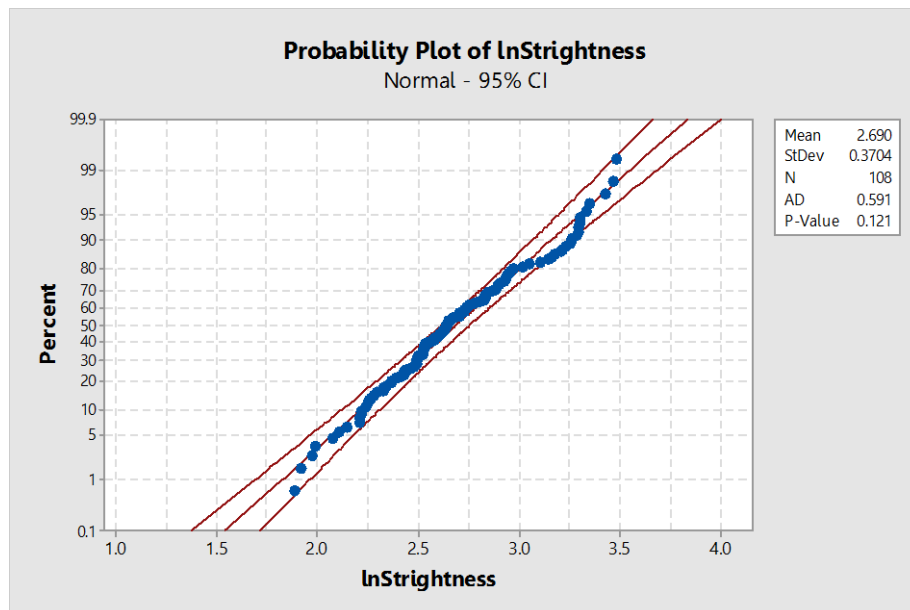
- มุมคายเศษโลหะเพิ่มขึ้นทำให้ความตรงและความกลมขึ้นงานลดลง เนื่องจากการเพิ่มมุมคายเศษโลหะจะช่วยลดการต้านทานการเคลื่อนที่ของเศษโลหะ ส่งผลให้แรงตัดลดลง ความตรงและความกลมขึ้นงานจึงลดลงไปด้วย

#### 4.9 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

ทำการทดสอบการกระจายแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ด้วย Normal Probability Plot โดยมีสมมติฐานของการทดสอบดังนี้

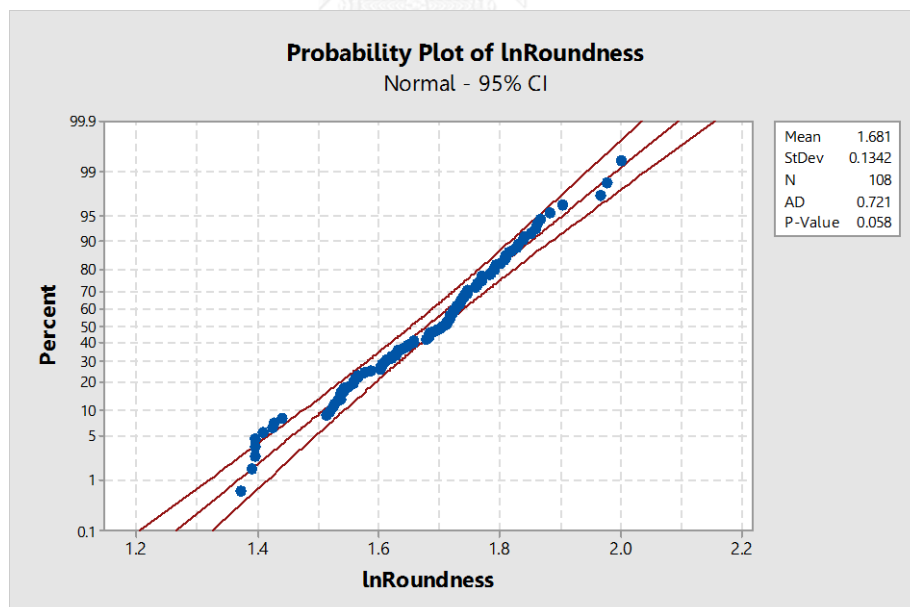
$H_0$ : ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

$H_1$ : ความคลาดเคลื่อนไม่มีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.66 Normal Probability Plot ข้อมูลความตรงของชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.66 พบว่าความคลาดเคลื่อนของความตรงของชิ้นงาน การเรียงตัวมีแนวโน้มเป็นแนวเส้นตรง และมีค่า P-Value = 0.121 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่  $\alpha = 0.05$  จึงยอมรับสมมติฐานหลัก และสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

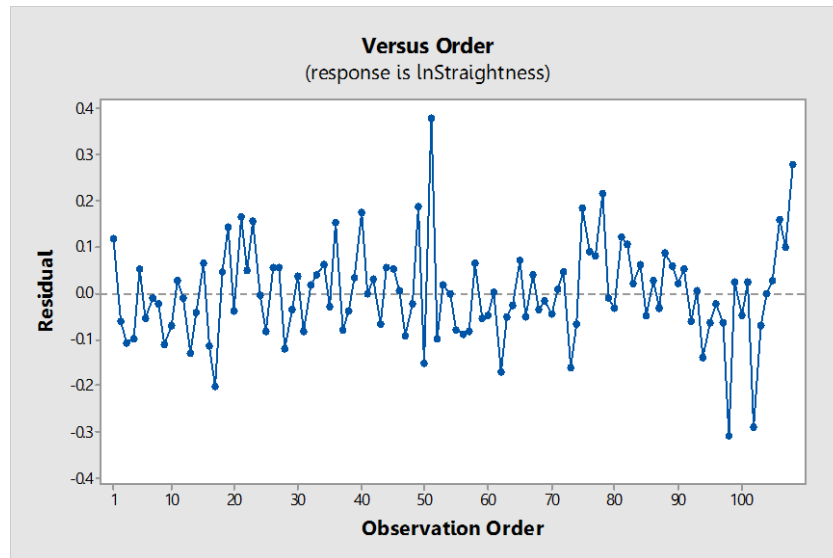


รูปที่ 4.67 Normal Probability Plot ข้อมูลความกลมชิ้นงาน

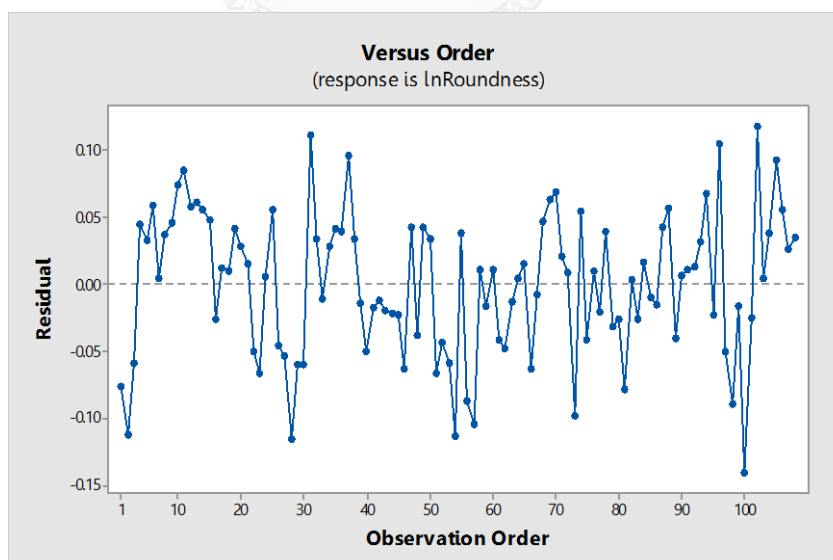
จากรูปที่ 4.67 พบว่าความคลาดเคลื่อนของความกลมของชิ้นงาน การเรียงตัวมีแนวโน้มเป็นแนวเส้นตรง และมีค่า P-Value = 0.058 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่  $\alpha = 0.05$  จึงยอมรับสมมติฐานหลัก และสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

#### 4.10 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

จากรูปที่ 4.68 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับการเก็บข้อมูลความตรงชิ้นงาน พบว่าลักษณะของค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบศูนย์ และไม่มีรูปแบบเป็นอย่างไรอย่างหนึ่ง หรือเป็นวัฏจักร ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน



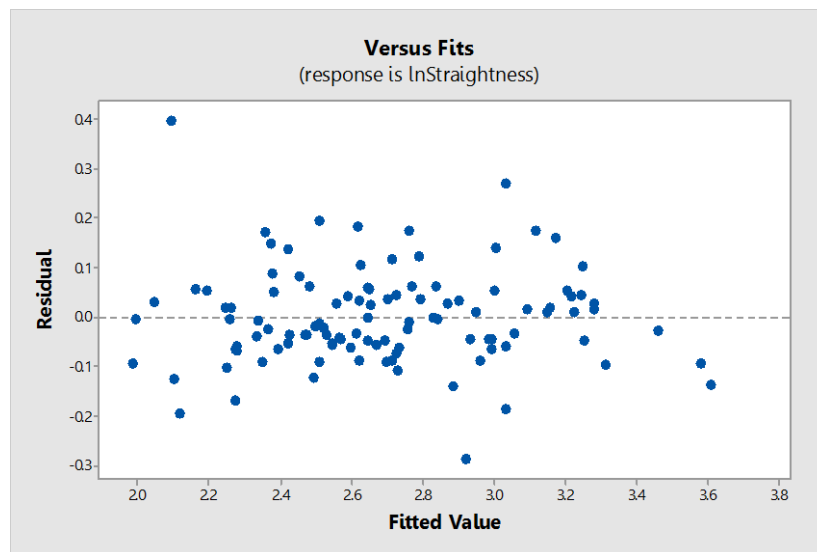
รูปที่ 4.68 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับการเก็บข้อมูลความตรงชิ้นงาน



รูปที่ 4.69 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับการเก็บข้อมูลความกลมชิ้นงาน

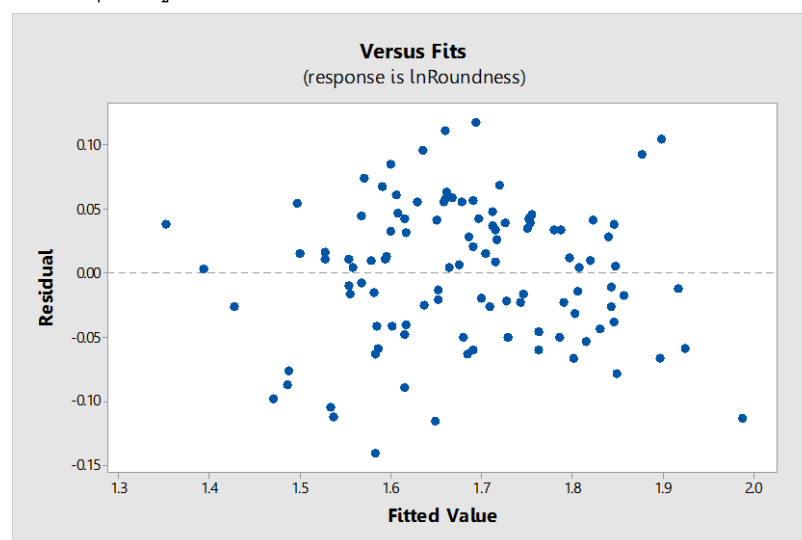
จากรูปที่ 4.69 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับการเก็บข้อมูลความตรงชิ้นงาน พบว่าลักษณะของค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบศูนย์ และไม่มีรูปแบบเป็นอย่างไรอย่างหนึ่ง หรือเป็นวัฏจักร ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน

#### 4.11 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน



รูปที่ 4.70 แสดงการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนความตรงของชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.70 แสดงการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนความตรงของชิ้นงาน โดยการตรวจสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมีการกระจายตัวอยู่รอบศูนย์ ไม่มีลักษณะเป็นรูปแบบใดแบบหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความแปรปรวนของชุดข้อมูลมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง



รูปที่ 4.71 แสดงการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนความกลมชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.71 แสดงการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนความกลมขึ้นงาน โดยการตรวจสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมีการกระจายตัวอยู่รอบศูนย์ ไม่มีลักษณะเป็นรูปแบบใดแบบหนึ่ง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความแปรปรวนของชุดข้อมูลมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง

#### 4.12 สมการทำนายความตรงของขึ้นงาน

จากผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.1 สามารถนำมาพัฒนาสมการทำนายความตรงและความตรงของขึ้นงานได้โดยนำเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด และมุมคายเศษโลหะ รวมทั้งอัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตกับแรงป้อนตัดสถิตและอัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัตมาทำการวิเคราะห์ด้วยการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Linear Regression Analysis) และใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยได้สมการทำนายความตรงและความกลมขึ้นงาน ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

$$\ln S_t = 6.099 - 0.3303 \ln V + 1.0736 \ln f + 0.2380 \ln D - 0.6270 \ln R_n - 0.009586 \gamma + 0.1021 \ln \left( \frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}} \right) \quad (4.1)$$

$$\ln R_0 = 2.130 - 0.0819 \ln V + 0.0846 \ln f + 0.0541 \ln D - 0.0632 \ln R_n - 0.004763 \gamma + 0.3036 \ln \left( \frac{AVF_x}{AVF_y} \right) \quad (4.2)$$

##### 4.12.1 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอยเพื่อทำการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรตาม (พิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง) และตัวแปรอิสระ ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด มุมคายเศษโลหะ และแรงขณะตัด ที่ระดับการยอมรับความผิดพลาดที่ 5% ( $\alpha = 0.05$ ) มีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 0$$

$$H_1 : \beta_j \text{ อย่างน้อย 1 ตัวไม่เท่ากับศูนย์}$$

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Regression	6	15.0112	2.50187	214.37	0.000	
lnV	1	0.7142	0.71423	61.20	0.000	
lnf	1	2.4606	2.46060	210.83	0.000	
lnD	1	0.4479	0.44791	38.38	0.000	
lnRn	1	2.9120	2.91203	249.51	0.000	
Rake angle	1	0.5814	0.58144	49.82	0.000	
ln[Fy(max) - Fy(min)] / Fy(s)	1	0.0708	0.07079	6.07	0.016	
Error	96	1.1204	0.01167			
Total	102	16.1316				

Model Summary				
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
0.108032	93.05%	92.62%	91.98%	

รูปที่ 4.72 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอยของสมการความตรง

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Regression	6	1.58830	0.264717	152.31	0.000	
lnV	1	0.06133	0.061331	35.29	0.000	
lnf	1	0.11318	0.113180	65.12	0.000	
lnD	1	0.02348	0.023475	13.51	0.000	
lnRn	1	0.01727	0.017272	9.94	0.002	
Rake Angle	1	0.13992	0.139923	80.51	0.000	
ln(AV Fx/AV Fy)	1	0.52610	0.526104	302.70	0.000	
Error	100	0.17380	0.001738			
Total	106	1.76211				

Model Summary				
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
0.0416895	90.14%	89.54%	88.65%	

รูปที่ 4.73 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอยของสมการความกลม

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอยของสมการความตรงและความกลม ดังแสดงในรูปที่ 4.72 และ 4.73 พบว่าทั้ง 2 สมการมีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 จึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) และสรุปได้ว่ามีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัว ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง หมายความว่าสมการถดถอยที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประมาณค่าความตรงที่เกิดขึ้นได้

#### 4.12.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว

การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทำเพื่อทดสอบว่าตัวแปรอิสระมีความสามารถในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าความตรงและความกลมได้หรือไม่ โดยมีสมมติฐานดังนี้คือ

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0$$

Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	6.099	0.225	27.13	0.000		
lnV	-0.3303	0.0422	-7.82	0.000	1.29	
lnf	1.0736	0.0739	14.52	0.000	2.07	
lnD	0.2380	0.0384	6.20	0.000	1.04	
lnRn	-0.6270	0.0397	-15.80	0.000	1.67	
Rake angle	-0.00958	0.00136	-7.06	0.000	1.17	
ln[Fy (max) - Fy (min)] / Fy (s)	0.1021	0.0415	2.46	0.016	3.25	

Regression Equation						
lnSt = 6.099 - 0.3303 lnV + 1.0736 lnf + 0.2380 lnD - 0.6270 lnRn - 0.00958 Rake angle + 0.1021 ln[Fy (max) - Fy (min)] / Fy (s)						

รูปที่ 4.74 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการความตรง

Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	2.3410	0.0898	26.06	0.000		
lnV	-0.0937	0.0158	-5.94	0.000	1.20	
lnf	0.1589	0.0197	8.07	0.000	1.01	
lnD	0.0568	0.0155	3.68	0.000	1.21	
lnRn	-0.0395	0.0125	-3.15	0.002	1.14	
Rake Angle	-0.004420	0.000493	-8.97	0.000	1.08	
ln(AV Fx/AV Fy)	0.3040	0.0175	17.40	0.000	1.49	

Regression Equation						
lnRoundness = 2.3410 - 0.0937 lnV + 0.1589 lnf + 0.0568 lnD - 0.0395 lnRn - 0.004420 Rake Angle + 0.3040 ln(AV Fx/AV Fy)						

รูปที่ 4.75 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการความกลม

จากการวิเคราะห์การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการความตรงและความกลม ขึ้นงานดังรูปที่ 4.74 และ 4.75 ตามลำดับ พบว่าค่า P-Value ของตัวแปรอิสระในสมการ มีค่าน้อยกว่าระดับการยอมรับความผิดพลาดที่ 5% ( $\alpha = 0.05$ ) ทุกตัวแปรค่า จึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) และสรุปได้ว่าตัวแปรอิสระในสมการสามารถใช้ในการทำนายค่าความตรงและความกลมได้ทุกตัวแปรอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.12.3 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการทำนายความตรงขึ้นงาน

จากการวิเคราะห์การถดถอยตามรูปที่ 4.72 สมการทำนายความตรงขึ้นงานมีค่า  $R^2 = 93.05\%$  และ  $R^2_{adj} = 92.62\%$  หมายความว่า ตัวแปรตอบสนองหรือค่าความตรงขึ้นงานเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรอิสระ (ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมีด มุมคายเศษโลหะ และแรงขณะตัด) 93.05% และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ได้สามารถอธิบายตัวแปรตอบสนองได้เป็นอย่างดี



ดังนั้นจึงเสนอสมการทำนายความตรงในรูปแบบของสมการเอกซ์โปเนนเชียล ด้วยการแปลงลอการิทึมธรรมชาติออกจากสมการ จะได้สมการความตรงดังนี้

$$S_t = e^{6.099} \cdot V^{-0.3303} \cdot f^{1.0736} \cdot D^{0.2380} \cdot R_n^{-0.6270} \cdot \gamma^{-0.00958} \cdot \left( \frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}} \right)^{0.1021}$$

จากการวิเคราะห์การถดถอยตามรูปที่ 4.73 สมการทำนายความกลมขึ้นงานมีค่า  $R^2 = 90.14\%$  และ  $R^2_{\text{adj}} = 89.54\%$  หมายความว่า ตัวแปรตอบสนองหรือค่าความตรงขึ้นงานเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรอิสระ (ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิด มุมคายเศษโลหะ และแรงขณะตัด)  $90.14\%$  และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ได้สามารถอธิบายตัวแปรตอบสนองได้เป็นอย่างดี

ดังนั้นจึงนำเสนอสมการทำนายความกลมในรูปแบบของสมการเอกซ์โปเนนเชียล ด้วยการแปลงลอการิทึมธรรมชาติออกจากสมการ จะได้สมการความกลมดังนี้

$$R_0 = e^{2.3410} \cdot V^{-0.0937} \cdot f^{0.1589} \cdot D^{0.0568} \cdot R_n^{-0.0395} \cdot \gamma^{-0.004420} \cdot \left( \frac{AVF_x}{AVF_y} \right)^{0.3040}$$

#### 4.13 การทดสอบความแม่นยำของสมการ

สมการทำนายความตรงและความกลมขึ้นงานที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ จะต้องมีการทดสอบความแม่นยำโดยคาดหวังว่าสมการจะสามารถใช้ทำนายความตรงและความกลมขึ้นงานสำหรับงานกลึงได้ดีภายใต้เงื่อนไขการตัดอื่นๆ โดยการทดสอบความแม่นยำแบ่งเป็น 2 การทดสอบ คือ การทดสอบที่อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม และการทดสอบที่อยู่นอกขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความตรงและความกลมที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ จะทำโดยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดใหม่ ซึ่งการทดลองภายใต้ขอบเขตเงื่อนไขการตัดใหม่ที่กำหนดขึ้นแสดงดังตารางที่ 4.2

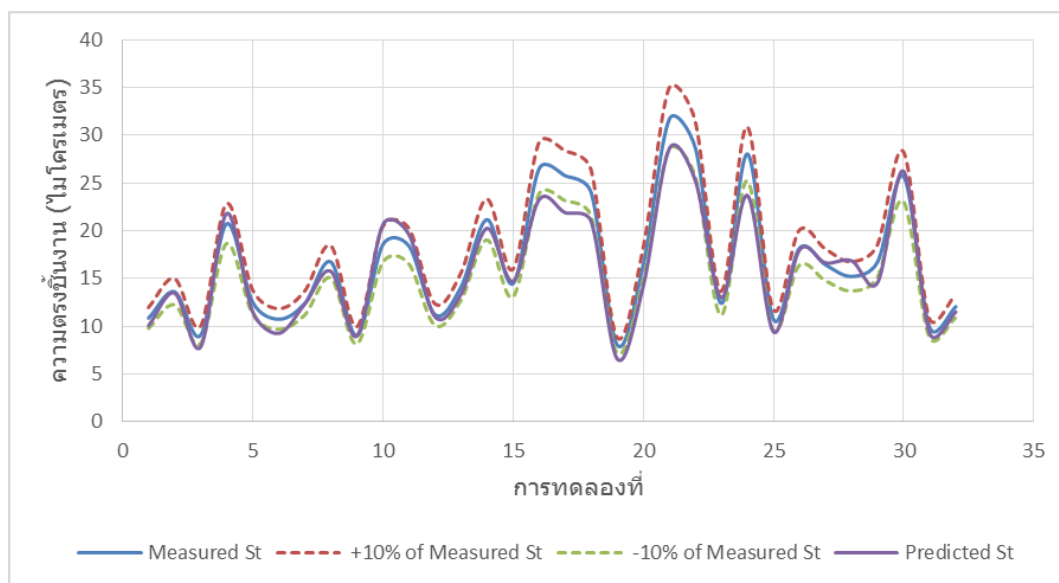
ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการตัดเพื่อการทดสอบความแม่นยำสมการทำนายความตรงและความกลม

เม็ดเม็ดคาร์ไบด์	DNMG150604FN
	DNMG150608FN
	DCMT11T304HQ
	DCMT11T308HQ
ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	120, 250
อัตราป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)	0.18, 0.30
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.2, 0.5
รัศมีจุมก (มิลลิเมตร)	0.4, 0.8
มุมคายเศษโลหะ (องศา)	-6, 11

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำ

ลำดับ	V	f	D	Rn	Y	$\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_{y(s)}}$	ความตรง จากการวัด	ความตรง จากสมการ	$\frac{AVF_x}{AVF_y}$	พิสัยผ่าน ศูนย์กลางจากการวัด	พิสัยผ่าน ศูนย์กลางจากสมการ
1	250	0.18	0.5	0.8	-6	0.12556	10.837	10.052	0.726	4.703	4.687
2	120	0.3	0.2	0.8	11	0.088044	13.593	13.467	1.479	4.324	4.731
3	250	0.18	0.5	0.8	11	0.078617	9.058	7.835	0.898	4.390	4.185
4	250	0.3	0.2	0.4	-6	0.267795	20.726	21.792	1.264	4.883	4.975
5	250	0.18	0.5	0.4	11	0.074487	12.504	11.493	1.173	4.460	4.705
6	250	0.18	0.2	0.4	11	0.070099	10.730	9.237	1.482	4.947	4.844
7	120	0.18	0.2	0.4	11	0.036261	12.391	12.301	0.934	4.320	4.411
8	120	0.18	0.5	0.4	11	0.122395	16.726	15.747	0.902	5.087	4.941
9	250	0.18	0.2	0.8	-6	0.251405	9.007	8.960	0.611	4.335	3.953
10	120	0.3	0.5	0.8	-6	0.156063	18.538	20.626	0.853	5.399	4.903
11	120	0.3	0.5	0.8	11	0.293089	18.391	19.596	1.147	5.332	4.960
12	250	0.3	0.2	0.8	11	0.120355	11.212	10.983	1.113	5.359	5.104
13	250	0.3	0.2	0.8	-6	0.128197	14.090	13.329	0.819	4.981	4.585
14	120	0.18	0.5	0.4	-6	0.198881	21.163	20.250	1.098	6.325	5.907
15	250	0.3	0.5	0.8	11	0.218249	14.476	14.705	1.749	5.331	5.395
16	120	0.3	0.2	0.4	-6	0.070963	26.499	23.249	1.090	5.849	5.621

ลำดับ	V	f	D	Rn	Y	$\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_{y(s)}}$	ความตรง จากการวัด	ความตรง จากสมการ	$\frac{AVF_x}{AVF_y}$	พิสัยเบนผ่าน ศูนย์กลางจากการวัด	พิสัยเบนผ่าน ศูนย์กลางจากสมการ
17	250	0.3	0.5	0.8	-6	0.099113	25.746	21.877	1.255	4.454	4.851
18	120	0.3	0.2	0.4	11	0.027251	23.983	20.947	1.379	5.452	5.375
19	250	0.18	0.2	0.8	11	0.099497	8.019	6.558	1.257	4.176	4.326
20	120	0.18	0.2	0.8	11	0.084753	16.428	14.211	1.680	6.562	5.941
21	120	0.3	0.5	0.4	-6	0.03094	31.688	28.601	0.679	4.736	4.317
22	250	0.3	0.5	0.4	-6	0.168612	28.642	25.238	1.019	5.986	5.441
23	250	0.18	0.2	0.4	-6	0.120689	12.379	12.974	0.966	4.895	4.752
24	250	0.3	0.5	0.4	11	0.152105	28.034	23.682	1.529	4.976	4.897
25	120	0.18	0.5	0.8	11	0.049376	10.688	9.408	1.755	5.460	5.454
26	120	0.3	0.2	0.8	-6	0.189091	18.177	17.994	2.828	5.210	5.263
27	250	0.3	0.2	0.4	11	0.143556	16.428	16.629	1.697	5.148	5.424
28	120	0.18	0.2	0.4	-6	0.01855	15.206	16.855	0.910	5.081	4.994
29	250	0.18	0.5	0.4	-6	0.109953	16.748	14.587	1.763	5.847	6.066
30	120	0.3	0.5	0.4	11	0.141631	25.679	26.212	1.194	5.233	5.031
31	120	0.18	0.2	0.8	-6	0.052113	9.835	9.242	0.028	4.411	4.870
32	120	0.18	0.5	0.8	-6	0.028108	12.039	11.478	3.762	5.727	5.926



รูปที่ 4.76 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความตรง

$$\text{ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|f_t - a_t|}{a_t}$$

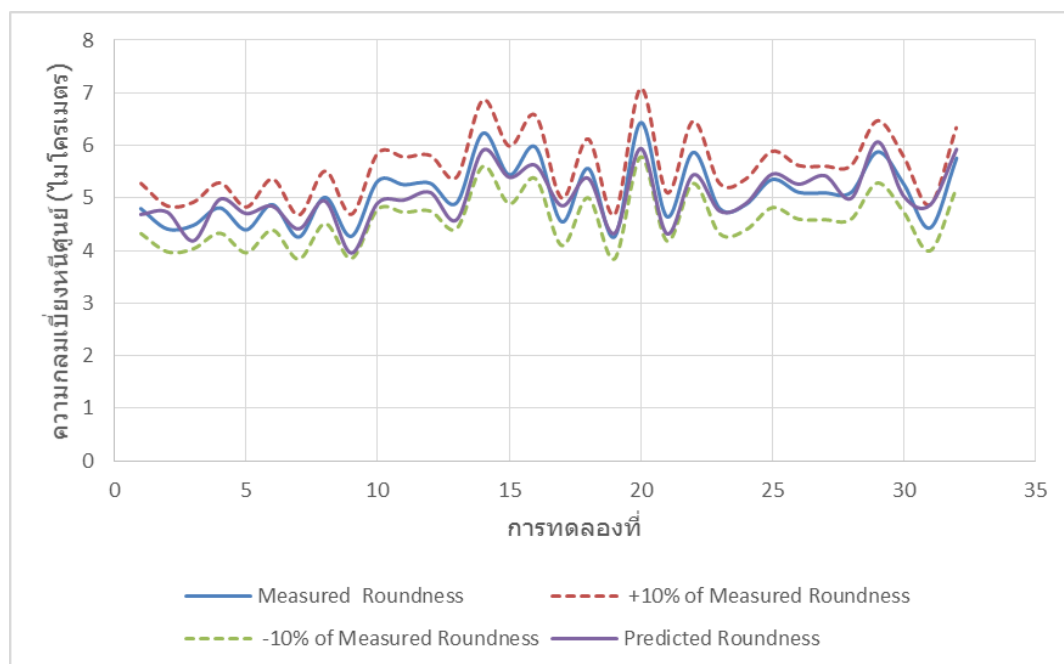
$$\text{ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำ} = 100\% - \text{ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน}$$

เมื่อ  $f_t$  = ความกลมที่ได้จากการทำนาย

$a_t$  = ความกลมที่ได้จากการตรวจสอบจริง

โดยที่  $n = 1, 2, \dots, t$

จากการคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของสมการทำนายความตรงของขึ้นงานดังรูปที่ 4.76 พบว่ามีค่าเท่ากับ 7.85% นั่นคือ สมการทำนายความตรงของขึ้นงานมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 92.14% ซึ่งถือว่าสมการมีความแม่นยำสูงและสามารถทำนายความตรงของขึ้นงานในระดับที่ยอมรับได้



รูปที่ 4.77 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความกลมของชิ้นงาน

จากการคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของสมการทำนายความกลมของชิ้นงานดังรูปที่ 4.77 พบว่ามีค่าเท่ากับ 4.49% นั่นคือ สมการทำนายความตรงของชิ้นงานมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 95.51% ซึ่งถือว่าสมการมีความแม่นยำสูงและสามารถทำนายความกลมของชิ้นงานในระดับที่ยอมรับได้

งานวิจัยนี้ได้สมการทำนายค่าความตรงและความกลมของชิ้นงานซึ่งมีความแม่นยำที่สูงกว่าสมการที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว โดยสมการทำนายความตรงมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 92.14% และสมการทำนายความกลมมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 95.51% ดังนั้นการประยุกต์ใช้การแปลงเวฟเลทในการแยกสัญญาณสอดคล้องความตรงและความกลมชิ้นงานนั้น นอกจากจะสามารถนำมาพัฒนาสมการทำนายความตรงและความกลมชิ้นงานได้แม่นยำยิ่งขึ้นแล้ว ยังสามารถทำนายความตรงและความกลมชิ้นงานได้ในทุกเงื่อนไขการตัดไม่ว่าเงื่อนไขการตัดนั้นจะเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่องหรือแตกหักก็ตาม ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในภาคอุตสาหกรรม

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงกับกับอัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตต่อแรงป้อนตัดสถิต และความกลมกับค่าพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลาง ของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในขณะตัดภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาเป็นสมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ทำนายความตรงและความกลมของชิ้นงานในขณะตัดชิ้นงาน สำหรับชิ้นงานเหล็ก S45C ด้วยโปรแกรมคาร์ไบด์เคลือบผิว

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

สมการสำหรับทำนายความตรงและความกลมของชิ้นงานในขณะตัดนั้นได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยอยู่ในรูปฟังก์ชันของเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุ่มกมิด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนแรงป้อนตัด ในขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้มีการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เพื่อตรวจวัดสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดชิ้นงาน ซึ่งเป็นตัวแปรตัวหนึ่งในการทำนายความตรงโดยจะอยู่ในรูปของอัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตต่อแรงป้อนตัดสถิต และอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัตในการทำนายความกลมของชิ้นงาน

ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและความตรงของชิ้นงานกับแรงป้อนตัด และเงื่อนไขการตัดอื่น ๆ ได้ ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการใช้สมการแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล เนื่องจากข้อมูลความตรงและความกลมมีลักษณะคล้ายกับความขรุขระผิวของชิ้นงาน จึงอาศัยทฤษฎีความสัมพันธ์ของความขรุขระผิว ทั้งนี้การหาความสัมพันธ์แบบถดถอยพหุคูณถูกนำมาใช้วิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลองความตรงและความกลมของชิ้นงานด้วยการใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

จากการวิจัยพบว่า อัตราการป้อนตัด และอัตราส่วนแรงตัดเป็นสองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความตรงของชิ้นงานมากที่สุด และสามารถอธิบายความตรงของชิ้นงานได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ความตรงของชิ้นงานจะมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อใช้ความเร็วตัด รัศมีจุ่มกมิด และมุมคายเศษโลหะที่มีค่ามาก ๆ ในขณะที่ใช้อัตราการป้อนตัด และความลึกตัดที่น้อย ๆ ดังแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ในสมการทำนายความตรงของชิ้นงาน 4.7-1 จากการทดลองซ้ำเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการโดยเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลอง พบว่าสมการทำนายความตรงของชิ้นงาน (St) มีความแม่นยำเท่ากับ 92.14%

ในส่วนของความกลมขึ้นงานอัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต (AVFx/AVFy) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด โดยพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้นั้นได้มากจากการเพิ่มความเร็วตัด ลดอัตราการใช้ป้อน ลดความลึกตัด เพิ่มขนาดรัศมีจุมกมิต และใช้มุมคายเศษโลหะที่มีค่ามาก จากการทดสอบความแม่นยำของสมการด้วยการทดลองด้วยเงื่อนไขที่อยู่ภายใต้ของเขตของการทำวิจัย พบว่าสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมีความแม่นยำในระดับสูง (95.51%) เป็นที่ยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้ในการอธิบายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางได้เป็นอย่างดี

## 5.2 อภิปรายผลการวิจัย

1) ปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาสมการทำนายความตรงและความกลมขึ้นงาน ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิต มุมคายเศษโลหะ อัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต และอัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตต่อแรงป้อนตัดสถิต สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความกลมและความตรงภายใต้เงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างมีนัยสำคัญ

2) จากการพัฒนาสมการพบว่า อัตราป้อนตัด มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของความตรงเพียงศูนย์กลางที่สุด เนื่องจากรอยป้อนตัดที่เกิดขึ้นส่งผลต่อระยะความขรุขระผิวที่มากที่สุด (max) และน้อยที่สุด (min) นั่นคือข้อมูลของความตรงเพียงศูนย์กลางของชิ้นงานนั่นเอง โดยความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราป้อนตัดพบว่าความตรงเพียงศูนย์กลางมีค่ามากขึ้น หมายความว่า ความตรงของชิ้นงานลดลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อใช้อัตราป้อนตัดน้อย ๆ ความตรงของชิ้นงานจะมีแนวโน้มที่ดี

3) ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด คือ อัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต เมื่อค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงรัศมี (AVFx) เพิ่มขึ้นมากกว่าค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงป้อนตัด (AVFy) ส่งผลให้ความกลมที่ได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงรัศมีพลวัต (Fx) ส่งผลโดยตรงต่อรูปร่างความกลมของชิ้นงาน จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนค่าความแปรปรวนแรงตัดพลวัต สามารถนำมาใช้ในการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางได้ภายใต้เงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปได้เป็นอย่างดี

4) การทดสอบความแม่นยำของสมการ ด้วยการทดลองตัดด้วยเงื่อนไขการตัดใหม่ พบว่าสมการทำนายความตรงเพียงศูนย์กลางและสมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางนี้ สามารถใช้ในการอธิบายความตรงและความกลมได้ตามลำดับ เนื่องจากความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจากผลการทดลองทดสอบความแม่นยำสมการ มีความสัมพันธ์ลักษณะเดียวกันแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลง

ไป แต่ยังคงพบว่ามี ความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดผิวชิ้นงาน ตำแหน่งในการติดตั้งมีดตัดที่ต้องมีการติดตั้งใหม่ทุกครั้งที่ทำการทดลอง และรวมไปถึงอิทธิพลของเศษโลหะที่มีผลต่อแรงตัดที่เกิดขึ้น โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น อาจเกิดจากปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่ได้นำมาวิเคราะห์ในการทดลอง

5) การผลิตชิ้นงานที่ต้องการความละเอียดสูงและความแม่นยำเป็นพิเศษ รวมถึงชิ้นงานที่ต้องการความเรียบผิวสำเร็จสูง เป็นชิ้นงานที่มีราคาสูง การควบคุมคุณภาพของชิ้นงานเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียจากลักษณะชิ้นงานสำเร็จไม่ตรงตามมาตรฐานจึงมีความสำคัญมาก งานวิจัยนี้ช่วยให้สามารถตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานในขณะตัดได้ทุกชิ้นในระดับนาโนเมตรบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีปกติ สามารถช่วยลดโอกาสในการเกิดของเสียขณะตัด โดยไม่ต้องลงทุนซื้อเครื่องกลึงความแม่นยำพิเศษ (High Precision Turning Machine) ซึ่งทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตและขั้นตอนในกระบวนการผลิตได้

### 5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย

1) เนื่องจากต้องมีการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ใหม่ทุกครั้ง ในทุก ๆ การตัด ซึ่งใช้เวลาติดตั้งค่อนข้างนาน ทั้งนี้อาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของมีดตัดที่ไม่เหมือนกันในแต่ละครั้ง โดยมีผลกระทบต่อแรงตัดที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งในแต่ละครั้ง

2) เนื่องจากเครื่องวัดความขรุขระผิวที่ใช้สำหรับเก็บค่าความตรงของชิ้นงาน มีข้อจำกัดในเรื่องของแท่นจับชิ้นงาน ซึ่งรูปร่างและชิ้นงานที่ถูกจับยึดในแต่ละครั้ง จะต้องมีการปรับแท่นจับยึดใหม่ในทุก ๆ ครั้ง ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าของชิ้นงานที่วัดในแต่ละครั้งอีกด้วย

3) สำหรับข้อจำกัดในเรื่องระยะการวัดผิวชิ้นงานของเครื่องวัดความขรุขระผิวมีมาตรฐานอยู่ที่ 12.5 มิลลิเมตร ดังนั้น ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจึงใช้ระยะตัด 15 มิลลิเมตร ซึ่งสมการการทำนายความตรงเบี่ยงศูนย์ที่ได้นั้น อาจไม่แม่นยำเมื่อใช้กับชิ้นงานที่มีความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก ๆ โดยชิ้นงานที่ใช้ควรมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (length-to-diameter) ไม่เกิน 10

4) ข้อจำกัดของเครื่องมือวัดความกลมชิ้นงานมีข้อจำกัดคือ ขนาดของชิ้นงานในการทำวิจัย ต้องกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 40 มิลลิเมตร และความยาวของชิ้นงานไม่เกิน 300 มิลลิเมตร ในการตรวจสอบพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางต้องทำการตั้งความร่วมมือศูนย์ระหว่างชิ้นงานและเครื่องวัดความกลมทุกครั้งก่อนการวัด ทำให้ใช้เวลาในการตรวจสอบพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมาก



5) ข้อมูลพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้ ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ได้ เนื่องจากเป็นอัตราการเก็บข้อมูลของเครื่องวัดความกลม ถึงแม้ว่าเงื่อนไขการตัดและคุณภาพผิวที่ตรวจสอบเปลี่ยนแปลง เมื่อนำไปวิเคราะห์ในโดเมนความถี่จะให้ความถี่เท่ากับอัตราการเก็บข้อมูลของเครื่องวัดความกลมเสมอ

#### 5.4 ข้อเสนอแนะ

1) เพื่อให้สมการทำนายพิสัยเส้นผ่านศูนย์กลางมีความแม่นยำและประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงควรพิจารณาปัจจัยดังต่อไปนี้ ได้แก่

- ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของชิ้นงาน เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวนี้ส่งผลโดยตรงต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องมือตัดและชิ้นงาน

- การสึกหรอของมีดตัด เนื่องจากส่งผลต่อแรงตัด

2) งานวิจัยนี้สมการทำนายความตรงและความกลมของชิ้นงาน สามารถใช้ได้กับชิ้นงานเหล็กกล้า S45C เท่านั้น

3) การสั่นสะเทือน (Vibration) ในกระบวนการกลึงมีสาเหตุได้จากหลายกรณีเช่น ปัจจัยที่ใช้ในการตัดไม่เหมาะสม ความไม่สมดุลหรือการหมุนไม่ได้ศูนย์ของเครื่อง การเสื่อสภาพของอุปกรณ์ภายในเครื่อง หรือการสั่นเนื่องมาจากตัวมอเตอร์เอง การสั่นสะเทือนเหล่านี้ส่งผลต่ออายุการใช้งานเม็ดมีด คุณภาพชิ้นงาน และส่งผลทำให้เกิดสัญญาณรบกวนปะปนไปกับข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยได้

4) เพื่อให้สมการมีความสามารถในการทำนายมากขึ้น ควรพิจารณาถึงรูปทรงของเม็ดมีดตัดที่ต่างกัน เช่น มีดตัดรูปทรงเพชร (Diamond) และมีดตัดรูปทรงสามเหลี่ยม (Triangular) เนื่องจากรูปทรงของเม็ดมีดตัดที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อค่าลักษณะผิวชิ้นงานที่ต่างกันด้วย

## รายการอ้างอิง

1. สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย. ชุดโครงการวิจัยนโยบายสาธารณะเพื่อยกระดับไทยให้พ้นกับดักประเทศรายได้ปานกลาง. 2556 [cited 2558 24 สิงหาคม]; Available from: <http://tdri.or.th/wp-content/uploads/2014/02/MIT2-Innovation-Final-Fmt.pdf>.
2. สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้ากระทรวงพาณิชย์. เอกสารผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้านเศรษฐกิจการค้าที่สำคัญปี 2555. 2555 [cited 2558 24 สิงหาคม]; Available from: [http://tpso.moc.go.th/web/tpso-preview-headonly-detail.php?groupnews\\_id=5&news\\_id=1022](http://tpso.moc.go.th/web/tpso-preview-headonly-detail.php?groupnews_id=5&news_id=1022).
3. กระทรวงอุตสาหกรรม. แผนแม่บทพัฒนาอุตสาหกรรมไทย พ.ศ. 2555-2574. 2554 [cited 2558 24 สิงหาคม]; Available from: [http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/industry\\_plan/National Industrial Development Master Plan.pdf](http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/industry_plan/National_Industrial_Development_Master_Plan.pdf).
4. Mechlook. Measurement of Circularity-Straightness, Flatness, Squareness, Parallelism, Circularity and Rotation. 2011 [cited 2015 26 August]; Available from: <http://www.mechlook.com/measurement-circularitystraightness-flatness-squareness-parallelism-circularity-rotation/>.
5. Polini, W. and U. Prisco, The estimation of the diameter error in bar turning: a comparison among three cutting force models. The international Journal of advanced manufacturing technology, 2002. 22: p. 465-474.
6. Tangjitsitcharoen, S. and S. Ratanakuakangwan, Monitoring of cutting conditions with dry cutting on CNC turning machine. Journal of Key Engineering Materials, 2010. 443: p. 382-387.
7. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, วิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. 2555, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
8. เตือนพรธณ จันทนา, การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความกลมของชิ้นงานในกระบวนการกลึงกับแรงตัด, in สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2558, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

9. ธารรัตน์ ชาญสูงเนิน., การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานกับแรงตัดในกระบวนการกลึง, in สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2558, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
10. กัญยานต์ สมานมิตร, การทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการโดยประยุกต์ใช้แรงตัดพลวัตในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C โดยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว, in สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2556, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
11. A., M., E. A.H., and A. M.A. Roundness Measurement of Cylindrical Part by Machine Vision. in International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering. 2011. Malaysia.
12. Fung, E.H.K. and C. J.C.K., ARX Modelling and Compensation of Roundness Errors in Taper Turning. The international Journal of advanced manufacturing technology, 2000. 2006: p. 402-404.
13. Rico, L.e.a. Effect of cutting parameter on the roundness of cylindrical bars turned of 1018 steel. in the 15th annual international conference on Industrial Engineering Theory. 2010. Mexico: Applications and practice.
14. Tangjitsitcharoen, S., In-process monitoring and prediction of surface roughness in CNC turning process. Advance Materials Research, 2011. 199-200: p. 1958-1966.
15. Tangjitsitcharoen, S., Advanced prediction of surface roughness by monitoring of dynamic cutting forces in cnc turning process. Applied Mechanics and Materials, 2012. 239-240: p. 661-669.
16. H., S., U. F., and Y. S., An experimental investigate as to the effect of cutting parameter on roundness error and surface roughness in cylindrical grinding. International Journal of Product Research, 2005. 43(11): p. 2309-2322.
17. Sheng-bo, F., et al., Prediction of diameter errors compensation in bars turning. Journal of Central South University of Technology, 2005. 12(2): p. 264-268.
18. วัชรินทร์ สามีตร. ความตรง. 2554 [cited 2558 26 สิงหาคม]; Available from: <http://www.nimt.or.th/nimt/upload/linkfile/sys-metrology-606-101.pdf>.

19. Kim, S.-C. and S.-C. Chung, Synthesis of the multi-step straightness control system for shaft straightening processes. *Mechatronics*, 2002. 12(1): p. 139–156.
20. Saglam, H. Pneumatic non-contact data acquisition system for straightness measurement of cylindrical parts. in 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11). 2011. Turkey.
21. Benardos, P.G. and G.-C. Vosniakos, Predicting surface roughness in machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003. 43: p. 833-844.
22. Zhang, J.Z. and J.C. Chen, Neural networks-based in-process surface roughness adaptive control system in turning operation. *International Symposium on Neural Networks*, 2006: p. 970-975.
23. Seimitsu, T. *Measuring Instruments Catalog : Roundness-Cylindrical Profile Measuring Instruments*. 2013 [cited 2015 24 สิงหาคม]; Available from: <http://www.accretech.de/en/support/metrology/product-information-for-download/>.
24. Disk, E.O.A. *Roundness Testing*. 2010 [cited 2015 24 August]; Available from: [http://engineeronadisk.com/notes\\_manufact/round.html](http://engineeronadisk.com/notes_manufact/round.html).
25. ปรมเสศ ชูติมา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. 2545, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
26. ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา and พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. 2552, กรุงเทพมหานคร: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด. 464.
27. Ali, S.H.R., H.H. Mohamed, and M.K. Bedewy, Identifying cylinder liner wear using precise coordinate measurement. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2009. 10(5): p. 19-25.
28. Yaldiz, S. and F. Unsacar, Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement. *Materials and Design*, 2006. 27: p. 839-846.

29. Venkataramaiah, P., K. DharmaReddy, and P. Meramma, Analysis on influence of feed rate and tool geometry on cutting forces in turning using Taguchi method and Fuzzy logic. *Procedia Materials Science*, 2014. 5: p. 1692–1701.
30. Moriwaki, T., T. Shibasaka, and S. Tangjitsitcharoen, Development of in-Process Tool Wear Monitoring System for CNC Turning. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 2004. 47(3): p. 933-938.
31. Tangjitsitcharoen, S., C. Rungruang, and N. Pongsathornwiwat, Advanced monitoring of tool wear and cutting states in CNC turning process by utilizing sensor fusion. *Advanced Materials Research*, 2011. 189-193: p. 377-384.
32. Jianliang, G. and H. Rongdi, A united model of diametral error in slender bar turning with a follower rest. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006. 46: p. 1002-1012.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

โปรแกรมแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วสำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตัด



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วสำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตัด

```

clear;

samp = 10000;           %Sampling Frequency

fname1 = 'd001';       % ชื่อ ไฟล์ที่ต้องการเปิด

ext1 = '.txt';         % ชื่อ สกุลไฟล์

filename = [fname1,ext1]; % รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์

load (filename);       % เรียกไฟล์

eval(['data1=',[fname1],';']); %

[N1,n1]=size(data1);   % เก็บค่าขนาดของข้อมูล โดย N เป็นจำนวนแถว และ n เป็น
จำนวนคอลัมน์

fname2 = 'd100';       % 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([0 100 0*10^-3 3500*10^-3])

subplot(3,1,2);plot(freq,PabsFY);grid;zoom on ;xlabel('Frequency (Hz)');ylabel('PSD of
Fy (N^2)');

axis([0 100 0*10^-3 3500*10^-3])

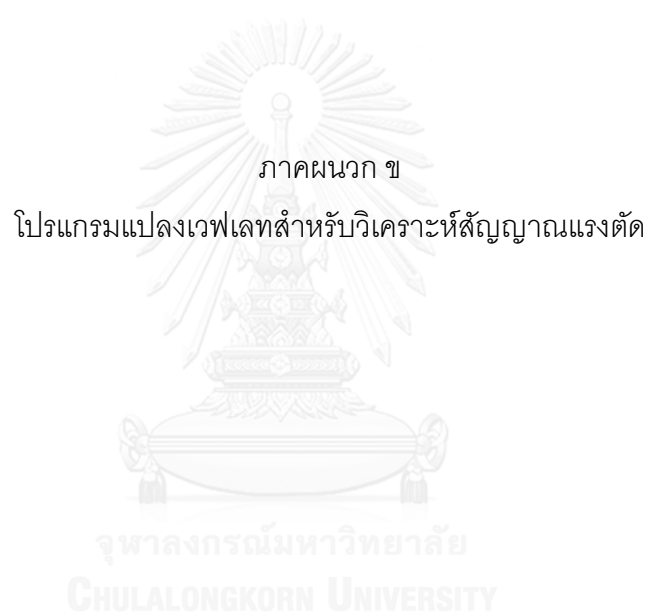
subplot(3,1,3);plot(freq,PabsFZ);grid;zoom on ;xlabel('Frequency (Hz)');ylabel('PSD of
Fz (N^2)');

axis([0 100 0*10^-3 3500*10^-3])

figure(103);

```

```
subplot(3,1,1);plot(tt,data2(:,1));grid;zoom on ;xlabel('Time (sec)');ylabel('Fx  
(N)');%'Dynamic radial force(N)');  
  
axis([0 0.6 -40 40])  
  
%set(subplot(3,1,1),'YLim',[0 250],'XLim',[0 1]);set(subplot(3,1,1),'YTick',[50 200]);  
  
%set(subplot(3,1,1),'times','8','italic');  
  
subplot(3,1,2);plot(tt,data2(:,2));grid;zoom on ;xlabel('Time (sec)');ylabel('Fy  
(N)');%'Dynamic feed force(N)');  
  
axis([0 0.6 -40 40])  
  
%set(subplot(3,1,2),'YLim',[50 200],'XLim',[0 1]);set(subplot(3,1,2),'YTick',[100 150]);  
  
subplot(3,1,3);plot(tt,data2(:,3));grid;zoom on ;xlabel('Time (sec)');ylabel('Fz  
(N)');%'Dynamic main force(N)');  
  
axis([0 0.6 -40 40])  
  
%set(subplot(3,1,3),'YLim',[250 400],'XLim',[0 1]);set(subplot(3,1,3),'YTick',[300 350]);
```



### โปรแกรมแปลงเวฟเลทสำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตัก

```

Xdef3 = 'd001';
Xdef1 = [Xdef3 '.txt']
forceroughness = textread(Xdef1);
L_x1 = length(forceroughness);
fx = forceroughness(:,1); fy = forceroughness(:,2); fz = forceroughness(:,3);
[N,n]=size(forceroughness);
samp = 10000;
t=1/samp;
tt=(0:t*(N-1));
f=(0:N-1)/N*samp;
freq1 = f(1:N/2);

[cAx1,cDx1] = dwt(forceroughness(:,1),'db2');
[cAy1,cDy1] = dwt(forceroughness(:,2),'db2');
[cAz1,cDz1] = dwt(forceroughness(:,3),'db2');

[cAx2,cDx2] = dwt(cAx1,'db2');
[cAx3,cDx3] = dwt(cAx2,'db2');
[cAx4,cDx4] = dwt(cAx3,'db2');
[cAx5,cDx5] = dwt(cAx4,'db2');
[cAx6,cDx6] = dwt(cAx5,'db2');
[cAx7,cDx7] = dwt(cAx6,'db2');
[cAx8,cDx8] = dwt(cAx7,'db2');
[cAx9,cDx9] = dwt(cAx8,'db2');
[cAx10,cDx10] = dwt(cAx9,'db2');

[cAy2,cDy2] = dwt(cAy1,'db2');
[cAy3,cDy3] = dwt(cAy2,'db2');

```

```
[cAy4,cDy4] = dwt(cAy3,'db2');
[cAy5,cDy5] = dwt(cAy4,'db2');
[cAy6,cDy6] = dwt(cAy5,'db2');
[cAy7,cDy7] = dwt(cAy6,'db2');
[cAy8,cDy8] = dwt(cAy7,'db2');
[cAy9,cDy9] = dwt(cAy8,'db2');
[cAy10,cDy10] = dwt(cAy9,'db2');
```

```
[cAz2,cDz2] = dwt(cAz1,'db2');
[cAz3,cDz3] = dwt(cAz2,'db2');
[cAz4,cDz4] = dwt(cAz3,'db2');
[cAz5,cDz5] = dwt(cAz4,'db2');
[cAz6,cDz6] = dwt(cAz5,'db2');
[cAz7,cDz7] = dwt(cAz6,'db2');
[cAz8,cDz8] = dwt(cAz7,'db2');
[cAz9,cDz9] = dwt(cAz8,'db2');
[cAz10,cDz10] = dwt(cAz9,'db2');
```

```
Dx1 = upcoef('d',cDx1,'db2',1,l_x1);
Dx2 = upcoef('d',cDx2,'db2',2,l_x1);
Dx3 = upcoef('d',cDx3,'db2',3,l_x1);
Dx4 = upcoef('d',cDx4,'db2',4,l_x1);
Dx5 = upcoef('d',cDx5,'db2',5,l_x1);
Dx6 = upcoef('d',cDx6,'db2',6,l_x1);
Dx7 = upcoef('d',cDx7,'db2',7,l_x1);
Dx8 = upcoef('d',cDx8,'db2',8,l_x1);
Dx9 = upcoef('d',cDx9,'db2',9,l_x1);
Dx10 = upcoef('d',cDx10,'db2',10,l_x1);
```

Ax1 = upcoef('a',cAx1,'db2',1,l\_x1);

Ax2 = upcoef('a',cAx2,'db2',2,l\_x1);

Ax3 = upcoef('a',cAx3,'db2',3,l\_x1);

Ax4 = upcoef('a',cAx4,'db2',4,l\_x1);

Ax5 = upcoef('a',cAx5,'db2',5,l\_x1);

Ax6 = upcoef('a',cAx6,'db2',6,l\_x1);

Ax7 = upcoef('a',cAx7,'db2',7,l\_x1);

Ax8 = upcoef('a',cAx8,'db2',8,l\_x1);

Ax9 = upcoef('a',cAx9,'db2',9,l\_x1);

Ax10 = upcoef('a',cAx10,'db2',10,l\_x1);

Dy1 = upcoef('d',cDy1,'db2',1,l\_x1);

Dy2 = upcoef('d',cDy2,'db2',2,l\_x1);

Dy3 = upcoef('d',cDy3,'db2',3,l\_x1);

Dy4 = upcoef('d',cDy4,'db2',4,l\_x1);

Dy5 = upcoef('d',cDy5,'db2',5,l\_x1);

Dy6 = upcoef('d',cDy6,'db2',6,l\_x1);

Dy7 = upcoef('d',cDy7,'db2',7,l\_x1);

Dy8 = upcoef('d',cDy8,'db2',8,l\_x1);

Dy9 = upcoef('d',cDy9,'db2',9,l\_x1);

Dy10 = upcoef('d',cDy10,'db2',10,l\_x1);

Ay1 = upcoef('a',cAy1,'db2',1,l\_x1);

Ay2 = upcoef('a',cAy2,'db2',2,l\_x1);

Ay3 = upcoef('a',cAy3,'db2',3,l\_x1);

Ay4 = upcoef('a',cAy4,'db2',4,l\_x1);

Ay5 = upcoef('a',cAy5,'db2',5,l\_x1);

Ay6 = upcoef('a',cAy6,'db2',6,l\_x1);

Ay7 = upcoef('a',cAy7,'db2',7,l\_x1);

```
Ay8 = upcoef('a',cAy8,'db2',8,l_x1);  
Ay9 = upcoef('a',cAy9,'db2',9,l_x1);  
Ay10 = upcoef('a',cAy10,'db2',10,l_x1);
```

```
Dz1 = upcoef('d',cDz1,'db2',1,l_x1);  
Dz2 = upcoef('d',cDz2,'db2',2,l_x1);  
Dz3 = upcoef('d',cDz3,'db2',3,l_x1);  
Dz4 = upcoef('d',cDz4,'db2',4,l_x1);  
Dz5 = upcoef('d',cDz5,'db2',5,l_x1);  
Dz6 = upcoef('d',cDz6,'db2',6,l_x1);  
Dz7 = upcoef('d',cDz7,'db2',7,l_x1);  
Dz8 = upcoef('d',cDz8,'db2',8,l_x1);  
Dz9 = upcoef('d',cDz9,'db2',9,l_x1);  
Dz10 = upcoef('d',cDz10,'db2',10,l_x1);
```

```
Az1 = upcoef('a',cAz1,'db2',1,l_x1);  
Az2 = upcoef('a',cAz2,'db2',2,l_x1);  
Az3 = upcoef('a',cAz3,'db2',3,l_x1);  
Az4 = upcoef('a',cAz4,'db2',4,l_x1);  
Az5 = upcoef('a',cAz5,'db2',5,l_x1);  
Az6 = upcoef('a',cAz6,'db2',6,l_x1);  
Az7 = upcoef('a',cAz7,'db2',7,l_x1);  
Az8 = upcoef('a',cAz8,'db2',8,l_x1);  
Az9 = upcoef('a',cAz9,'db2',9,l_x1);  
Az10 = upcoef('a',cAz10,'db2',10,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(11,1,1);
plot(time,forceroughness(:,1));
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Original Signal');ylim('auto');%ปรับค่า
แกน Y
subplot(11,1,2)
plot(time,Dx1)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D1'); ylim('auto');
subplot(11,1,3)
plot(time,Dx2)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D2'); ylim('auto');
subplot(11,1,4)
plot(time,Dx3)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D3'); ylim('auto');
subplot(11,1,5)
plot(time,Dx4)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D4');ylim('auto');
subplot(11,1,6)
plot(time,Dx5)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D5');ylim('auto');
subplot(11,1,7)
plot(time,Dx6)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D6');ylim('auto');
subplot(11,1,8)
plot(time,Dx7)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D7');ylim('auto');

```



```
subplot(11,1,9)
plot(time,Dx8)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D8');ylim('auto');
subplot(11,1,10)
plot(time,Dx9)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D9');ylim([-50 50]);
subplot(11,1,11)
plot(time,Dx10)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D10');ylim([-50
50]);

figure(2);
subplot(11,1,1);
plot(time,forceroughness(:,2));
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Original Signal');ylim('auto');
subplot(11,1,2)
plot(time,Dy1)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D1'); ylim('auto');
subplot(11,1,3)
plot(time,Dy2)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D2'); ylim('auto');
subplot(11,1,4)
plot(time,Dy3)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D3'); ylim('auto');
subplot(11,1,5)
plot(time,Dy4)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D4');ylim('auto');
subplot(11,1,6)
plot(time,Dy5)
```

```

grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D5');ylim('auto');
subplot(11,1,7)
plot(time,Dy6)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D6');ylim('auto');
subplot(11,1,8)
plot(time,Dy7)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D7');ylim('auto');
subplot(11,1,9)
plot(time,Dy8)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D8');ylim('auto');
subplot(11,1,10)
plot(time,Dy9)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D9');ylim([-50 50]);
subplot(11,1,11)
plot(time,Dy10)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D10');ylim([-50
50]);

figure(3);
subplot(11,1,1);
plot(time,forceroughness(:,3));
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Original Signal'); ylim('auto');
subplot(11,1,2)
plot(time,Dz1)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D1'); ylim('auto');
subplot(11,1,3)
plot(time,Dz2)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D2'); ylim('auto');
subplot(11,1,4)

```

```

plot(time,Dz3)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D3'); ylim('auto');
subplot(11,1,5)
plot(time,Dz4)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D4'); ylim('auto');
subplot(11,1,6)
plot(time,Dz5)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D5');
ylim('auto');
subplot(11,1,7)
plot(time,Dz6)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D6'); ylim('auto');
subplot(11,1,8)
plot(time,Dz7)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D7'); ylim('auto');
subplot(11,1,9)
plot(time,Dz8)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D8'); ylim('auto');
subplot(11,1,10)
plot(time,Dz9)
grid;zoom on ;xlabel("");xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D9'); ylim([-50 50]);
subplot(11,1,11)
plot(time,Dz10)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.)');xlim([0 1]);ylabel("");title('Detail Signal D10'); ylim([-50
50]);

%Fourier Transform%
[N1,M1] = size(Dx1);
[N2,M2] = size(Dx2);

```

```

[N3,M3] = size(Dx3);
[N4,M4] = size(Dx4);
[N5,M5] = size(Dx5);
[N6,M6] = size(Dx6);
[N7,M7] = size(Dx7);
[N8,M8] = size(Dx8);
[N9,M9] = size(Dx9);
[N10,M10] = size(Dx10);

```

```

sample = 10000;
t = 1/sample;
tt = (0:t*(N-1));
f = (0:N-1)/N*sample;
freq = f(1:N/2);

```

```

fx0 = fft(forceroughness(:,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;
fx6 = fft(Dx6)/N*2;
fx7 = fft(Dx7)/N*2;
fx8 = fft(Dx8)/N*2;
fx9 = fft(Dx9)/N*2;
fx10 = fft(Dx10)/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));
fx6abs = abs(fx6(1:N6/2));
fx7abs = abs(fx7(1:N7/2));
fx8abs = abs(fx8(1:N8/2));
fx9abs = abs(fx9(1:N9/2));
fx10abs = abs(fx10(1:N10/2));

```

```

fx0abs2 = fx0abs.^2;
fx1abs2 = fx1abs.^2;
fx2abs2 = fx2abs.^2;
fx3abs2 = fx3abs.^2;
fx4abs2 = fx4abs.^2;
fx5abs2 = fx5abs.^2;
fx6abs2 = fx6abs.^2;
fx7abs2 = fx7abs.^2;
fx8abs2 = fx8abs.^2;
fx9abs2 = fx9abs.^2;
fx10abs2 = fx10abs.^2;

```

```

fy0 = fft(forceroughness(:,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;
fy6 = fft(Dy6)/N*2;

```



fy7 = fft(Dy7)/N\*2;

fy8 = fft(Dy8)/N\*2;

fy9 = fft(Dy9)/N\*2;

fy10 = fft(Dy10)/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));

fy6abs = abs(fy6(1:N6/2));

fy7abs = abs(fy7(1:N7/2));

fy8abs = abs(fy8(1:N8/2));

fy9abs = abs(fy9(1:N9/2));

fy10abs = abs(fy10(1:N10/2));

fy0abs2 = fy0abs.^2;

fy1abs2 = fy1abs.^2;

fy2abs2 = fy2abs.^2;

fy3abs2 = fy3abs.^2;

fy4abs2 = fy4abs.^2;

fy5abs2 = fy5abs.^2;

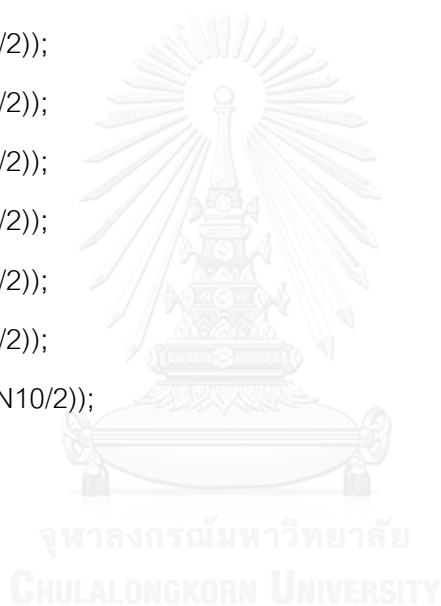
fy6abs2 = fy6abs.^2;

fy7abs2 = fy7abs.^2;

fy8abs2 = fy8abs.^2;

fy9abs2 = fy9abs.^2;

fy10abs2 = fy10abs.^2;



```
fz0 = fft(forceroughness(:,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;
```

```
fz6 = fft(Dz6)/N*2;
```

```
fz7 = fft(Dz7)/N*2;
```

```
fz8 = fft(Dz8)/N*2;
```

```
fz9 = fft(Dz9)/N*2;
```

```
fz10 = fft(Dz10)/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));
```

```
fz6abs = abs(fz6(1:N6/2));
```

```
fz7abs = abs(fz7(1:N7/2));
```

```
fz8abs = abs(fz8(1:N8/2));
```

```
fz9abs = abs(fz9(1:N9/2));
```

```
fz10abs = abs(fz10(1:N10/2));
```

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

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

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

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

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



```
fz5abs2 = fz5abs.^2;
fz6abs2 = fz6abs.^2;
fz7abs2 = fz7abs.^2;
fz8abs2 = fz8abs.^2;
fz9abs2 = fz9abs.^2;
fz10abs2 = fz10abs.^2;

figure(4);
subplot(11,1,1);
plot(fx0abs2);xlabel("");ylabel("");title('Original Signal'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,2);
plot(fx1abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D1'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,3);
plot(fx2abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D2'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,4);
plot(fx3abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D3'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,5);
plot(fx4abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D4'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,6);
plot(fx5abs2);xlabel("");ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D5'); xlim([000
1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,7);
plot(fx6abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D6'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,8);
plot(fx7abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D7'); xlim([000 1000]); ylim([0 30]);
subplot(11,1,9);
plot(fx8abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D8'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,10);
plot(fx9abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D9'); xlim([000 1000]); ylim([0 50]);
```



```
subplot(11,1,11);
plot(fx10abs2);xlabel('Frequency');ylabel("");title('Detail Signal D10'); xlim([000 1000]);
ylim([0 20]);

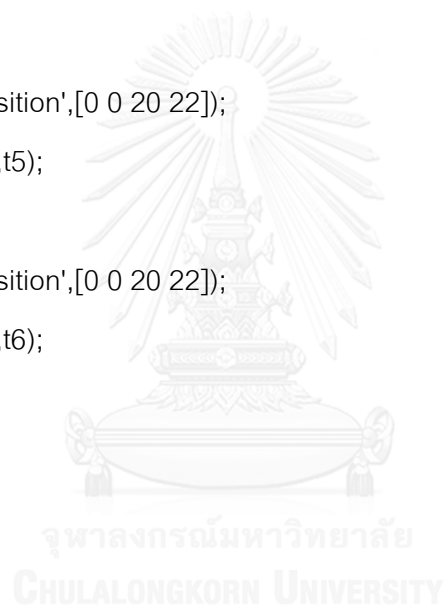
figure(5);
subplot(11,1,1);
plot(fy0abs2);xlabel("");ylabel("");title('Original Signal'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,2);
plot(fy1abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D1'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,3);
plot(fy2abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D2'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,4);
plot(fy3abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D3'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,5);
plot(fy4abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D4'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,6);
plot(fy5abs2);xlabel("");ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D5'); xlim([000
1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,7);
plot(fy6abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D6'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,8);
plot(fy7abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D7'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,9);
plot(fy8abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D8'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,10);
plot(fy9abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D9'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,11);
plot(fy10abs2);xlabel('Frequency');ylabel("");title('Detail Signal D10'); xlim([000 1000]);
ylim('auto');
```

```

figure(6);
subplot(11,1,1);
plot(fz0abs2);xlabel("");ylabel("");title('Original Signal'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,2);
plot(fz1abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D1'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,3);
plot(fz2abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D2'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,4);
plot(fz3abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D3'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,5);
plot(fz4abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D4'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,6);
plot(fz5abs2);xlabel("");ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D5'); xlim([000
1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,7);
plot(fz6abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D6'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,8);
plot(fz7abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D7'); xlim([000 1000]); ylim([0 30]);
subplot(11,1,9);
plot(fz8abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D8'); xlim([000 1000]); ylim('auto');
subplot(11,1,10);
plot(fz9abs2);xlabel("");ylabel("");title('Detail Signal D9'); xlim([000 1000]); ylim([0 20]);
subplot(11,1,11);
plot(fz10abs2);xlabel('Frequency');ylabel("");title('Detail Signal D10'); xlim([000 1000]);
ylim([0 20]);
set(figure(1),'PaperPosition',[0 0 20 22]);
t1 = [Xdef3 '-1'];
print(figure(1),'-djpeg',t1);

```

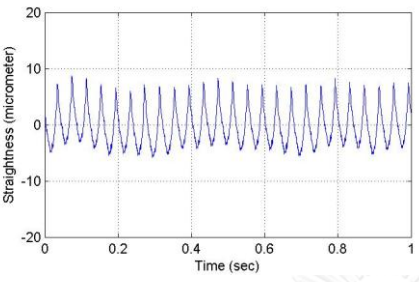
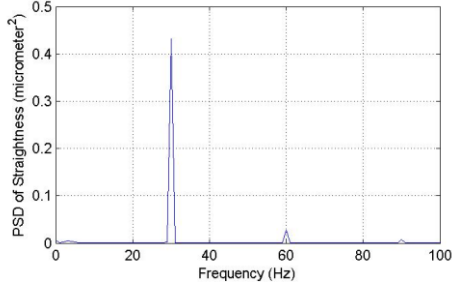
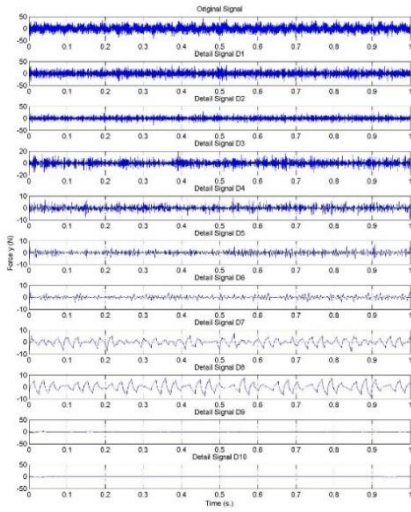
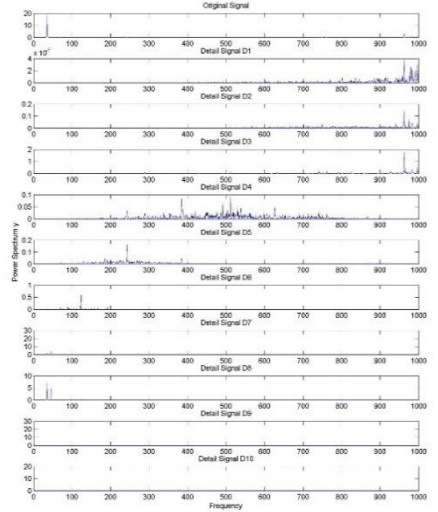
```
t2 = [Xdef3 '-2'];
set(figure(2),'PaperPosition',[0 0 20 22]);
print(figure(2),'-djpeg',t2);
t3 = [Xdef3 '-3'];
set(figure(3),'PaperPosition',[0 0 20 22]);
print(figure(3),'-djpeg',t3);
t4 = [Xdef3 '-4'];
set(figure(4),'PaperPosition',[0 0 20 22]);
print(figure(4),'-djpeg',t4);
t5 = [Xdef3 '-5'];
set(figure(5),'PaperPosition',[0 0 20 22]);
print(figure(5),'-djpeg',t5);
t6 = [Xdef3 '-6'];
set(figure(6),'PaperPosition',[0 0 20 22]);
print(figure(6),'-djpeg',t6);
```

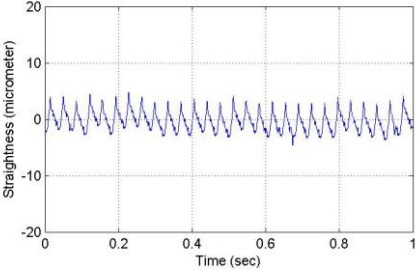
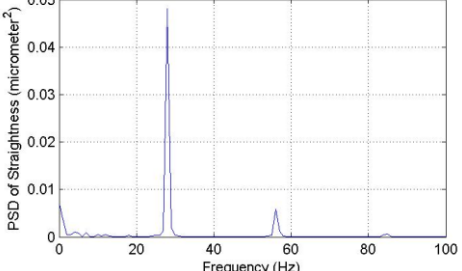
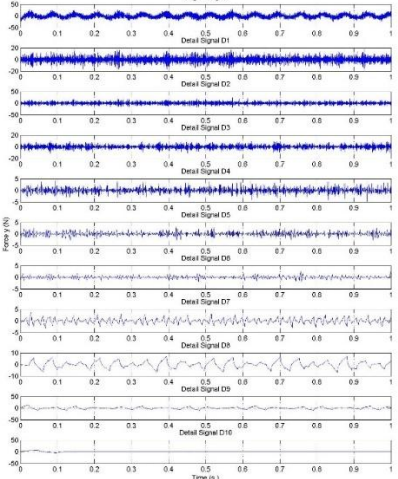
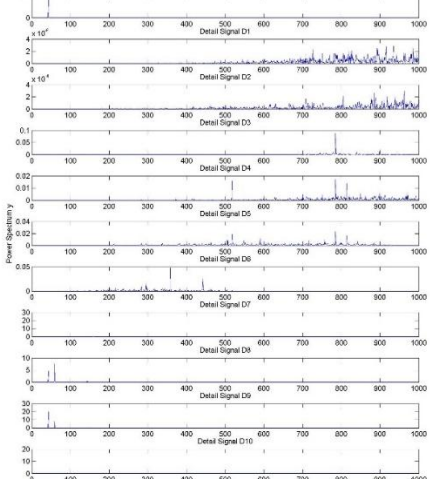


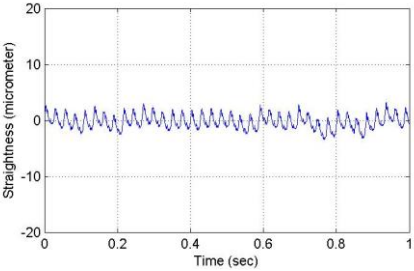
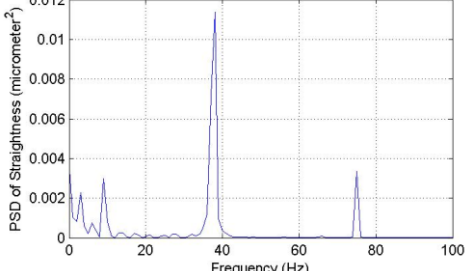
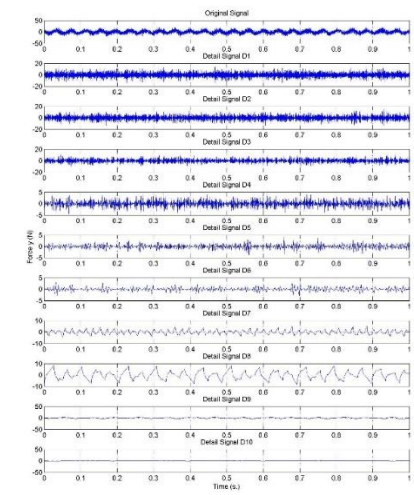
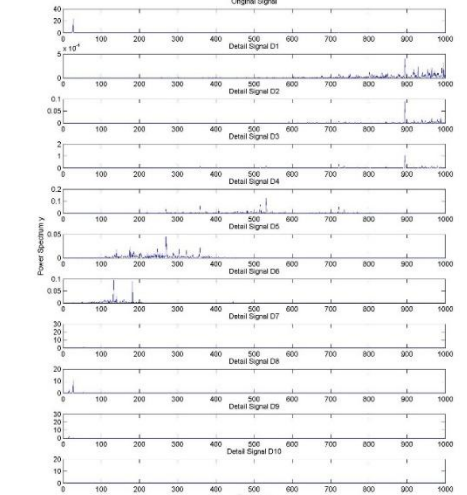
ภาคผนวก ค

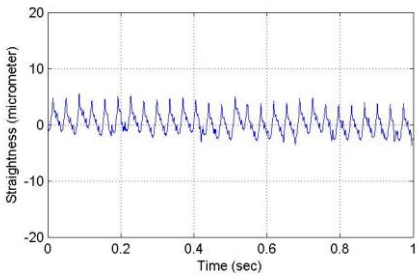
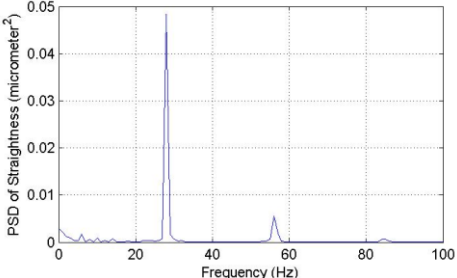
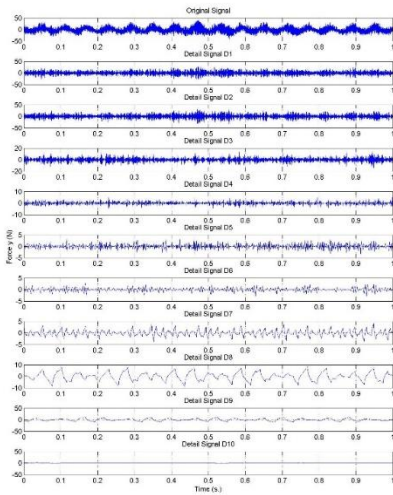
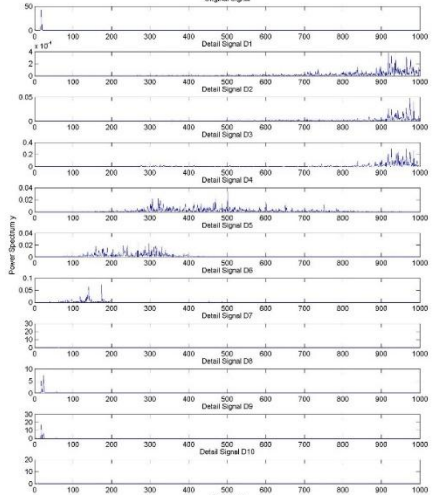
การวิเคราะห์ความตรงและแรงตัดโดยการแปลงเวฟเลขสำหรับเงื่อนไขการตัดต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

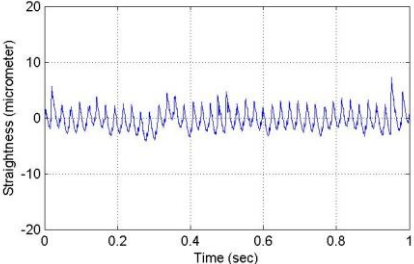
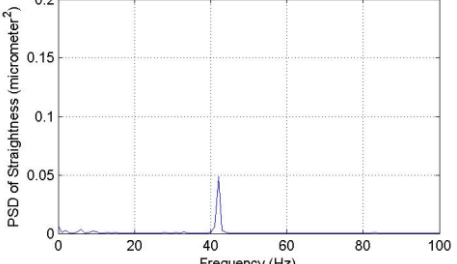
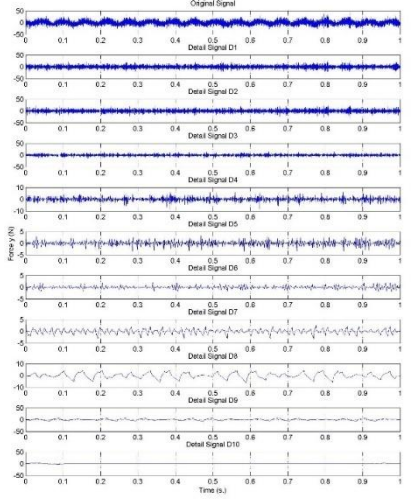
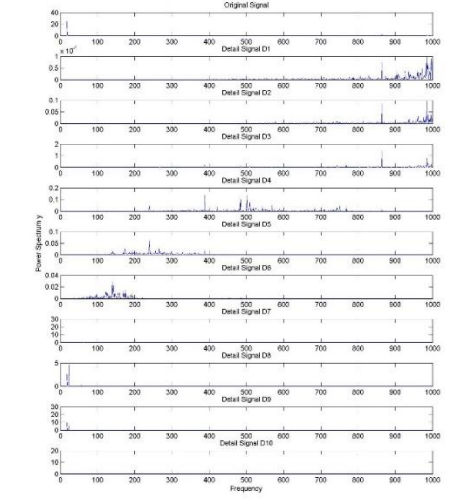
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
1	200	0.25	0.6	0.8	-6	0.112	15.376	ต่อเนื่อง
								
								

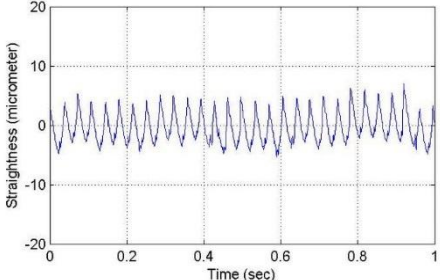
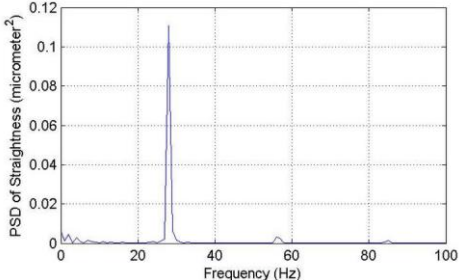
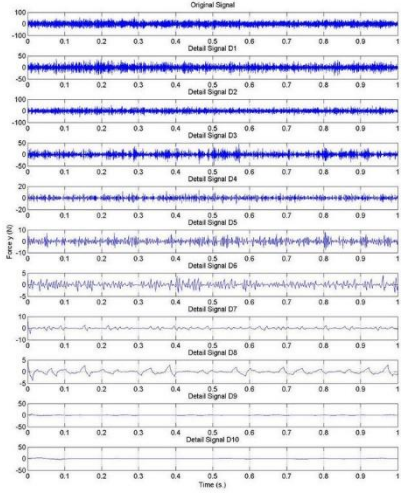
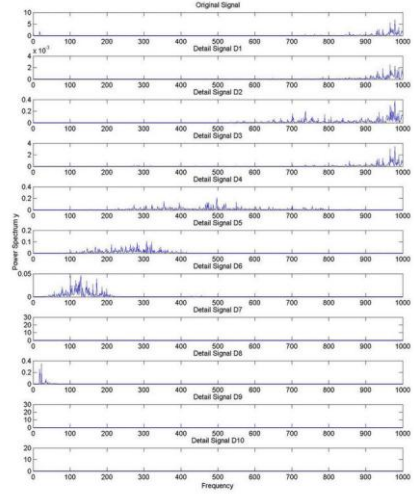
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ	
2	100	0.20	0.4	0.8	11	0.166	10.262	ต่อเนื่อง	
									
									

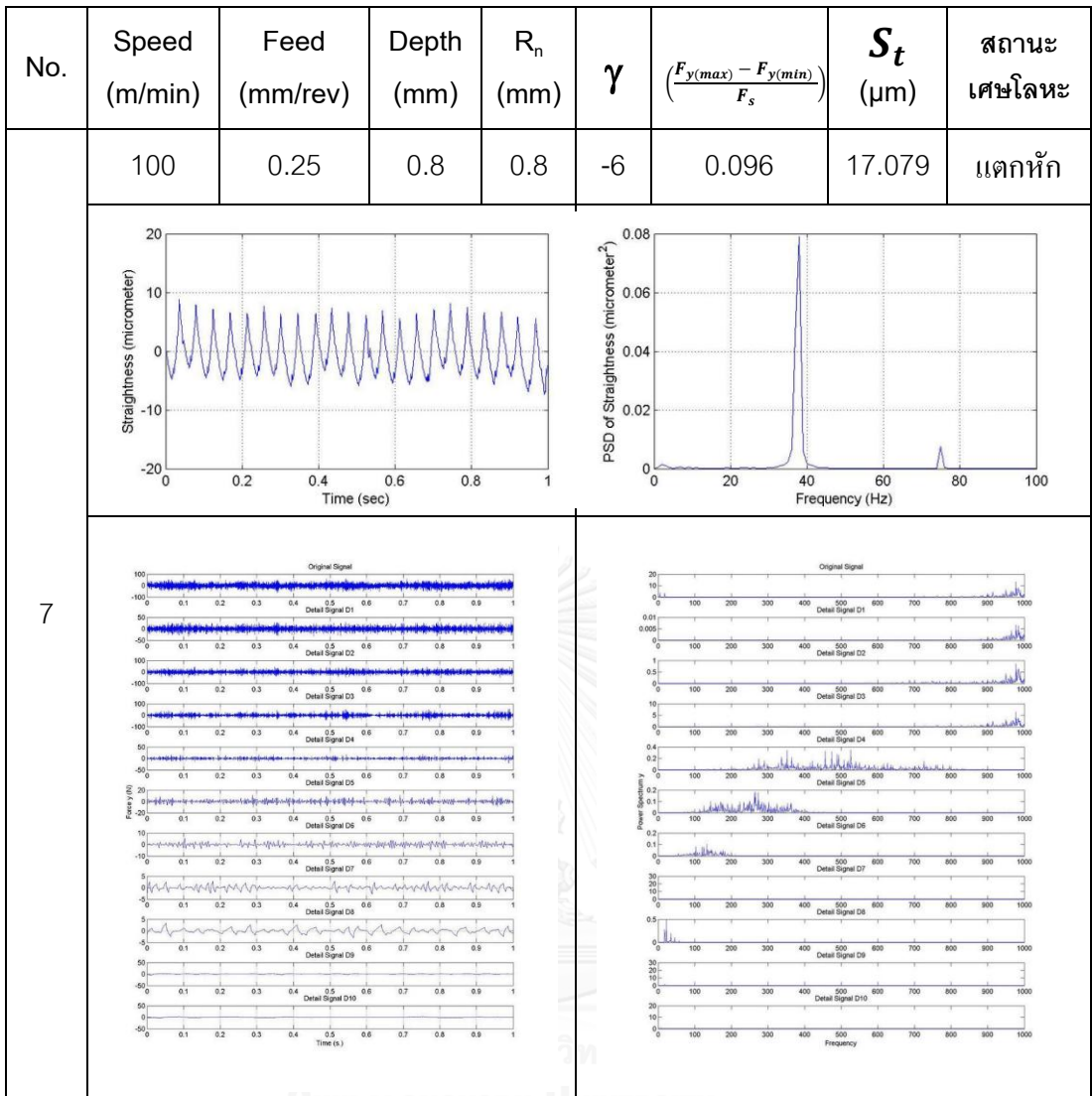
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
3	150	0.15	0.4	0.8	11	0.257	7.211	ต่อเนื่อง
								
								

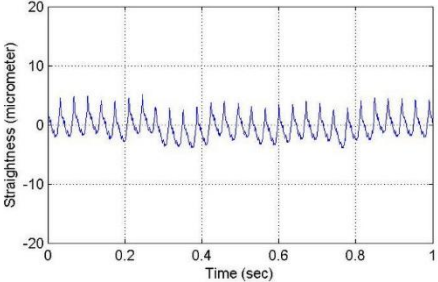
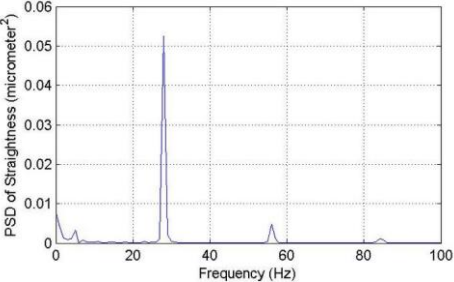
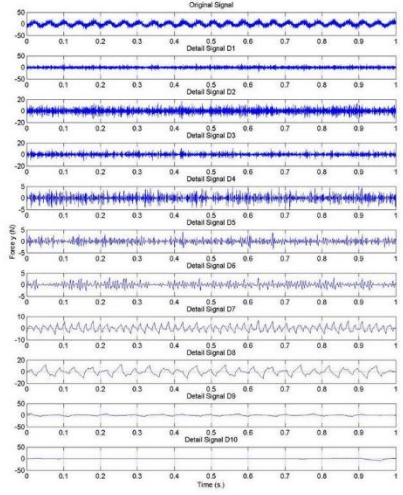
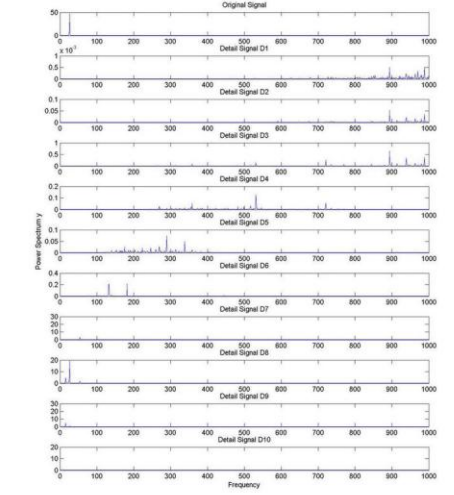
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
4	100	0.20	0.6	0.8	11	0.147	9.568	ต่อเนื่อง
								
								

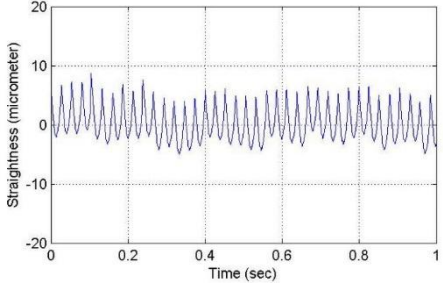
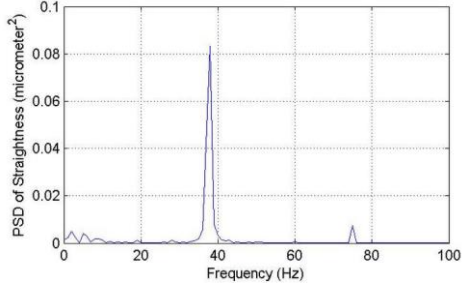
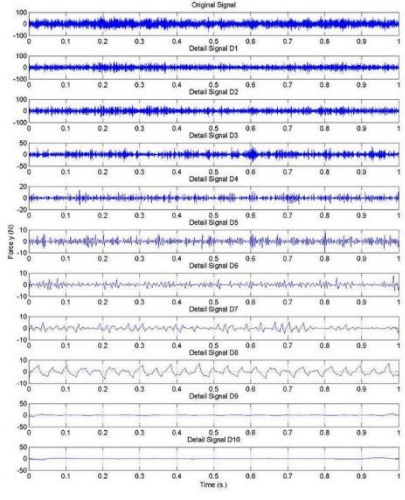
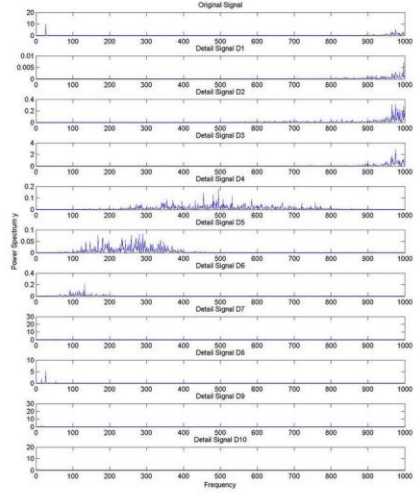


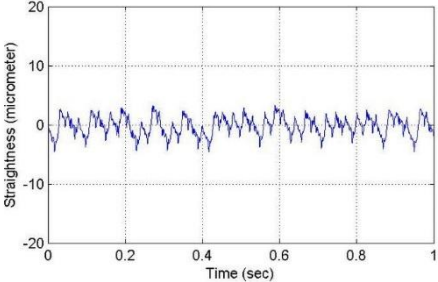
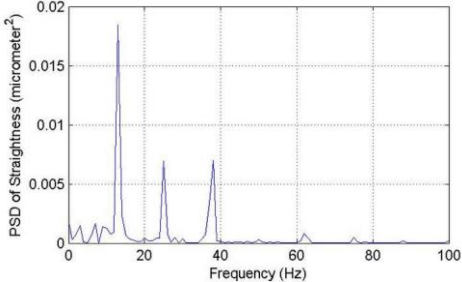
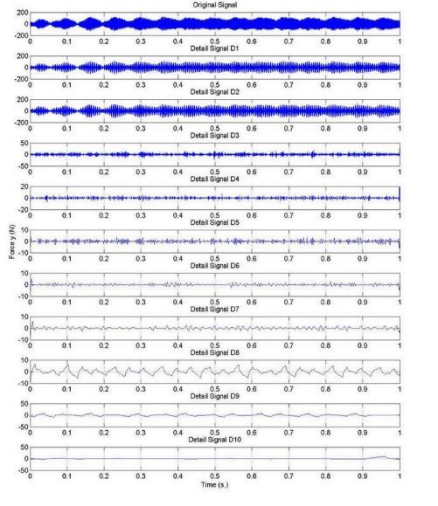
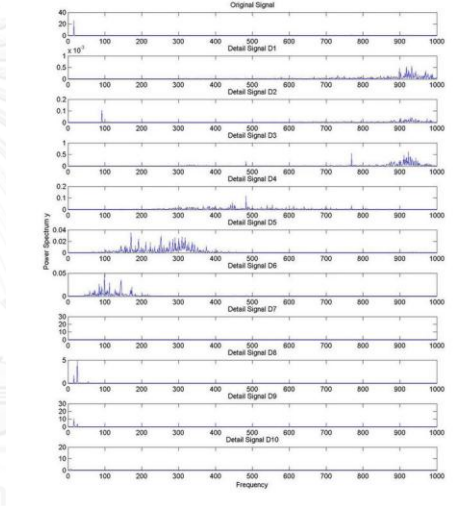
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ	
5	100	0.15	0.6	0.8	-6	0.100	11.407	ต่อเนื่อง	
									
									

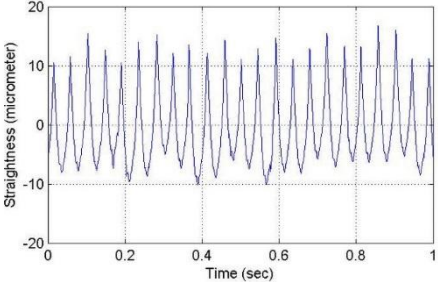
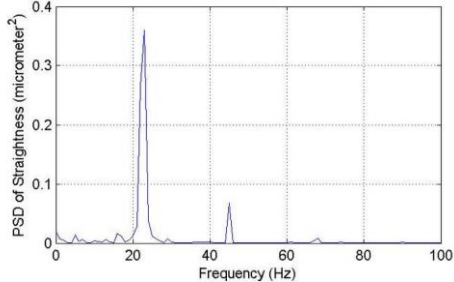
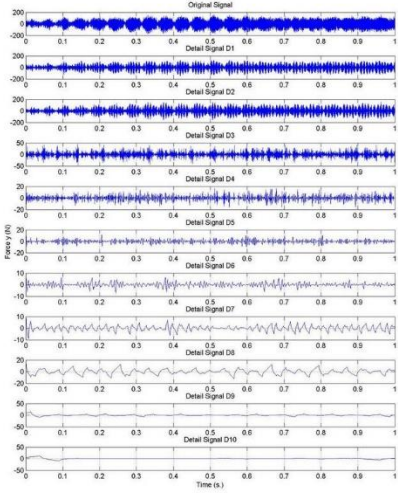
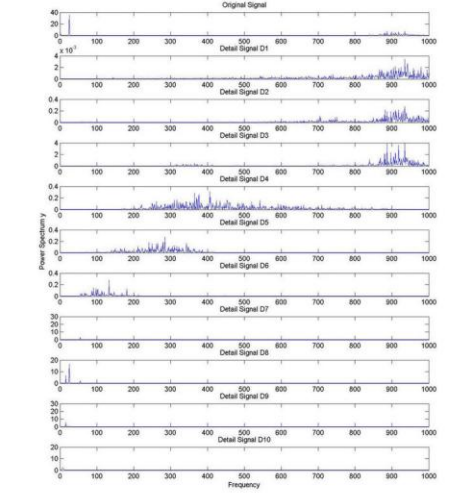
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
6	100	0.20	0.8	0.8	-6	0.051	13.426	แตกหัก
								
								

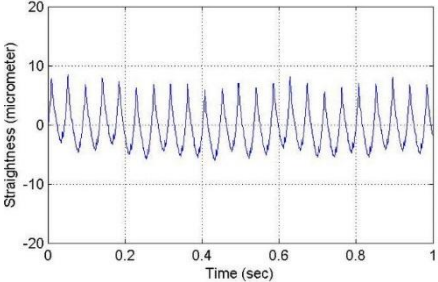
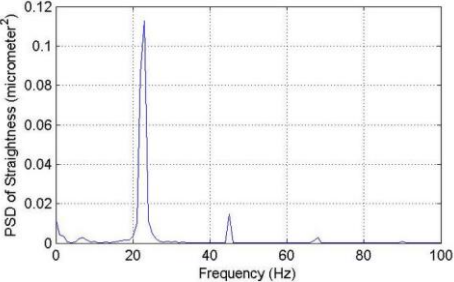
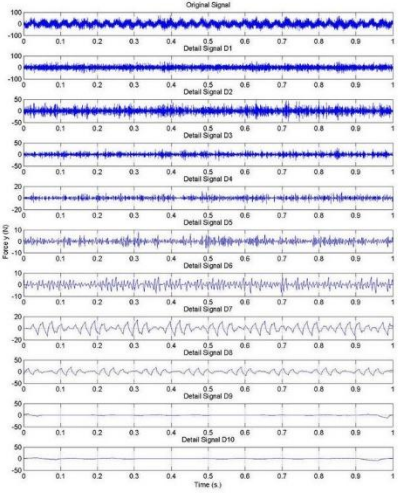
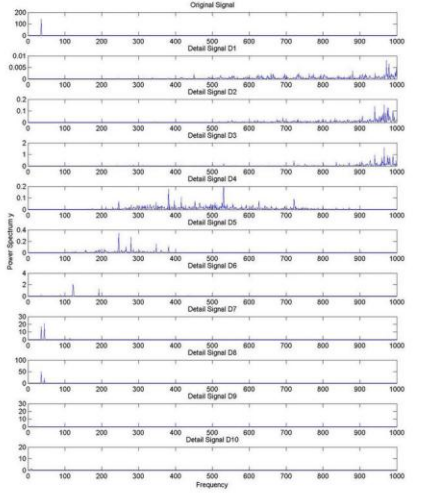


No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
8	150	0.20	0.4	0.8	11	0.299	9.945	ต่อเนื่อง
								
								

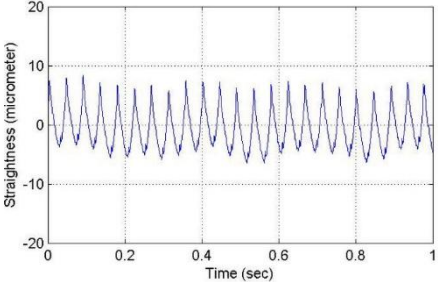
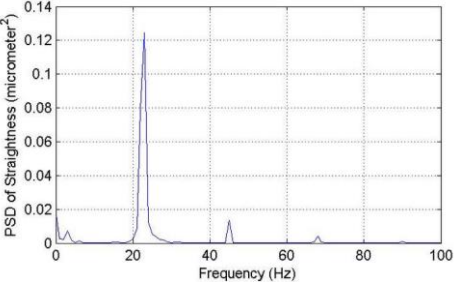
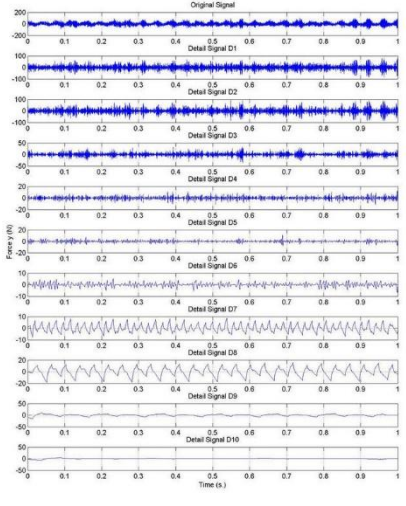
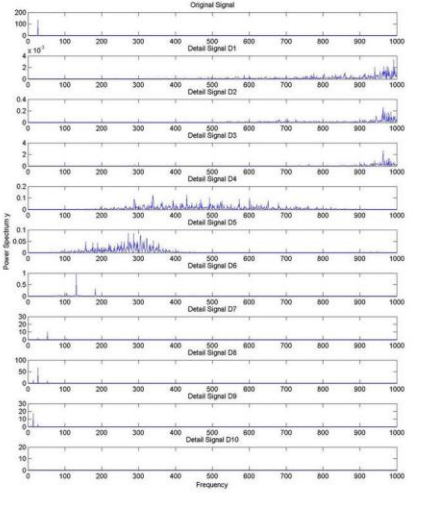
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
9	150	0.15	0.8	0.4	-6	0.102	13.772	ต่อเนื่อง
								
								

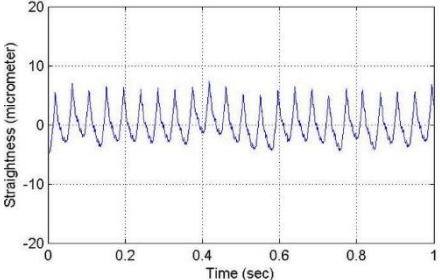
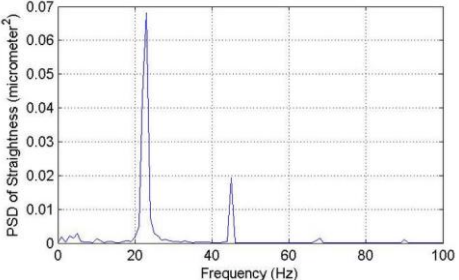
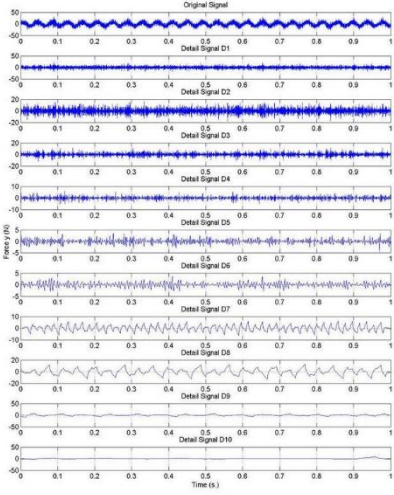
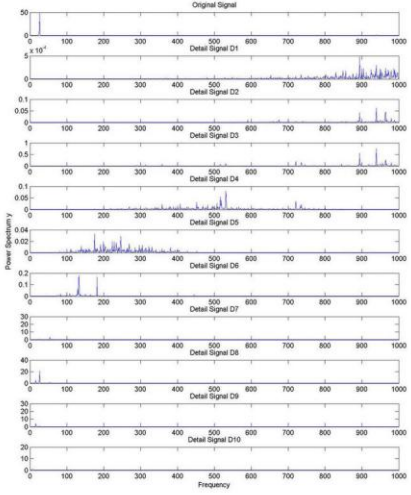
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
10	100	0.15	0.8	0.8	11	0.141	9.127	แตกหัก
								
								

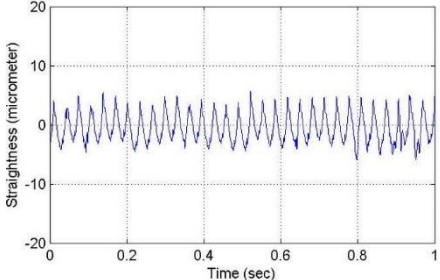
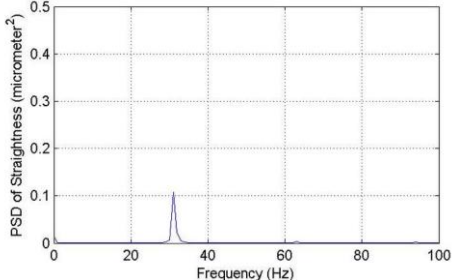
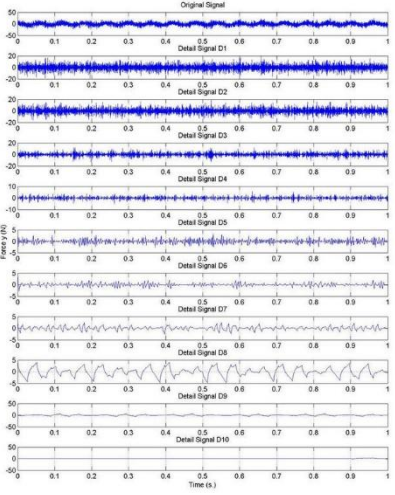
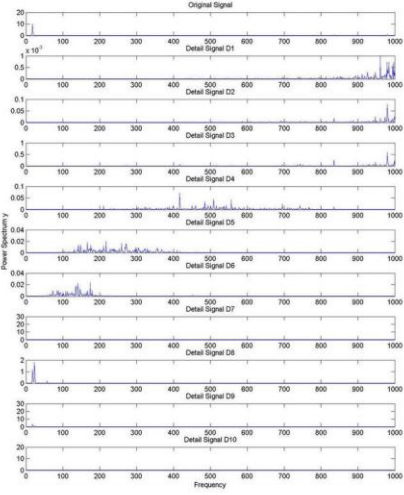
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
11	150	0.25	0.8	0.4	11	0.147	27.332	แตกหัก
								
								

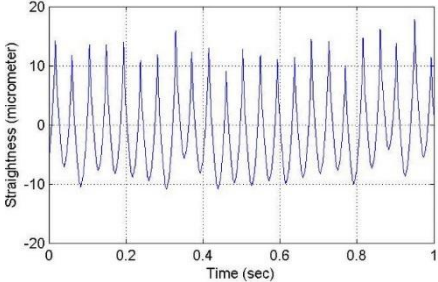
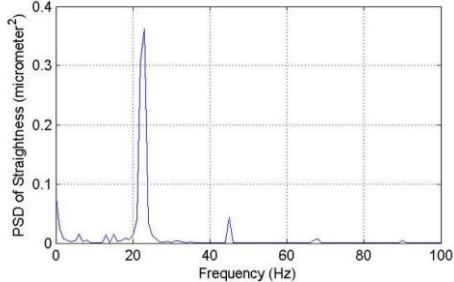
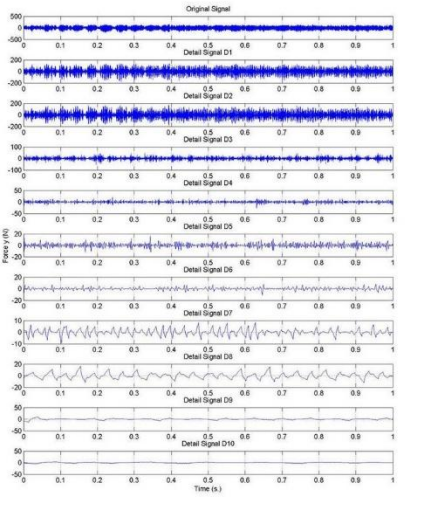
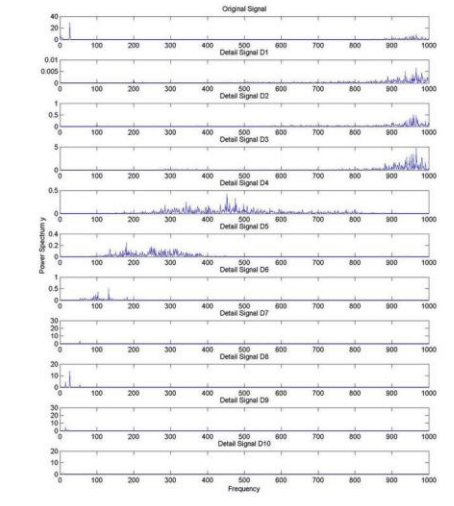
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
12	200	0.25	0.8	0.8	-6	0.206	15.395	แตกหัก
								
								

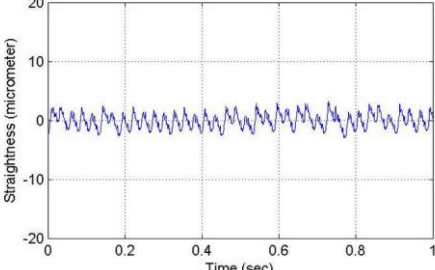
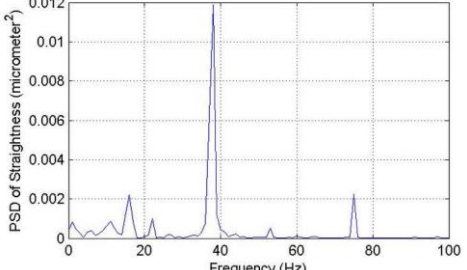
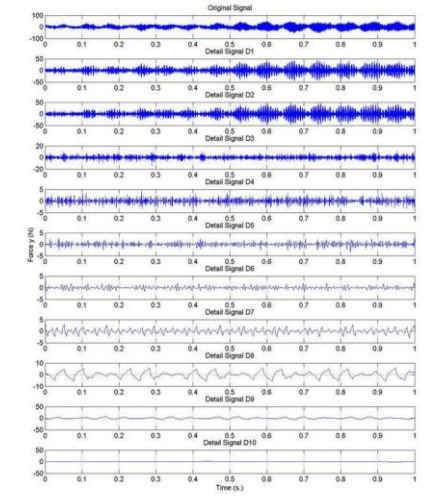
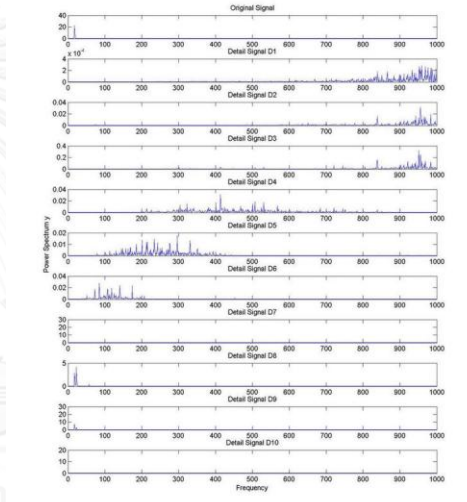


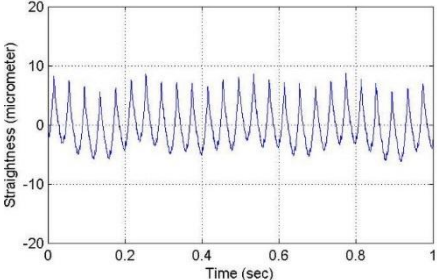
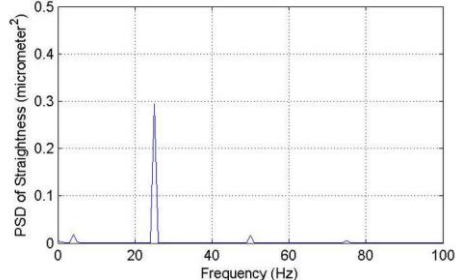
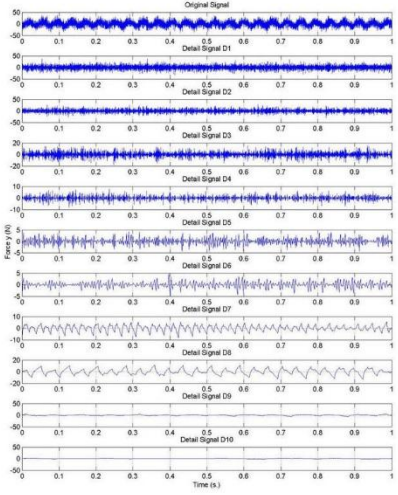
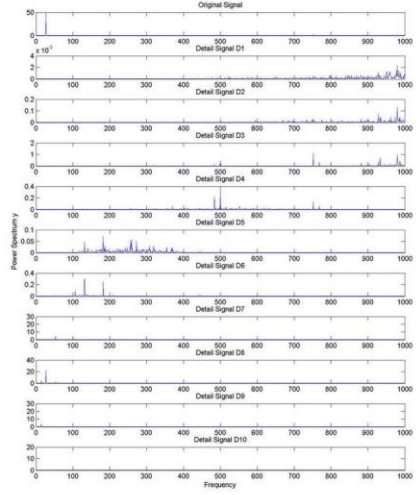
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
13	150	0.25	0.8	0.8	-6	0.229	15.563	แตกหัก
								
								

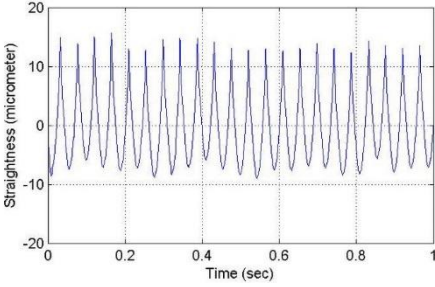
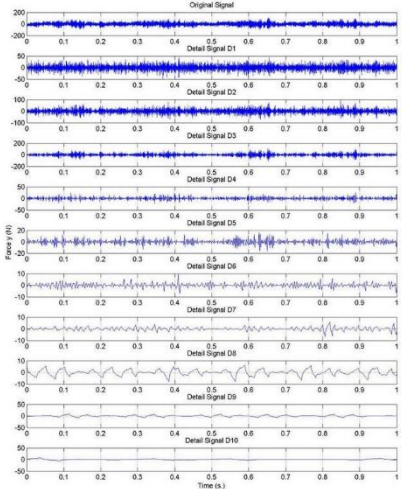
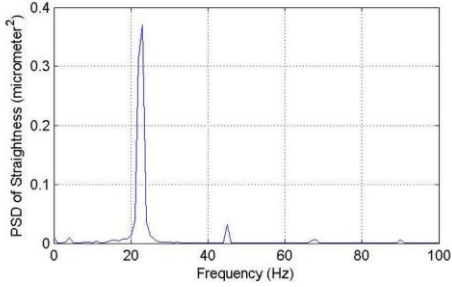
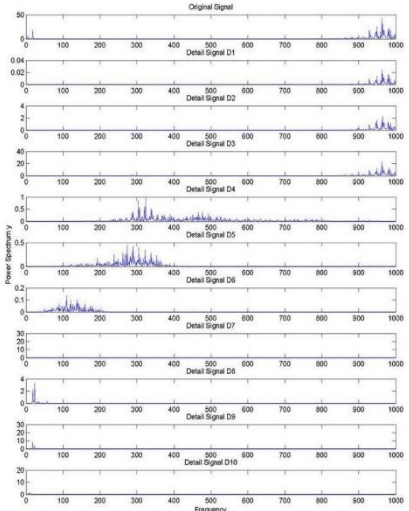
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
14	150	0.25	0.4	0.8	11	0.262	12.072	ต่อเนื่อง
								
								

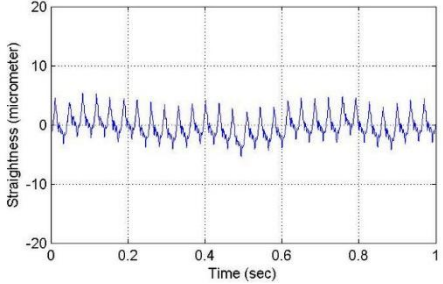
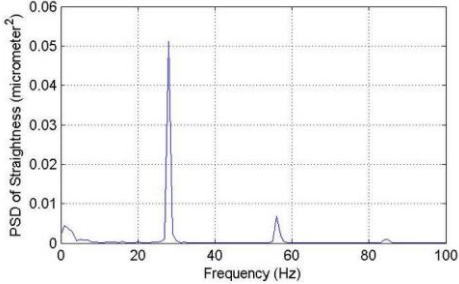
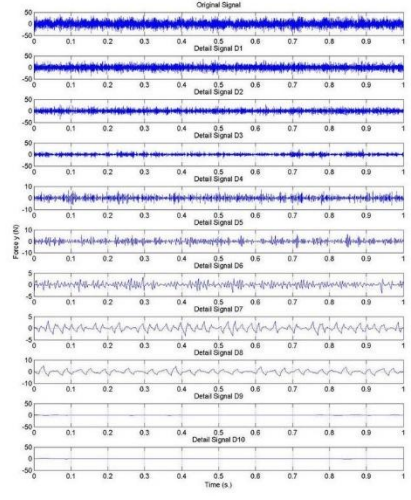
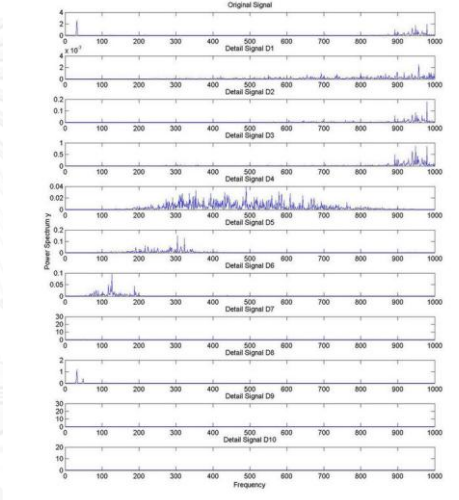
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
15	100	0.20	0.4	0.8	-6	0.091	14.97	ต่อเนื่อง
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
16	150	0.25	0.8	0.4	-6	0.130	32.634	แตกหัก
								
								

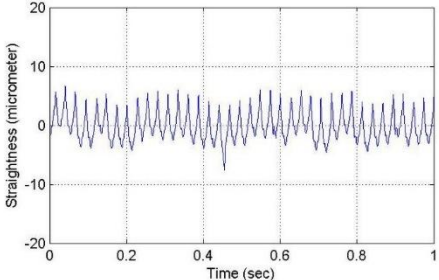
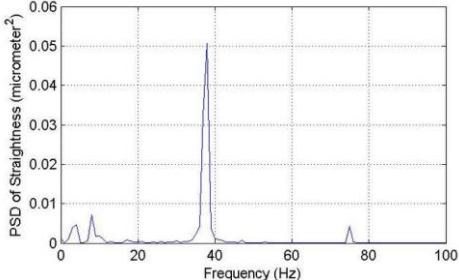
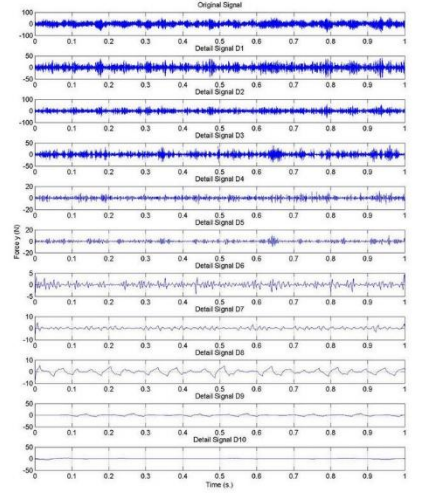
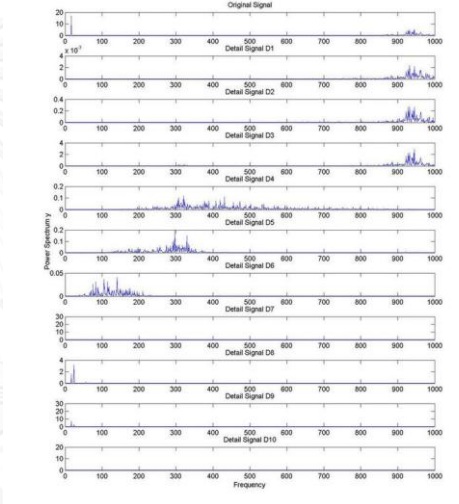
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
17	100	0.15	0.6	0.8	11	0.127	6.836	ต่อเนื่อง+ แตกหัก
								
								

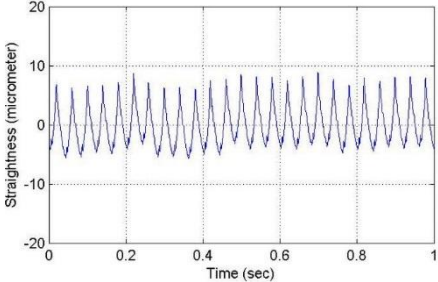
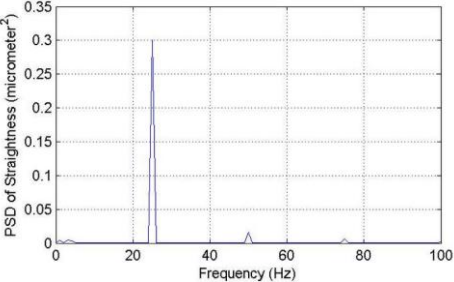
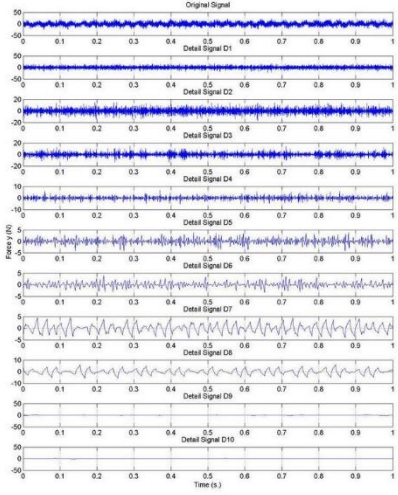
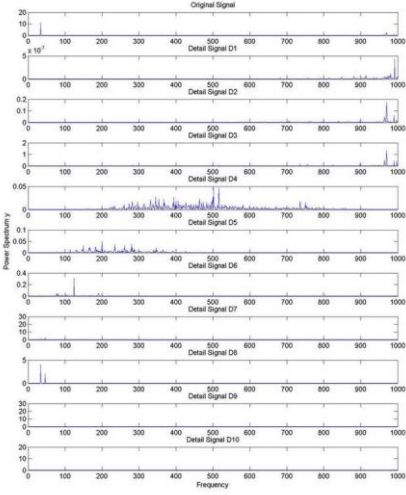
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
18	150	0.25	0.6	0.8	-6	0.157	16.952	ต่อเนื่อง
								
								

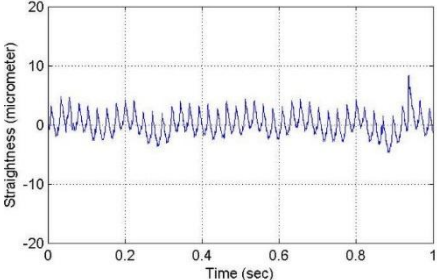
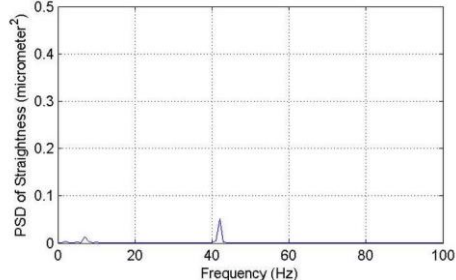
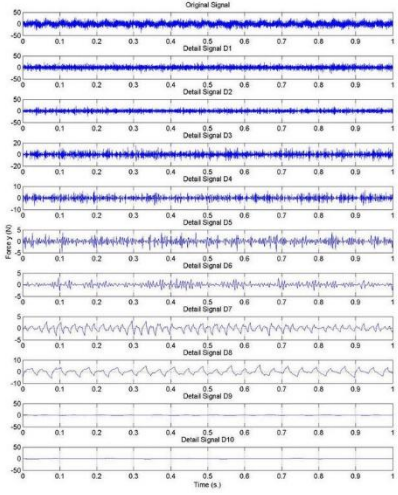
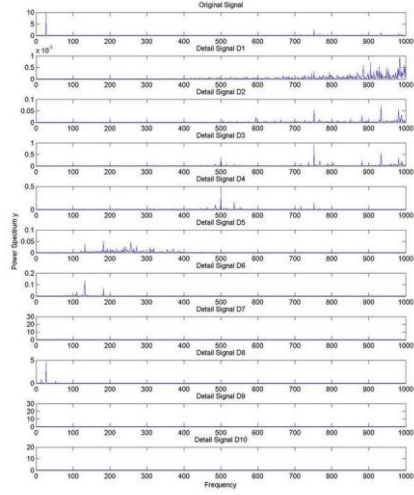
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
19	100	0.25	0.6	0.4	-6	0.078	25.448	ต่อเนื่อง
	 					 		

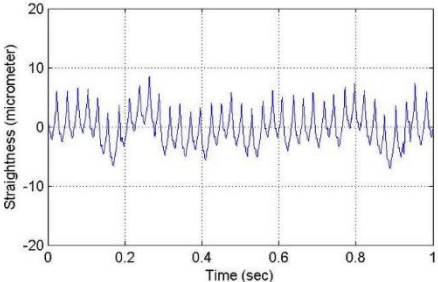
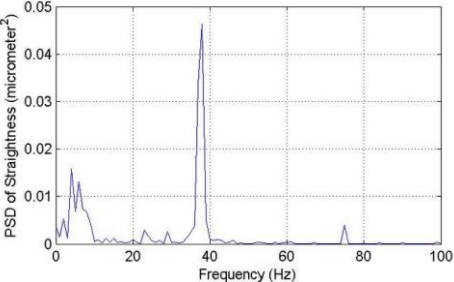
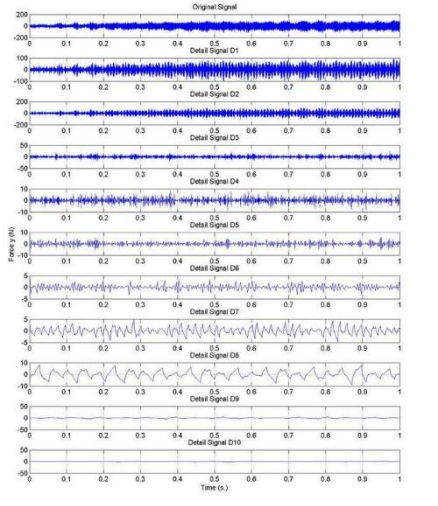
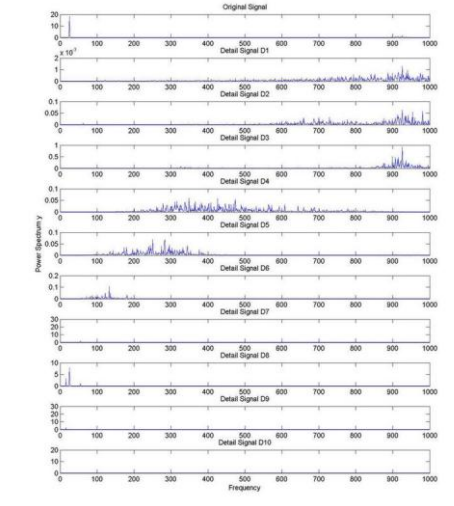
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
20	200	0.20	0.8	0.8	11	0.063	10.701	แตกหัก
								
								

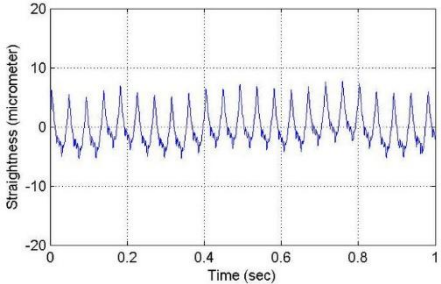
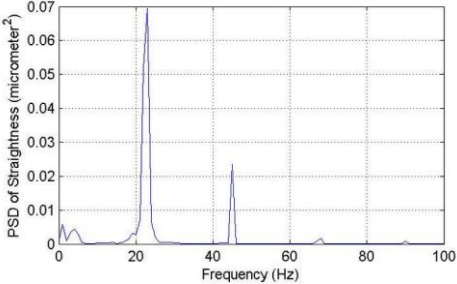
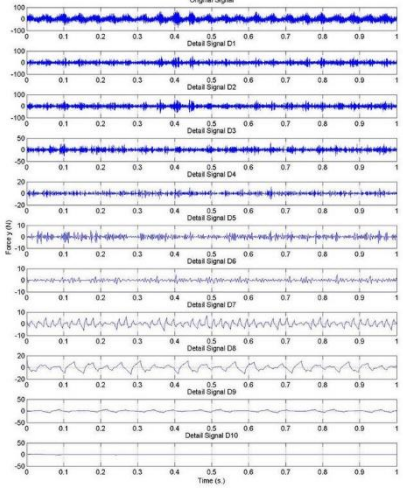
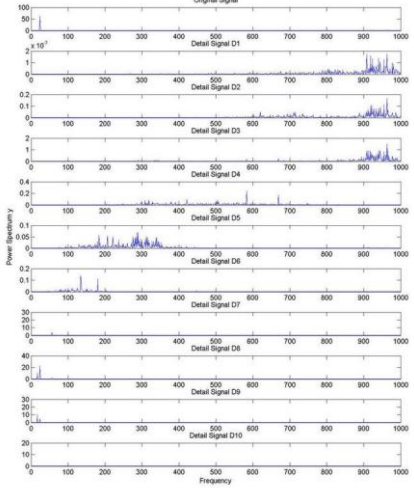


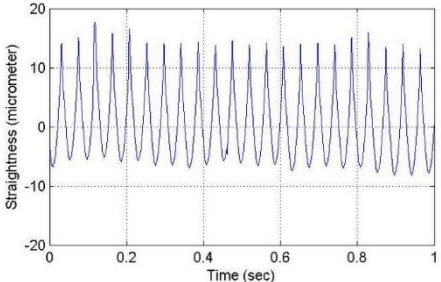
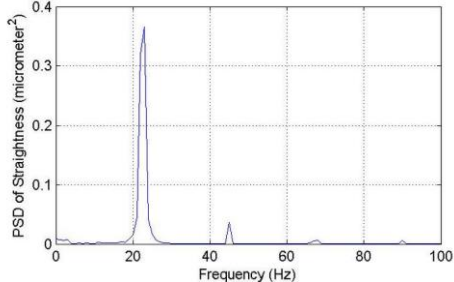
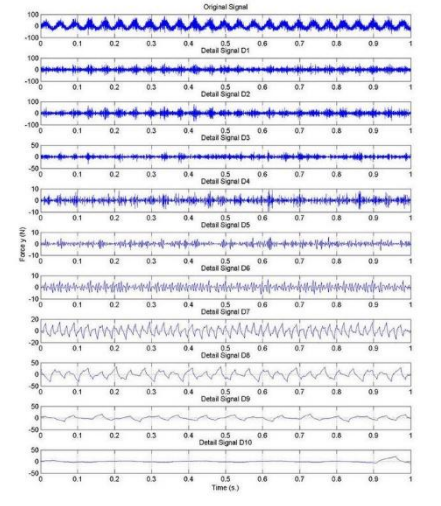
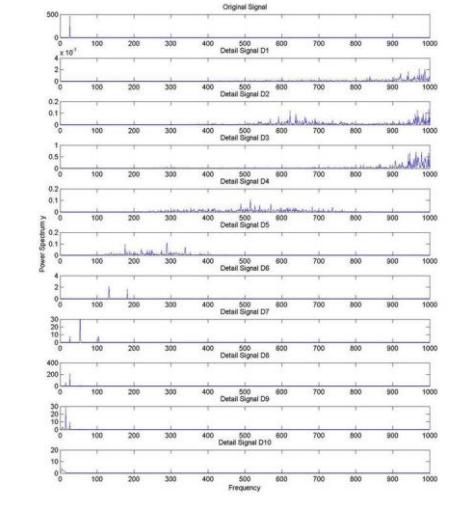
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
21	100	0.15	0.8	0.4	11	0.107	16.456	ต่อเนื่อง
								
								

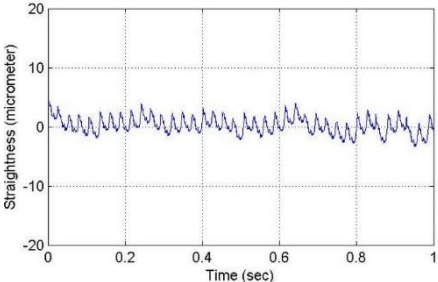
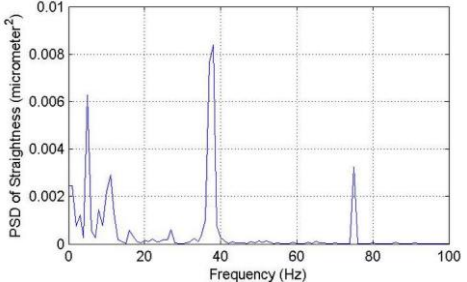
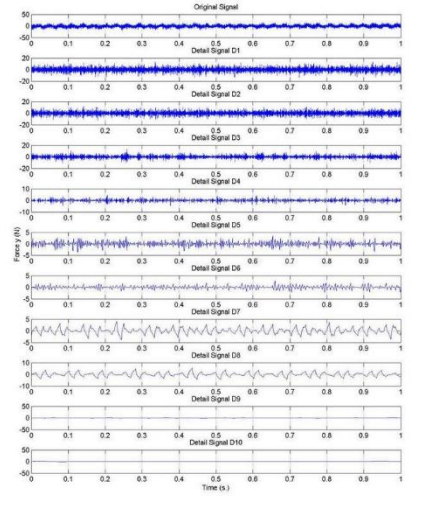
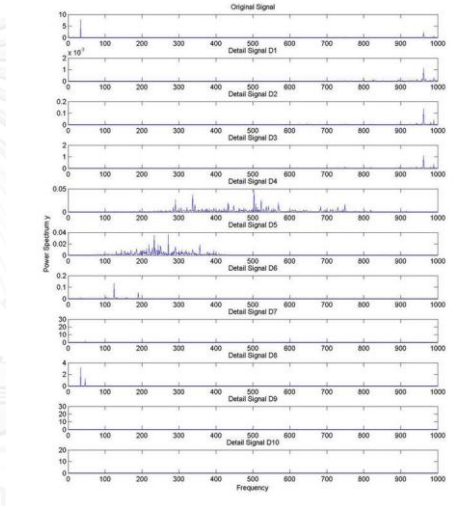
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
22	200	0.25	0.4	0.8	-6	0.108	14.54	ต่อเนื่อง
								
								

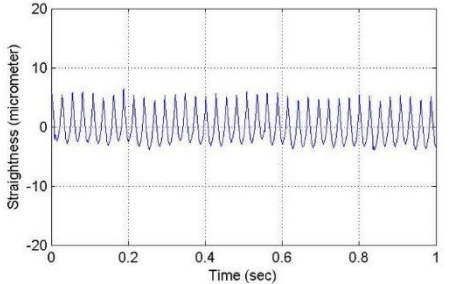
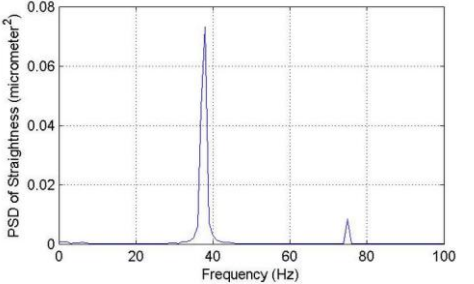
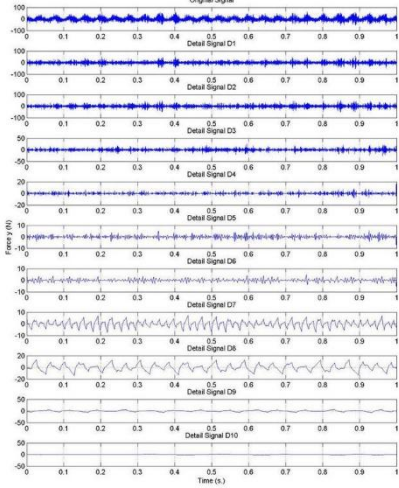
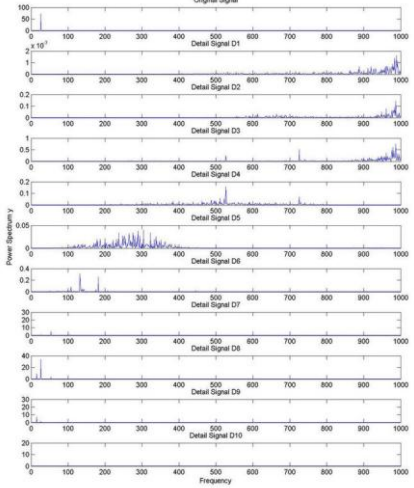
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
23	150	0.15	0.6	0.8	-6	0.113	12.967	ต่อเนื่อง
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
24	150	0.15	0.8	0.4	11	0.153	15.658	แตกหัก
								
								

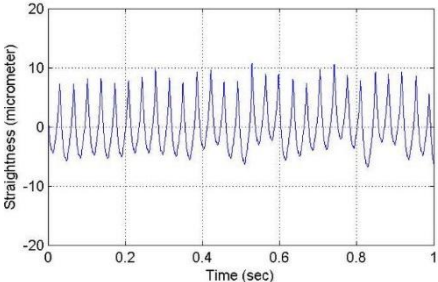
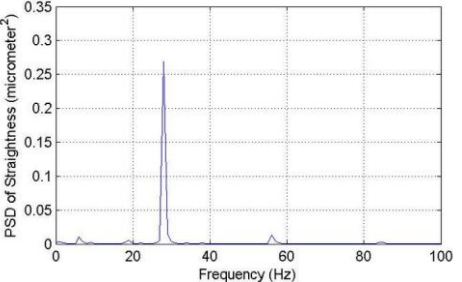
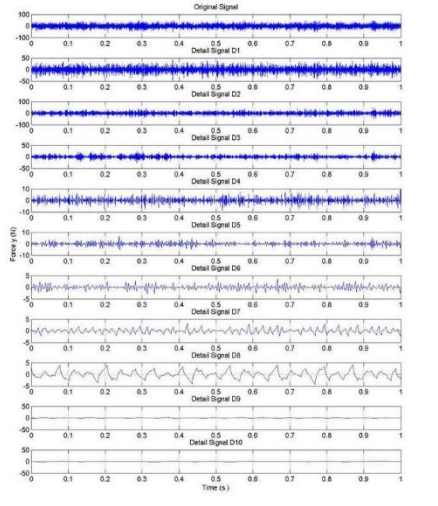
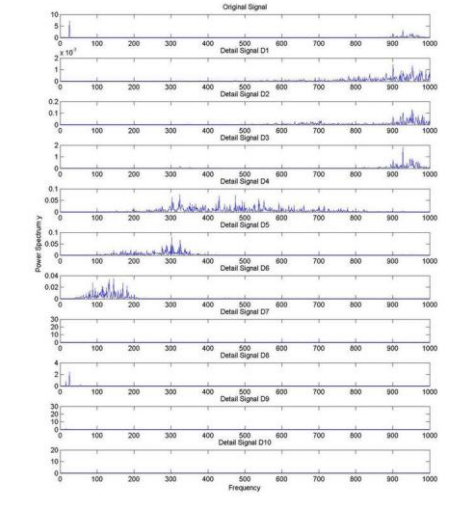
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
25	150	0.25	0.8	0.8	11	0.140	13.837	แตกหัก
								
								

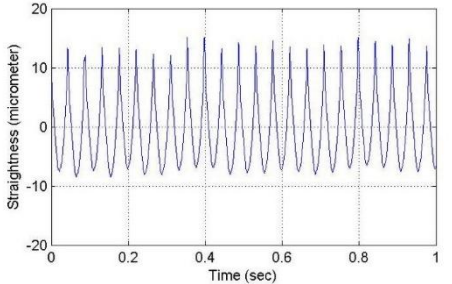
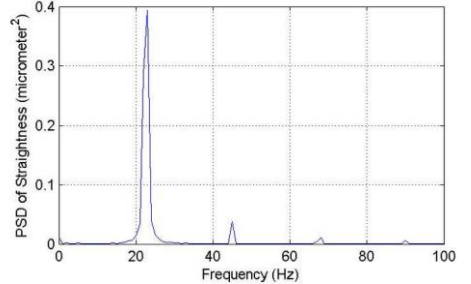
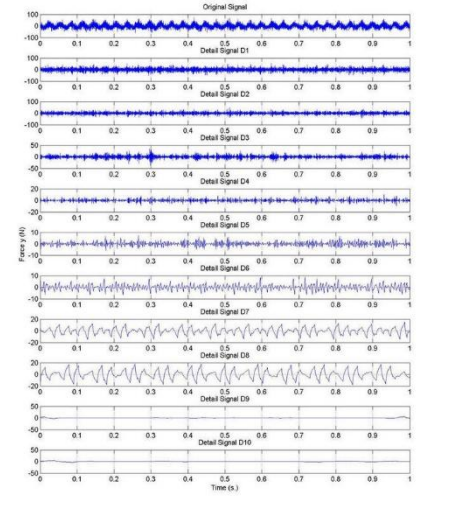
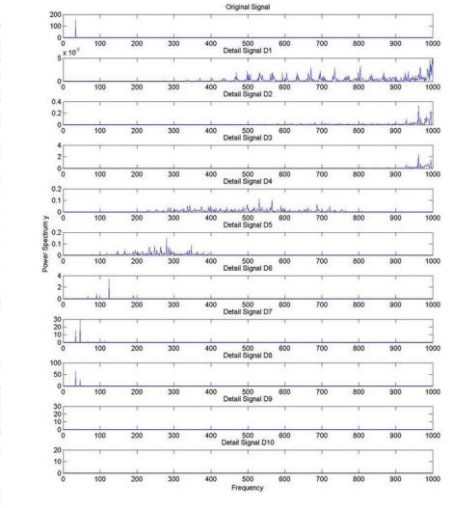
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
26	150	0.25	0.4	0.4	-6	0.498	26.107	แตกหัก
								
								

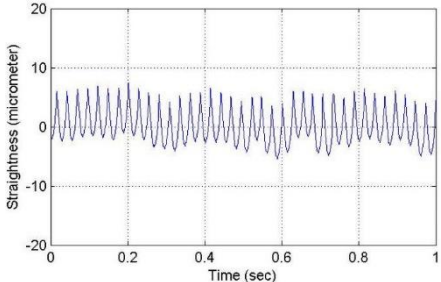
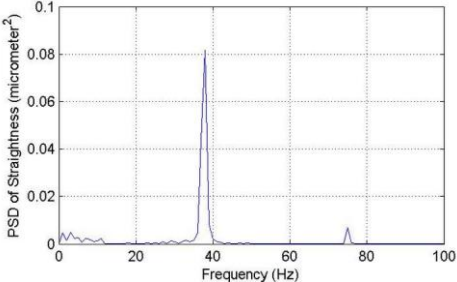
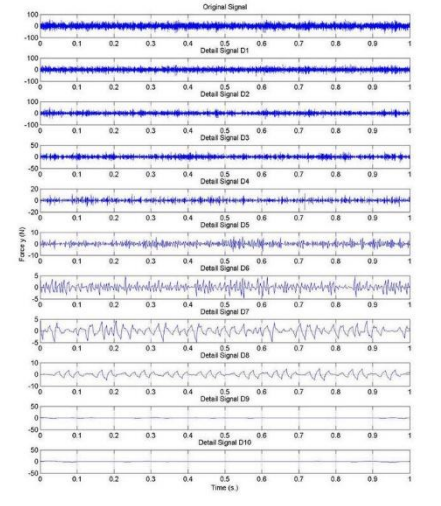
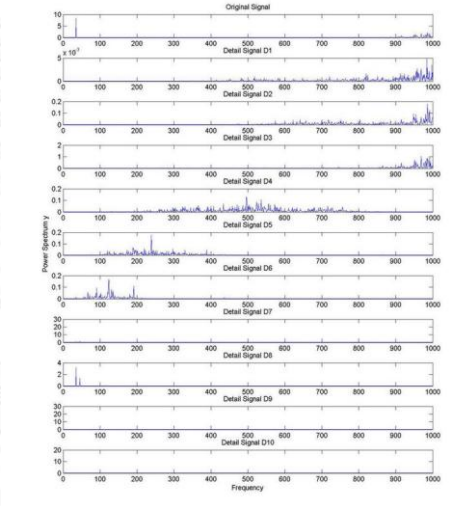
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ	
27	200	0.15	0.4	0.8	11	0.161	7.966	ต่อเนื่อง	
									
									

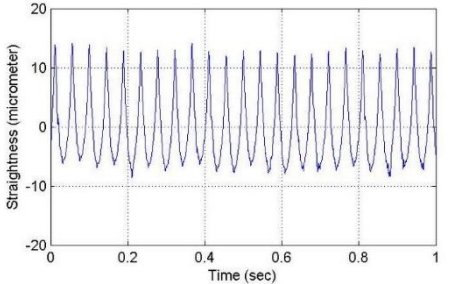
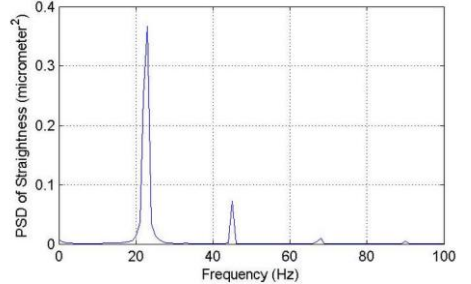
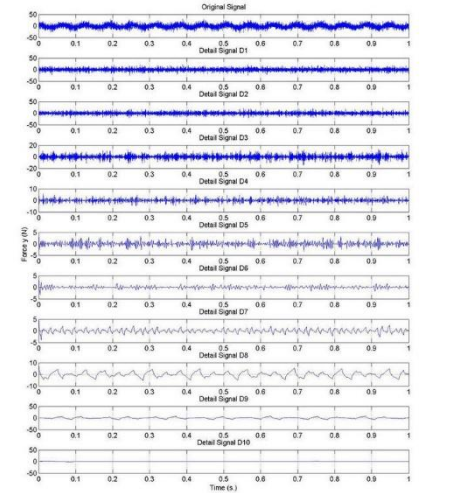
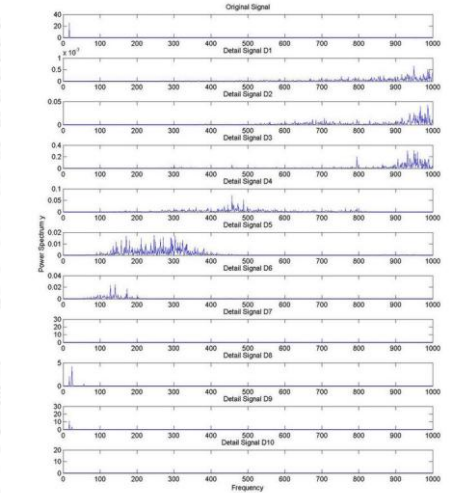
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
28	150	0.15	0.4	0.4	-6	0.334	10.724	ต่อเนื่อง
								
								

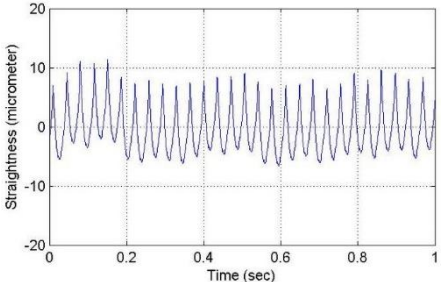
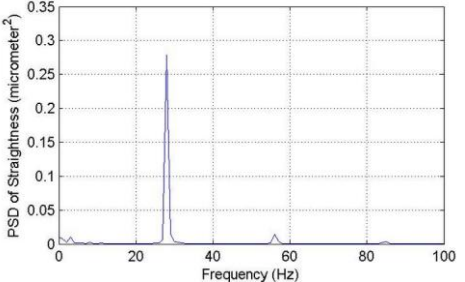
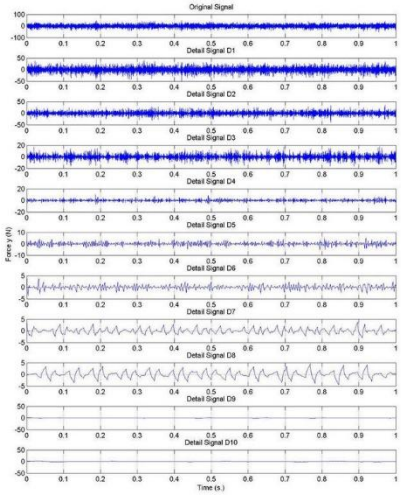
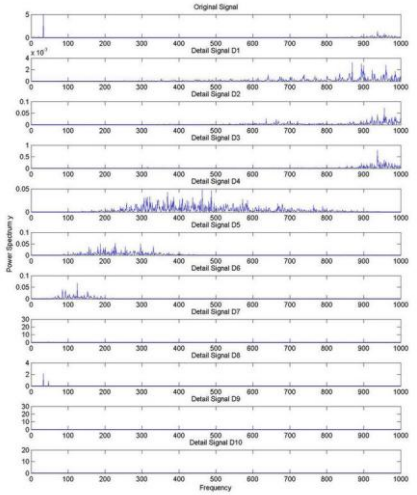


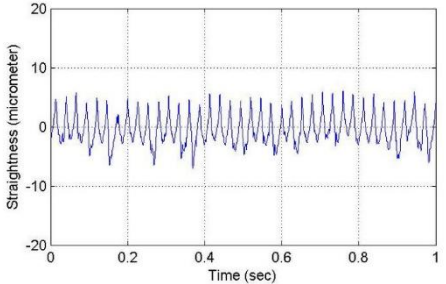
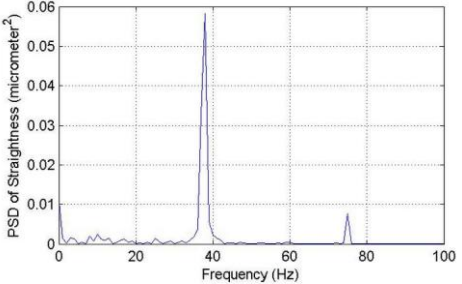
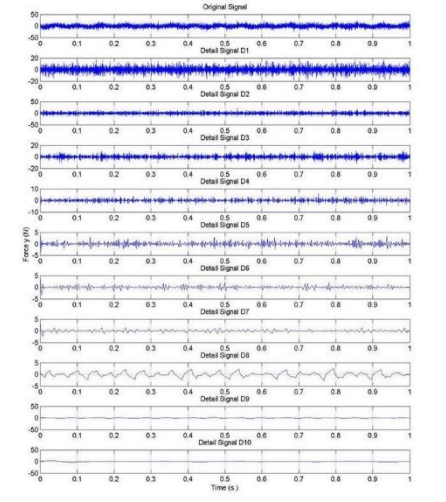
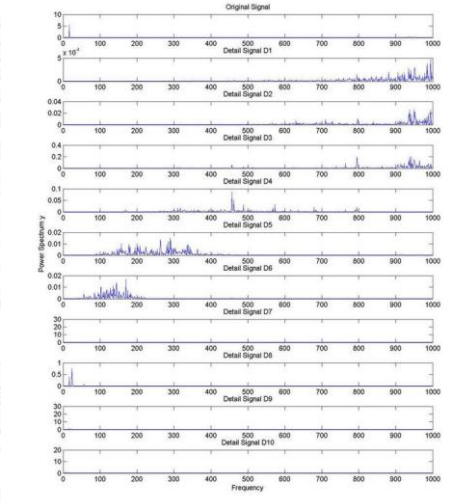
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
29	150	0.20	0.6	0.4	11	0.080	19.097	ต่อเนื่อง
								
								

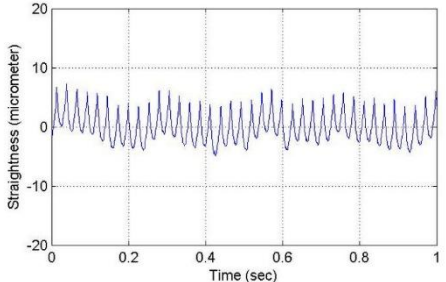
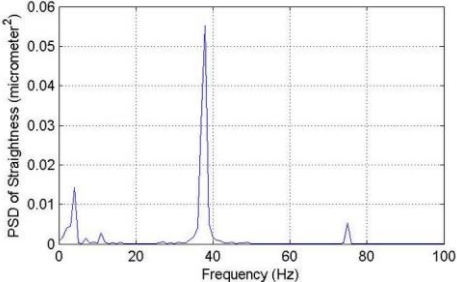
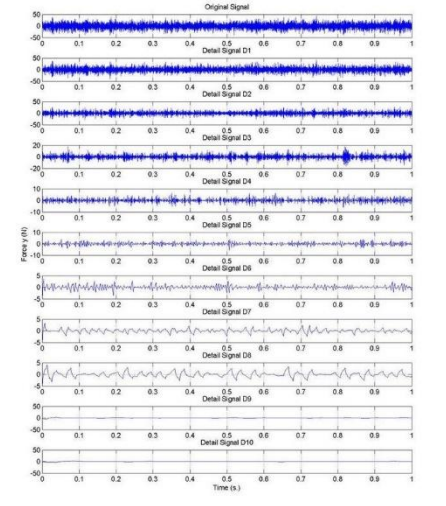
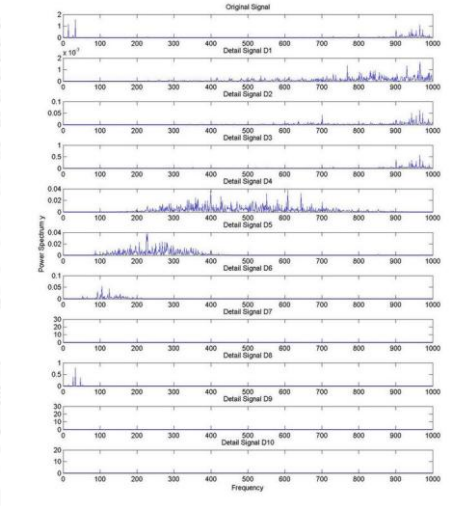
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
30	200	0.25	0.4	0.4	-6	0.285	26.821	ต่อเนื่อง
								
								

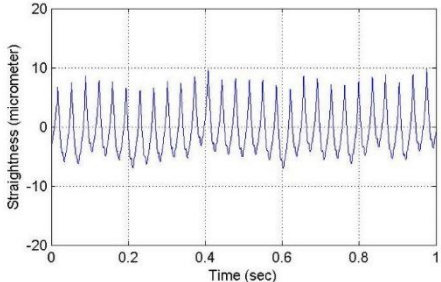
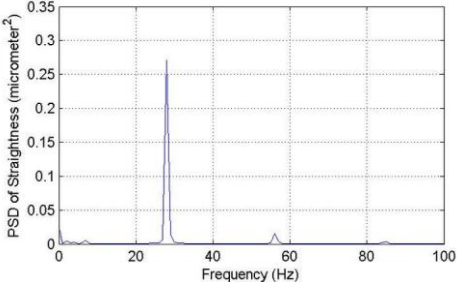
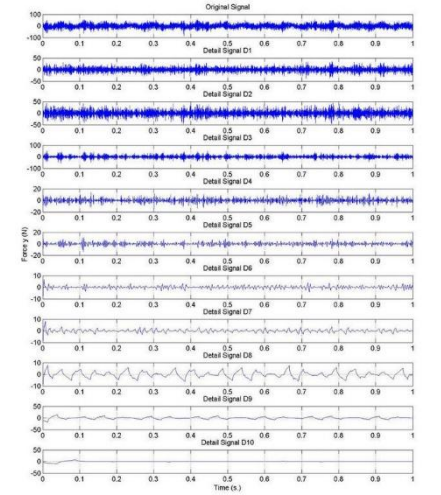
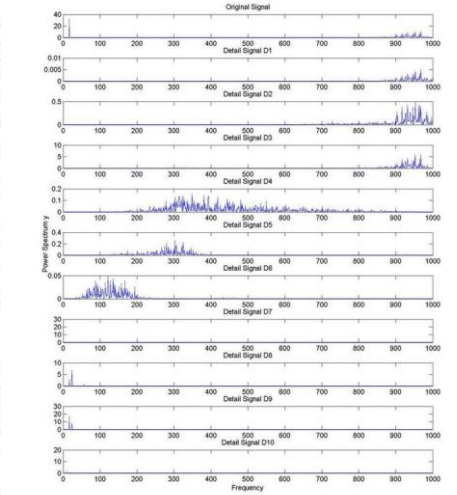
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
31	200	0.15	0.8	0.4	-6	0.080	13.541	แตกหัก
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
32	100	0.25	0.4	0.4	11	0.138	23.999	ต่อเนื่อง
								
								

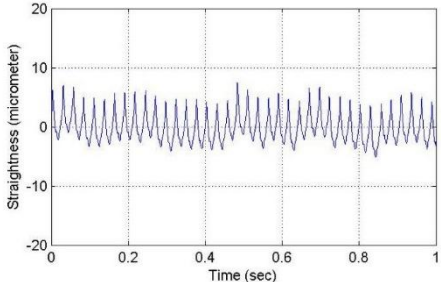
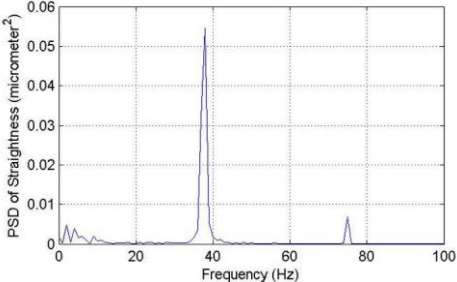
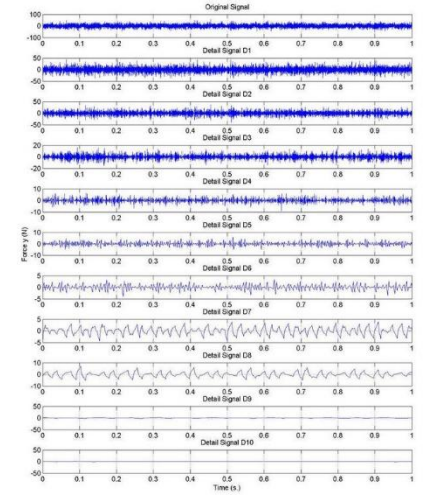
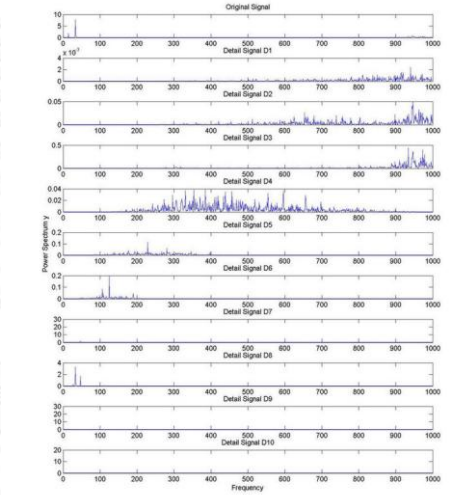
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
33	200	0.20	0.6	0.4	11	0.095	18.103	ต่อเนื่อง
								
								

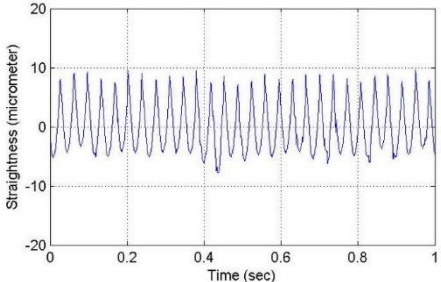
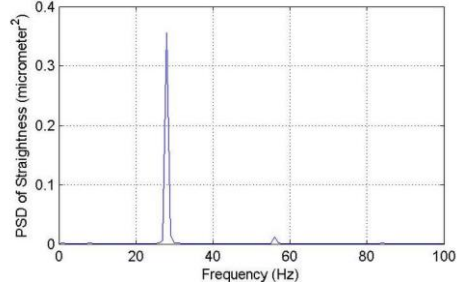
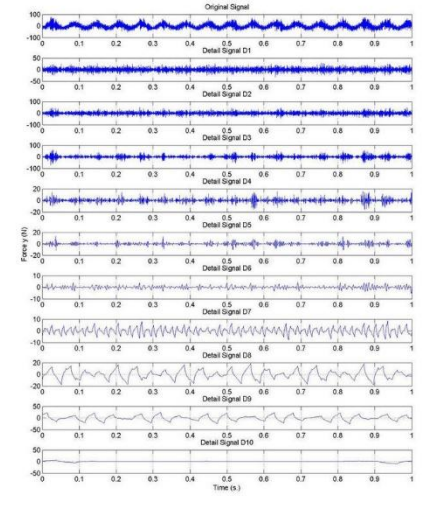
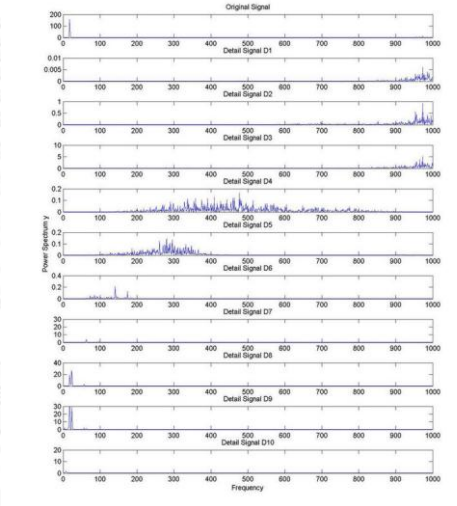
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
34	100	0.15	0.4	0.4	11	0.093	14.982	ต่อเนื่อง
								
								

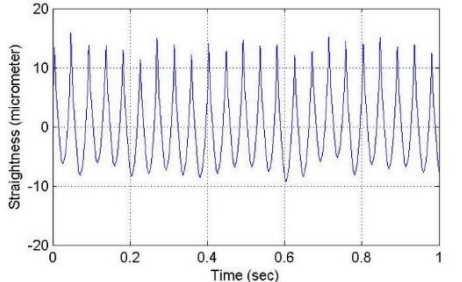
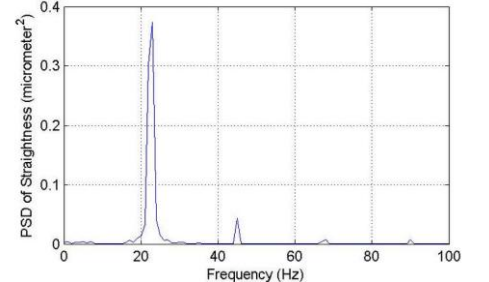
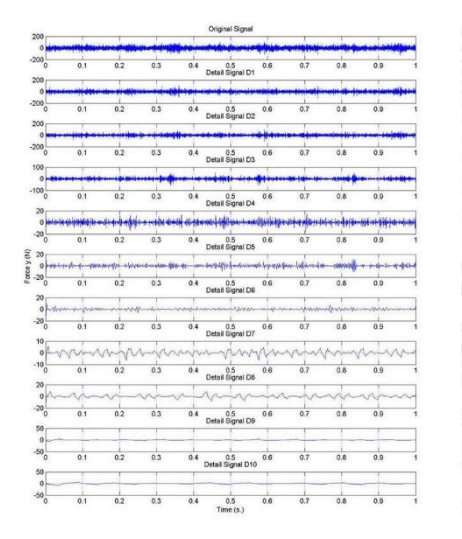
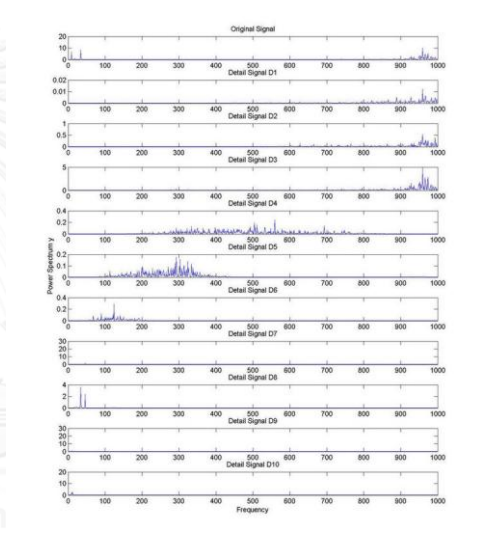
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
35	200	0.15	0.6	0.4	11	0.110	12.486	ต่อเนื่อง
								
								

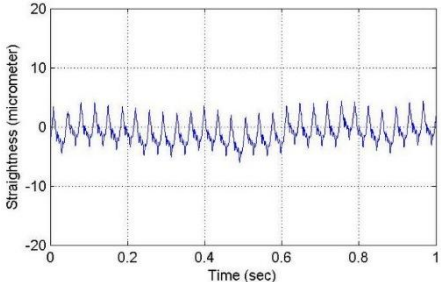
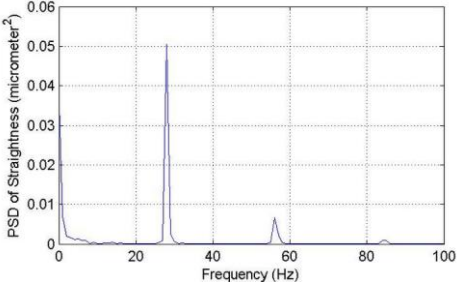
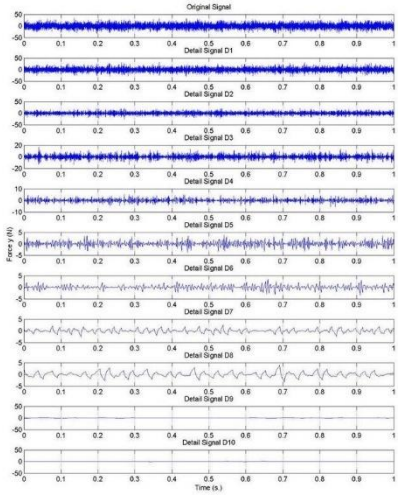
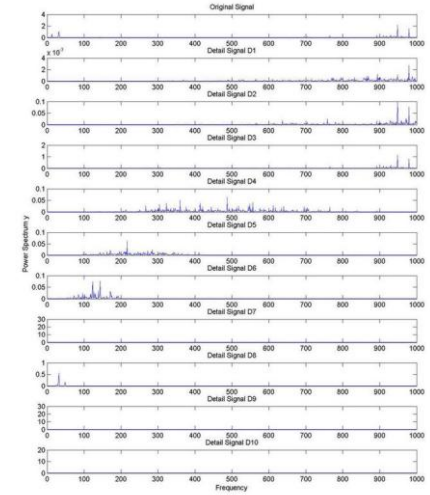
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
36	100	0.20	0.8	0.4	11	0.113	18.895	ต่อเนื่อง
								
								

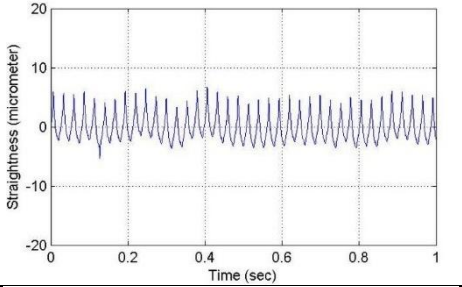
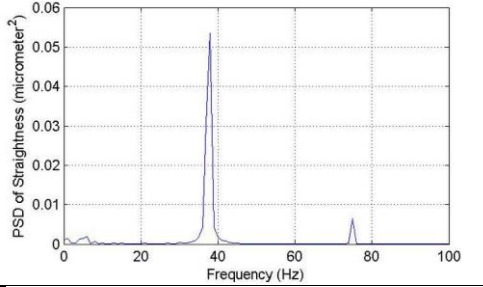
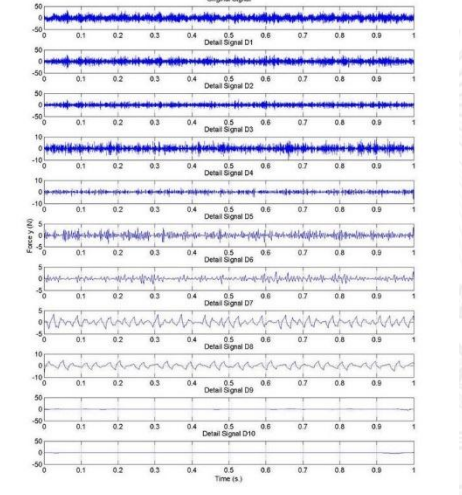
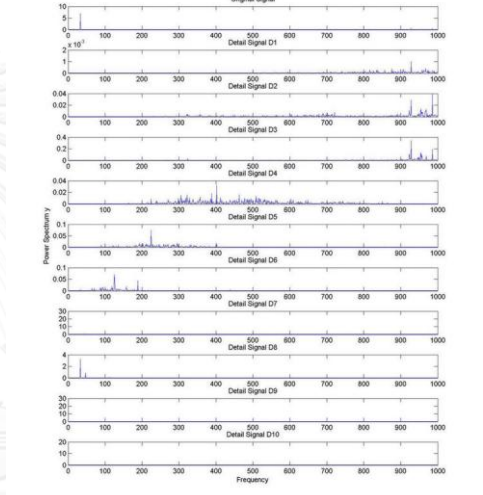


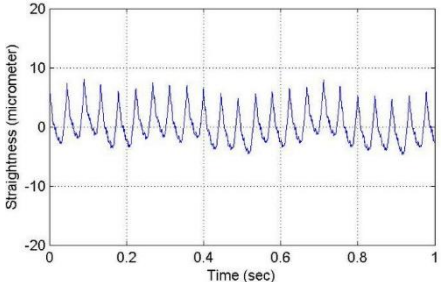
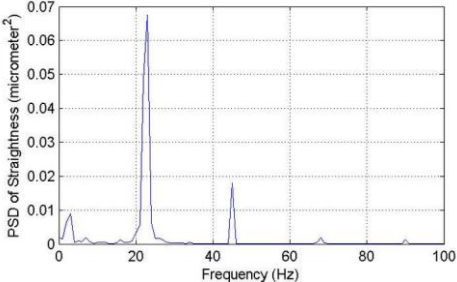
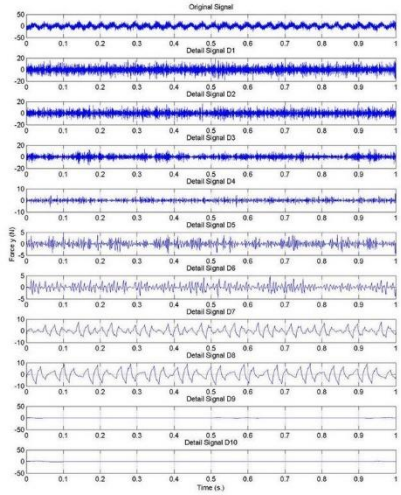
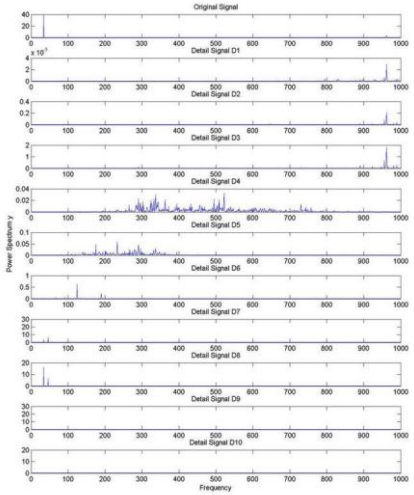
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
37	200	0.15	0.8	0.4	11	0.117	12.619	ต่อเนื่อง
								
								

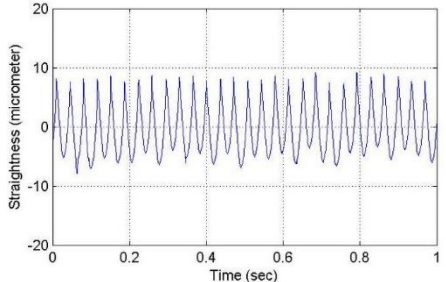
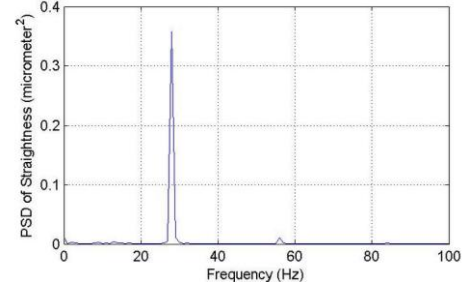
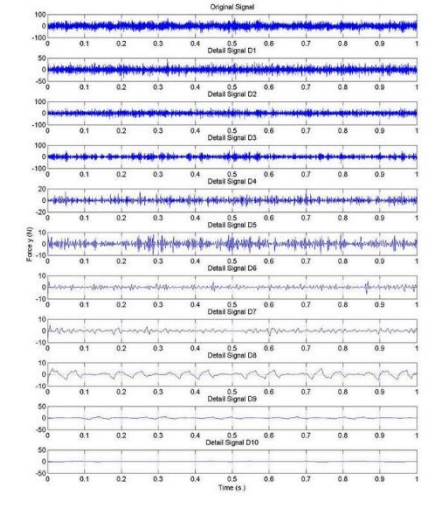
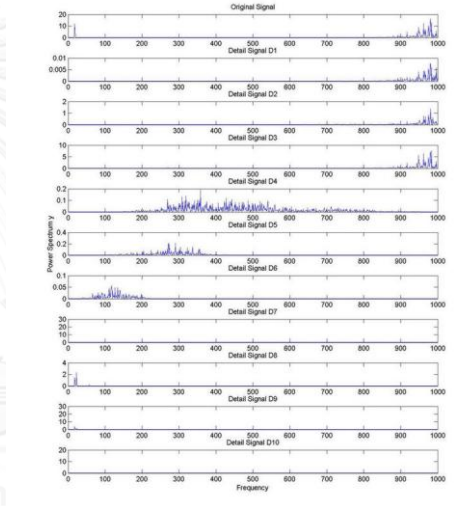
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
38	100	0.20	0.4	0.4	-6	0.332	17.732	ต่อเนื่อง
								
								

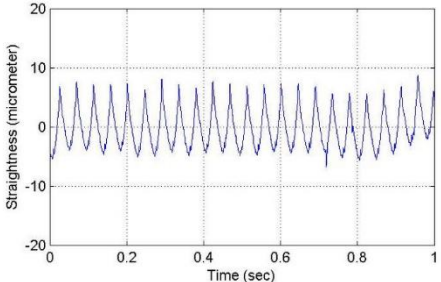
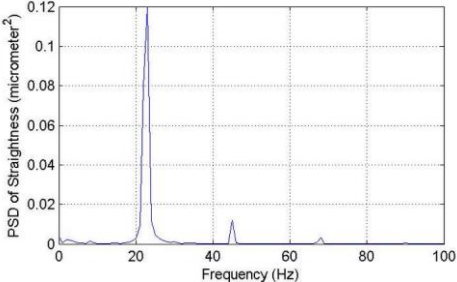
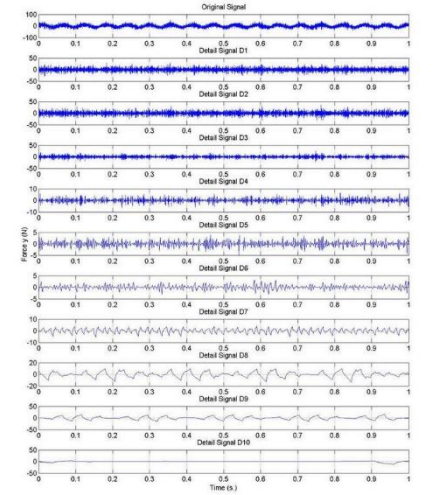
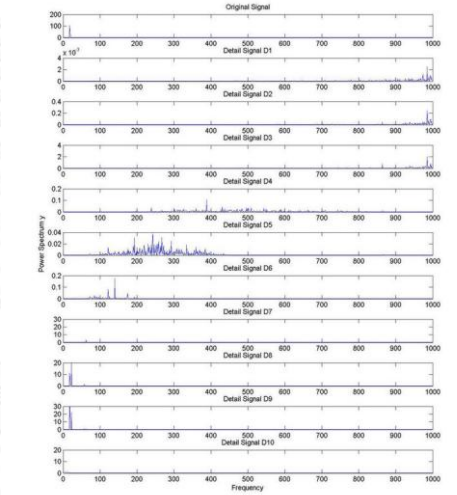
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
39	200	0.25	0.6	0.4	-6	0.111	27.109	ต่อเนื่อง
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
40	200	0.15	0.8	0.8	11	0.066	12.466	ต่อเนื่อง
								
								

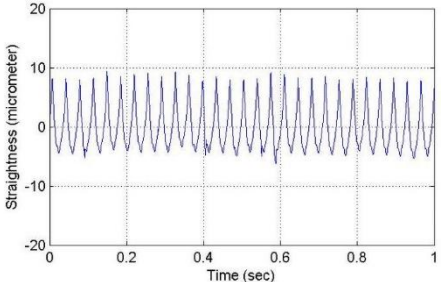
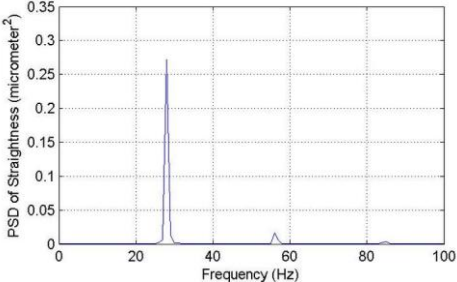
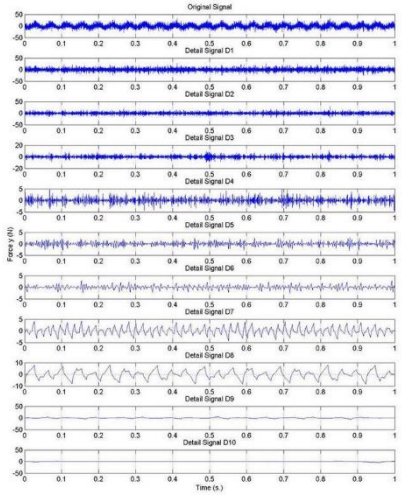
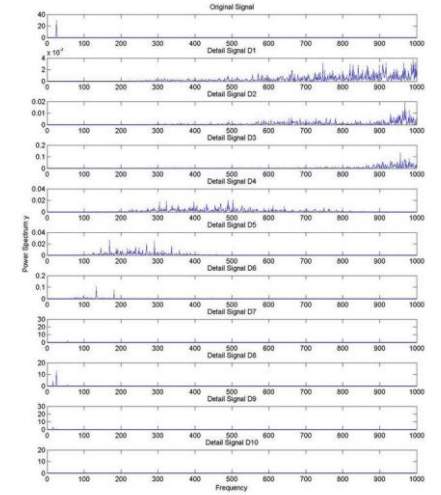
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
	200	0.15	0.4	0.4	11	0.189	12.23	ต่อเนื่อง
41								
								

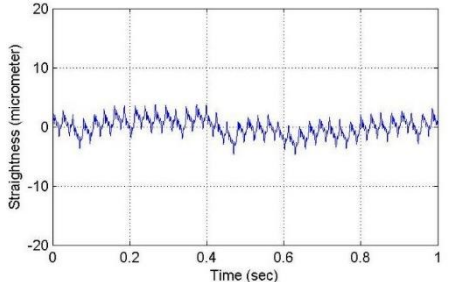
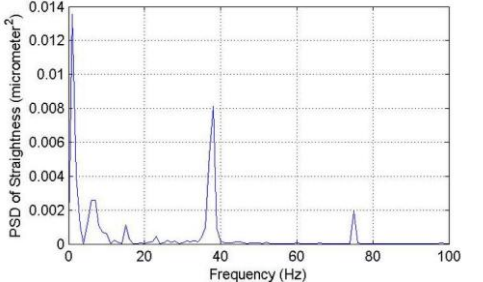
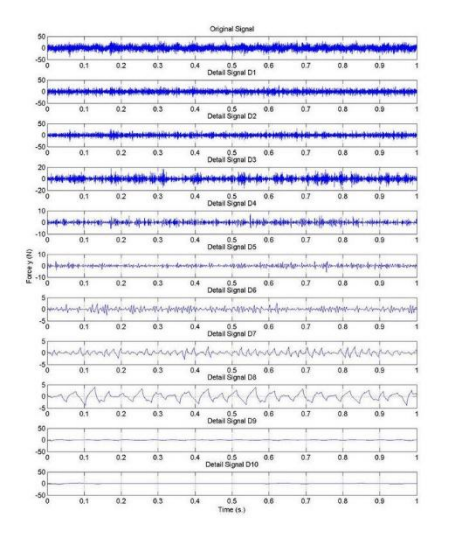
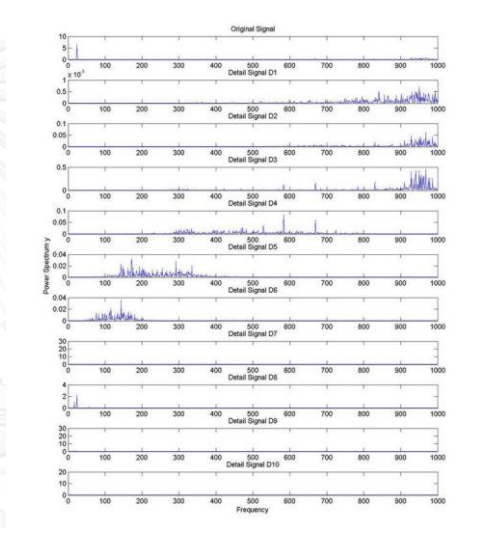
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
42	200	0.25	0.4	0.8	11	0.198	12.746	ต่อเนื่อง
								
								

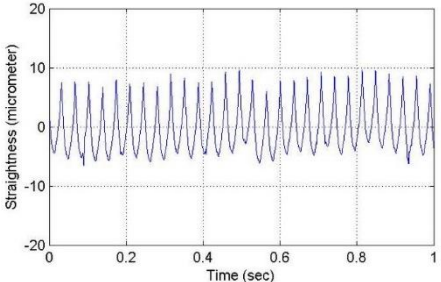
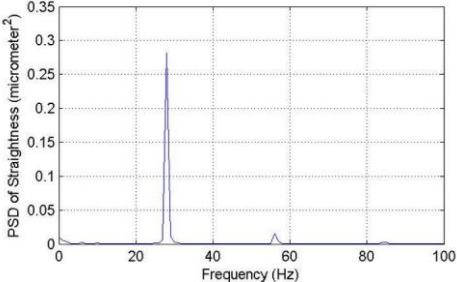
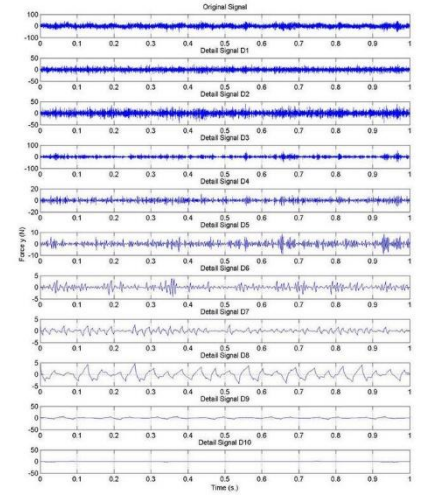
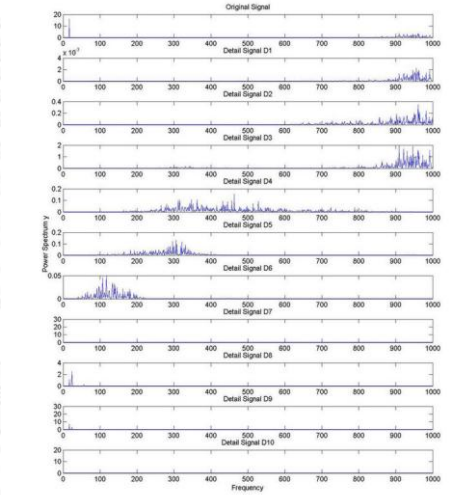
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
43	100	0.20	0.6	0.4	-6	0.088	19.616	ต่อเนื่อง
								
								

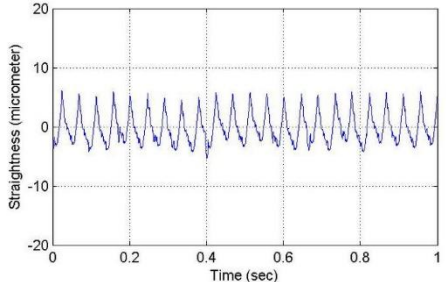
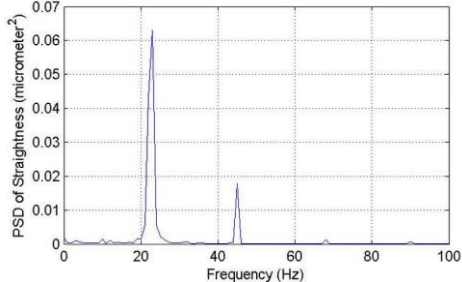
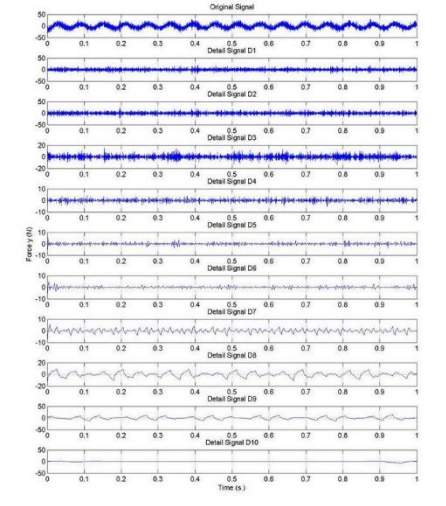
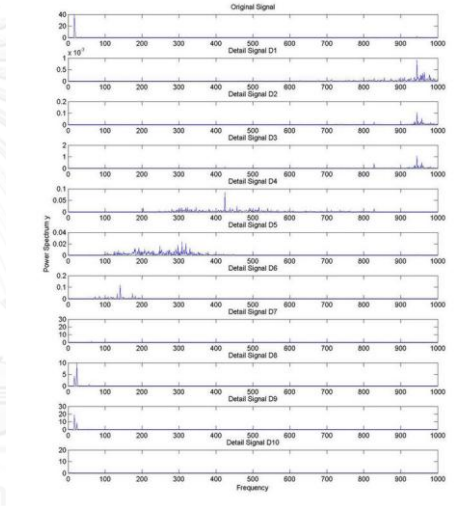
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
44	100	0.25	0.6	0.8	-6	0.142	16.942	ต่อเนื่อง
								
								

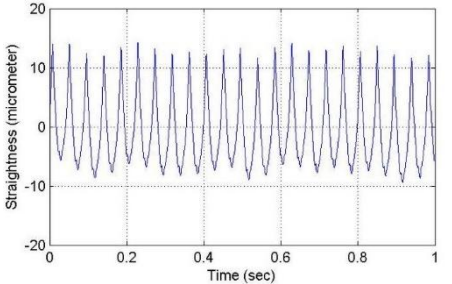
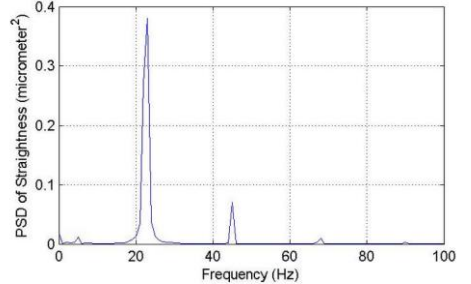
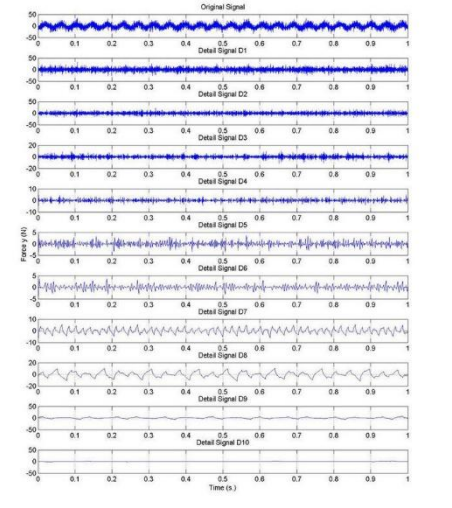
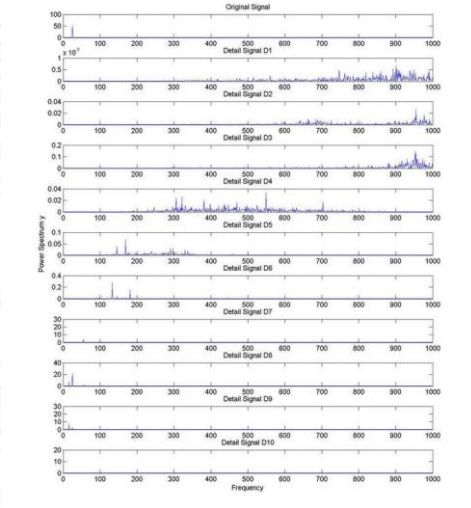


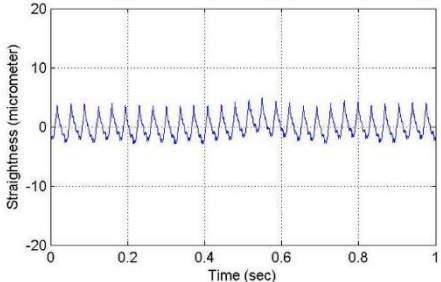
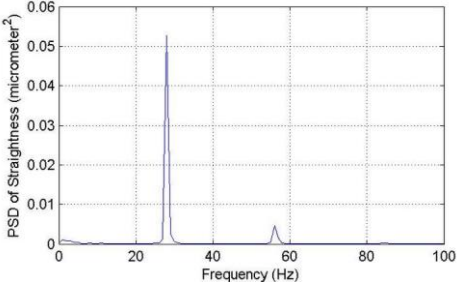
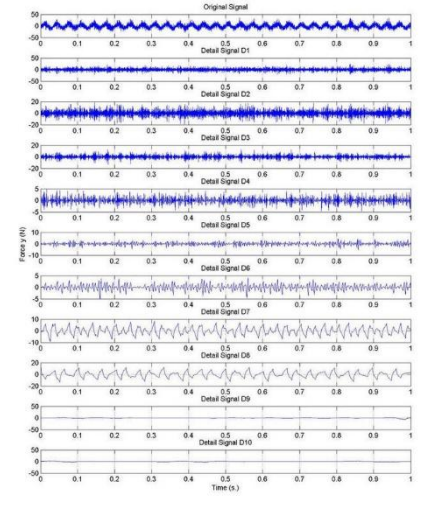
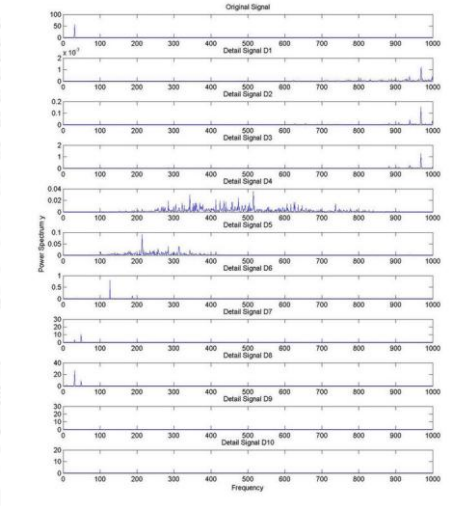
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ	
45	150	0.20	0.4	0.4	11	0.225	16.029	ต่อเนื่อง	
									
									

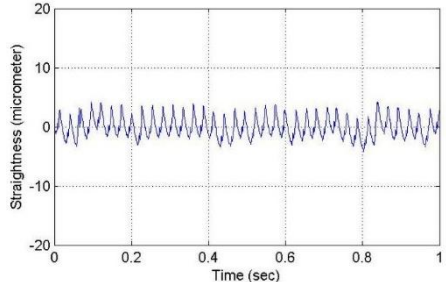
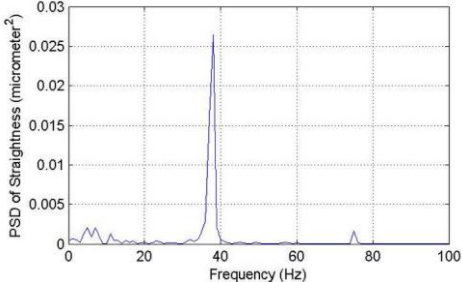
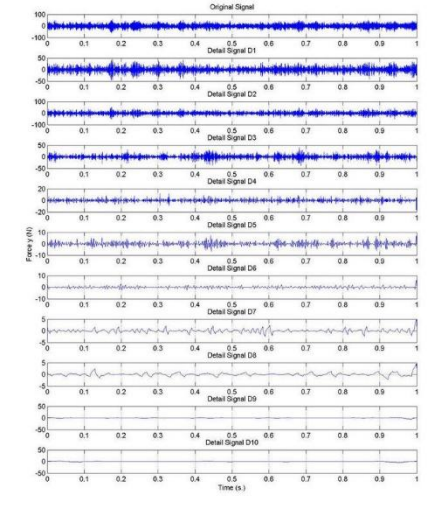
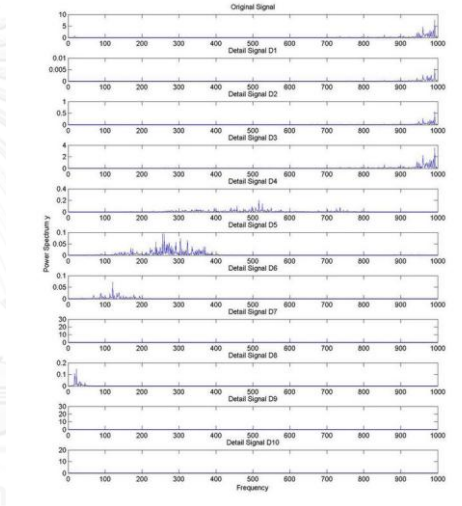
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
46	150	0.15	0.8	0.8	11	0.069	9.512	แตกหัก
								
								

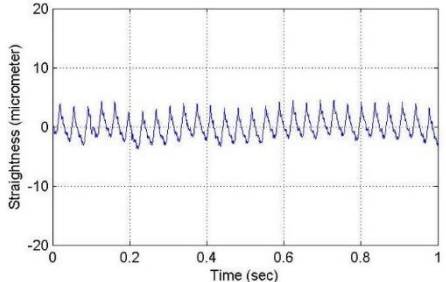
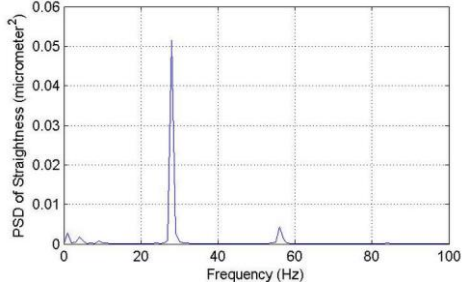
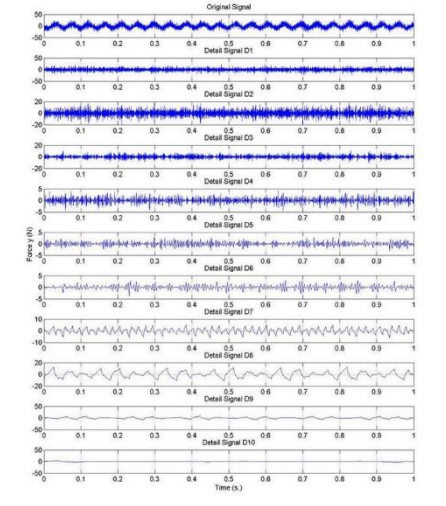
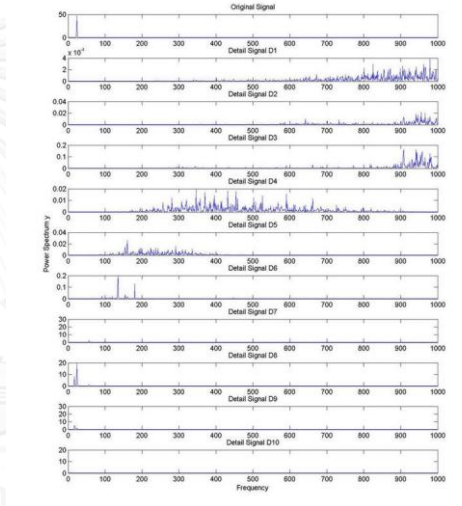
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
47	100	0.20	0.6	0.4	11	0.079	17.012	ต่อเนื่อง
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
48	100	0.25	0.4	0.8	11	0.208	11.908	ต่อเนื่อง
								
								

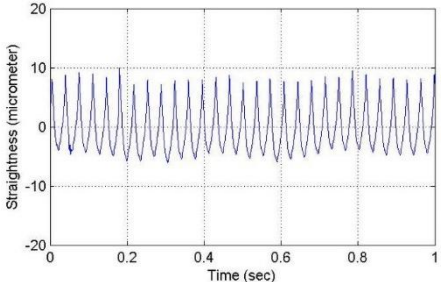
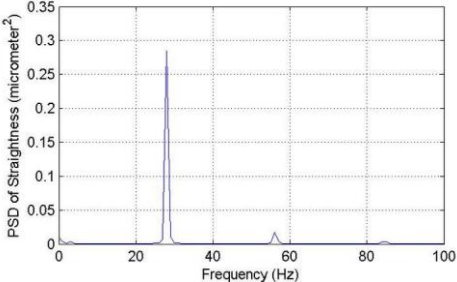
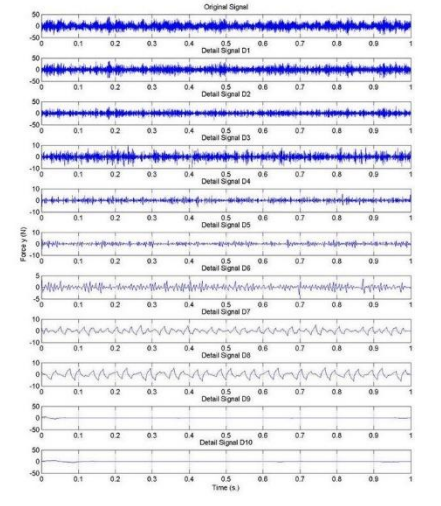
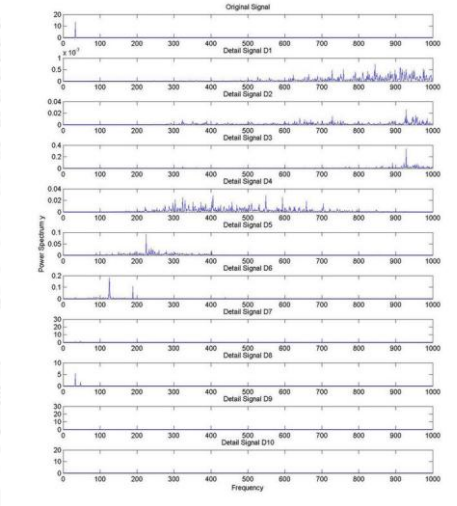
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
49	150	0.25	0.4	0.4	11	0.238	26.991	ต่อเนื่อง
								
								

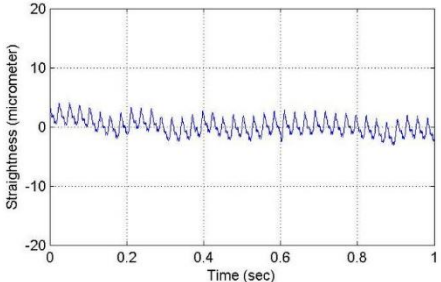
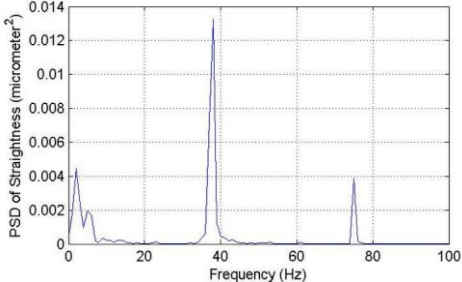
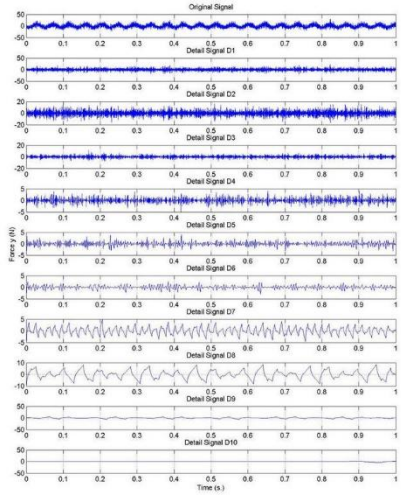
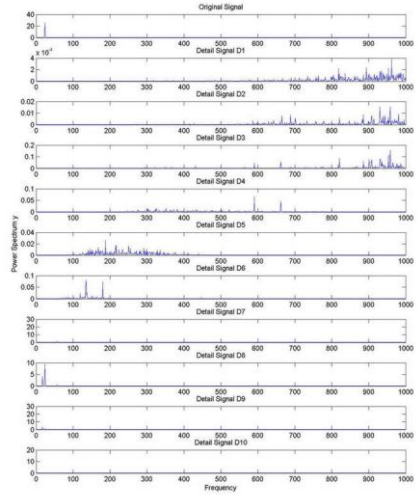
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
50	200	0.20	0.6	0.8	11	0.235	8.234	ต่อเนื่อง
								
								

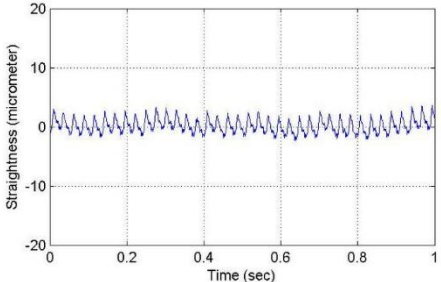
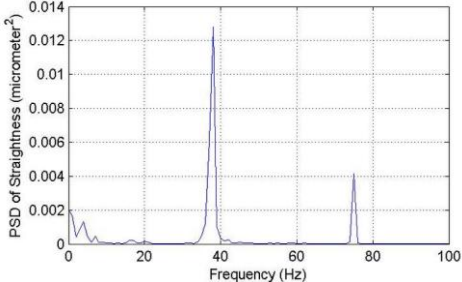
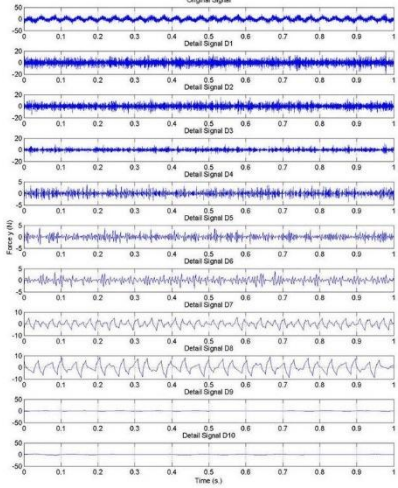
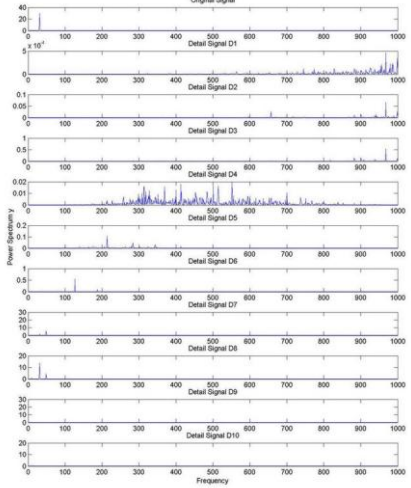
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
51	100	0.15	0.8	0.8	-6	0.050	12.106	แตกหัก
								
								

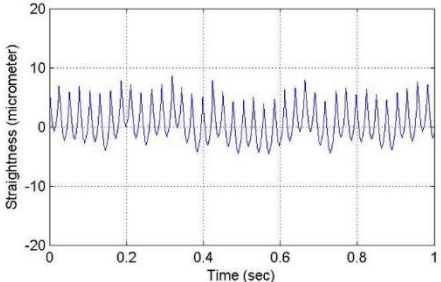
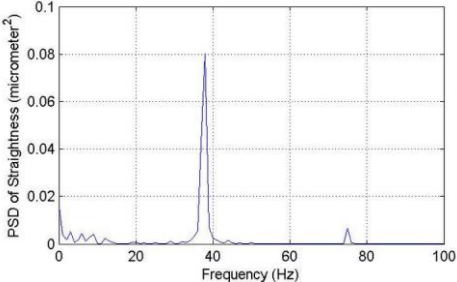
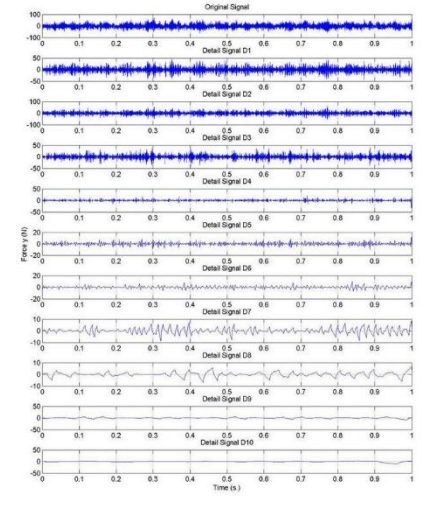
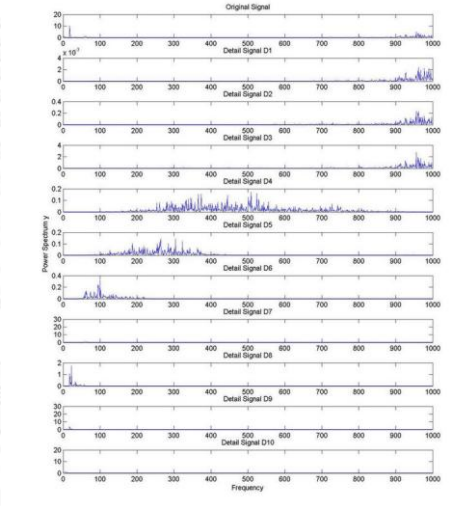
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
52	150	0.20	0.6	0.8	11	0.206	8.564	ต่อเนื่อง
								
								

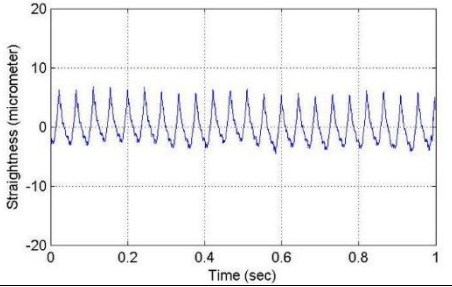
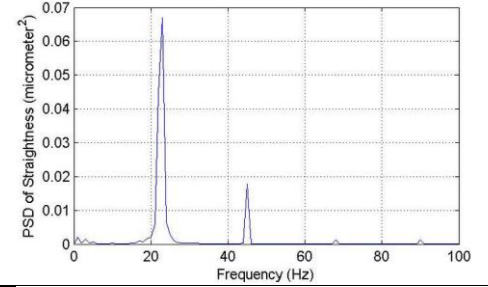
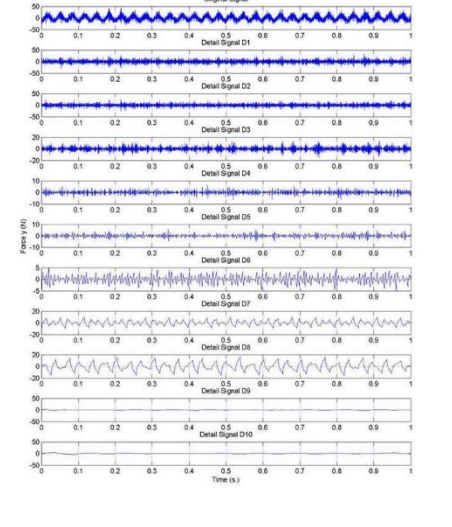
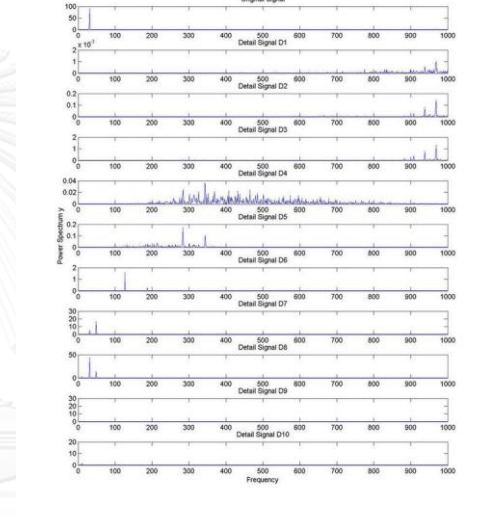


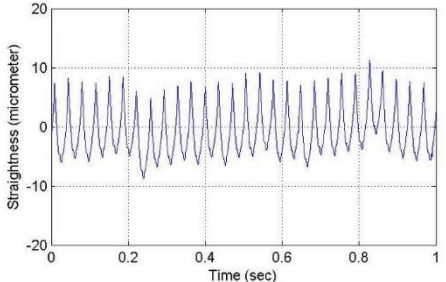
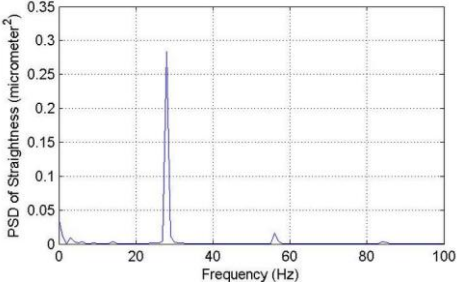
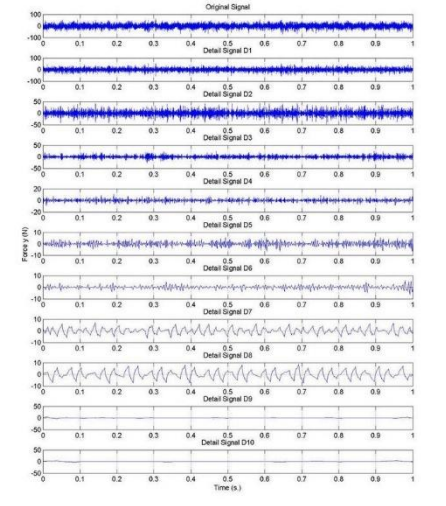
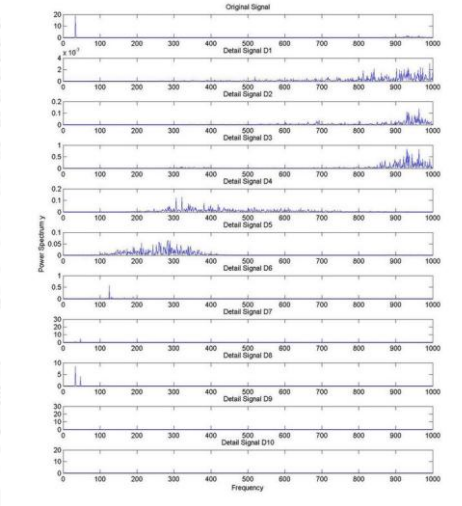
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
53	200	0.20	0.4	0.4	11	0.161	16.916	ต่อเนื่อง
								
								

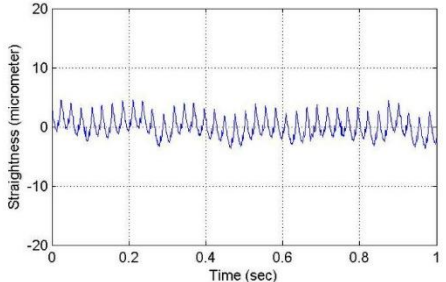
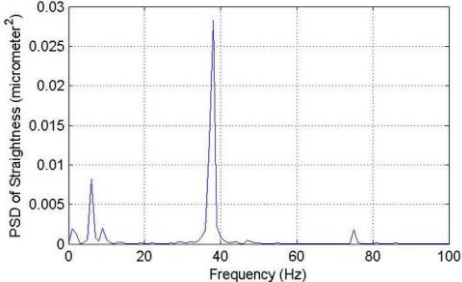
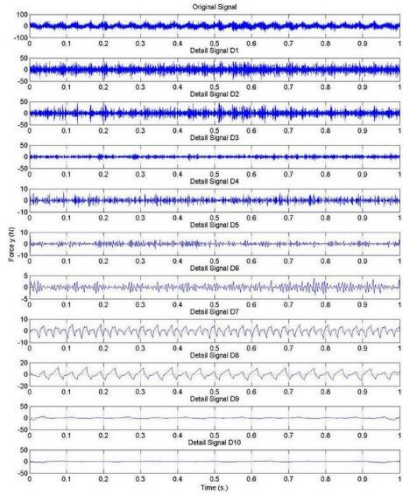
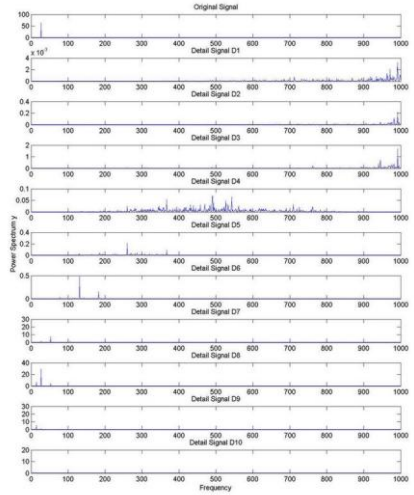
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
54	150	0.15	0.6	0.8	11	0.203	7.314	ต่อเนื่อง
								
								

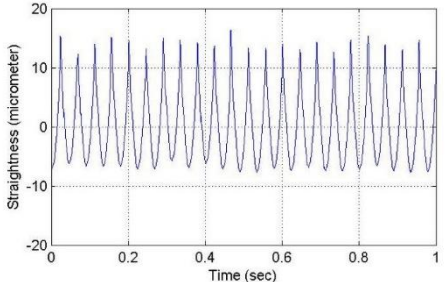
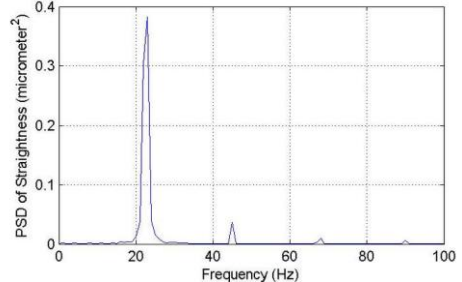
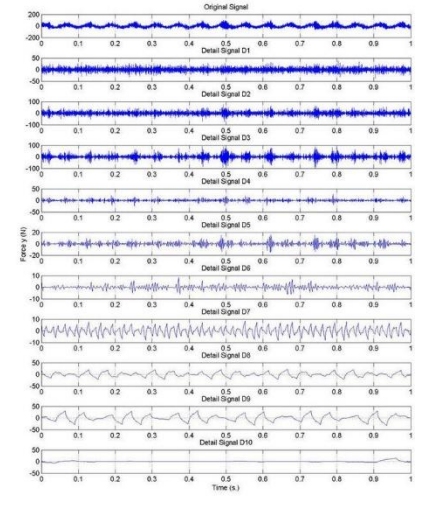
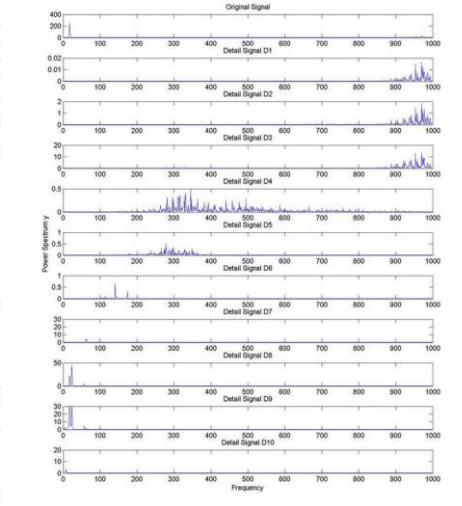
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ	
55	200	0.15	0.6	0.8	11	0.215	6.645	ต่อเนื่อง	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ	
56	100	0.15	0.8	0.4	-6	0.096	14.201	แตกหัก	
									
									

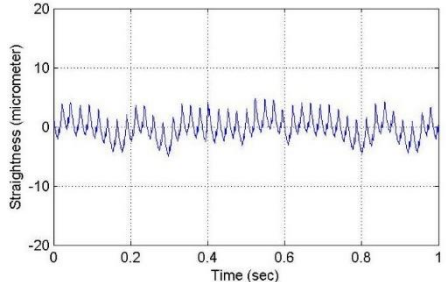
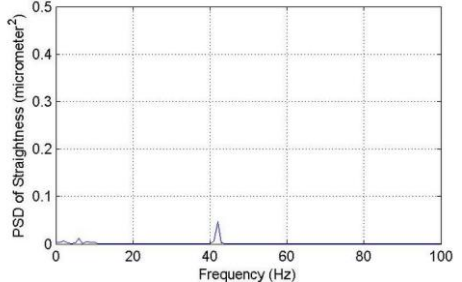
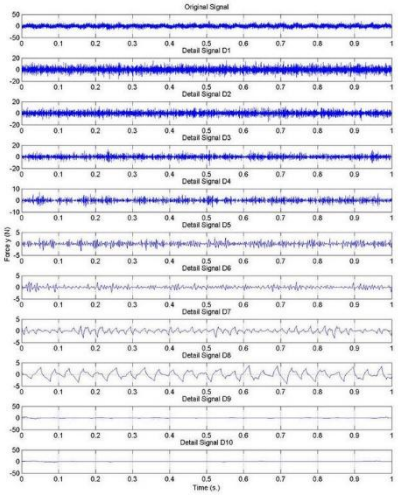
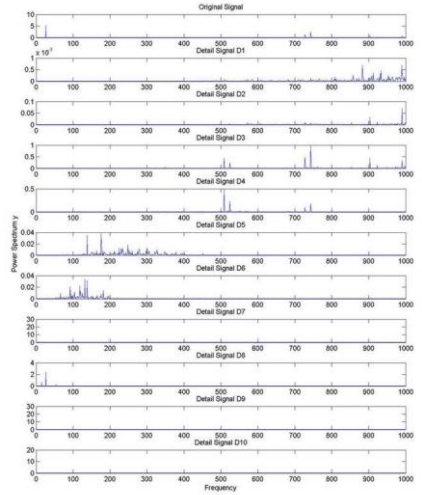
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
	200	0.25	0.6	0.8	11	0.241	12.175	ต่อเนื่อง
57								
								

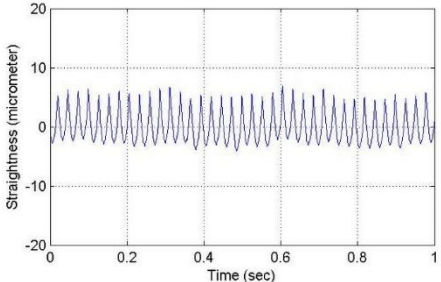
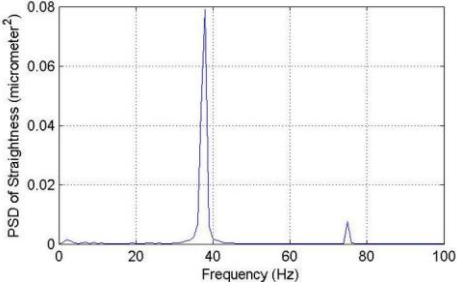
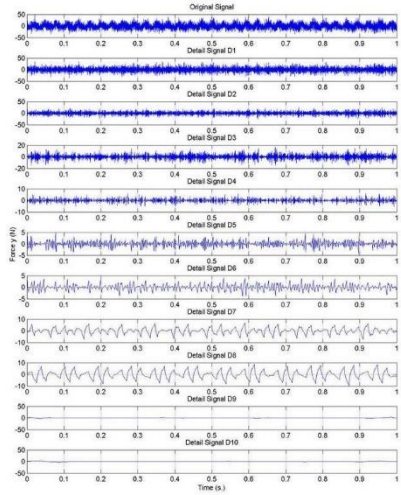
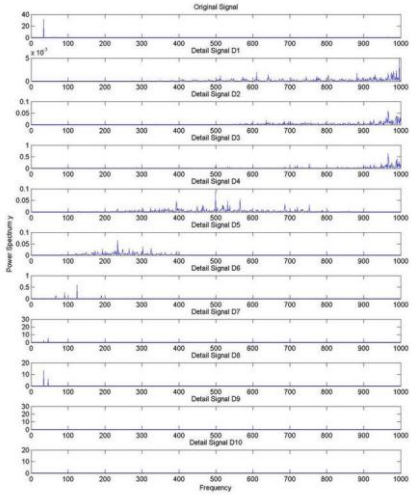
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
58	200	0.20	0.8	0.4	11	0.118	21.252	ต่อเนื่อง
								
								

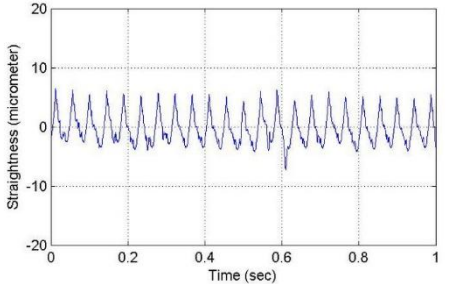
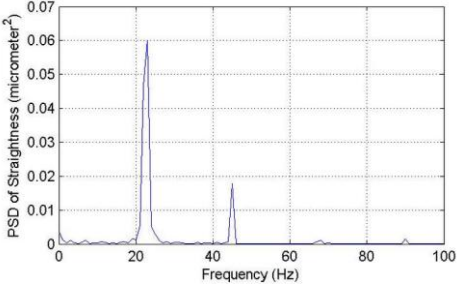
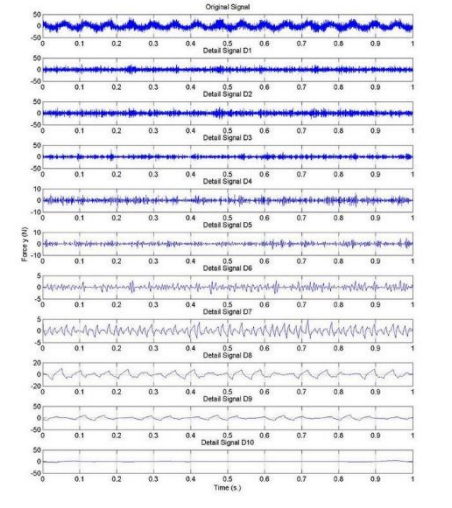
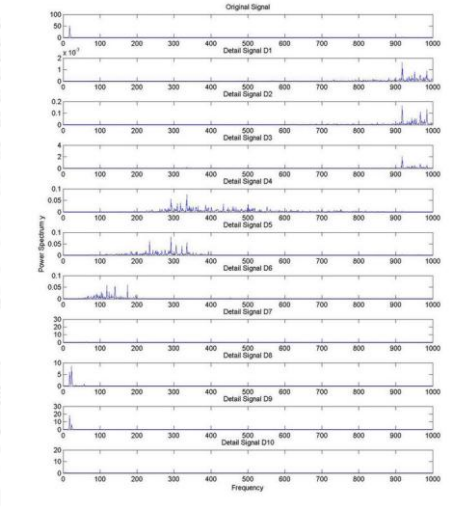
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
59	150	0.15	0.8	0.8	-6	0.189	9.2	ต่อเนื่อง
								
								

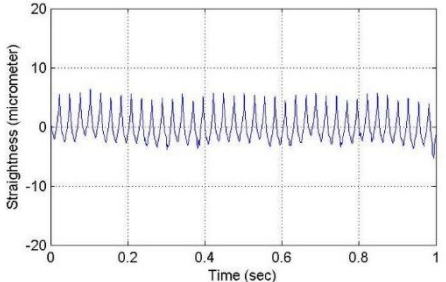
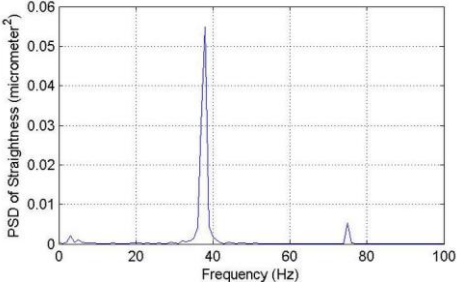
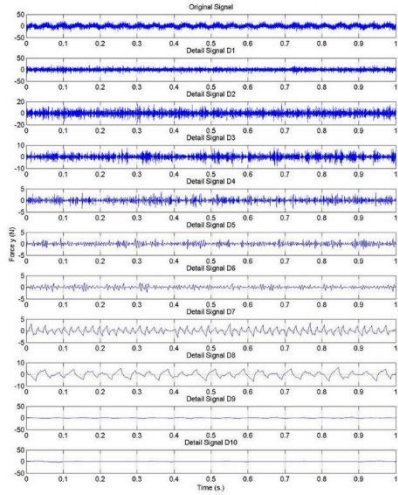
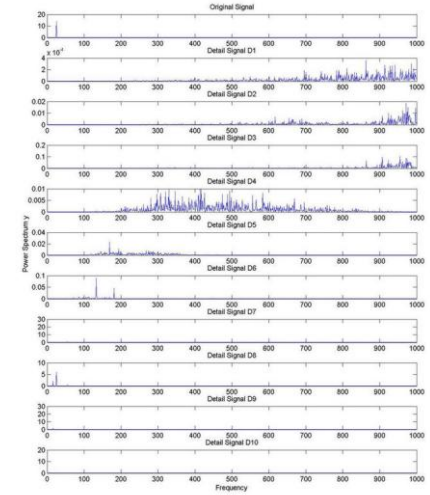
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
60	100	0.25	0.4	0.4	-6	0.322	24.738	ต่อเนื่อง
								
								

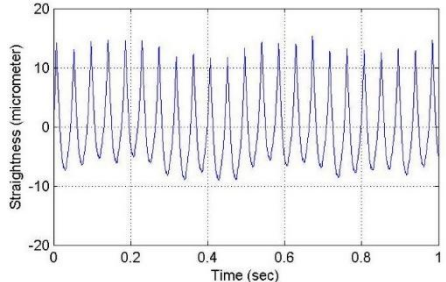
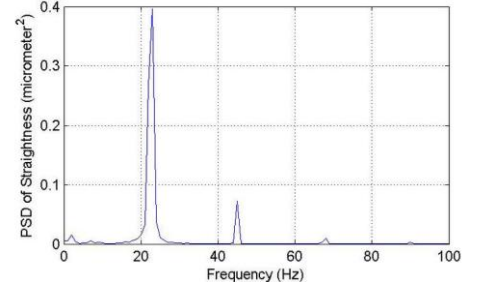
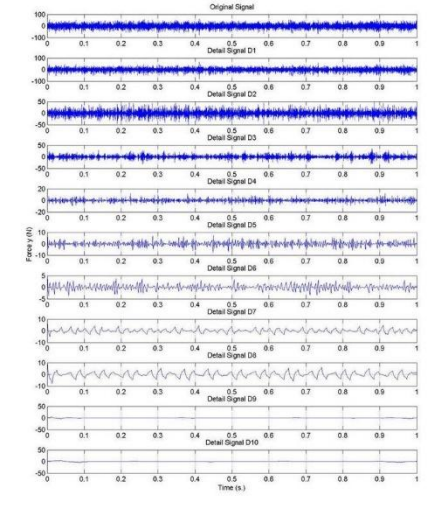
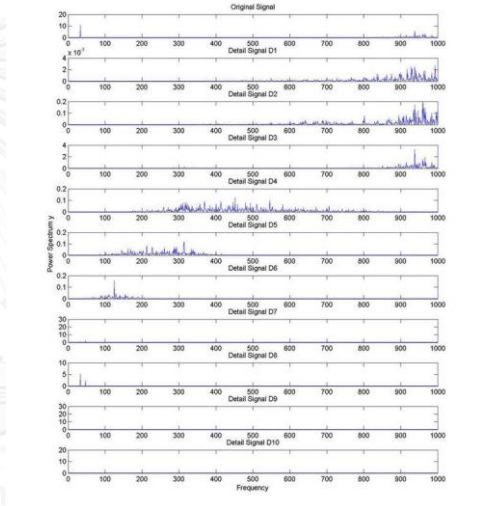


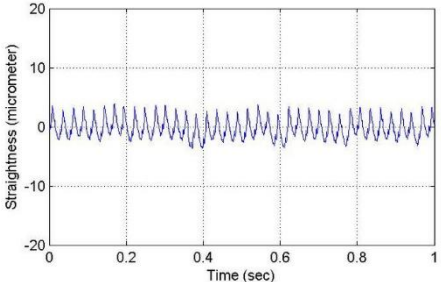
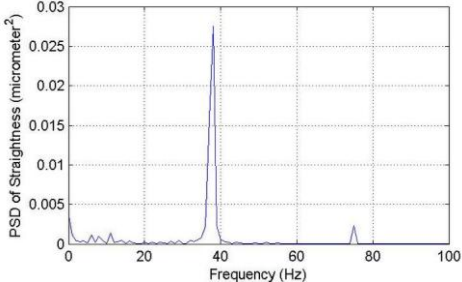
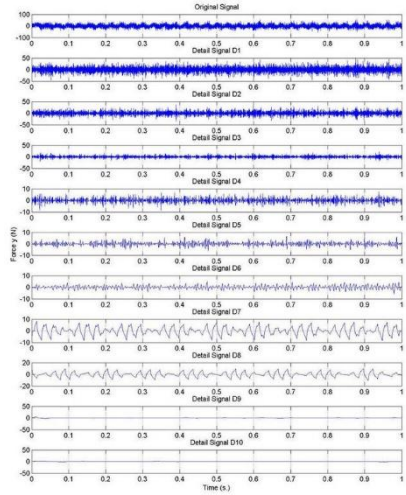
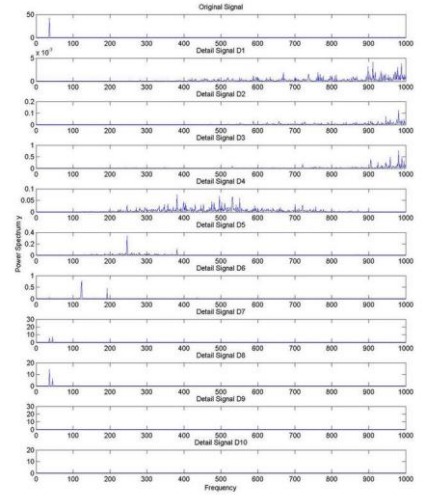
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
61	150	0.15	0.4	0.8	-6	0.109	10.416	ต่อเนื่อง
								
								

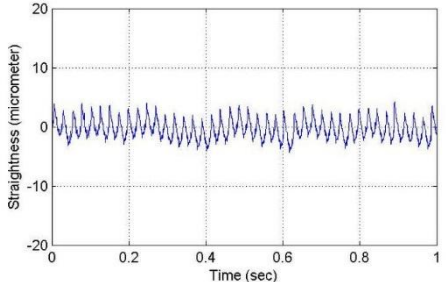
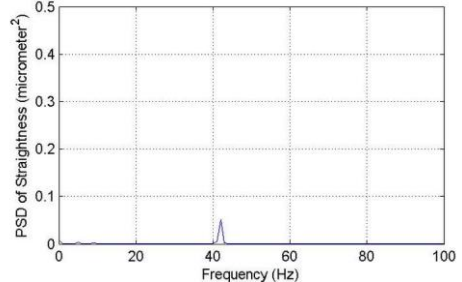
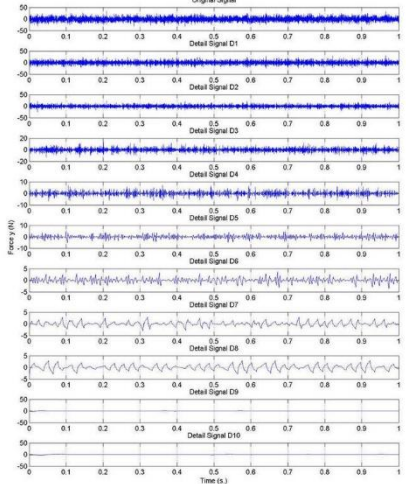
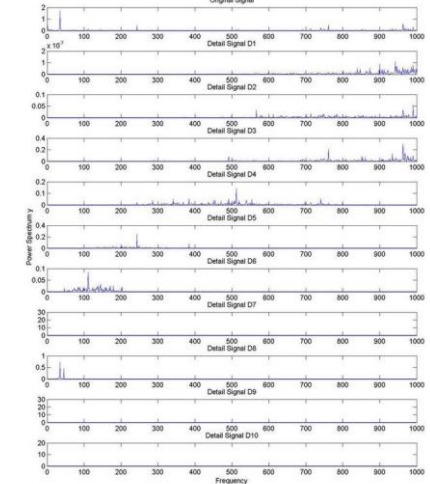
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
62	200	0.15	0.4	0.4	-6	0.238	11.216	ต่อเนื่อง
								
								

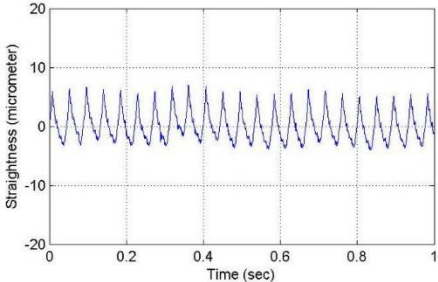
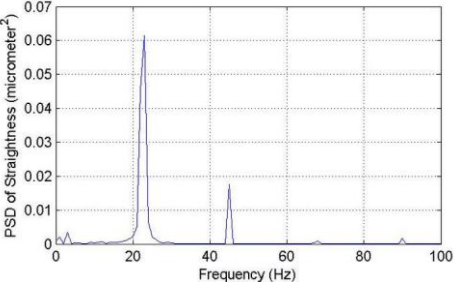
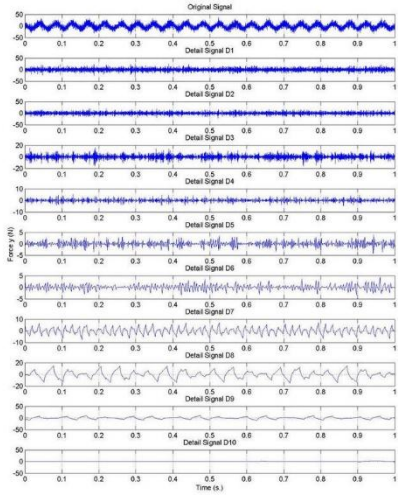
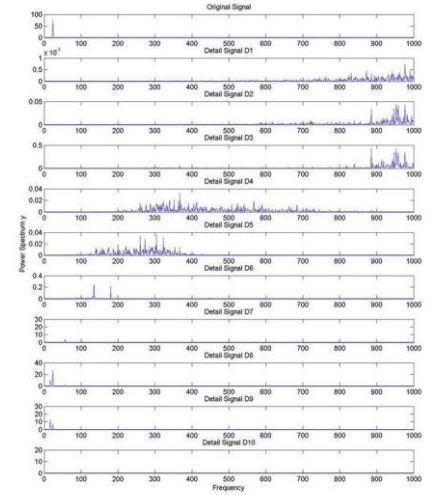
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
63	100	0.25	0.6	0.8	11	0.136	14.077	ต่อเนื่อง
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
64	150	0.15	0.4	0.4	11	0.211	12.11	ต่อเนื่อง
								
								

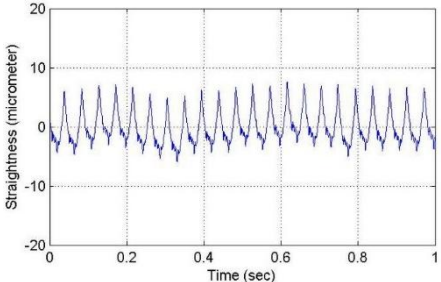
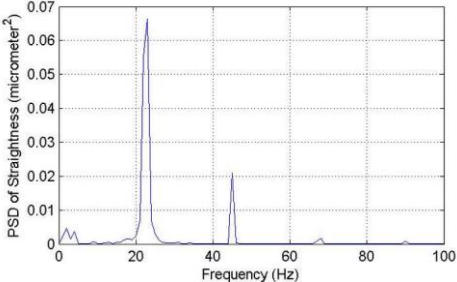
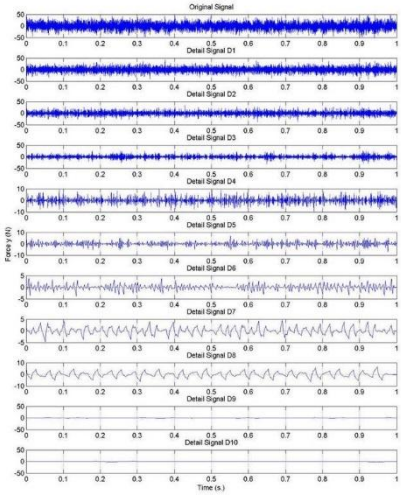
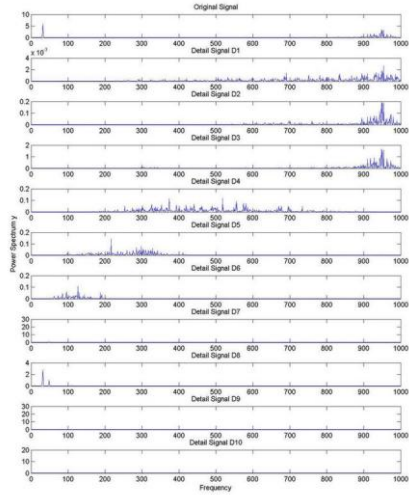
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
65	200	0.25	0.6	0.4	11	0.133	26.069	ต่อเนื่อง
								
								

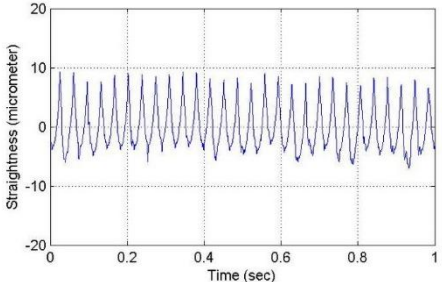
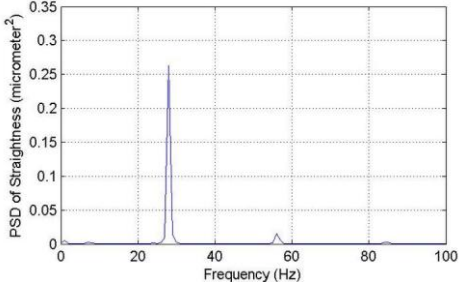
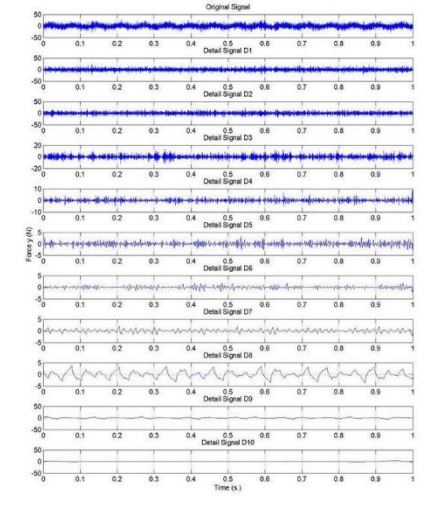
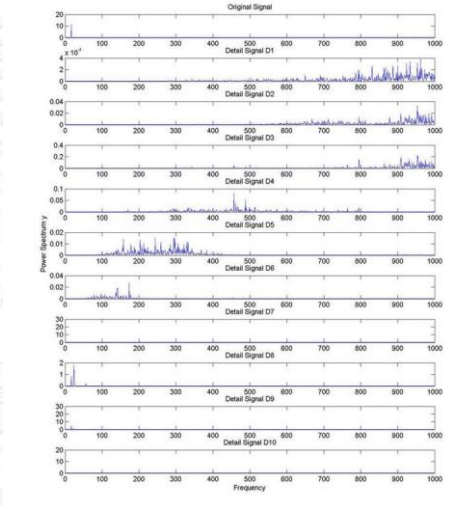
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ	
66	200	0.15	0.8	0.8	-6	0.174	9.121	ต่อเนื่อง	
									
									

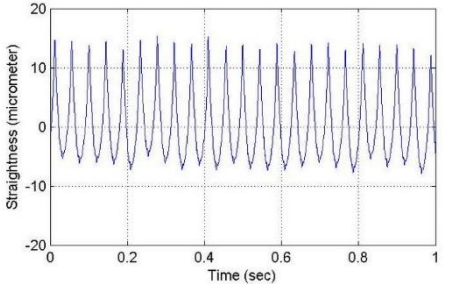
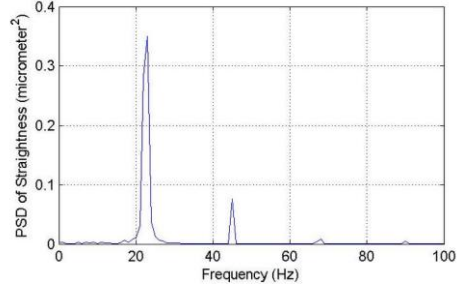
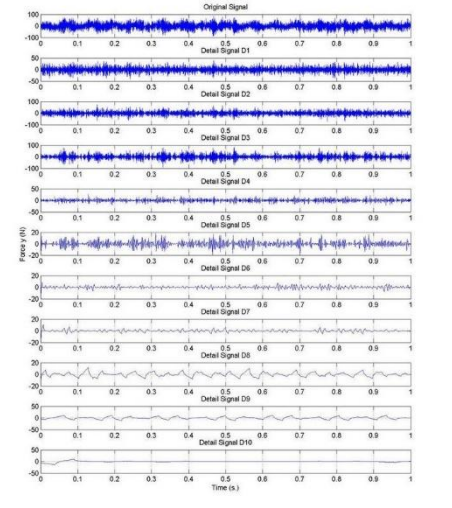
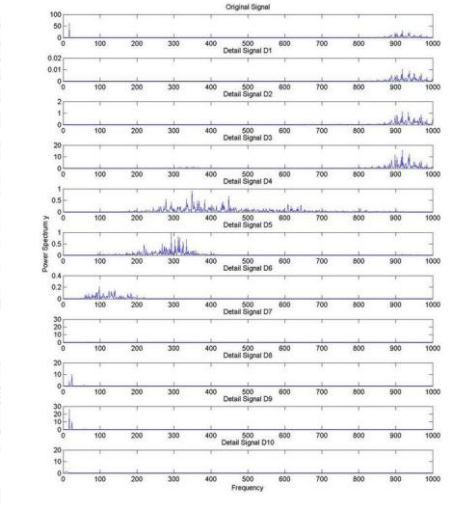
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
67	200	0.15	0.6	0.8	-6	0.063	9.624	ต่อเนื่อง
								
								

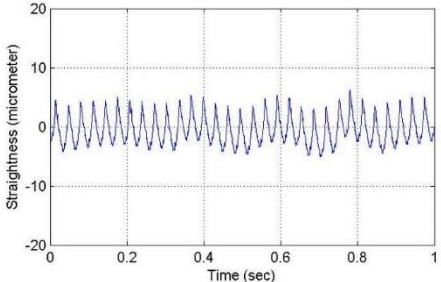
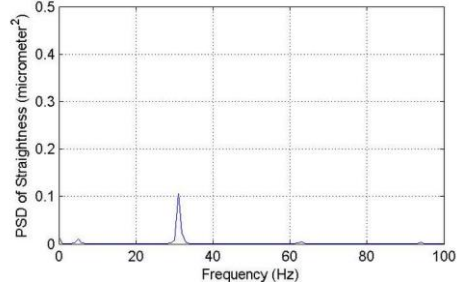
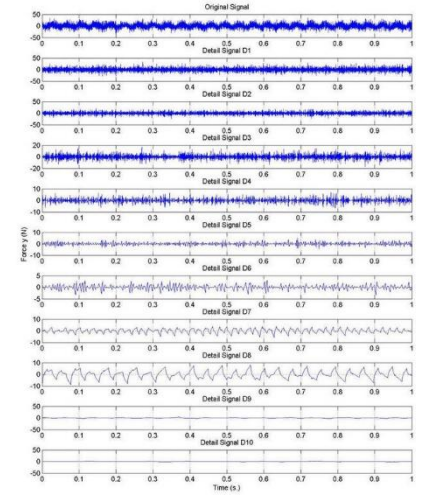
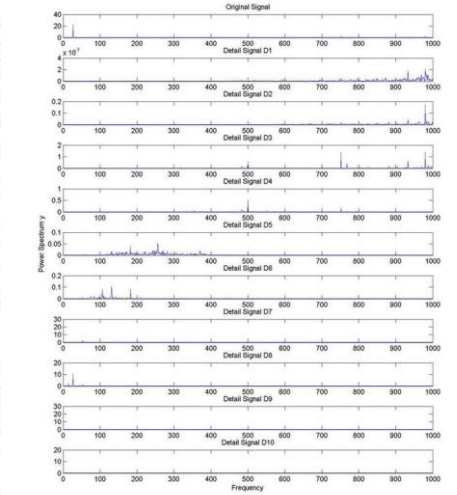
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
68	150	0.25	0.6	0.8	11	0.214	11.443	ต่อเนื่อง
								
								

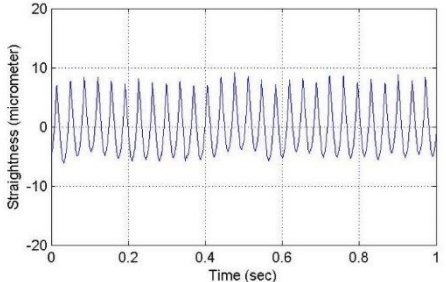
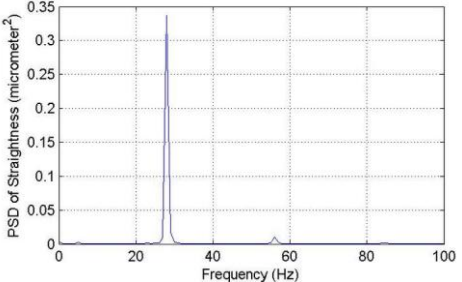
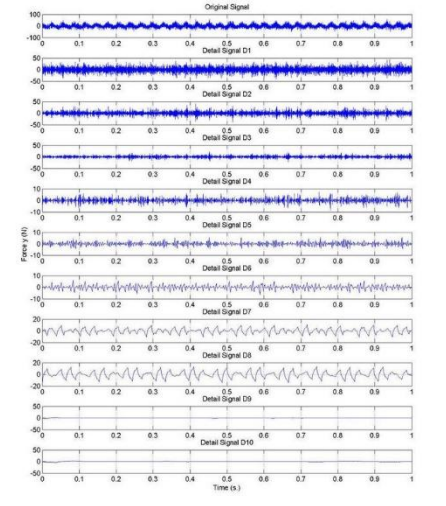
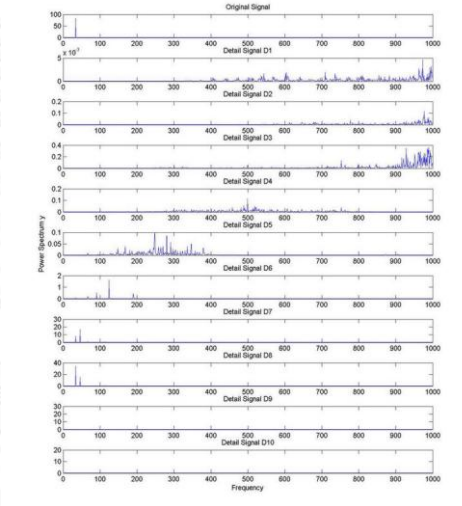


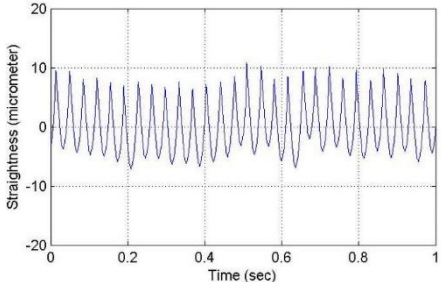
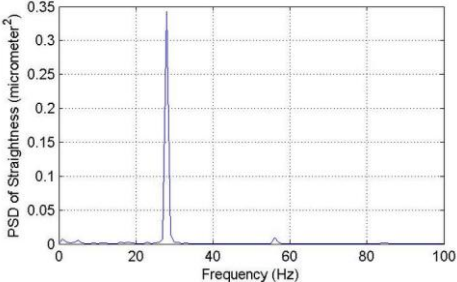
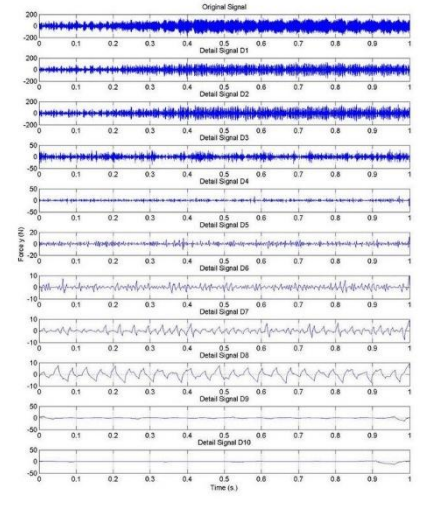
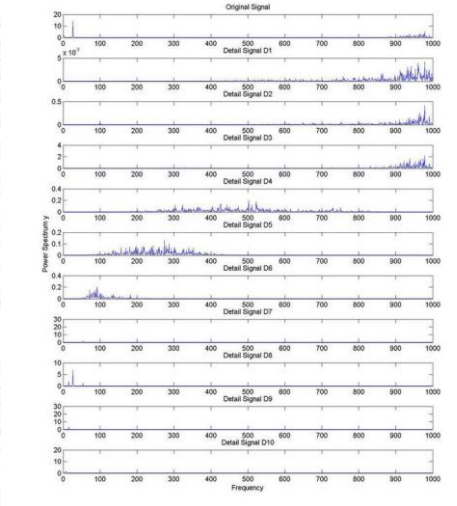
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
69	200	0.25	0.8	0.8	11	0.072	14.066	แตกหัก
								
								

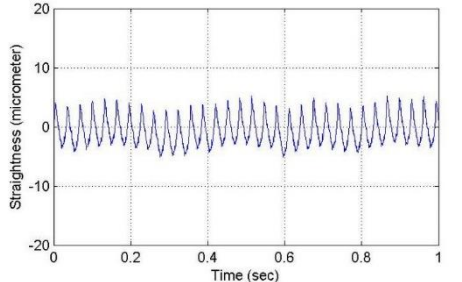
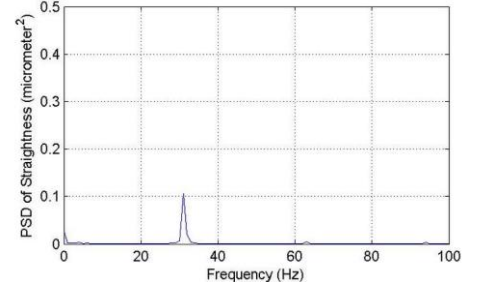
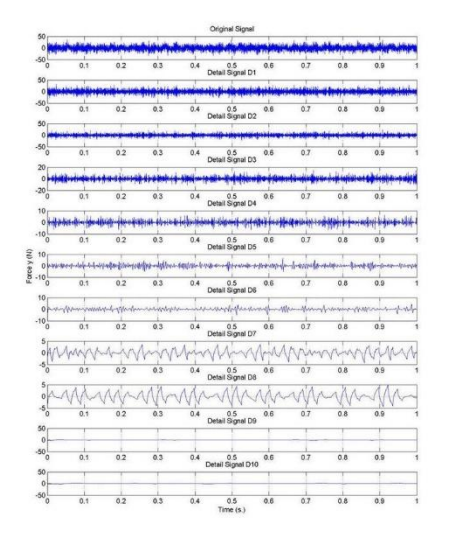
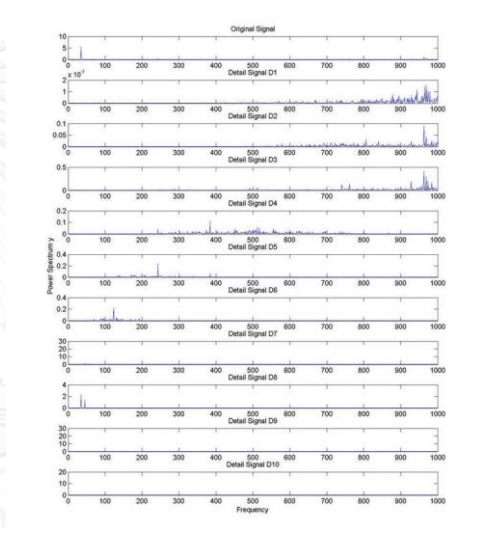
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ	
70	100	0.20	0.4	0.4	11	0.098	18.009	ต่อเนื่อง	
									
									

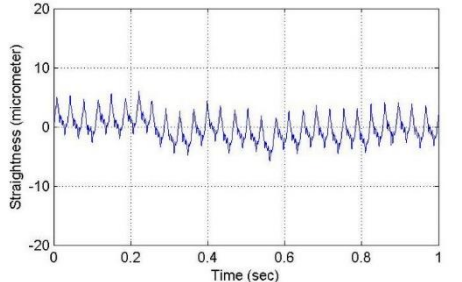
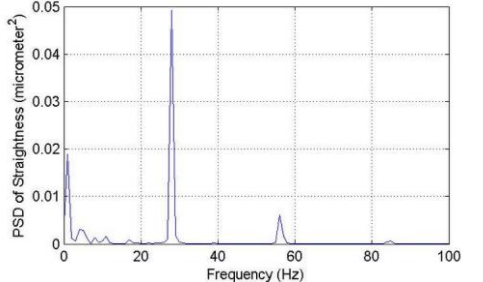
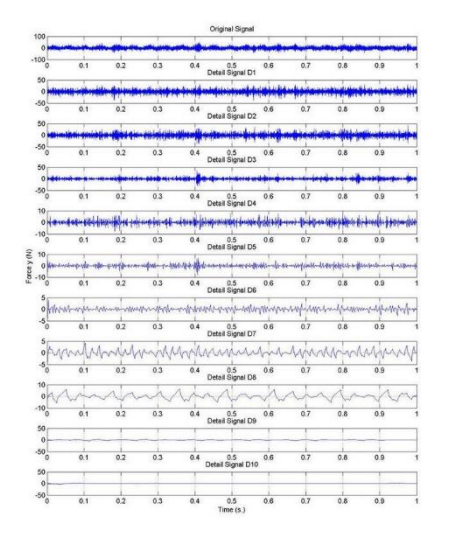
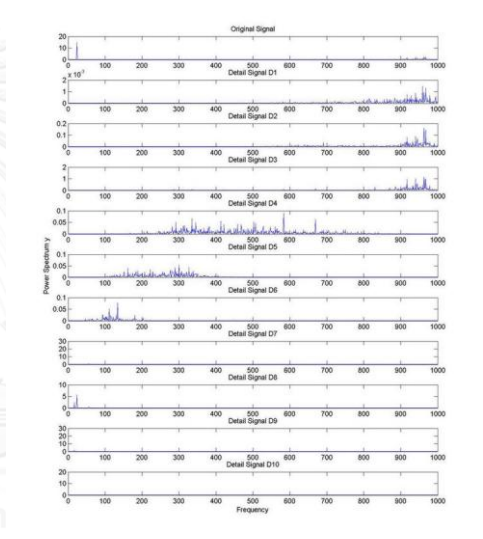
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
71	100	0.25	0.8	0.4	11	0.106	24.947	แตกหัก
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
72	150	0.20	0.6	0.8	-6	0.132	14.203	ต่อเนื่อง
								
								

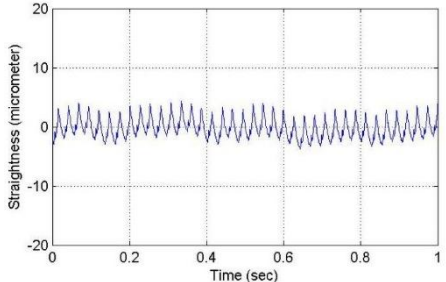
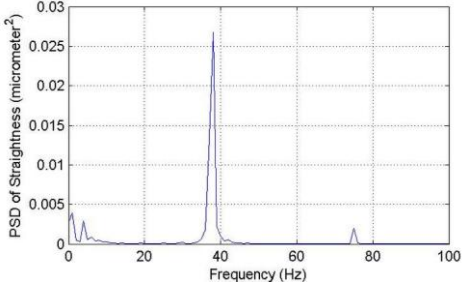
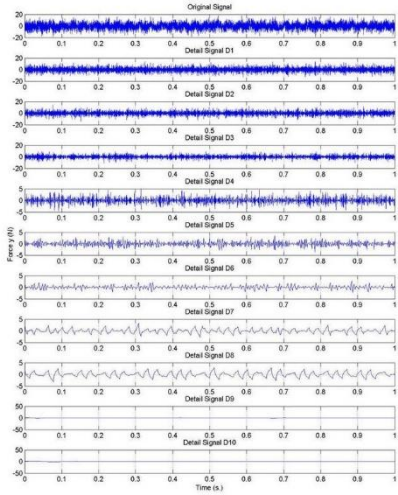
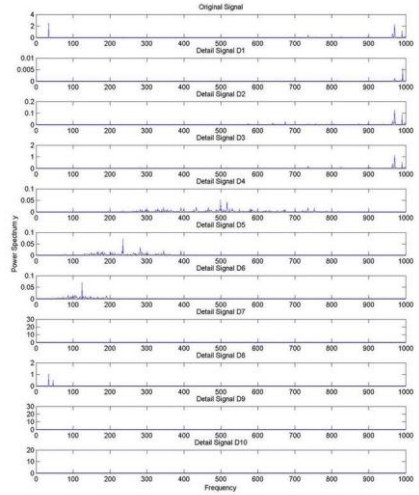
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
73	200	0.20	0.4	0.4	-6	0.272	17.245	ต่อเนื่อง
								
								

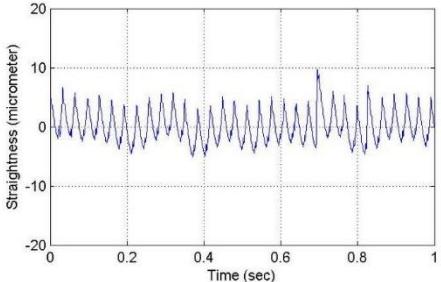
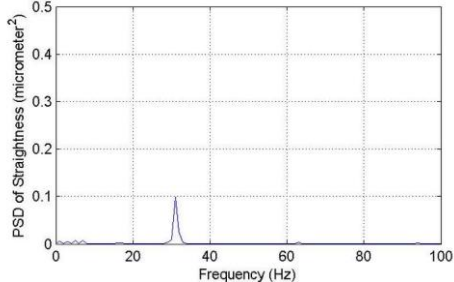
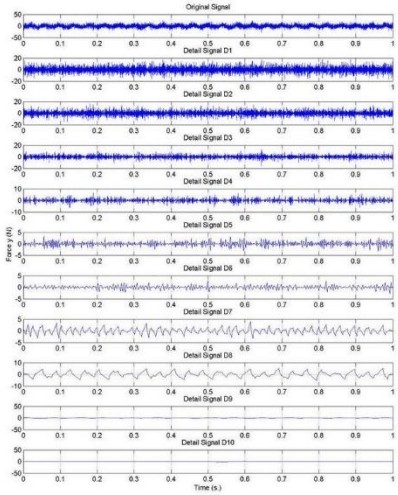
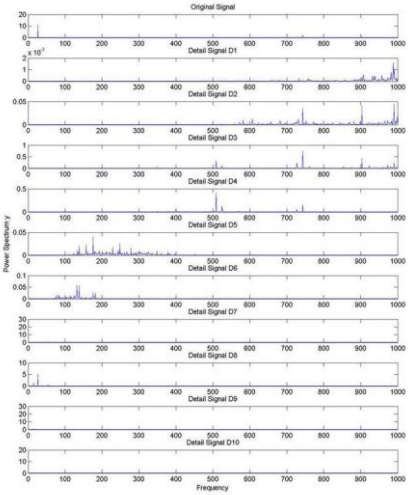
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
74	150	0.20	0.8	0.4	-6	0.092	18.724	แตกหัก
								
								

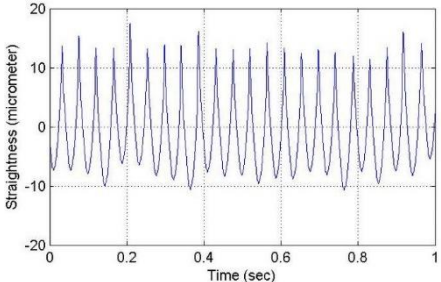
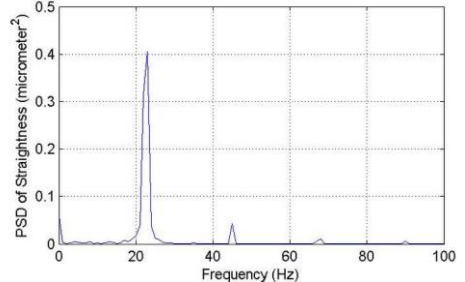
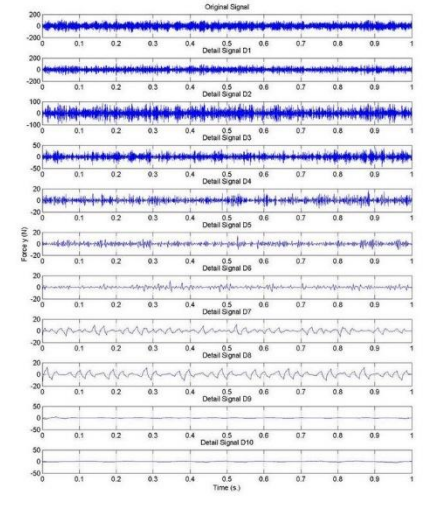
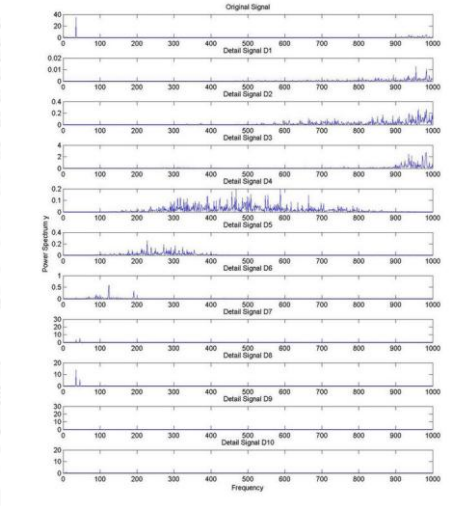
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
75	200	0.20	0.6	0.8	-6	0.077	12.549	ต่อเนื่อง
								
								

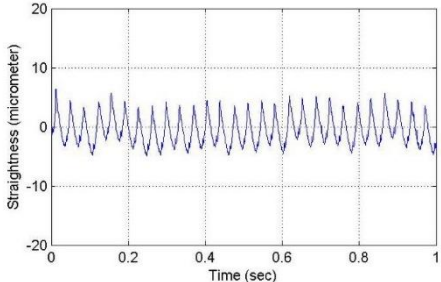
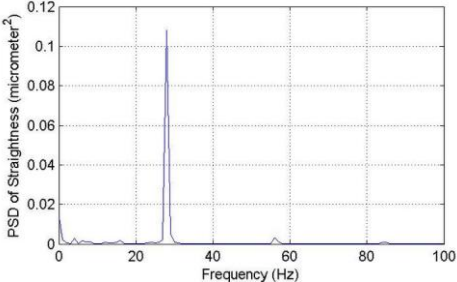
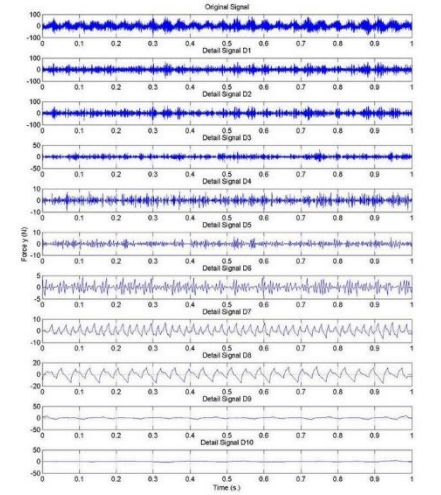
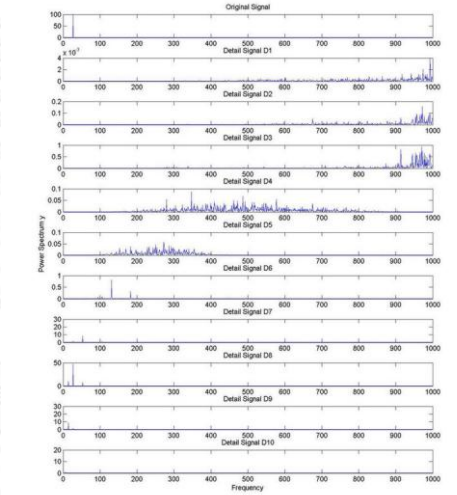
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
76	150	0.20	0.8	0.8	11	0.083	11.786	แตกหัก
								
								

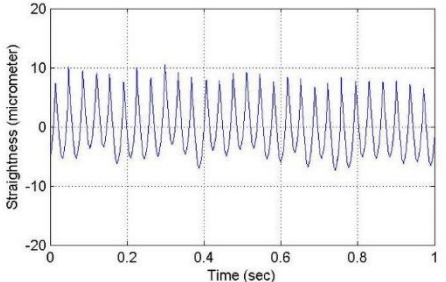
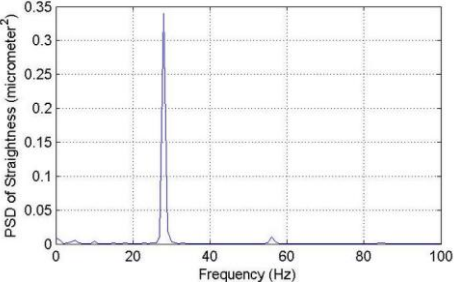
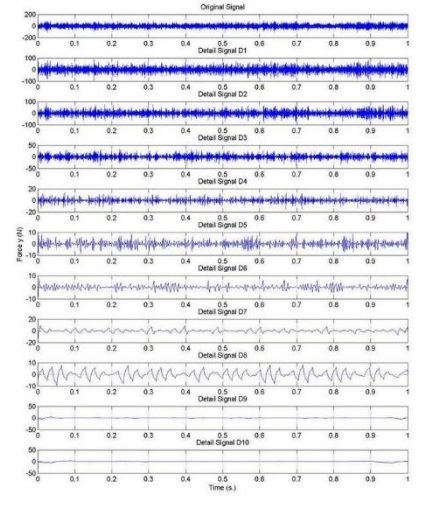
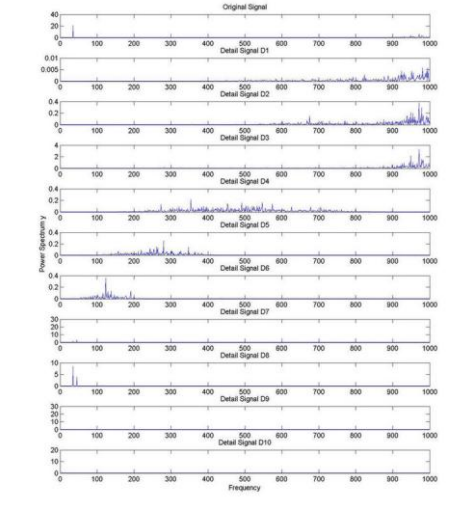


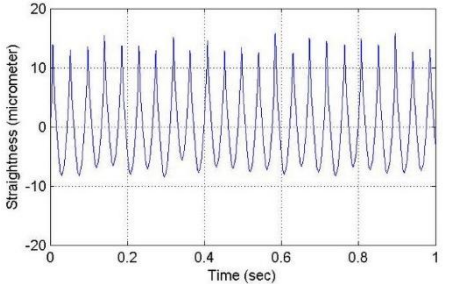
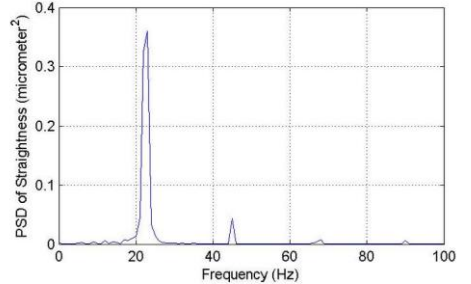
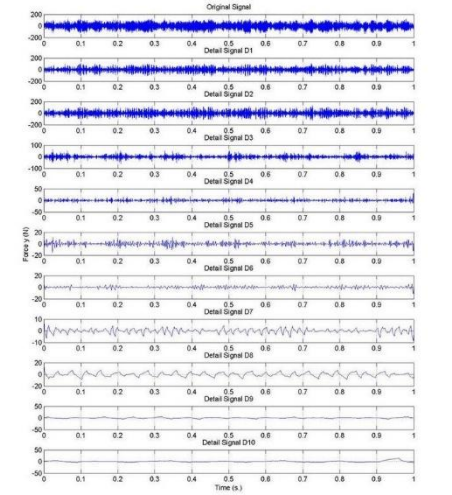
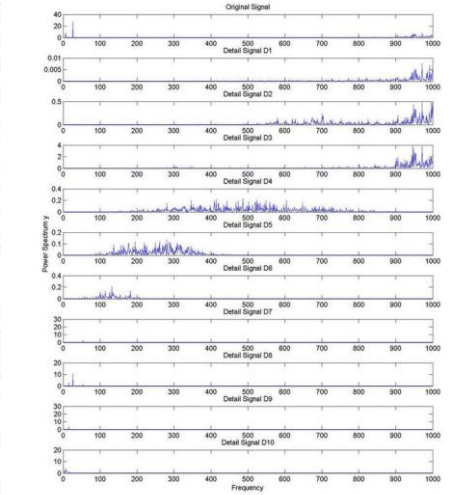
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
77	200	0.15	0.4	0.8	-6	0.088	9.462	ต่อเนื่อง
								
								

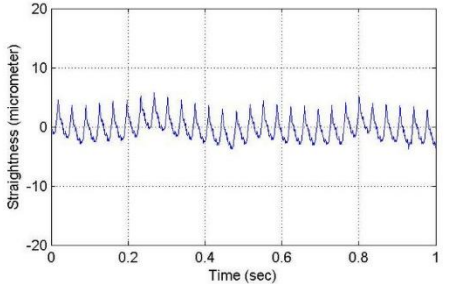
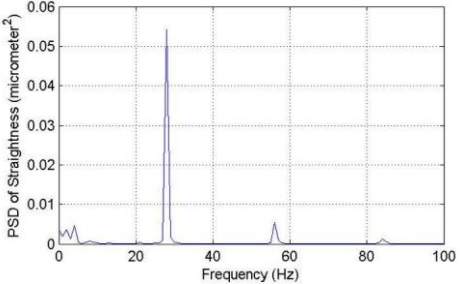
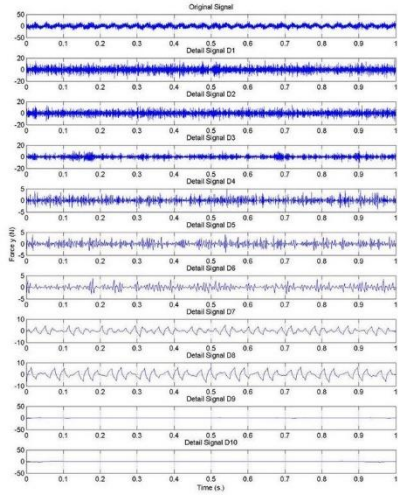
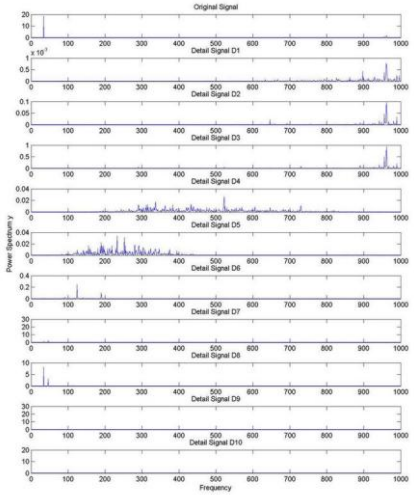
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
78	150	0.20	0.4	0.8	-6	0.113	14.985	ต่อเนื่อง
								
								

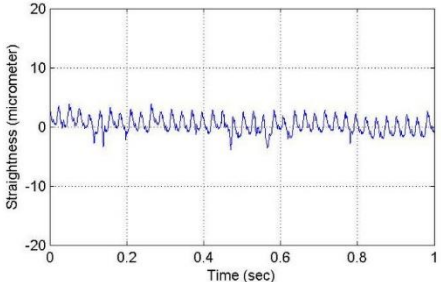
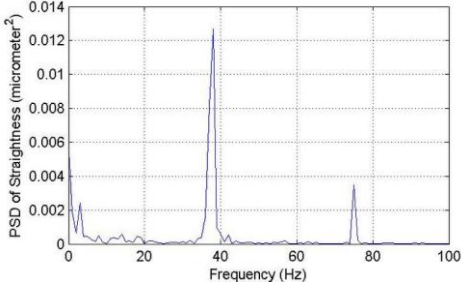
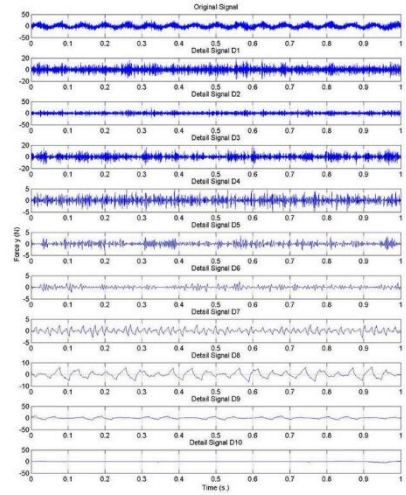
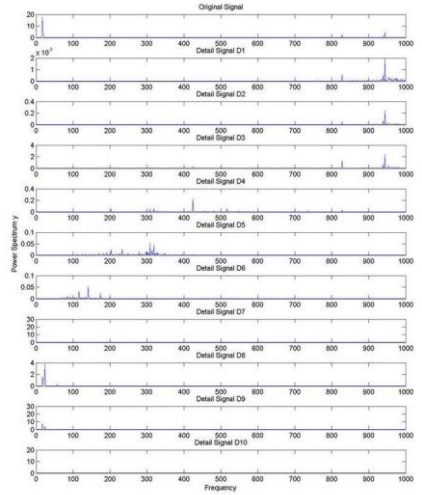
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
79	200	0.25	0.8	0.4	-6	0.111	30.941	แตกหัก
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
80	150	0.20	0.8	0.8	-6	0.178	12.09	แตกหัก
								
								

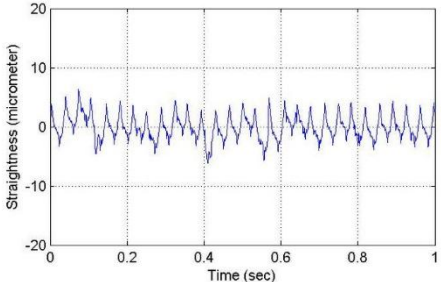
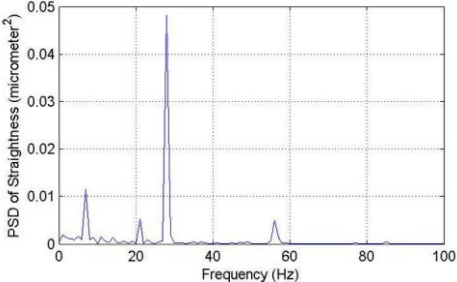
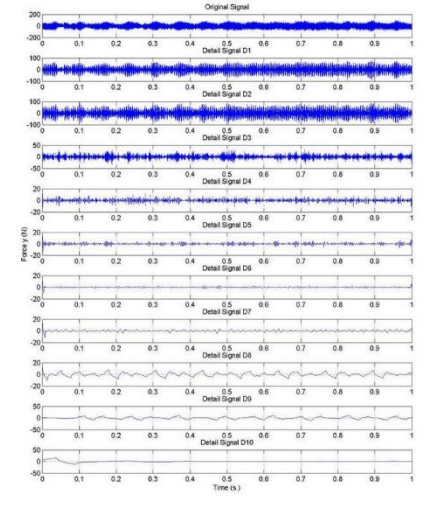
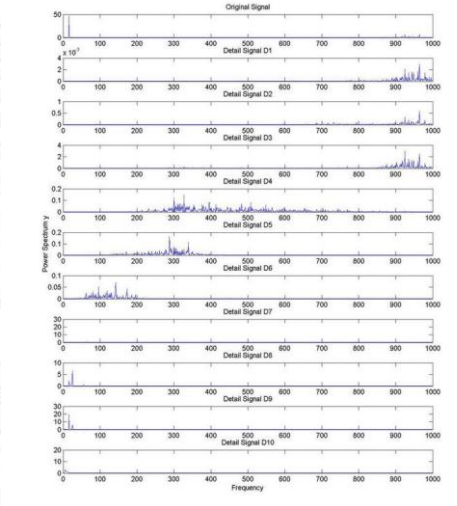
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
81	200	0.20	0.8	0.4	-6	0.113	18.4	แตกหัก
								
								

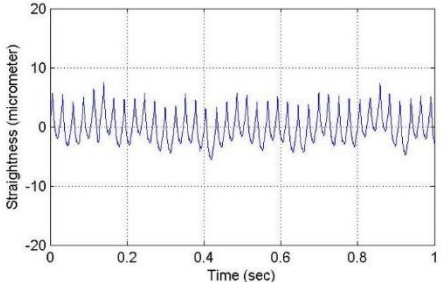
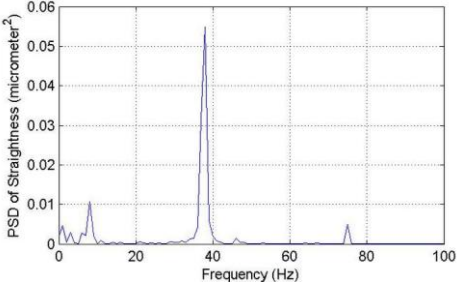
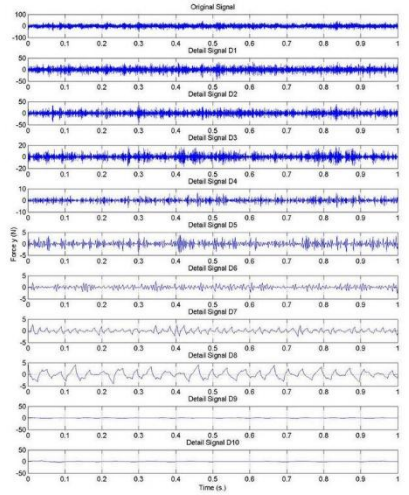
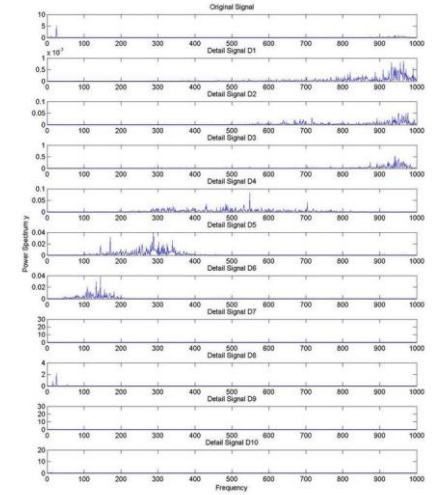
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
82	150	0.25	0.6	0.4	-6	0.121	28.534	ต่อเนื่อง+ แตกหัก
								
								

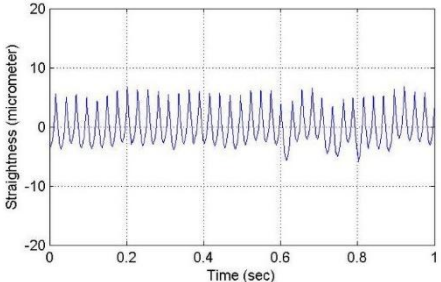
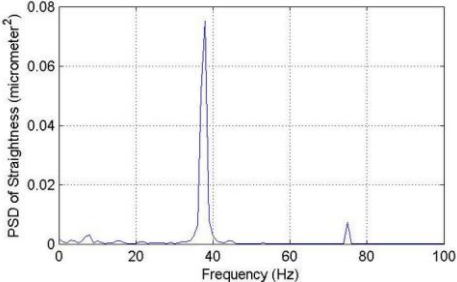
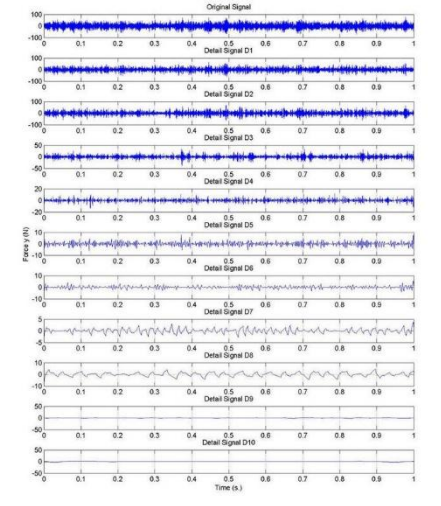
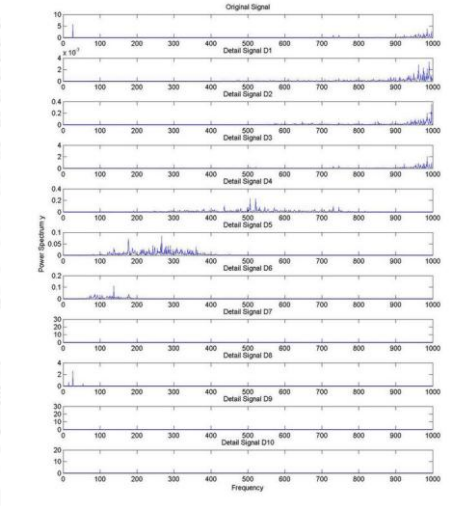
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
83	200	0.20	0.4	0.8	11	0.171	10.314	ต่อเนื่อง
								
								

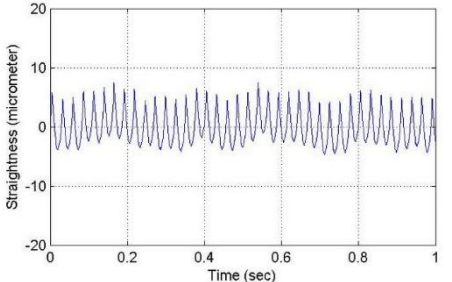
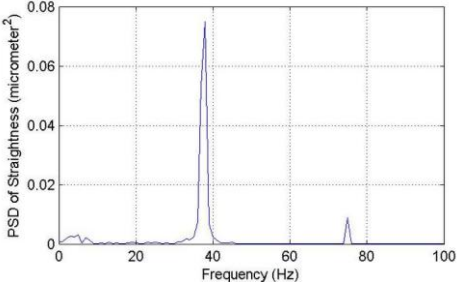
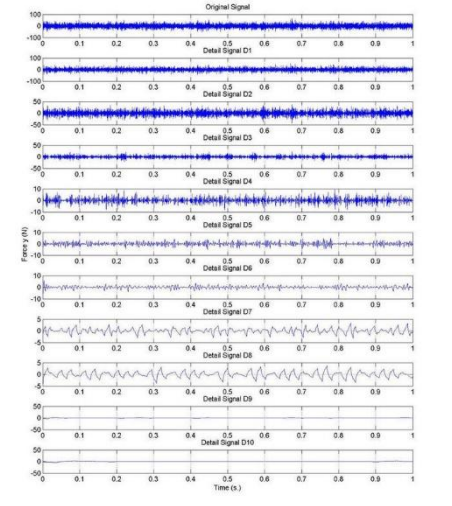
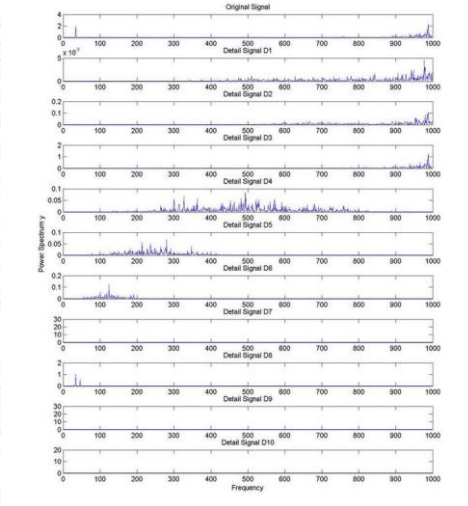
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
84	100	0.15	0.4	0.8	11	0.194	9.216	ต่อเนื่อง
								
								

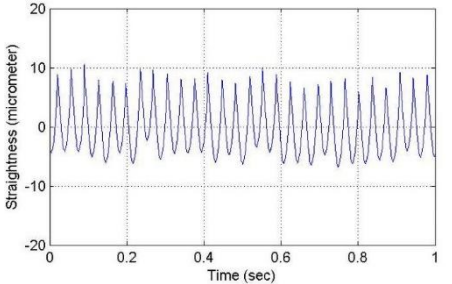
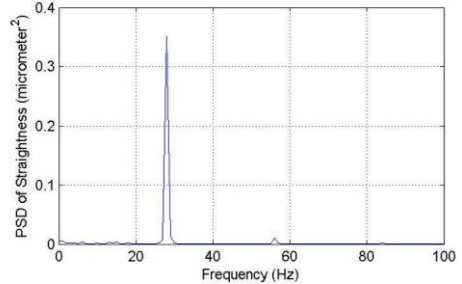
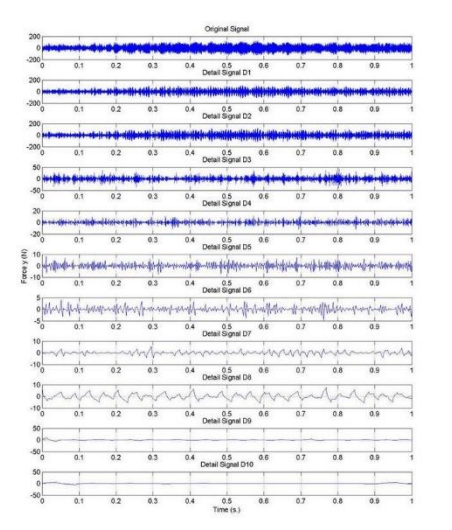
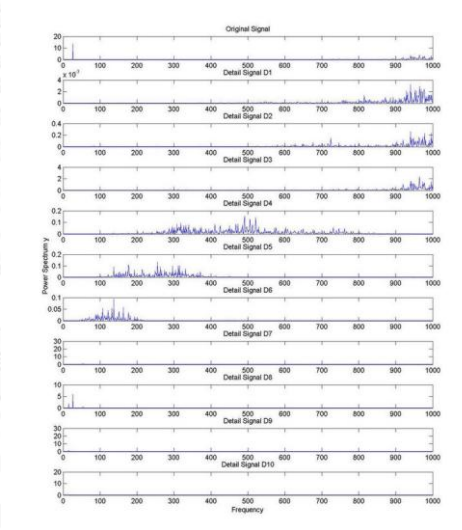


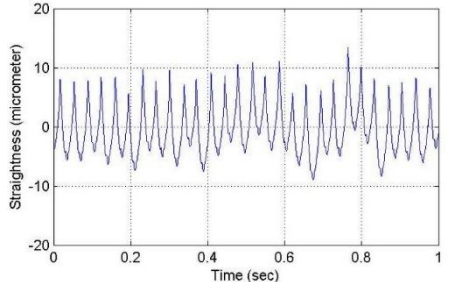
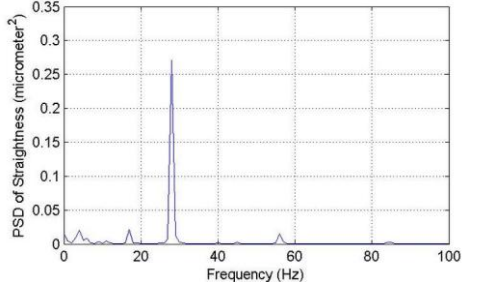
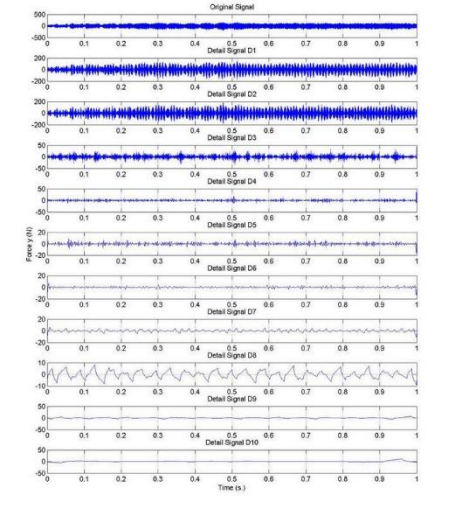
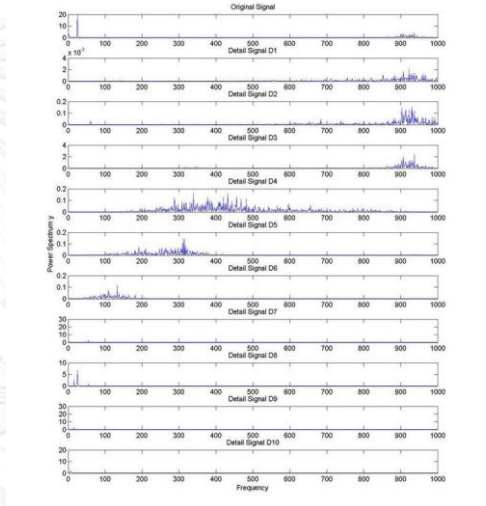
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
85	100	0.20	0.8	0.8	11	0.151	12.506	แตกหัก
								
								

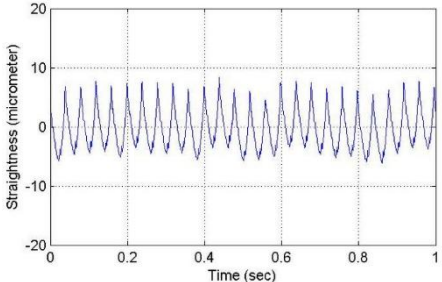
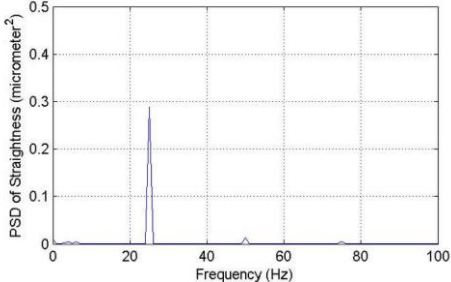
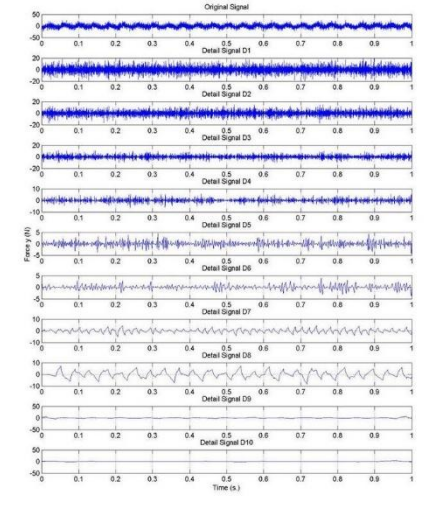
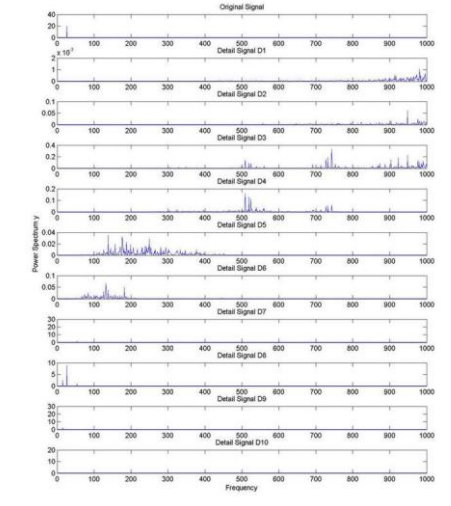
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
86	150	0.15	0.6	0.4	11	0.104	13.25	ต่อเนื่อง
								
								

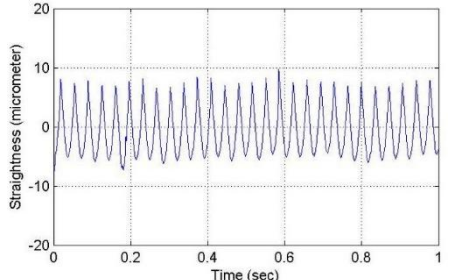
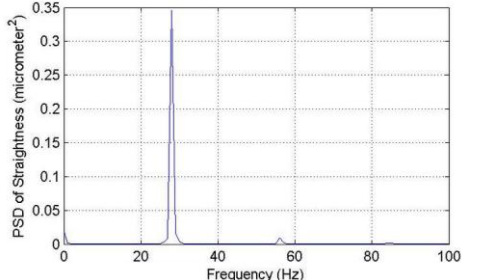
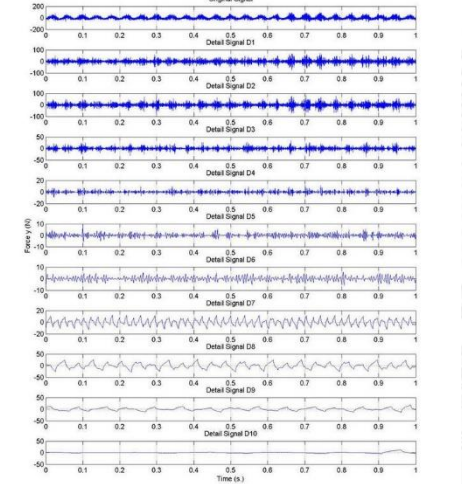
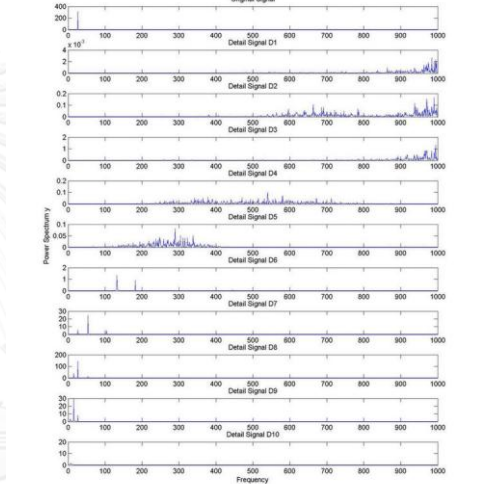
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
87	150	0.15	0.6	0.4	-6	0.104	13.201	แตกหัก
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
88	200	0.15	0.6	0.4	-6	0.076	12.643	แตกหัก
								
								

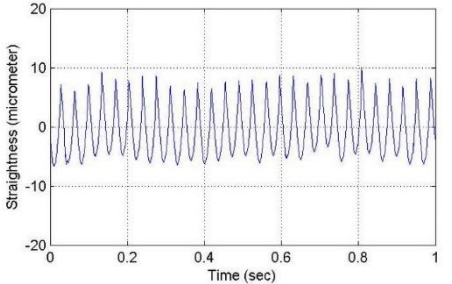
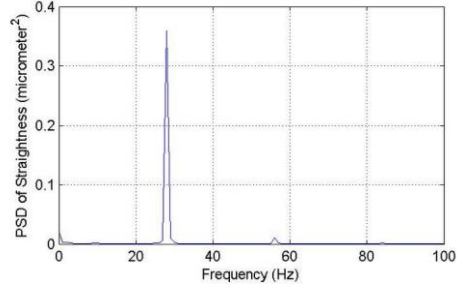
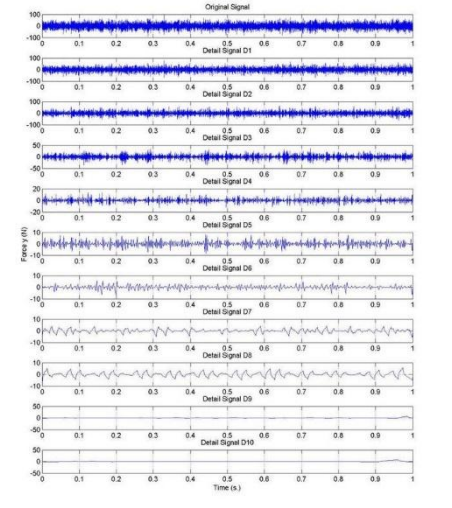
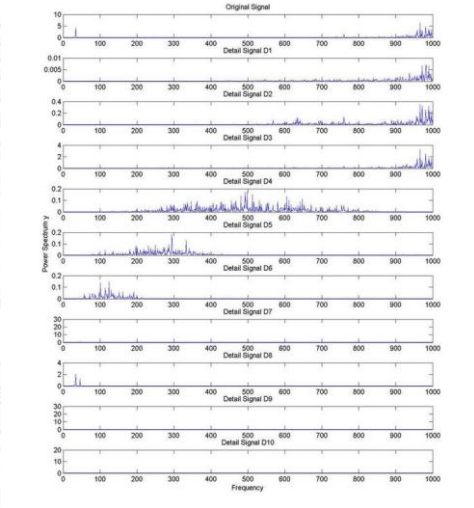
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
89	150	0.20	0.6	0.4	-6	0.092	18.227	ต่อเนื่อง+ แตกหัก
								
								

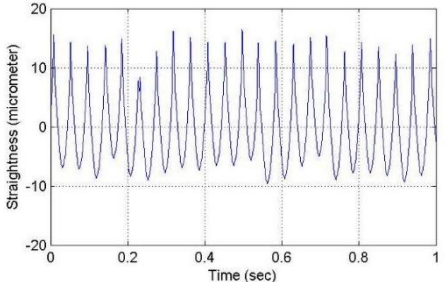
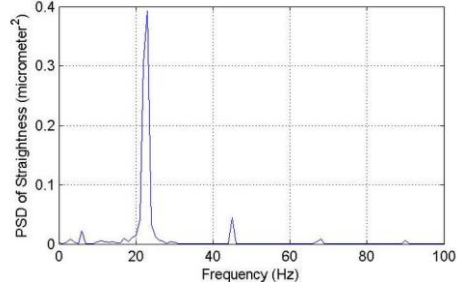
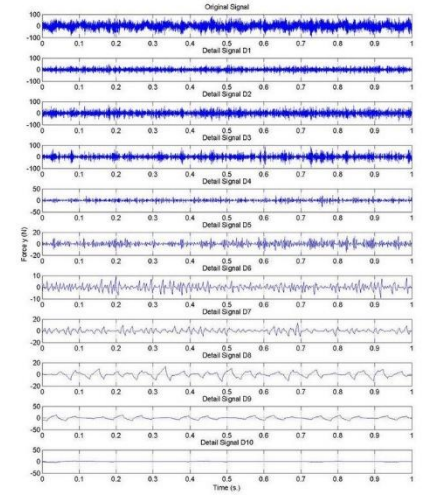
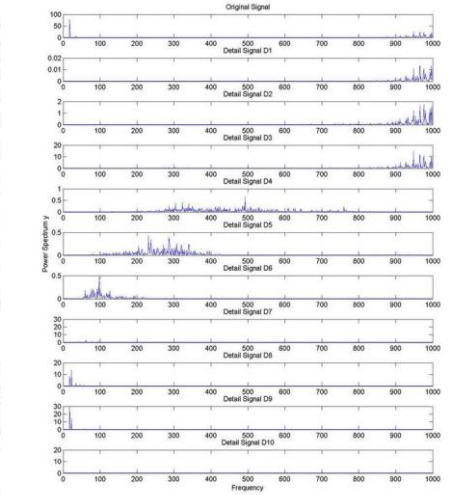
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ	
90	150	0.20	0.8	0.4	11	0.123	22.428	แตกหัก	
									
									

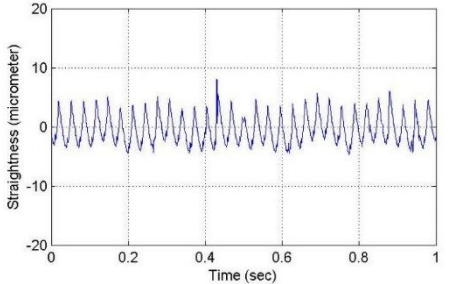
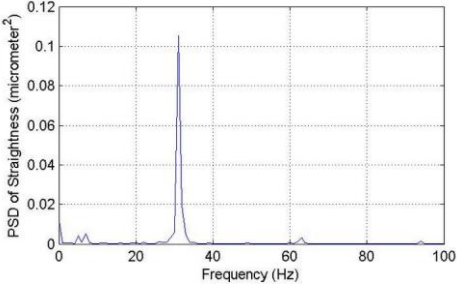
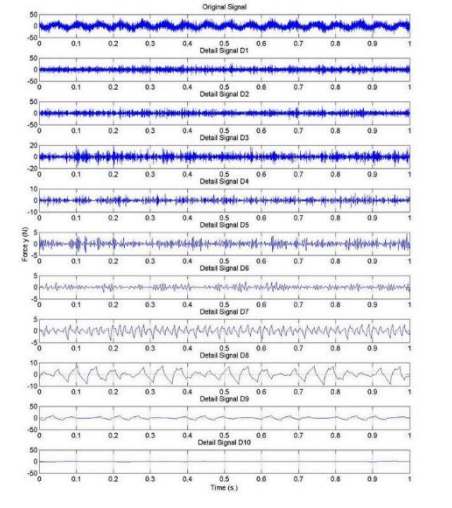
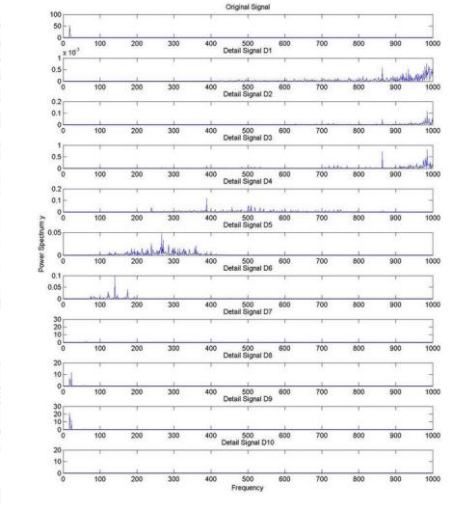
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
91	150	0.25	0.4	0.8	-6	0.139	15.467	ต่อเนื่อง
								
								

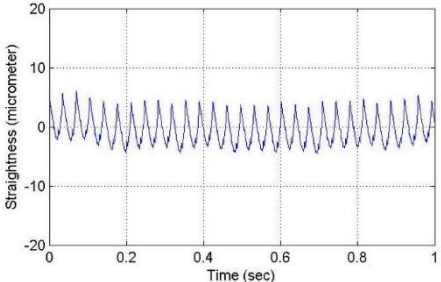
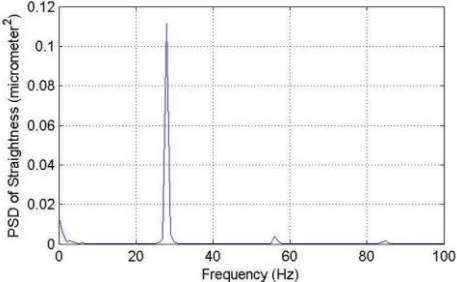
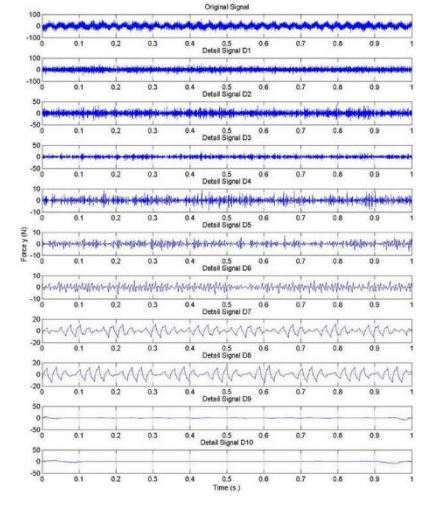
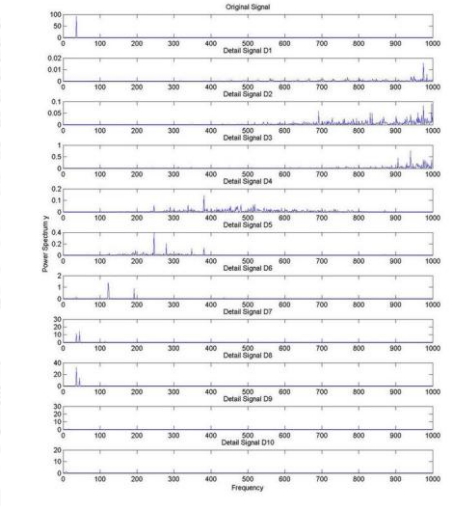
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
	150	0.20	0.4	0.4	-6	0.509	18.919	ต่อเนื่อง
92								
								

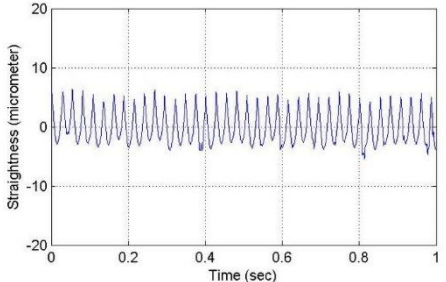
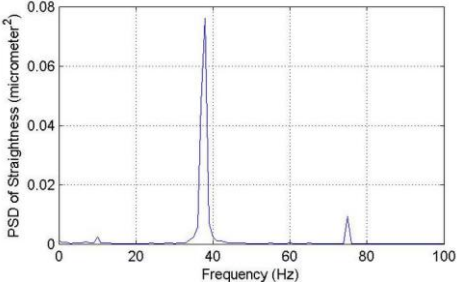
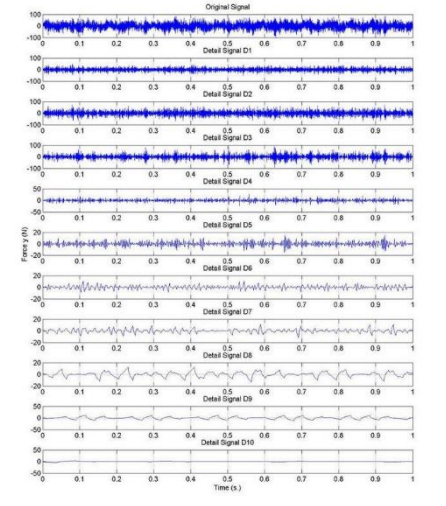
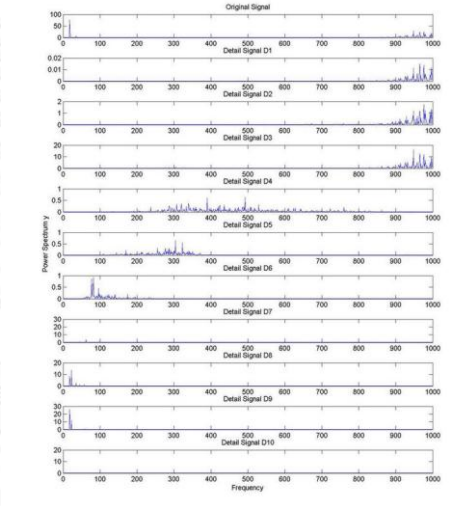


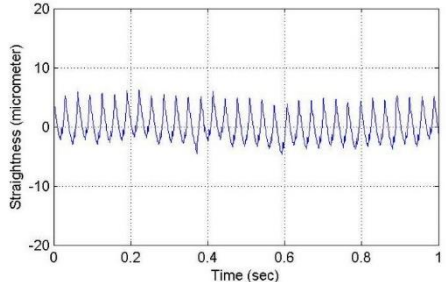
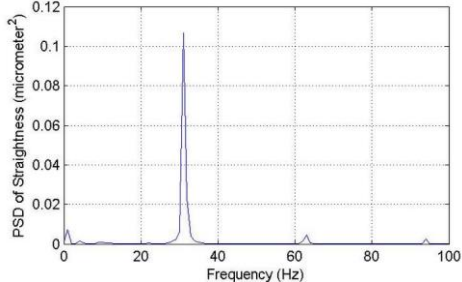
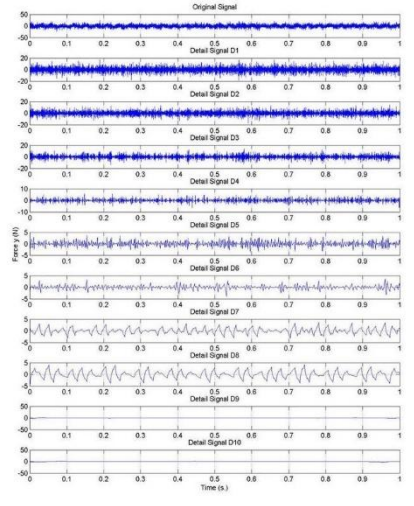
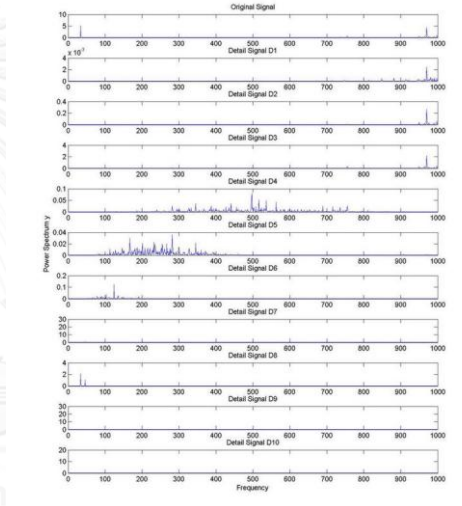
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
93	200	0.20	0.6	0.4	-6	0.084	18.85	ต่อเนื่อง
								
								

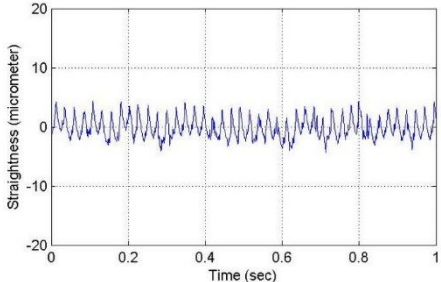
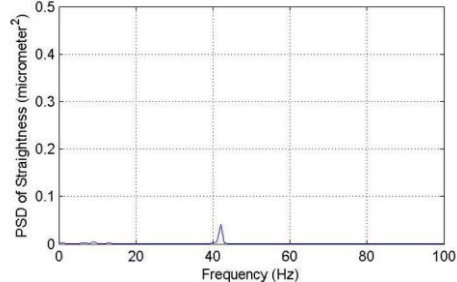
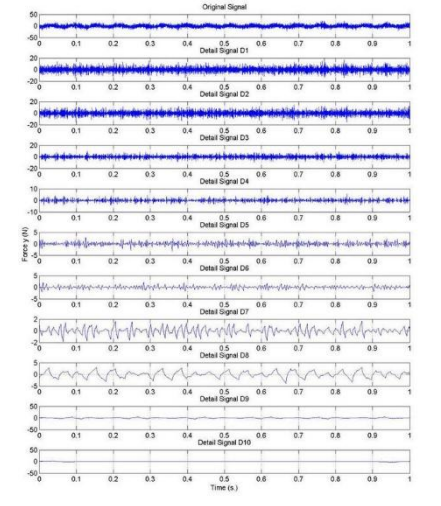
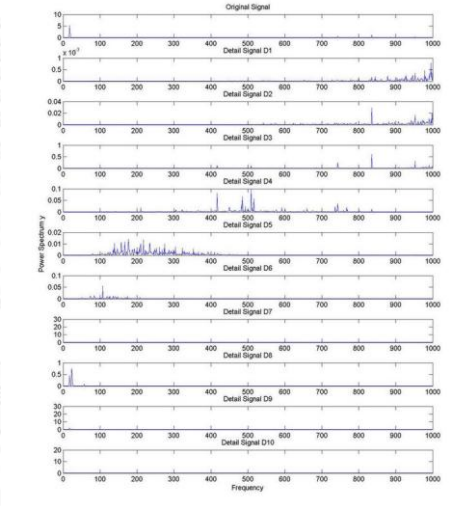
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
94	100	0.25	0.8	0.4	-6	0.112	32.141	แตกหัก
								
								

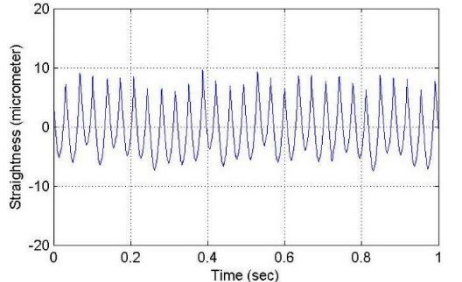
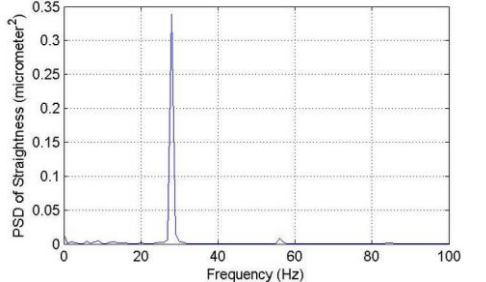
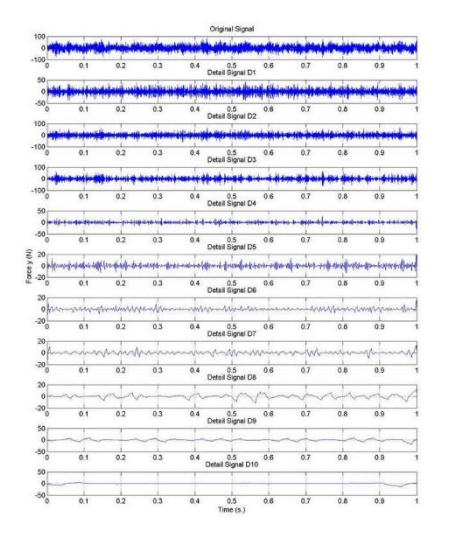
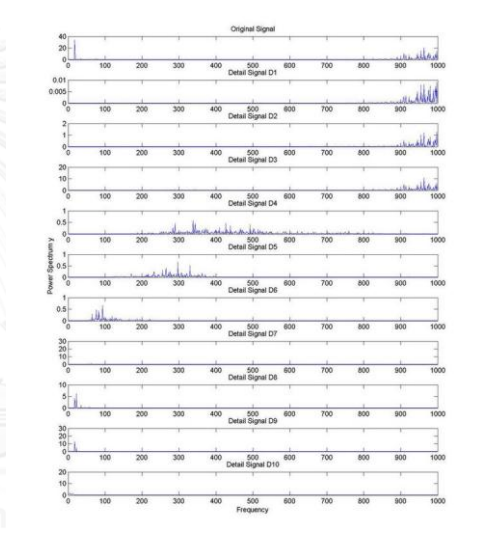
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
95	100	0.20	0.6	0.8	-6	0.121	12.64	ต่อเนื่อง
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
96	200	0.20	0.8	0.8	-6	0.196	11.41	แตกหัก
								
								

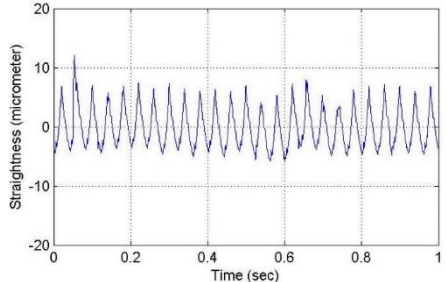
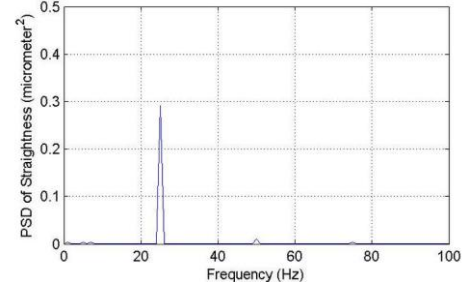
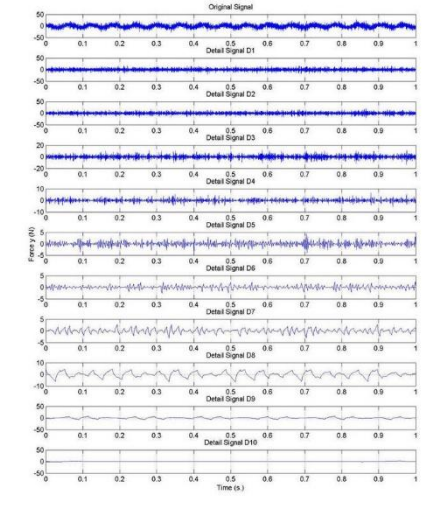
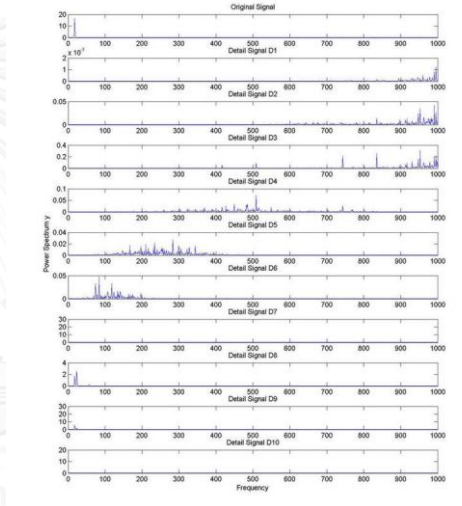
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
97	100	0.15	0.4	0.4	-6	0.300	14.438	ต่อเนื่อง
								
								

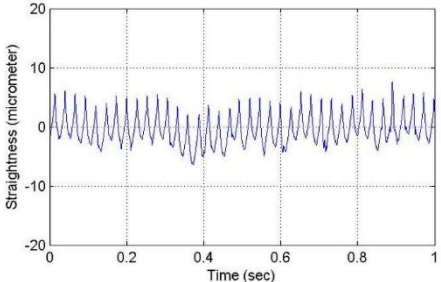
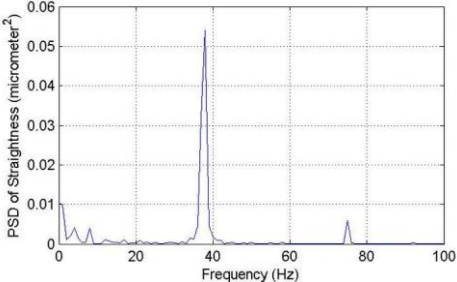
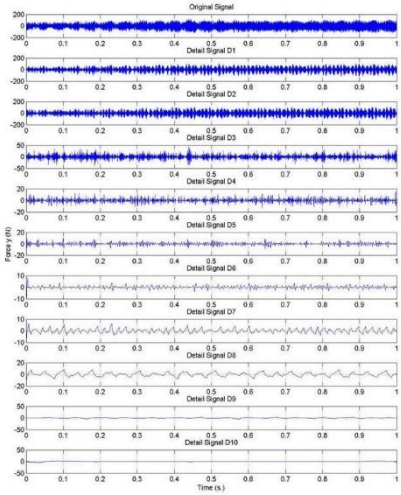
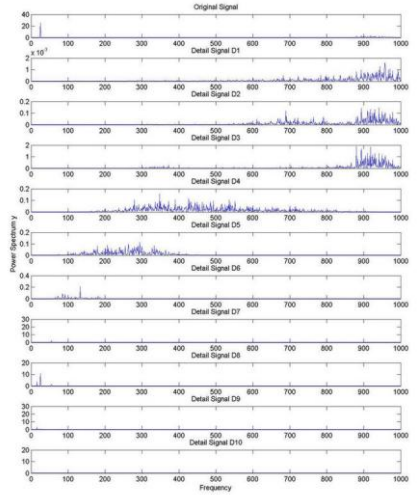
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
98	200	0.20	0.4	0.8	-6	0.097	10.918	ต่อเนื่อง
								
								

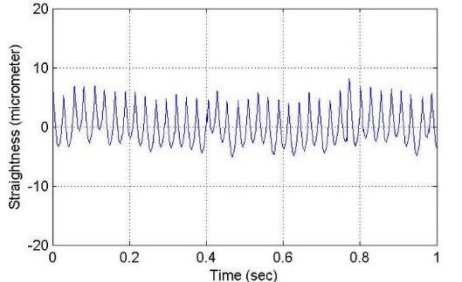
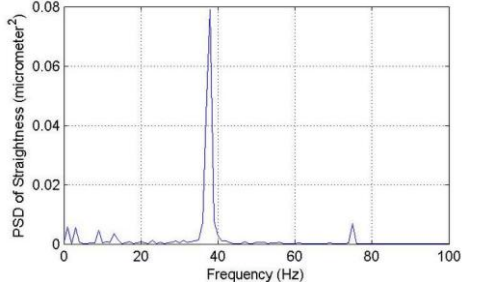
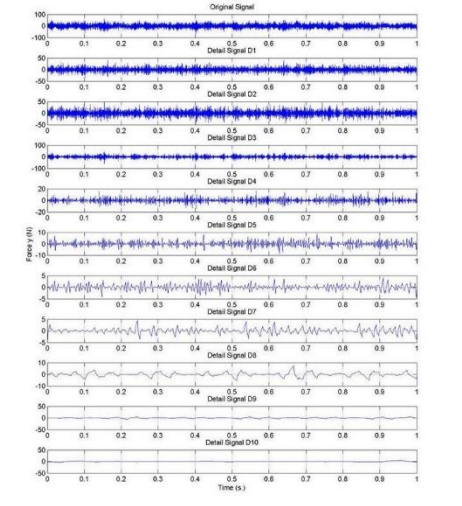
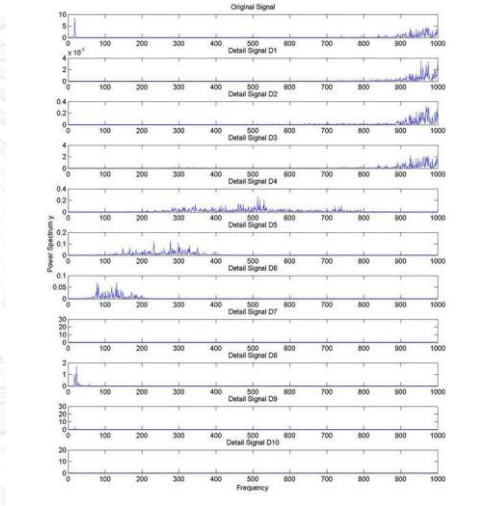
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
99	100	0.15	0.4	0.8	-6	0.087	9.793	ต่อเนื่อง
								
								

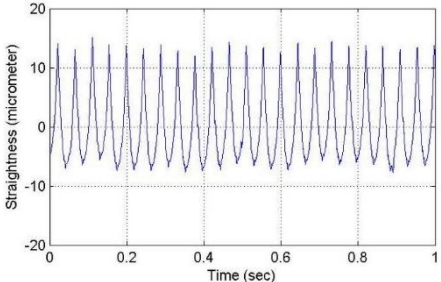
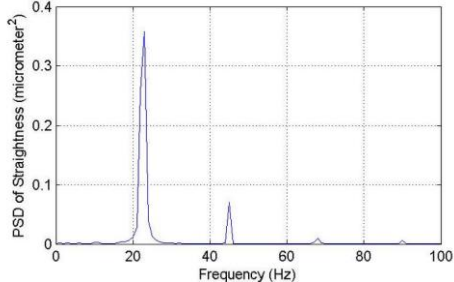
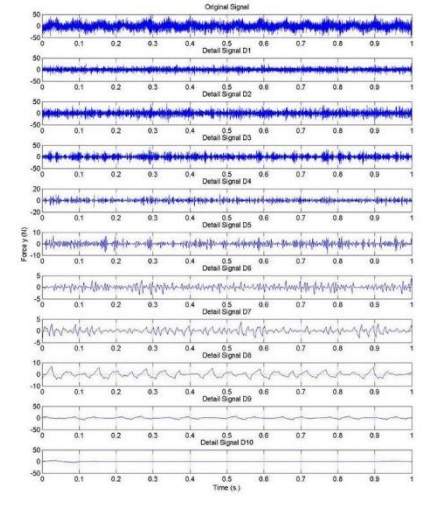
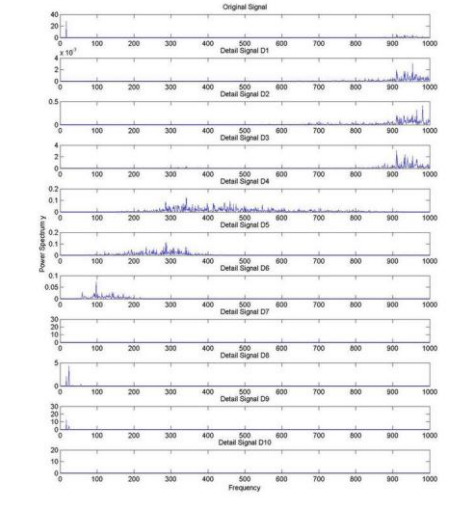
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
100	100	0.20	0.8	0.4	-6	0.126	20.58	แตกหัก
100								
								

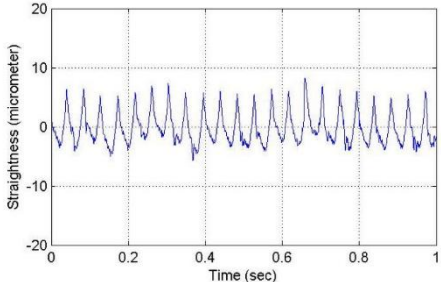
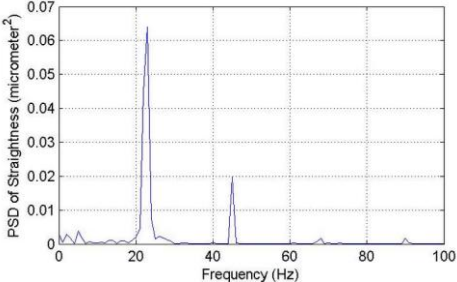
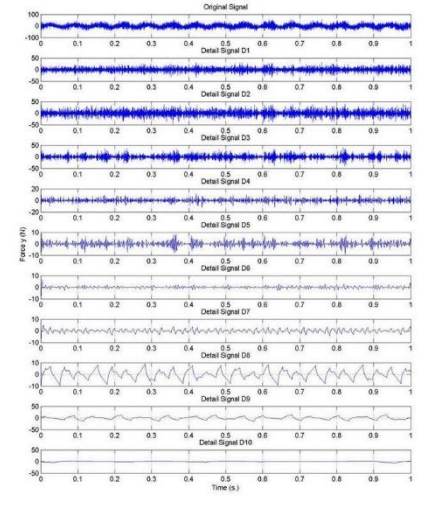
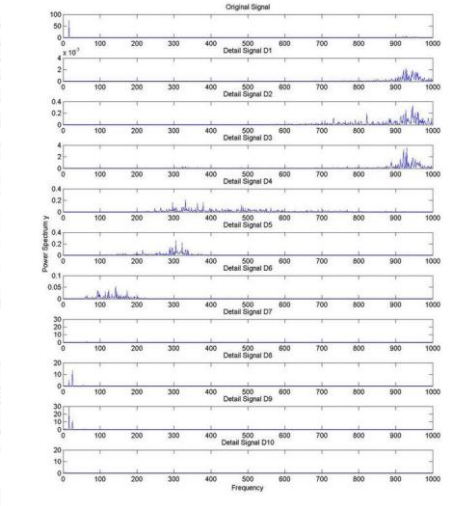


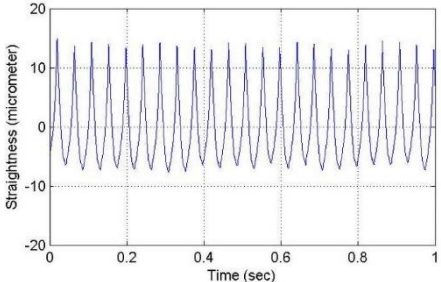
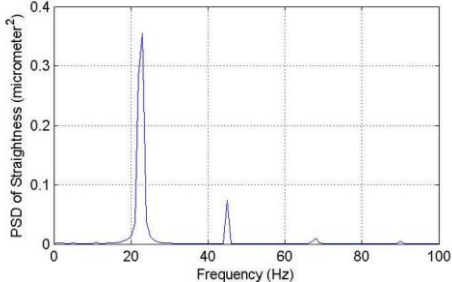
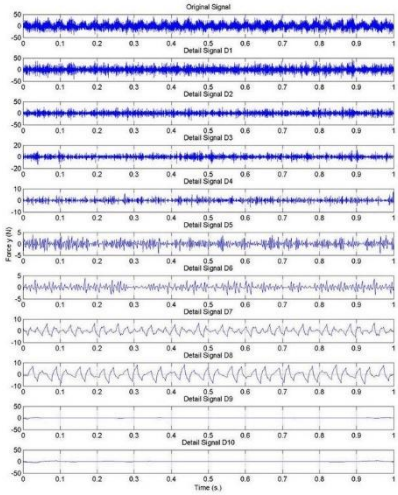
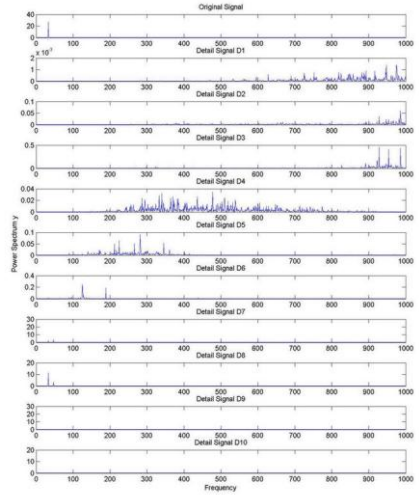
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
101	100	0.25	0.4	0.8	-6	0.111	19.305	ต่อเนื่อง
								
								

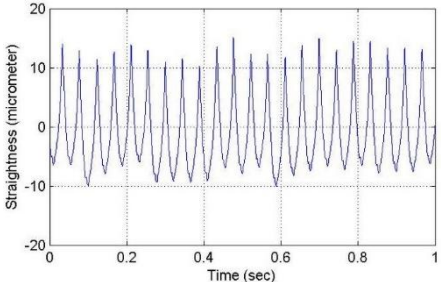
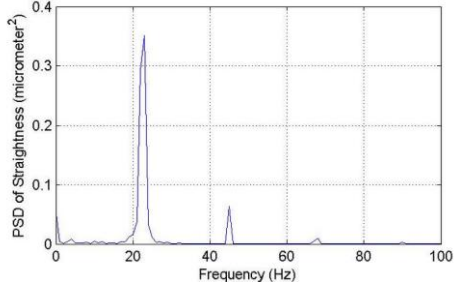
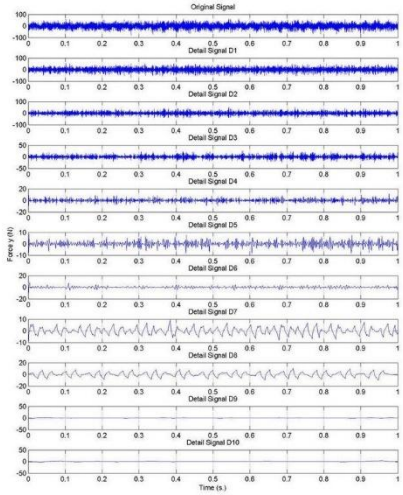
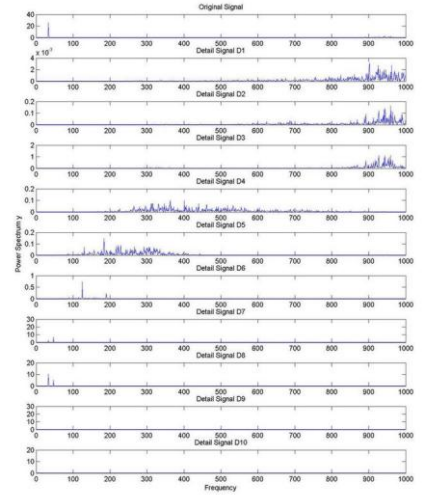
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
102	150	0.25	0.6	0.4	11	0.142	13.931	ต่อเนื่อง
								
								

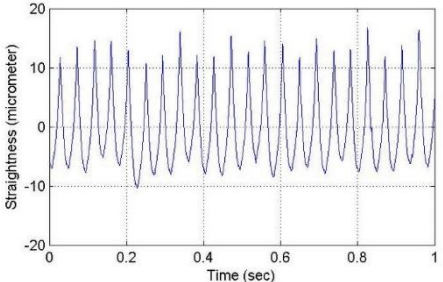
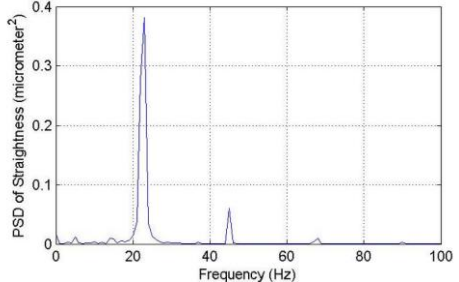
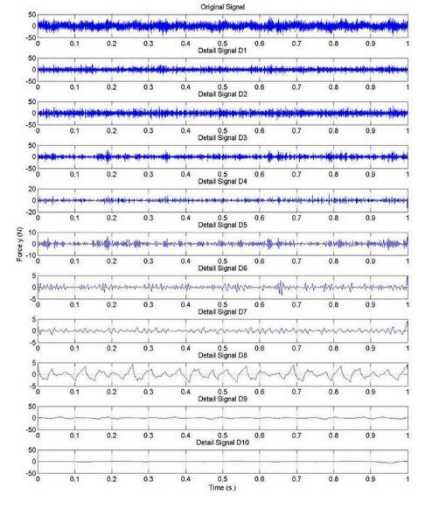
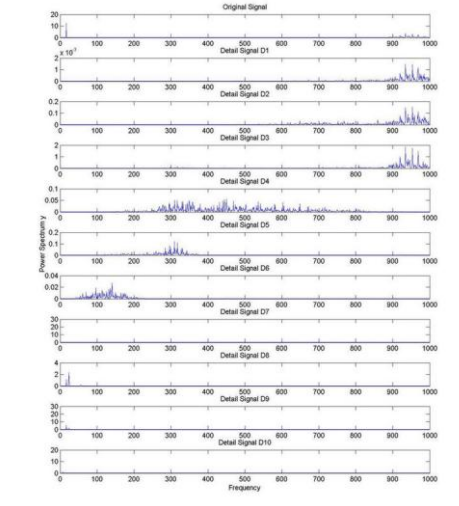
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ	
103	100	0.15	0.6	0.4	-6	0.113	13.646	แตกหัก	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
104	100	0.25	0.6	0.4	11	0.084	23.592	ต่อเนื่อง
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
105	100	0.25	0.8	0.8	11	0.102	13.916	แตกหัก
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
106	200	0.25	0.4	0.4	11	0.191	23.259	ต่อเนื่อง
								
								

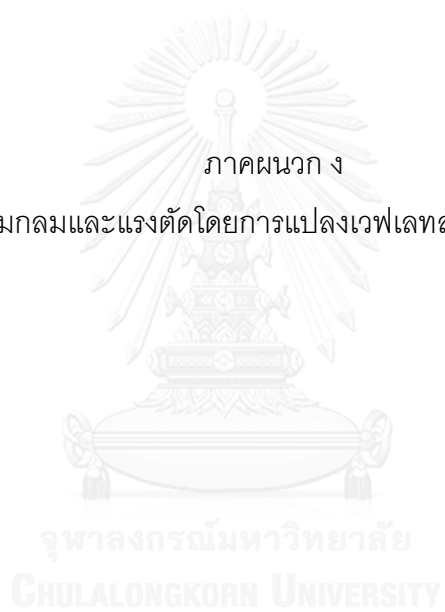
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
107	200	0.25	0.8	0.4	11	0.116	28.063	แตกหัก
								
								

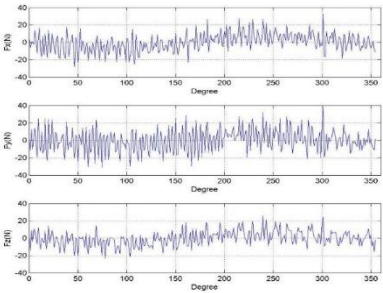
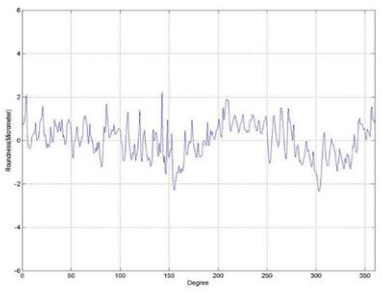
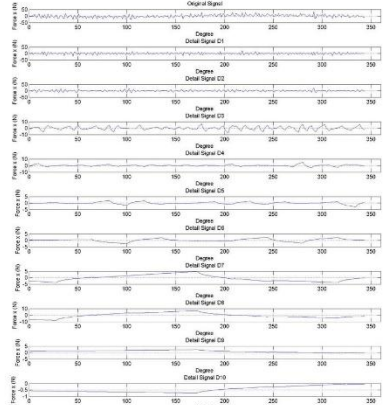
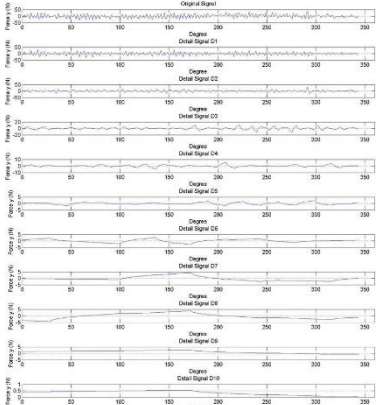
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_s}\right)$	$S_t$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะ เศษโลหะ
108	100	0.15	0.6	0.4	11	0.094	27.235	ต่อเนื่อง
								
								



ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ความกลมและแรงตัดโดยการแปลงเวฟเลขสำหรับเงื่อนไขการตัดต่างๆ



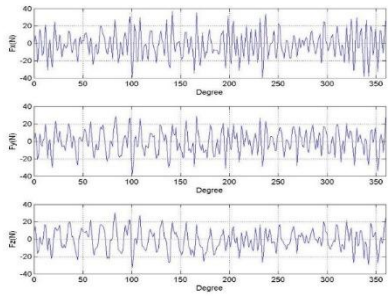
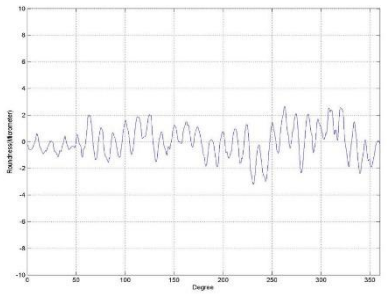
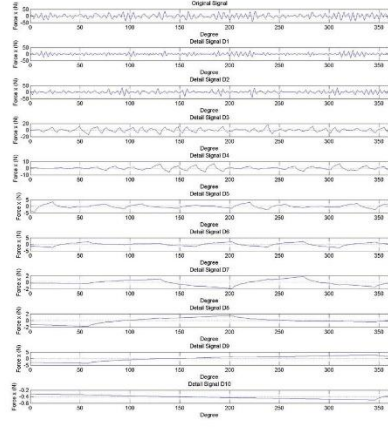
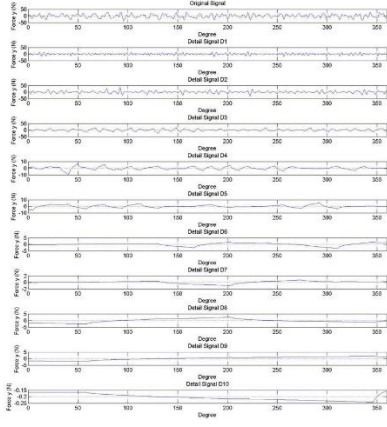
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
1	200	0.25	0.6	0.8	-6	1.247	5.576	ต่อเนื่อง
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	R <sub>n</sub> (mm)	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R <sub>0</sub> (μm)	สถานะเศษ โลหะ
	100	0.20	0.4	0.8	11	1.329	4.793	ต่อเนื่อง
2								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	R <sub>n</sub> (mm)	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R <sub>0</sub> (μm)	สถานะเศษ โลหะ
3	150	0.15	0.4	0.8	11	1.204	4.657	ต่อเนื่อง
								<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;"> </div> <div style="width: 45%;"> </div> </div>

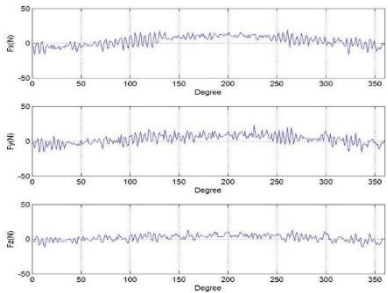
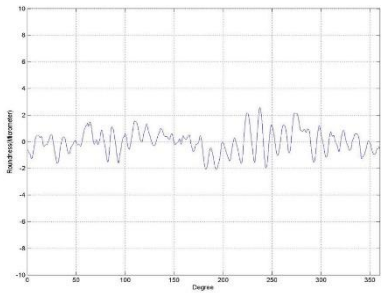
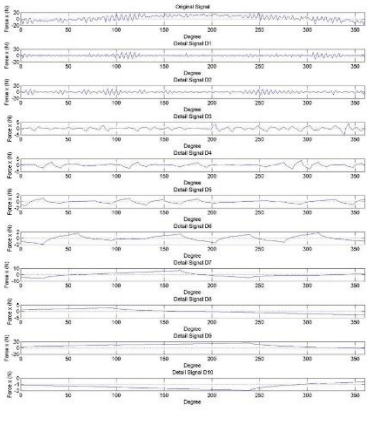
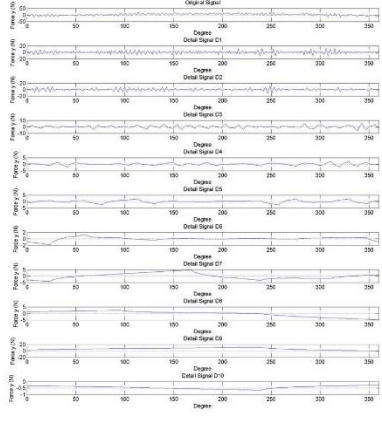
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	R <sub>n</sub> (mm)	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R <sub>0</sub> (μm)	สถานะเศษ โลหะ
	100	0.20	0.6	0.8	11	1.590	5.541	ต่อเนื่อง
4								

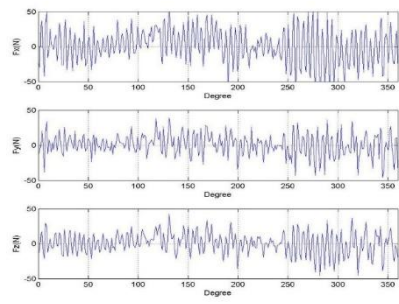
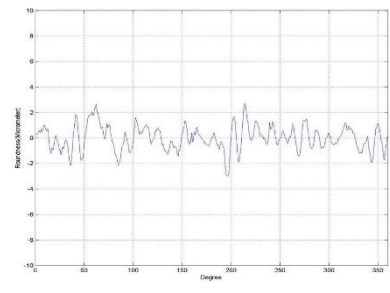
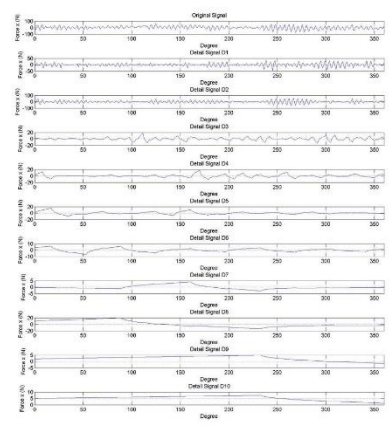
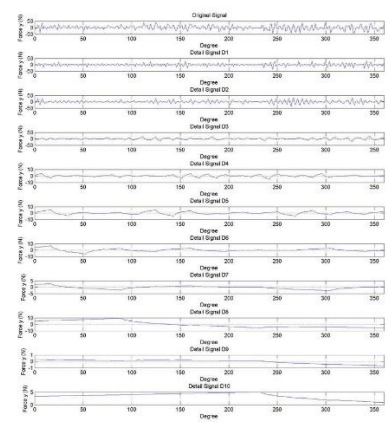
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	R <sub>n</sub> (mm)	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R <sub>0</sub> (μm)	สถานะเศษ โลหะ
5	100	0.15	0.6	0.8	-6	1.402	5.381	ต่อเนื่อง
								<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;"> </div> <div style="width: 45%;"> </div> </div>

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
	100	0.20	0.8	0.8	-6	1.467	5.573	แตกหัก
6								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	R <sub>n</sub> (mm)	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R <sub>0</sub> (μm)	สถานะเศษ โลหะ
	100	0.25	0.8	0.8	-6	1.639	5.825	แตกหัก
7								



No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
	150	0.20	0.4	0.8	11	1.216	4.659	ต่อเนื่อง
8								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
9	150	0.15	0.8	0.4	-6	1.233	5.691	ต่อเนื่อง
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
10	100	0.15	0.8	0.8	11	2.361	5.873	แตกหัก

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษโลหะ	
11	150	0.25	0.8	0.4	11	2.522	7.162	แตกหัก	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	R <sub>n</sub> (mm)	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R <sub>0</sub> (μm)	สถานะเศษ โลหะ	
12	200	0.25	0.8	0.8	-6	1.373	5.586	แตกหัก	

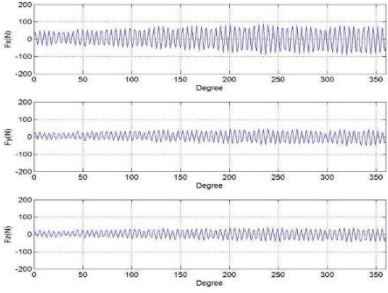
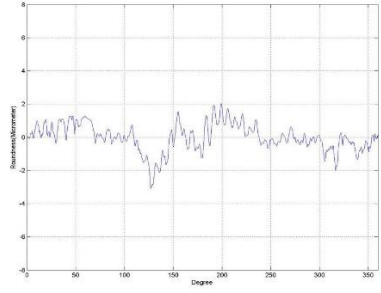
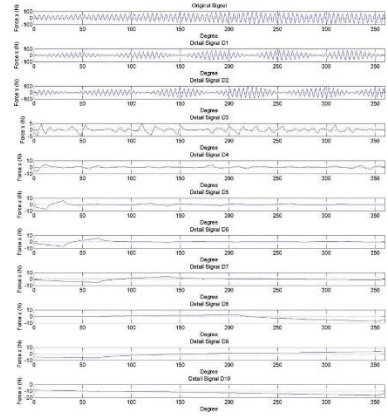
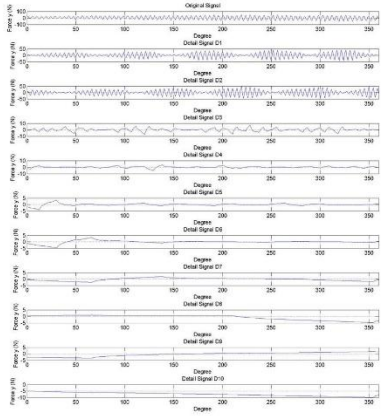
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
13	150	0.25	0.8	0.8	-6	2.026	6.375	แตกหัก	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	R <sub>n</sub> (mm)	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R <sub>0</sub> (μm)	สถานะเศษโลหะ	
14	150	0.25	0.4	0.8	11	1.298	4.976	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
15	100	0.20	0.4	0.8	-6	1.399	5.749	ต่อเนื่อง	



No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
16	150	0.25	0.8	0.4	-6	2.065	6.233	แตกหัก	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
17	100	0.15	0.6	0.8	11	1.889	5.976	ต่อเนื่อง+ แตกหัก
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
18	150	0.25	0.6	0.8	-6	1.369	5.814	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	R <sub>n</sub> (mm)	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R <sub>0</sub> (μm)	สถานะเศษ โลหะ
19	100	0.25	0.6	0.4	-6	1.372	5.857	ต่อเนื่อง

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
20	200	0.20	0.8	0.8	11	0.961	4.722	แตกหัก

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
21	100	0.15	0.8	0.4	11	1.271	5.55	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
22	200	0.25	0.4	0.8	-6	1.049	4.606	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
23	150	0.15	0.6	0.8	-6	1.112	5.297	ต่อเนื่อง



No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
24	150	0.15	0.8	0.4	11	2.316	6.119	แตกหัก

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	R <sub>n</sub> (mm)	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R <sub>0</sub> (μm)	สถานะเศษโลหะ
25	150	0.25	0.8	0.8	11	1.779	5.85	แตกหัก

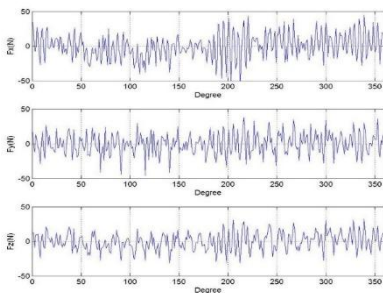
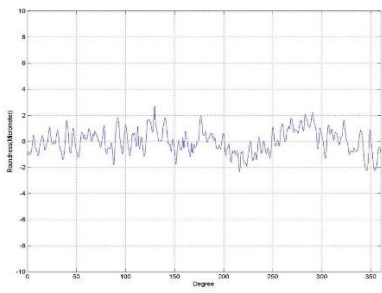
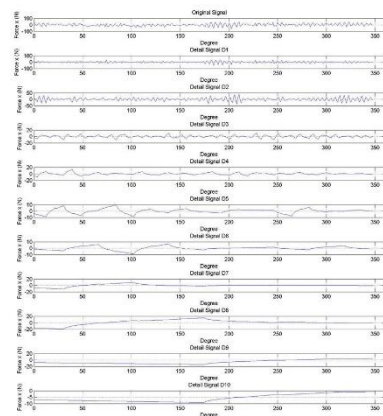
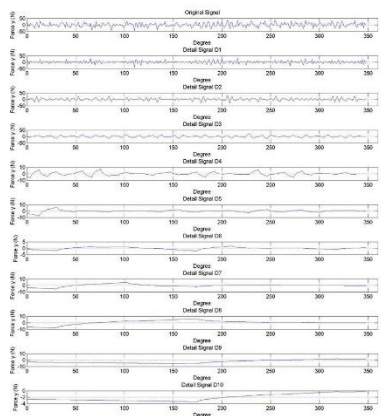
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
26	150	0.25	0.4	0.4	-6	1.961	6.25	แตกหัก	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
27	200	0.15	0.4	0.8	11	0.730	4.017	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
28	150	0.15	0.4	0.4	-6	1.612	5.873	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
29	150	0.20	0.6	0.4	11	1.823	5.59	ต่อเนื่อง	

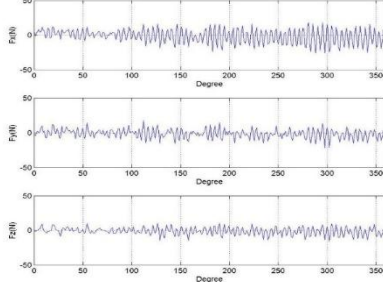
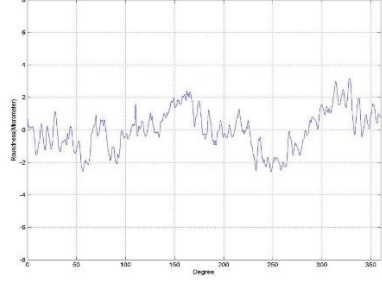
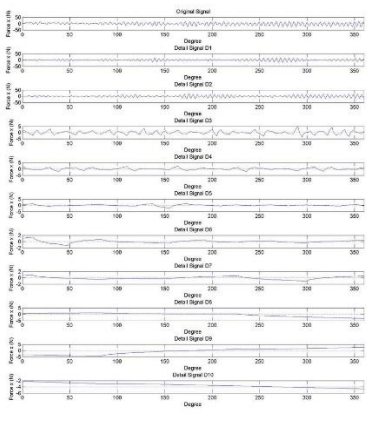
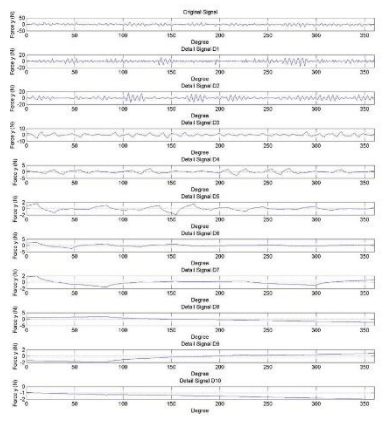
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
30	200	0.25	0.4	0.4	-6	1.626	5.492	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
31	200	0.15	0.8	0.4	-6	1.276	5.057	แตกหัก
								
								
								
								

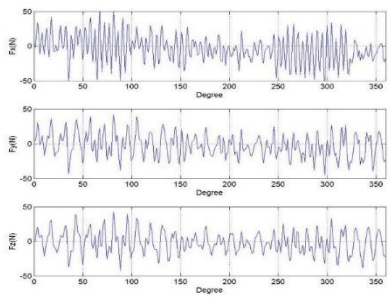
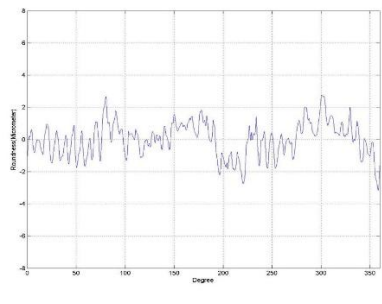
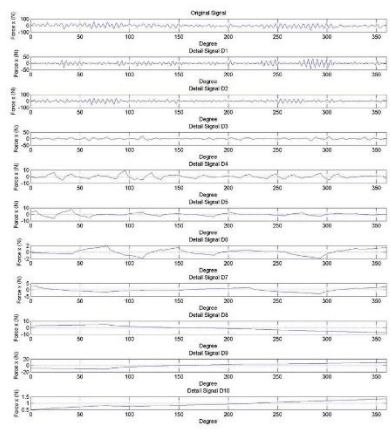
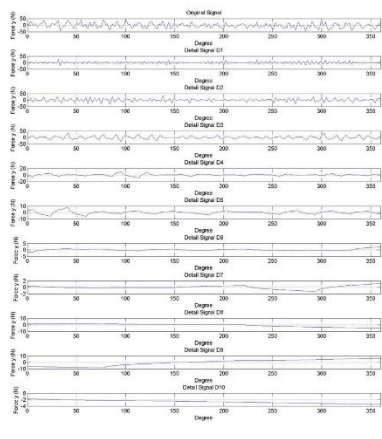


No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
32	100	0.25	0.4	0.4	11	1.320	5.375	ต่อเนื่อง	

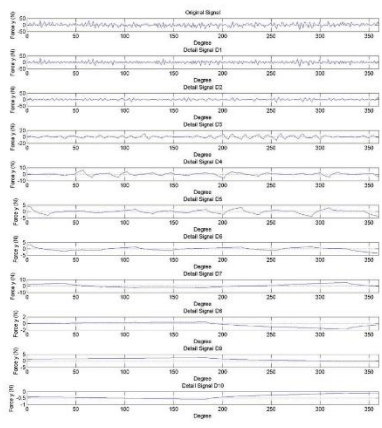
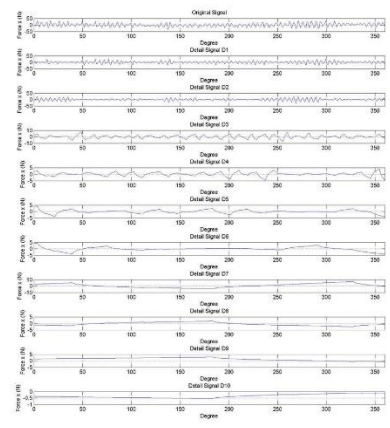
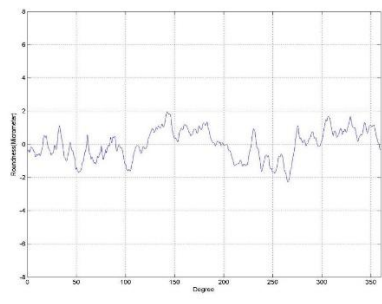
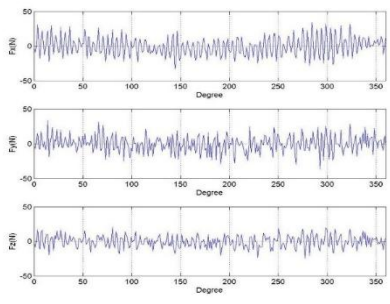
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
33	200	0.20	0.6	0.4	11	1.208	4.991	ต่อเนื่อง

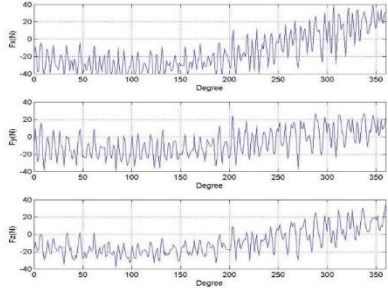
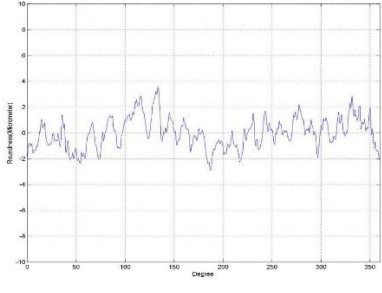
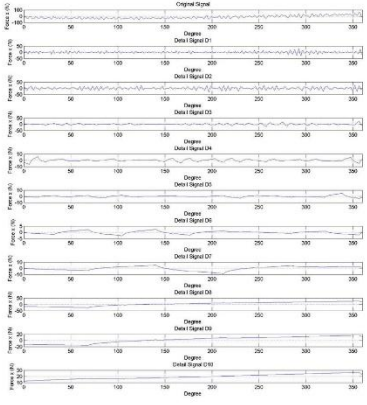
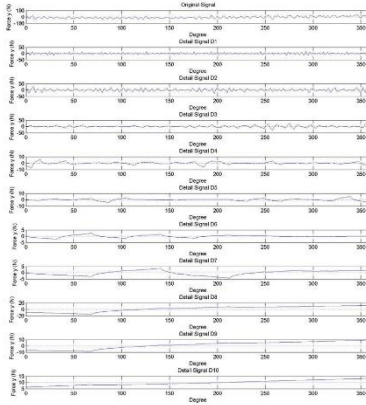
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
34	100	0.15	0.4	0.4	11	1.598	5.736	ต่อเนื่อง
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
35	200	0.15	0.6	0.4	11	1.144	4.781	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
36	100	0.20	0.8	0.4	11	1.425	5.719	ต่อเนื่อง	
									
									

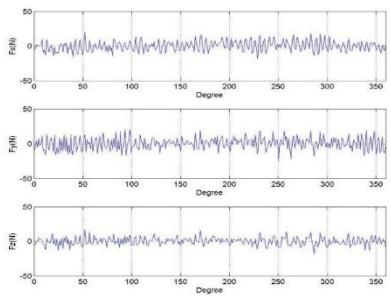
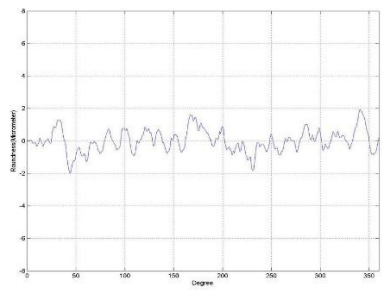
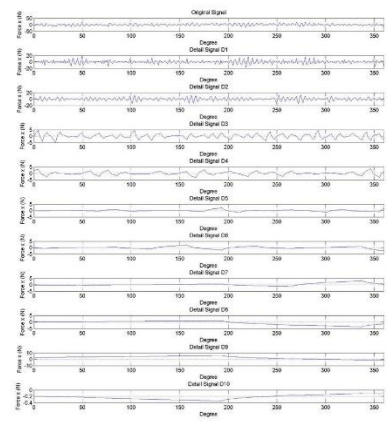
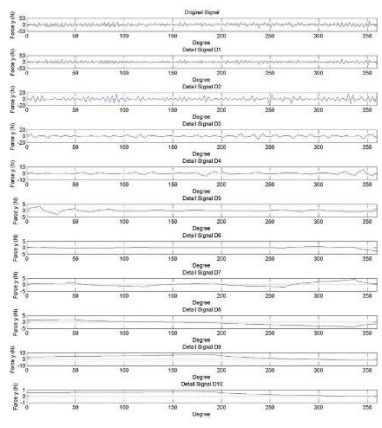
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
37	200	0.15	0.8	0.4	11	1.197	4.231	ต่อเนื่อง



No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
38	100	0.20	0.4	0.4	-6	1.746	6.449	ต่อเนื่อง
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	R <sub>n</sub> (mm)	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R <sub>0</sub> (μm)	สถานะเศษโลหะ	
39	200	0.25	0.6	0.4	-6	1.740	5.998	ต่อเนื่อง	



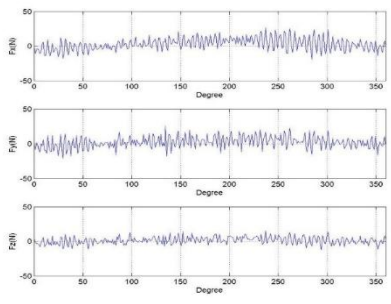
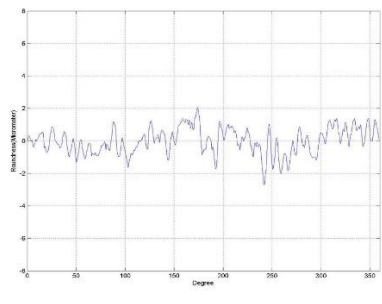
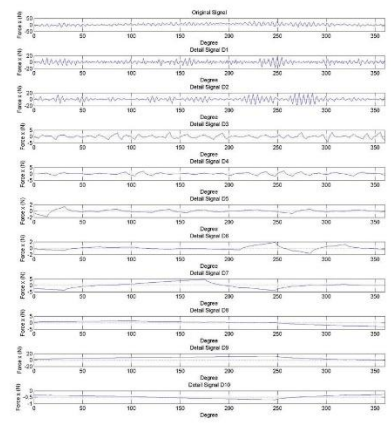
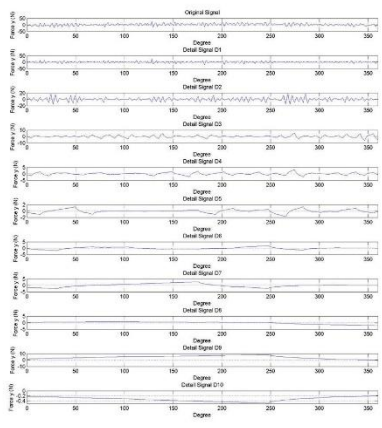
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษโลหะ	
40	200	0.15	0.8	0.8	11	0.955	3.944	ต่อเนื่อง	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
41	200	0.15	0.4	0.4	11	0.727	4.047	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	R <sub>n</sub> (mm)	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R <sub>0</sub> (μm)	สถานะเศษโลหะ	
42	200	0.25	0.4	0.8	11	1.151	4.17	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
43	100	0.20	0.6	0.4	-6	1.187	5.502	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
44	100	0.25	0.6	0.8	-6	1.749	6.234	ต่อเนื่อง

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
45	150	0.20	0.4	0.4	11	1.149	4.788	ต่อเนื่อง	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
46	150	0.15	0.8	0.8	11	1.258	4.894	แตกหัก	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
47	100	0.20	0.6	0.4	11	1.073	4.602	ต่อเนื่อง	



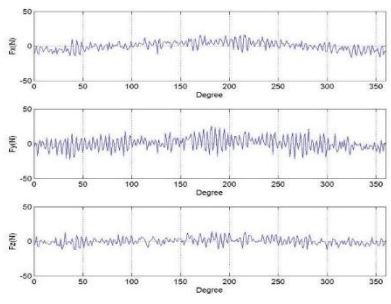
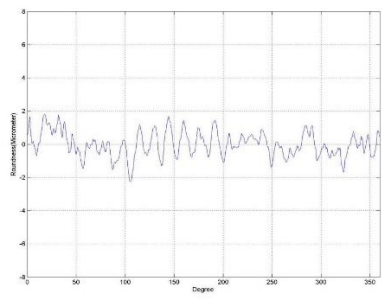
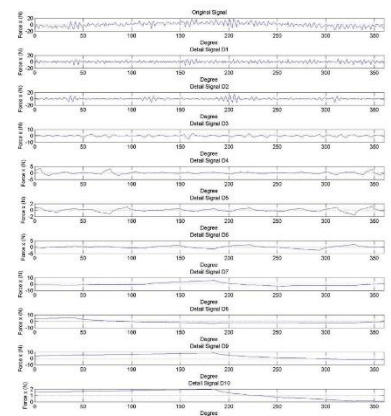
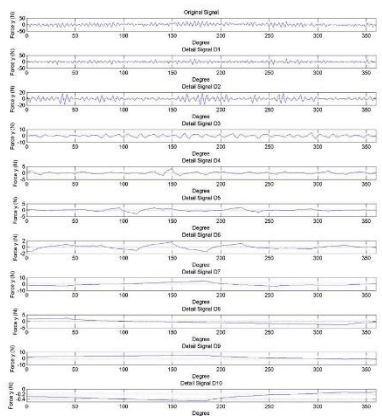
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
48	100	0.25	0.4	0.8	11	1.414	5.154	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	R <sub>n</sub> (mm)	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R <sub>0</sub> (μm)	สถานะเศษ โลหะ
49	150	0.25	0.4	0.4	11	1.207	5.246	ต่อเนื่อง

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
50	200	0.20	0.6	0.8	11	1.019	4.55	ต่อเนื่อง

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	R <sub>n</sub> (mm)	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R <sub>0</sub> (μm)	สถานะเศษโลหะ	
51	100	0.15	0.8	0.8	-6	1.022	5.395	แตกหัก	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ		
52	150	0.20	0.6	0.8	11	1.346	5.23	ต่อเนื่อง		

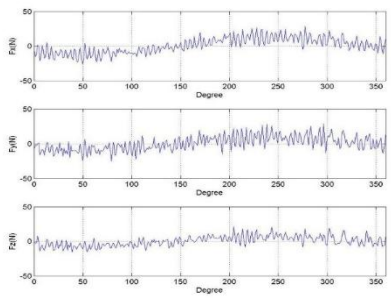
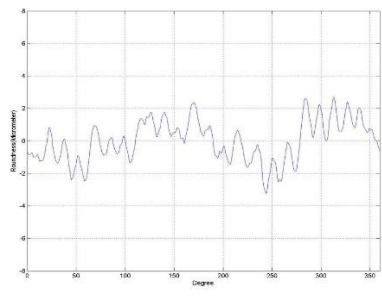
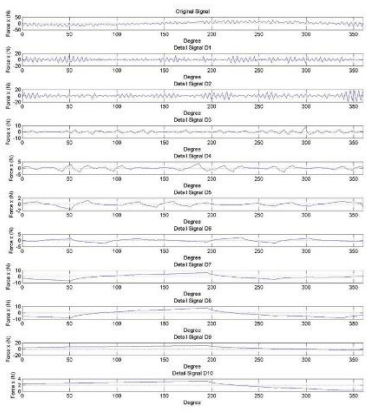

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
53	200	0.20	0.4	0.4	11	0.747	4.057	ต่อเนื่อง
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
54	150	0.15	0.6	0.8	11	1.279	4.759	ต่อเนื่อง	

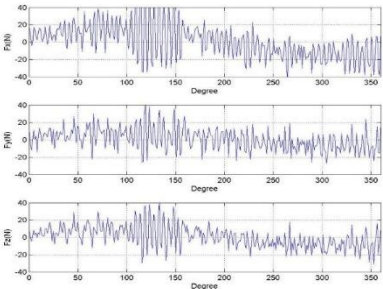
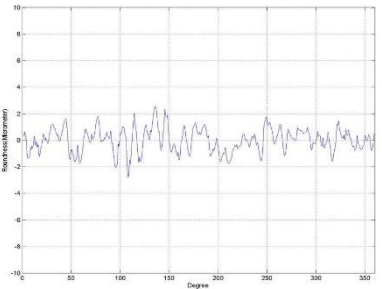
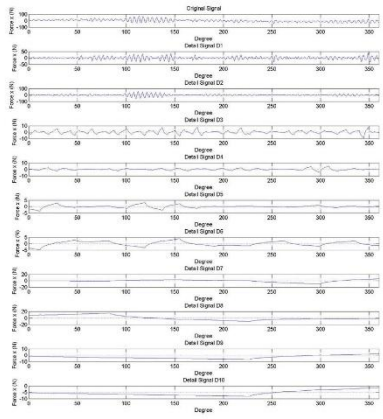
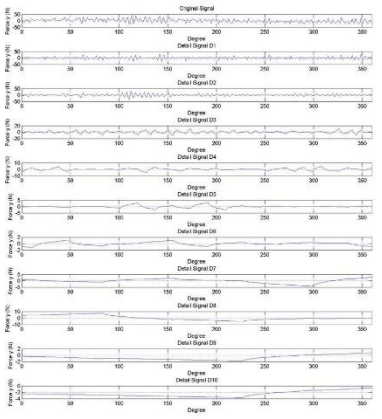
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
55	200	0.15	0.6	0.8	11	1.339	4.768	ต่อเนื่อง	



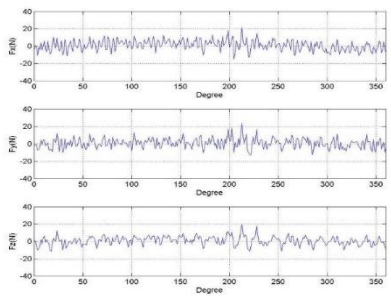
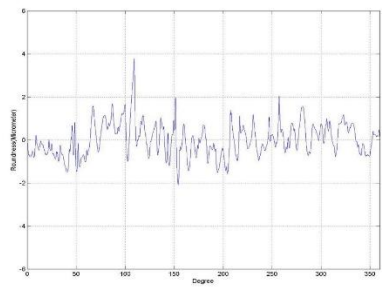
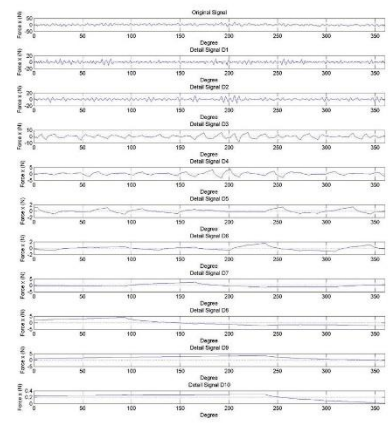
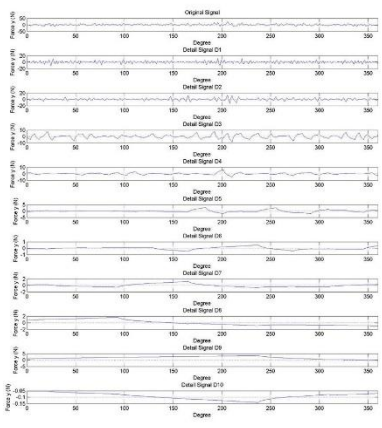
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
56	100	0.15	0.8	0.4	-6	1.721	5.976	แตกหัก	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
57	200	0.25	0.6	0.8	11	1.258	4.567	ต่อเนื่อง	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
58	200	0.20	0.8	0.4	11	1.319	5.011	ต่อเนื่อง

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
59	150	0.15	0.8	0.8	-6	1.585	5.358	ต่อเนื่อง	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
60	100	0.25	0.4	0.4	-6	1.308	6.01	ต่อเนื่อง

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
61	150	0.15	0.4	0.8	-6	1.055	5.019	ต่อเนื่อง	
									
									

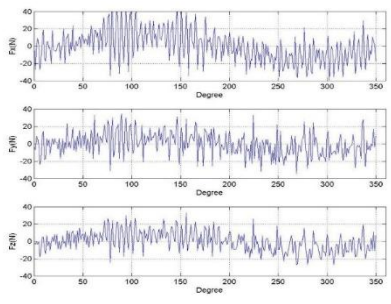
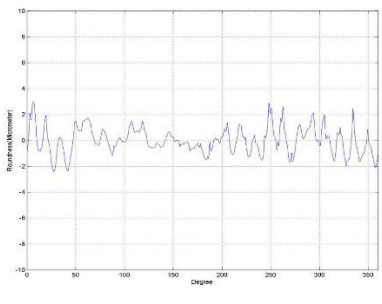
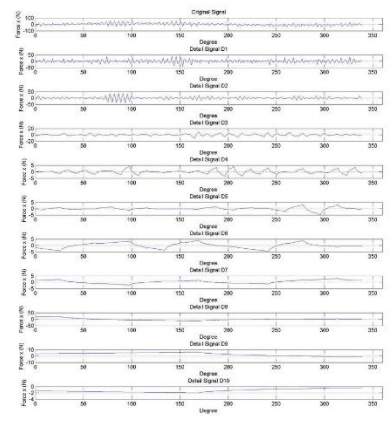
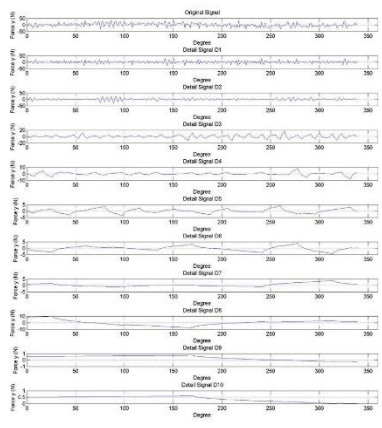
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
62	200	0.15	0.4	0.4	-6	1.288	4.635	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
63	100	0.25	0.6	0.8	11	1.619	5.608	ต่อเนื่อง	



No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษโลหะ	
64	150	0.15	0.4	0.4	11	1.139	4.686	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
65	200	0.25	0.6	0.4	11	1.219	5.194	ต่อเนื่อง

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
66	200	0.15	0.8	0.8	-6	1.322	5.428	ต่อเนื่อง	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
67	200	0.15	0.6	0.8	-6	1.069	5.181	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
68	150	0.25	0.6	0.8	11	1.508	5.608	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
69	200	0.25	0.8	0.8	11	1.270	4.754	แตกหัก	

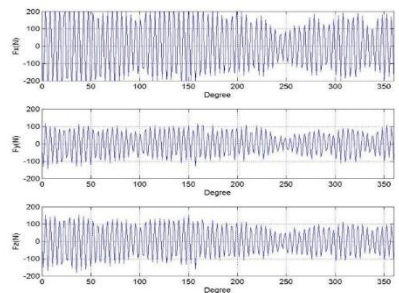
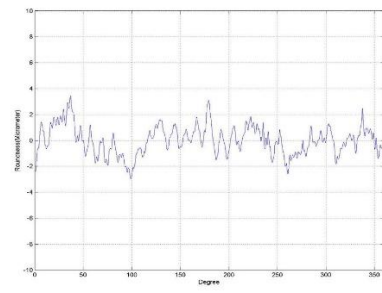
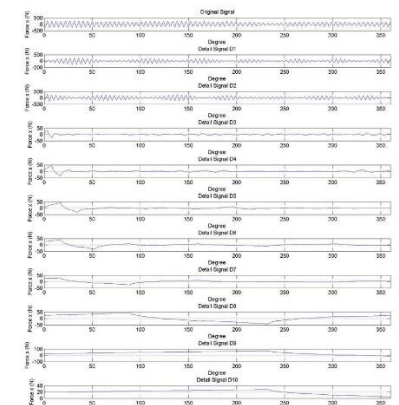
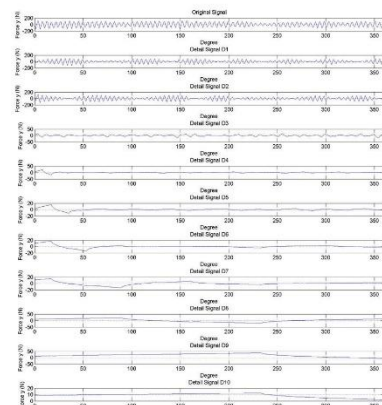
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
70	100	0.20	0.4	0.4	11	1.159	4.837	ต่อเนื่อง	

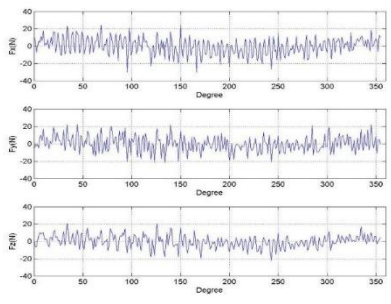
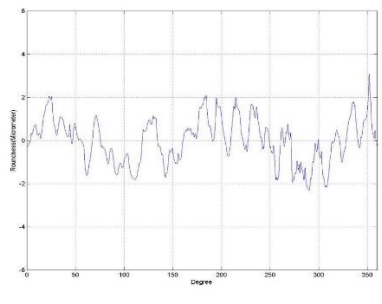
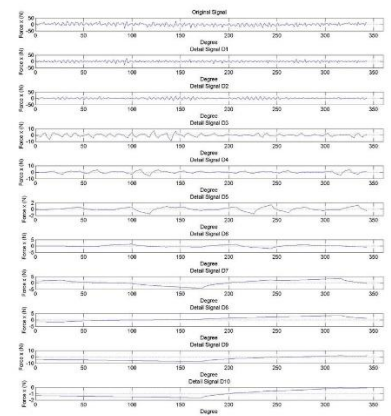
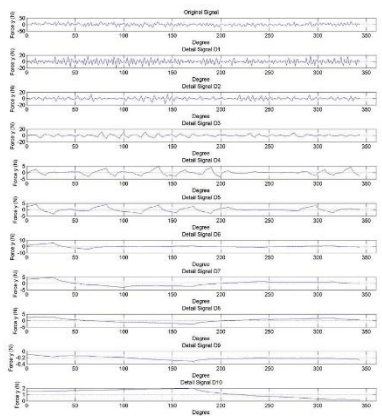
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
71	100	0.25	0.8	0.4	11	1.495	5.962	แตกหัก	

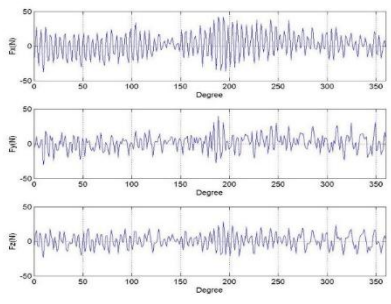
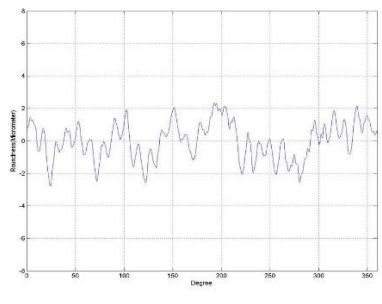
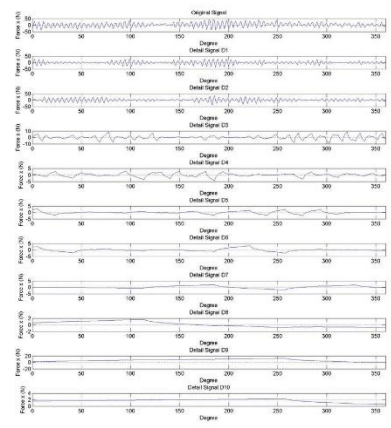
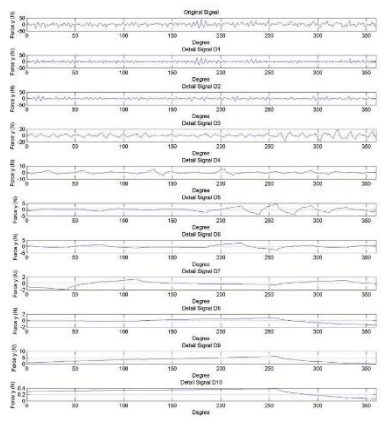


No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
72	150	0.20	0.6	0.8	-6	1.301	5.661	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
73	200	0.20	0.4	0.4	-6	1.365	5.107	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
74	150	0.20	0.8	0.4	-6	1.494	6.13	แตกหัก	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
75	200	0.20	0.6	0.8	-6	1.089	5.397	ต่อเนื่อง
								
								

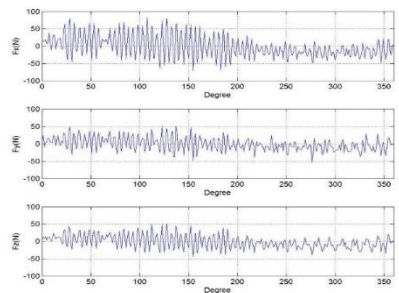
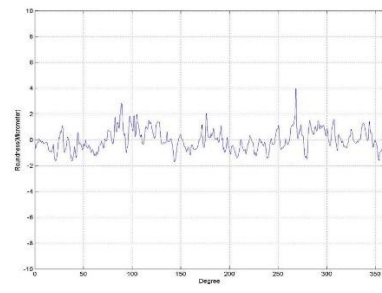
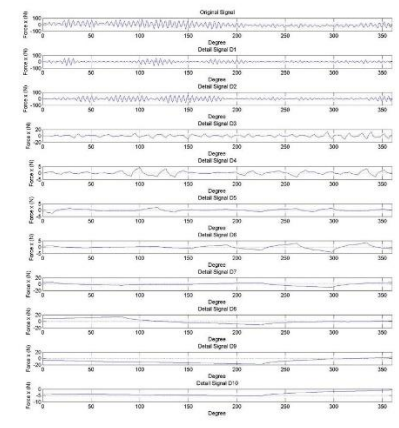
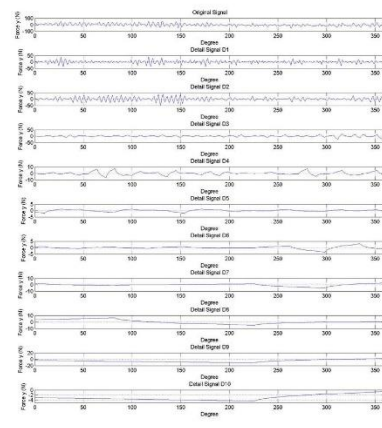
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
76	150	0.20	0.8	0.8	11	1.480	5.112	แตกหัก	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
77	200	0.15	0.4	0.8	-6	0.873	4.099	ต่อเนื่อง	

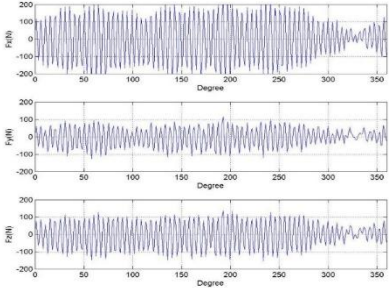
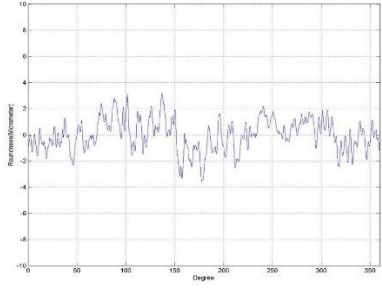
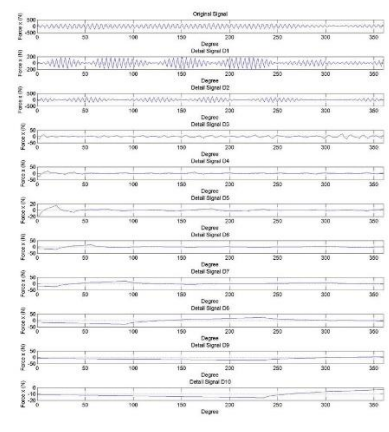
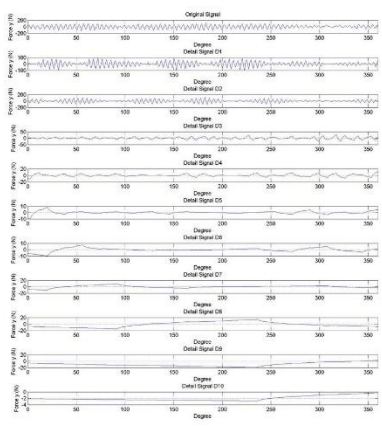
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
78	150	0.20	0.4	0.8	-6	1.083	5.122	ต่อเนื่อง	

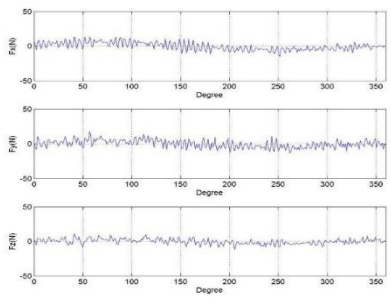
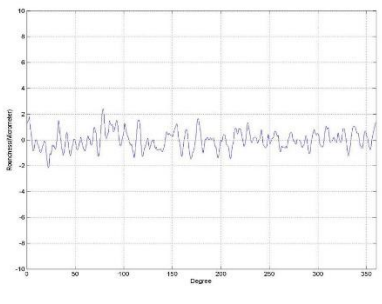
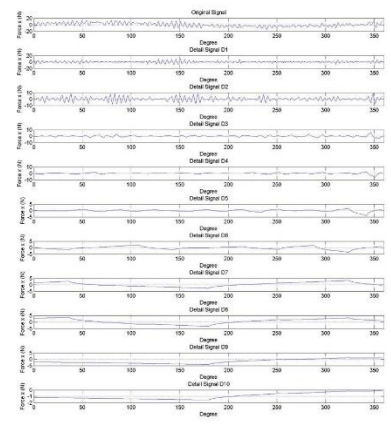
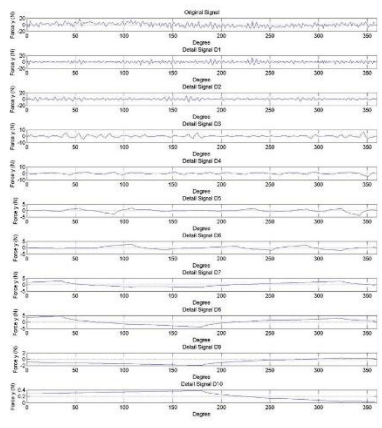
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
79	200	0.25	0.8	0.4	-6	1.892	6.101	แตกหัก	



No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
80	150	0.20	0.8	0.8	-6	1.854	5.667	แตกหัก	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
81	200	0.20	0.8	0.4	-6	1.476	6.018	แตกหัก	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
82	150	0.25	0.6	0.4	-6	2.328	6.725	ต่อเนื่อง+ แตกหัก
								
								

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
83	200	0.20	0.4	0.8	11	1.047	4.047	ต่อเนื่อง	
									
									

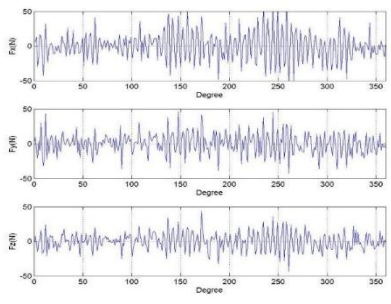
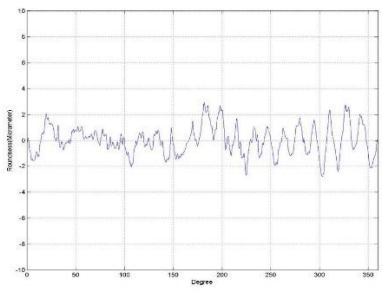
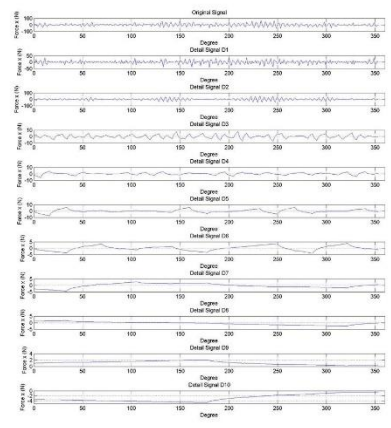
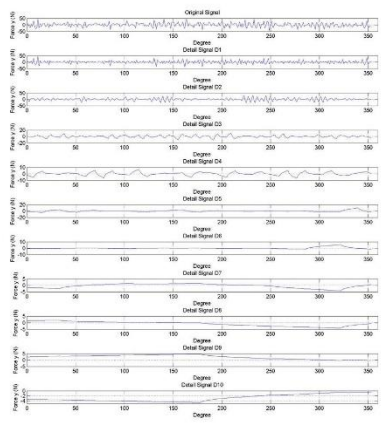
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
84	100	0.15	0.4	0.8	11	1.300	4.674	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
85	100	0.20	0.8	0.8	11	2.486	6.147	แตกหัก	

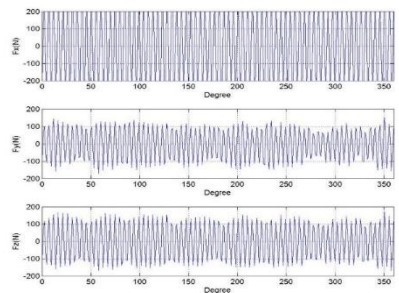
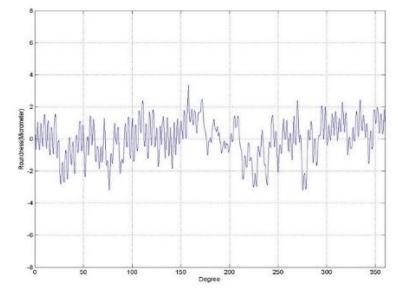
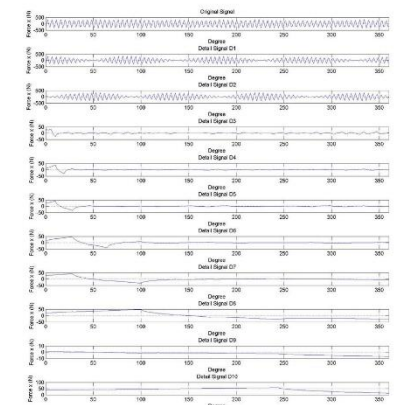
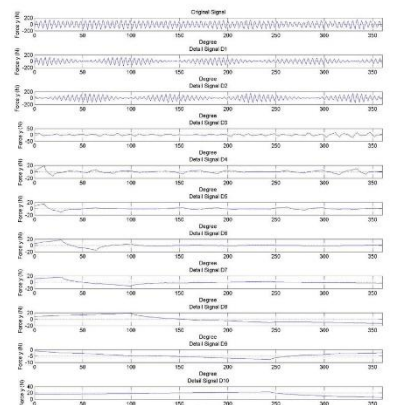
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
86	150	0.15	0.6	0.4	11	1.195	5.249	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
87	150	0.15	0.6	0.4	-6	1.738	5.67	แตกหัก	



No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
88	200	0.15	0.6	0.4	-6	1.143	5.644	แตกหัก	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
89	150	0.20	0.6	0.4	-6	2.028	6.291	ต่อเนื่อง+ แตกหัก	

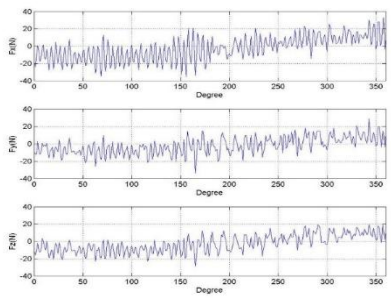
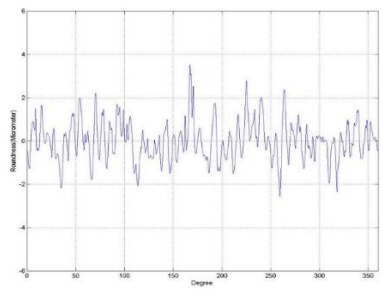
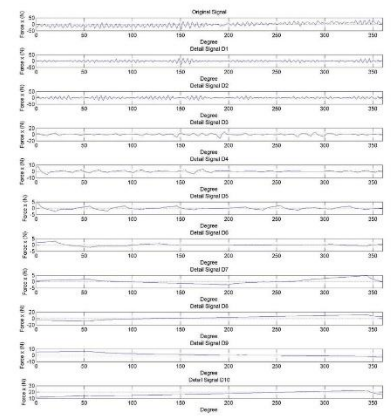
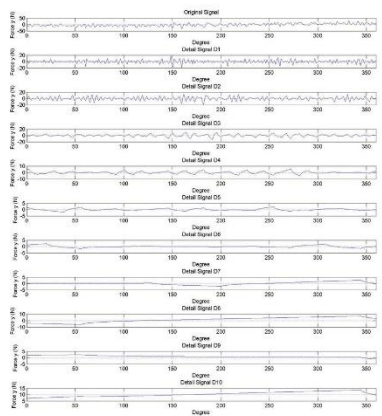
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
90	150	0.20	0.8	0.4	11	2.427	6.578	แตกหัก	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
91	150	0.25	0.4	0.8	-6	1.269	5.621	ต่อเนื่อง	

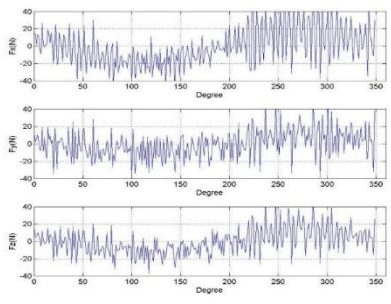
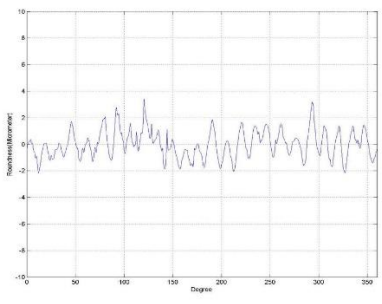
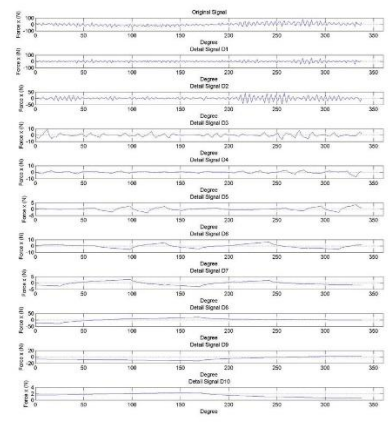
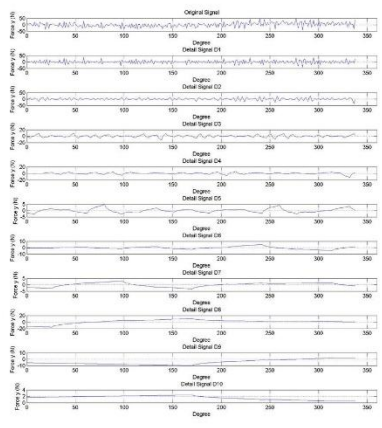
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
92	150	0.20	0.4	0.4	-6	1.732	6.174	ต่อเนื่อง

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
93	200	0.20	0.6	0.4	-6	1.377	5.749	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
94	100	0.25	0.8	0.4	-6	2.502	6.519	แตกหัก

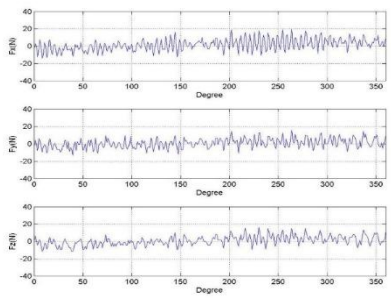
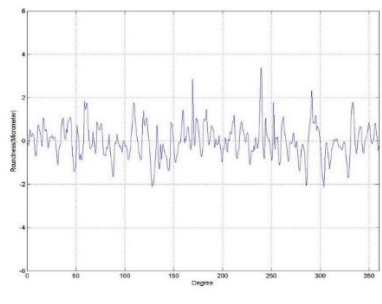
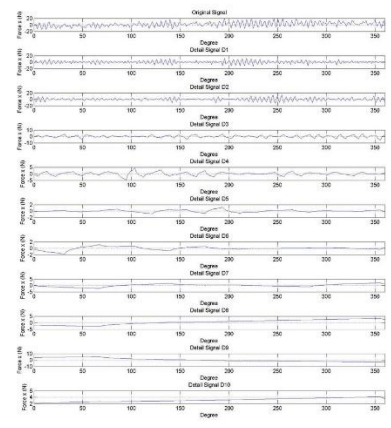
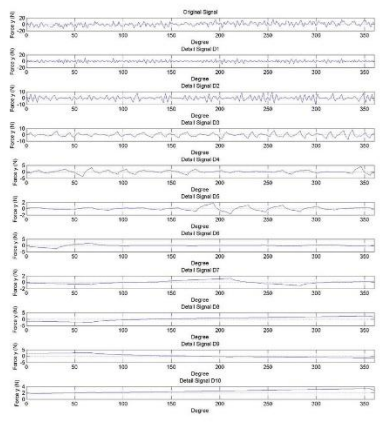
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
95	100	0.20	0.6	0.8	-6	1.722	6.102	ต่อเนื่อง
								
								

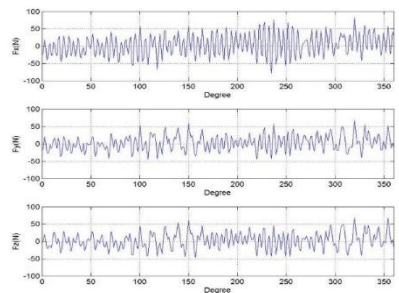
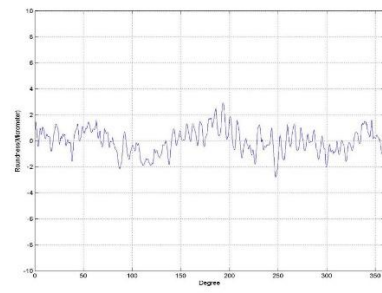
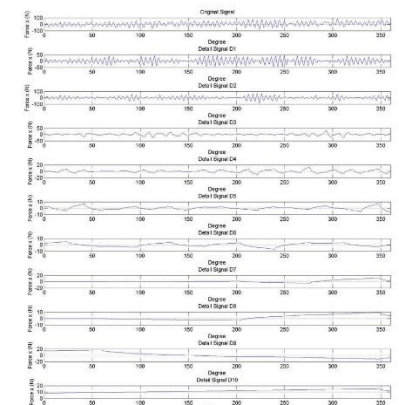
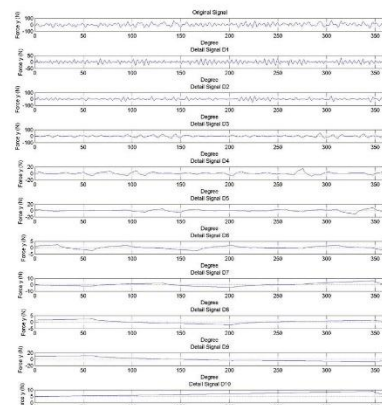


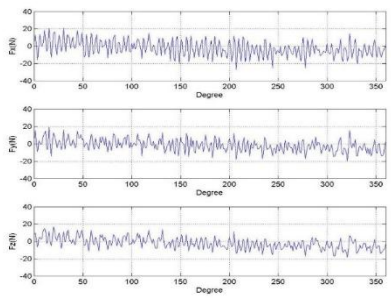
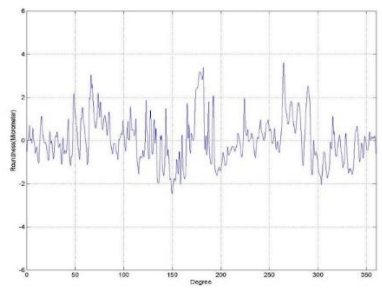
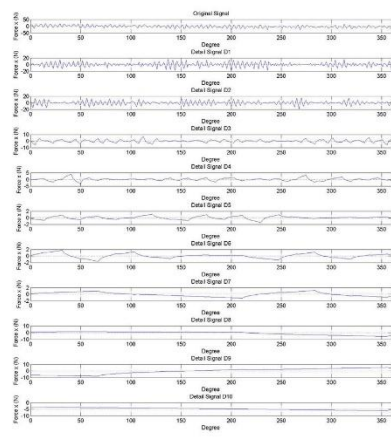
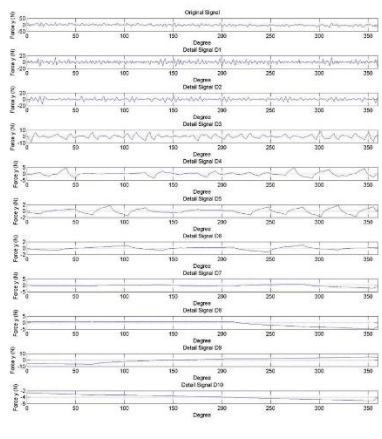
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
96	200	0.20	0.8	0.8	-6	1.369	5.55	แตกหัก	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
97	100	0.15	0.4	0.4	-6	2.009	6.481	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
98	200	0.20	0.4	0.8	-6	0.950	4.156	ต่อเนื่อง

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
99	100	0.15	0.4	0.8	-6	1.299	5.309	ต่อเนื่อง	
									
									

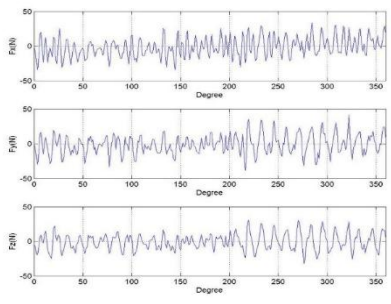
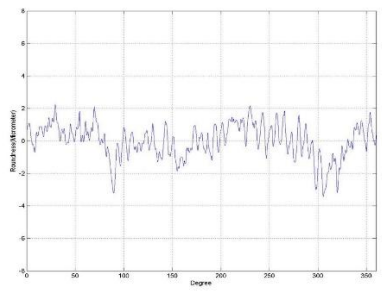
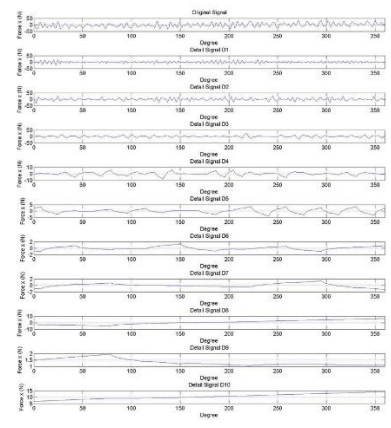
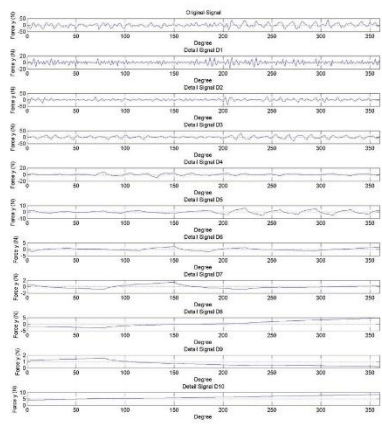
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
100	100	0.20	0.8	0.4	-6	2.158	6.46	แตกหัก	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
101	100	0.25	0.4	0.8	-6	1.523	6.06	ต่อเนื่อง
								
								

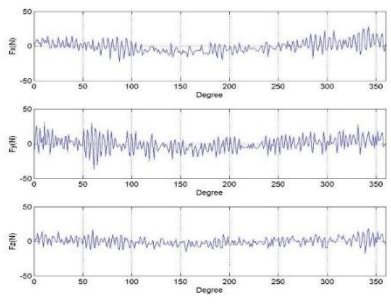
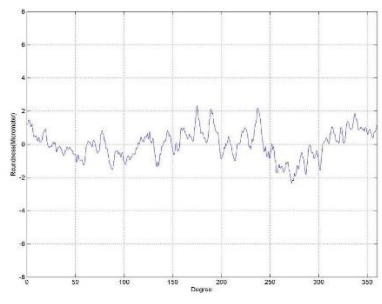
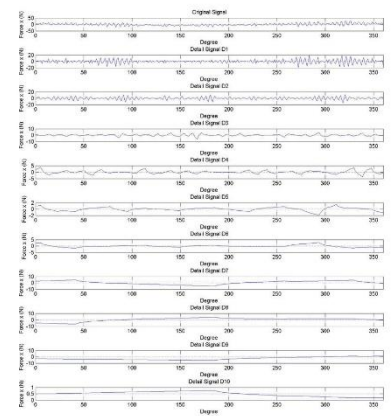
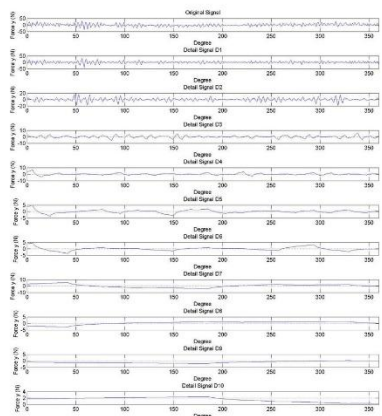
No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
102	150	0.25	0.6	0.4	11	2.851	7.41	ต่อเนื่อง	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	R <sub>n</sub> (mm)	γ	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	R <sub>0</sub> (μm)	สถานะเศษโลหะ
103	100	0.15	0.6	0.4	-6	1.172	5.364	แตกหัก



No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
104	100	0.25	0.6	0.4	11	1.551	5.641	ต่อเนื่อง	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
105	100	0.25	0.8	0.8	11	2.388	5.873	แตกหัก

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
106	200	0.25	0.4	0.4	11	0.978	4.686	ต่อเนื่อง	
									
									

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ	
107	200	0.25	0.8	0.4	11	1.492	6.118	แตกหัก	

No.	Speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth (mm)	$R_n$ (mm)	$\gamma$	$\left(\frac{AVF_x}{AVF_y}\right)$	$R_0$ ( $\mu\text{m}$ )	สถานะเศษ โลหะ
108	100	0.15	0.6	0.4	11	1.438	5.105	ต่อเนื่อง



ตาราง จ.1 ข้อกำหนดทางเทคนิคเครื่องวัดความตงยี่ห้ MITUTOYO รุ่น SJ400

item	Descriptions
Measured profile	P, R, W, DIN4776, MOTIF.R, MOTIF.W
Parameter	Ra, Ry, Rz, Rq, Rt, Rp, Rv, Sm, S, Pc, mr, R3z, $\delta_c$ , HSC, mrd, $\Delta a$ , Lo, Ppi, Sk, Ku, $\Delta q$ , Rx, Rpk, Rvk, Rk, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo, R, AR, W, AW, Wx, Wte, Rz1max, Rmax*1
Filter	2RC, PC75, GUASS
Cutoff legth	0.08, 0.25, 0.8, 2.5, 8mm (.003, .01, .03, .1, .3 in)
Number of sampling length	1, 3, 5, and L (arbitrary length)
Resolution	0.000125 $\mu$ m/.00492 $\mu$ in (16 bits)
Statistical data item	Mean, Maximum, Minimum, Standard deviation (one parameter per profile), GO/NG judgement (UL/LL, three parameters per profile)
Internal memory capacity	Up to 5 measurement condition files
External I/O	RS-232C, SPC, Memory card (option)
Power supply	AC adapter, Buit-in battery pack (nikel-hydrogen)



ตาราง จ.2 ข้อกำหนดทางเทคนิคเครื่องวัดความกลม TOKYO SEIMITSU CO.,LTD

ROUND COM 43C

item		Descriptions
Measuring range	Max. measuring diameter	∅ 250 mm
	Left/right feed (R axis)	125 mm
	Up/down feed (Z axis)	300 mm
	Max. load diameter	∅ 400 mm
	Max. measuring height	OD: 520mm / ID: 300mm
Rotation accuracy (ISO 4291/ JIS B7451)		(0.02 + 6H / 10000) μm
Straightness accuracy		0.25 μm /100mm, 0.8 μm /300mm
Parallelness accuracy		1.5 μm /300mm
Rotation speed (θ axis)		6/min
Up/down speed (Z axis)		Measuring 0.6 – 6 mm/s, Movement 15 mm/s
Radius speed (R axis)		5 mm/s
Detector		Linearity range ±400 μm, Measuring force 70 mN, Stylus shape ∅ 1.6mm carbide ball.
Roundness evaluation of profile error		MZC (min. range center line method), LSC (min. square center line method), MIC (max. inscribed circle center line method), MCC (min. circumscribed circle center line method), N.C. (no correction)
Uncertainties of measurement	Straightness	± 0.015 μm.
	Cylindricity	± 0.026 μm.
	Roundness	± 0.050 μm.
Measuring items	Rotation direction (θ)	Roundness, flatness, parallelness, concentricity, coaxiality,
		cylindricity, diameter deviation, squareness, non-uniformity, run-out
	Rectilinear direction up/down direction (Z)	Straightness, taper, cylindricity, squareness, parallelness



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายมุขมิณ ศาสน์สันติวงศ์ เกิดเมื่อ 12 สิงหาคม 2529 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาช่างอิเล็กทรอนิกส์ จากโรงเรียนพระรามหก เทคโนโลยี กรุงเทพมหานคร ต่อมาเข้าศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2553 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

