

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานกับแรงตดในกระบวนการกลึง



นางสาวธรรารัตน์ ชาญสูงเนิน

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 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF RELATION BETWEEN STRAIGHTNESS AND CUTTING FORCE
IN TURNING PROCESS

Miss Thararath Shansungnoen



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 2014
Copyright of Chulalongkorn University

ธารารัตน์ ชาญสูงเนิน : การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานกับแรงตัด
ในกระบวนการกลึง (A STUDY OF RELATION BETWEEN STRAIGHTNESS AND
CUTTING FORCE IN TURNING PROCESS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.
สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, 201 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงาน
กับอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงซีเอ็นซี โดยได้นำโมมิเตอร์ถูกติดตั้งบนชุดป้อมมิต
ของเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อวัดแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัด ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัด และความตรง
ของชิ้นงาน ถูกทดสอบภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความ
ลึกตัด รัศมีจุมุมมิต และมุมคายเศษโลหะ

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าความตรงของชิ้นงานมีแนวโน้มที่ดีขึ้น เมื่อใช้
ความเร็วตัด รัศมีจุมุมมิต และมุมคายเศษโลหะมากขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัต และความ
ตรงสามารถทดสอบได้จากการพิจารณาในโดเมนความถี่ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast
Fourier Transform) ซึ่งความถี่ของสัญญาณทั้งสองเกิดขึ้นที่ค่าเดียวกัน ดังนั้น อัตราส่วนแรงตัดจึง
สามารถนำมาใช้ในการทำนายความตรงของชิ้นงานได้ในขณะตัด แม้เงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนไป

อัตราส่วนแรงตัดถูกนำมาใช้เพื่อทำนายความตรงของชิ้นงานในระหว่าง
กระบวนการกลึง ในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณถูกนำมาใช้ใน
การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถดถอยพหุคูณของแบบจำลองที่ใช้ในการพยากรณ์ความตรงของ
ชิ้นงานในขณะตัด ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อตรวจสอบความแม่นยำ
ของแบบจำลองโดยการยืนยันผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดใหม่ พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น
สามารถพยากรณ์ค่าความตรงได้อย่างแม่นยำภายใน $\pm 10\%$ ของค่าความตรงที่วัดได้ โดยค่าความ
แม่นยำของการทำนายความตรงของชิ้นงานเท่ากับ 91.85 %

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5470947621 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: TURNING / STRAIGHTNESS / CUTTING FORCE RATIO

THARARATH SHANSUNGNOEN: A STUDY OF RELATION BETWEEN STRAIGHTNESS AND CUTTING FORCE IN TURNING PROCESS. ADVISOR: ASSOC. PROF. SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, D.Eng., 201 pp.

The objective of this research is to examine the relation between the straightness and the cutting force ratio during the CNC turning process. The cutting force is monitored and obtained by installing the dynamometer on the turret of CNC turning machine. The relation between the cutting force ratio and the straightness is investigated under the various cutting conditions, which are the cutting speed, the feed rate, the depth of cut, the tool nose radius and the rake angle.

The experimentally obtained results showed that the straightness can be improved with an increase in cutting speed, tool nose radius and rake angle. The relation between the dynamic cutting force and the straightness profile can be proved by checking the frequency of the cutting force in frequency domain with the use of the Fast Fourier Transform (FFT), which is the same as the straightness profile.

Hence, the cutting force ratio can be used to predict the straightness during the cutting regardless of the cutting conditions. The cutting force ratio is proposed to predict the straightness during turning process by employing the exponential function for the sake of straightness. The multiple regression analysis has been utilized to calculate the regression coefficients of the in-process prediction of straightness model by using the least square method at 95% confident level. It has been proved by the cutting tests that the in-process straightness can be predicted during the cutting within $\pm 10\%$ measured straightness with the high accuracy of 91.85 %.

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้แนวทางในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานวิจัยจนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดต่าง ๆ พร้อมทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณแม่ที่คอยให้กำลังใจ และเป็นแรงผลักดันให้มีวันนี้ และขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคน และหัวหน้าสำหรับความช่วยเหลือ และกำลังใจซึ่งเป็นส่วนช่วยทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จลงได้ด้วยดี



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	11
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	11
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	12
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	12
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	13
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	14
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	14
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	47
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	47
3.2 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	47
3.3 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	54
3.5 การออกแบบการทดลอง	56

3.6 การพัฒนาสมการทำนายความตรงของชิ้นงานในขณะตัด	61
3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล	62
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง	64
4.1 ผลการทดลอง.....	64
4.2 การวิเคราะห์ความตรงของชิ้นงาน และแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่.....	69
4.3 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา.....	74
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงาน และอัตราส่วนแรงตัด	75
4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับเงื่อนไขการตัดและการเกิด เศษโลหะ	75
4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	92
4.7 การสร้างสมการทำนายความตรงของชิ้นงาน	95
4.8 การทดสอบความแม่นยำของสมการ	99
4.9 การวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตด้วยการแปลงเวฟเล็ต.....	102
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	109
5.1 สรุปผลการวิจัย	109
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	110
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย	111
5.4 ข้อเสนอแนะ	111
รายการอ้างอิง	113
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	201

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 เงื่อนไขการตัด	12
ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดลักษณะของความทรงต่าง ๆ [25].....	31
ตารางที่ 2.2 แสดงรายละเอียดการระบุพิกัดความเื้อของความทรงบนแบบ.....	32
ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะเส้นตรงบนพื้นผิวทรงกระบอก [26]	34
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการตัด	47
ตารางที่ 3.2 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	56
ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลอง.....	57
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง.....	65
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย S_t	96
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย S_t	97
ตารางที่ 4.4 เงื่อนไขการตัดสำหรับทดสอบความแม่นยำของสมการ	100
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองที่ใช้ทดสอบความแม่นยำของสมการ โดยทำการวิเคราะห์ผล	100

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่ 1.1 ข้อมูลดัชนีผลผลิตในปี 2556-2557	1
รูปที่ 1.2 การพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตเชิงกล [3].....	3
รูปที่ 1.3 แรงตัดในแนวแกน 3 มิติ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกลึง.....	7
รูปที่ 1.4 กระบวนการกลึงชิ้นงานและการวัดความตรงของชิ้นงาน	8
รูปที่ 1.5 การวิเคราะห์แรงตัด และความตรงของชิ้นงานในโดเมนเวลา	8
รูปที่ 1.6 การวิเคราะห์แรงตัด และความตรงของชิ้นงานในโดเมนความถี่.....	9
รูปที่ 1.7 แสดงทิศทางการวัดความตรงของชิ้นงานและทิศทางการป้อนตัดชิ้นงาน	10
รูปที่ 1.8 แสดงแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดในแนวป้อนตัดชิ้นงานระหว่างตัด	10
รูปที่ 2.1 รูปแบบพื้นฐานของกระบวนการตัด [21].....	14
รูปที่ 2.2 ลักษณะงานที่สร้างขึ้นจากการกลึง [22].....	15
รูปที่ 2.3 เครื่องกลึง CNC (CNC Turning Machine).....	17
รูปที่ 2.4 ความเร็วตัดในการกลึง	17
รูปที่ 2.5 ลักษณะทางเรขาคณิตของการกลึงงานรูปทรงกระบอก	18
รูปที่ 2.6 รูปทรงเรขาคณิตของมีดตัด [22]	21
รูปที่ 2.7 แบบจำลองของการตัด	21
รูปที่ 2.8 สภาวะความเค้นที่จุดต่าง ๆ บนกราฟความเค้น – ความเครียด.....	22
รูปที่ 2.9 ระบบแรงบนคมตัดของการตั้งฉาก	22
รูปที่ 2.10 ระบบแรงเสียดทาน.....	23
รูปที่ 2.11 ระบบของแรงเฉือน	24
รูปที่ 2.12 (a) แรงเฉือนที่กระทำบนระนาบเฉือนในการกลึง (b) ความสัมพันธ์ระหว่างแรง เฉือน แรงตัด และแรงป้อน.....	25
รูปที่ 2.13 รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงและวิธีการสร้าง	25

รูปที่ 2.14 แรงที่เกิดในขณะตัดชิ้นงานของกระบวนการกลึง	26
รูปที่ 2.15 สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น	27
รูปที่ 2.16 การแปลงสัญญาณจากโดเมนของเวลาไปยังโดเมนความถี่.....	28
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างคลื่นสัญญาณ	29
รูปที่ 2.18 ข้อมูลที่ไม่มีรูปแบบแน่นอน.....	29
รูปที่ 2.19 คำจำกัดความของแนวตรง [24].....	30
รูปที่ 2.20 แสดงผลที่ได้จากการวัดความตรง.....	35
รูปที่ 2.21 วิธีการตัดสินแบบ N. C.	36
รูปที่ 2.22 วิธีการตัดสินแบบ LSC.....	36
รูปที่ 2.23 วิธีการตัดสินแบบ MZC	37
รูปที่ 3.1 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	49
รูปที่ 3.2 เม็ดมีด รัศมีงูมมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	49
รูปที่ 3.3 เม็ดมีด รัศมีงูมมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	49
รูปที่ 3.4 เม็ดมีด รัศมีงูมมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	50
รูปที่ 3.5 เม็ดมีด รัศมีงูมมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา.....	50
รูปที่ 3.6 ด้ามมีด (มุมคายเศษโลหะเป็นลบ).....	50
รูปที่ 3.7 ด้ามมีด (มุมคายเศษโลหะเป็นบวก).....	51
รูปที่ 3.8 เครื่องกลึงซีเอ็นซี ชนิด 4 แกน.....	51
รูปที่ 3.9 ไดนาโมมิเตอร์สำหรับวัดแรงตัด	52
รูปที่ 3.10 ออสซิลโลสโคป	52
รูปที่ 3.11 เครื่องขยายสัญญาณ	53
รูปที่ 3.12 เครื่องวัดความขรุขระผิว สำหรับวัดความตรง.....	53
รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	54
รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	55

รูปที่ 4.1 ลักษณะข้อมูลค่าความตรงของชิ้นงานในโดเมนเวลา	70
รูปที่ 4.2 ลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา	70
รูปที่ 4.3 ลักษณะข้อมูลค่าความตรงของชิ้นงานในโดเมนความถี่ ที่ความถี่ 30 Hz.....	73
รูปที่ 4.4 ลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ ที่ความถี่ 30 Hz	73
รูปที่ 4.5 แสดงการคำนวณแรงป้อนตัดสถิตและแรงป้อนตัดพลวัต.....	74
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานและอัตราส่วนแรงป้อนตัด	75
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับความเร็วตัดต่าง ๆ ที่อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร.....	76
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับความเร็วตัดต่าง ๆ ที่อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร.....	76
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับความเร็วตัดต่าง ๆ ที่อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร	77
รูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.8 และ คมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	77
รูปที่ 4.11 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของความตรงของชิ้นงานในกระบวนการกลึง อัตราป้อนตัด.....	78
รูปที่ 4.12 แสดงเศษโลหะที่ความเร็วตัดต่าง ๆ ที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	78
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร.....	79
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร.....	79
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับอัตราป้อนตัดต่าง ๆ และความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร.....	80
รูปที่ 4.16 แสดงพื้นที่การตัดสำหรับอัตราการป้อนตัดที่แตกต่างกัน.....	80

รูปที่ 4.17 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมีด 0.8 และ คุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	81
รูปที่ 4.18 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของความตรงของชิ้นงานในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมีด 0.8 และ คุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	81
รูปที่ 4.19 แสดงเศษโลหะที่อัตราป้อนตัดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา	82
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับความลึกตัดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ และรัศมีจุมกมีด 0.4 มิลลิเมตร	82
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับความลึกตัดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ และรัศมีจุมกมีด 0.8 มิลลิเมตร	83
รูปที่ 4.22 แสดงพื้นที่การตัดสำหรับความลึกตัดที่แตกต่างกัน แต่อัตราการป้อนตัดคงที่.....	83
รูปที่ 4.23 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีจุมกมีด 0.8 และ คุมคายเศษโลหะ -6 องศา	84
รูปที่ 4.24 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของความตรงของชิ้นงานในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีจุมกมีด 0.8 และ คุมคายเศษโลหะ -6 องศา	84
รูปที่ 4.25 แสดงเศษโลหะที่ความลึกตัดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีจุมกมีด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา	85
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับรัศมีจุมกมีดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร	85
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับรัศมีจุมกมีดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร	86
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับรัศมีจุมกมีดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร	86
รูปที่ 4.29 แสดงอิทธิพลของรัศมีจุมกมีดต่อผิวของชิ้นงาน	87

รูปที่ 4.30 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา	87
รูปที่ 4.31 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของความตรงของชิ้นงานในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และ มุมคายเศษโลหะ -6 องศา	88
รูปที่ 4.32 แสดงเศษโลหะที่ใช้รัศมีงูมกมิตต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	88
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับมุมคายเศษโลหะต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร.....	89
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับมุมคายเศษโลหะต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร.....	89
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับมุมคายเศษโลหะต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร.....	90
รูปที่ 4.36 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา	90
รูปที่ 4.37 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของความตรงของชิ้นงานในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา.....	91
รูปที่ 4.38 แสดงเศษโลหะที่ใช้มุมคายเศษโลหะต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีงูมกมิต 0.4 มิลลิเมตร.....	91
รูปที่ 4.39 Normal Probability Plot ของข้อมูลความตรงของผิวชิ้นงาน (S_r).....	93
รูปที่ 4.40 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความตรงของชิ้นงาน (S_t).....	94
รูปที่ 4.41 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความตรงของผิวชิ้นงาน (S_r).....	95
รูปที่ 4.42 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของผิวชิ้นงาน (S_r) .	102
รูปที่ 4.43 เวฟเล็ทที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า a และ b ต่าง ๆ กัน.....	104

รูปที่ 4.44 ลักษณะของเวฟเล็ทที่แฟมมีลีต่าง ๆ..... 104

รูปที่ 4.45 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเล็ทในโดเมนเวลาของ F_x 105

รูปที่ 4.46 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเล็ทในโดเมนความถี่ของ F_x 105

รูปที่ 4.47 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเล็ทในโดเมนเวลาของ F_y 106

รูปที่ 4.48 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเล็ทในโดเมนความถี่ของ F_y 106

รูปที่ 4.49 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเล็ทในโดเมนเวลาของ F_z 107

รูปที่ 4.50 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเล็ทในโดเมนความถี่ของ F_z 107



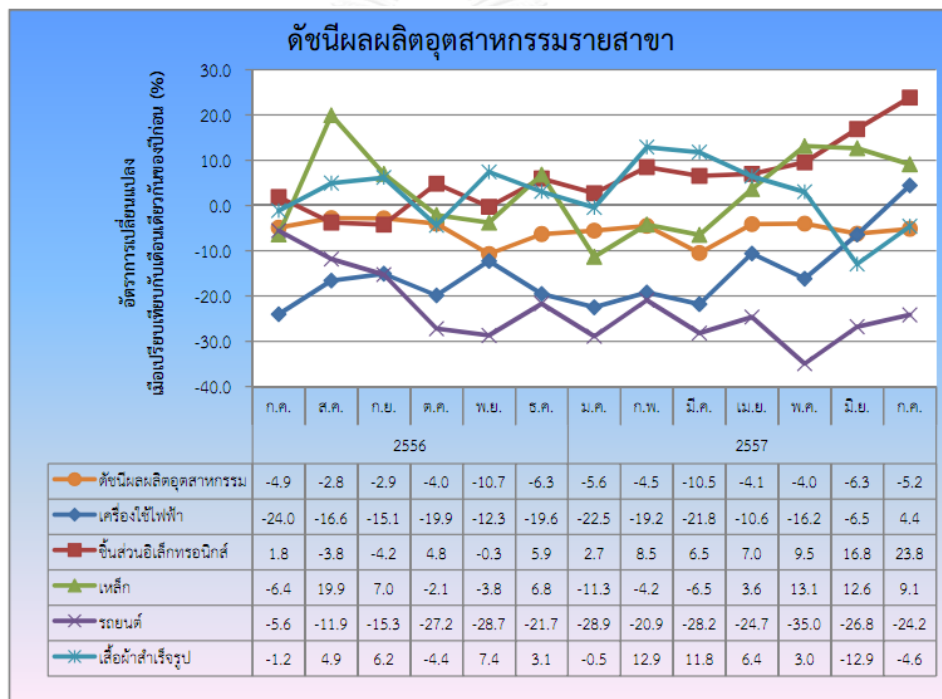
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

1.1.1 ภาพรวมของอุตสาหกรรมการผลิต

นับแต่อดีตจนถึงปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทยมาโดยตลอด ซึ่งส่วนใหญ่มูลค่าผลผลิตอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นมาจากการผลิตสินค้าเพื่อการส่งออก และยังเป็นสินค้าที่ต้องใช้เทคโนโลยีระดับกลางและสูง ที่ต้องพึ่งพาการนำเข้าชิ้นส่วนเครื่องจักร เทคโนโลยี [1]



รูปที่ 1.1 ข้อมูลดัชนีผลผลิตในปี 2556-2557

จากรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นแนวโน้มของการผลิตภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย ซึ่งโดยรวมมีการหดตัวร้อยละ 5.2 เมื่อเทียบกับปีที่แล้ว แต่อย่างไรก็ตาม การผลิตเพื่อการส่งออกยังคงขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสถานการณ์การผลิตมีแนวโน้มที่ดีขึ้น จากความเชื่อมั่นต่อสถานการณ์ภายในประเทศ โดยอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ขยายตัวถึงร้อยละ 23.8 จากการส่งออกที่เพิ่มขึ้นในตลาดหลักอย่างสหรัฐอเมริกา และสหภาพยุโรป การผลิตเหล็กมีการขยายตัวร้อยละ

ละ 9.1 จากการกลับมาผลิตของผู้ประกอบการเหล็กที่หยุดผลิตไปในช่วงก่อนหน้า ตามความต้องการเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ที่ถึงแม้จะมีหดตัวลงมาบ้างจากปีที่แล้ว จากการอิมพอร์ตของโครงการรถคันแรก แต่ก็ยังคงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น รวมถึงอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า ประกอบกับการต้องการเหล็กในกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการก่อสร้างเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของภาคอสังหาริมทรัพย์ [2]

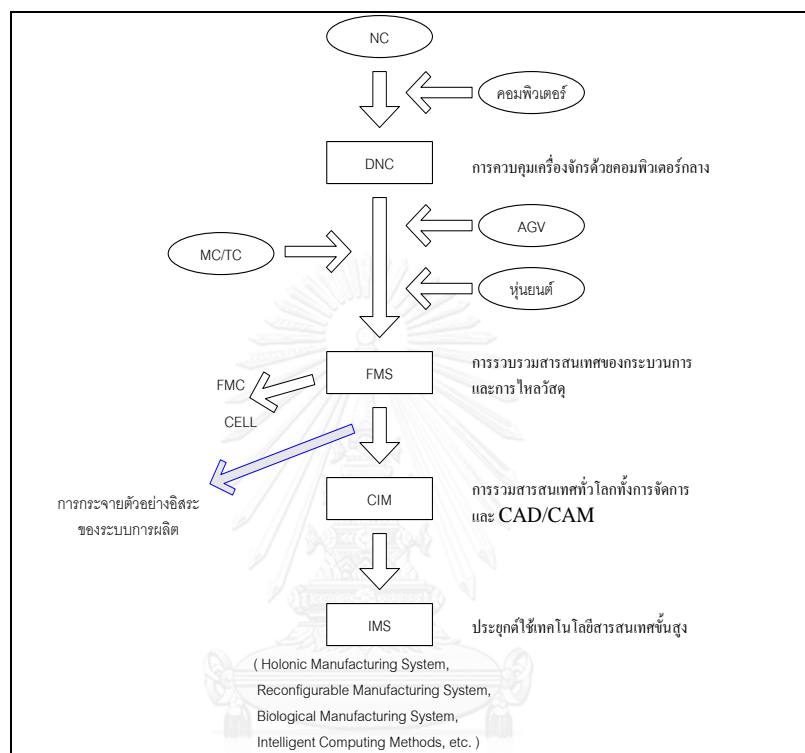
ด้วยเหตุนี้ ผู้ประกอบการหลายแห่งจึงมีมาตรการในการปรับโครงสร้างการผลิตสินค้าของตนเองให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การนำเครื่องจักรกลเข้ามาใช้แทนแรงงานคน การลดต้นทุนการผลิตด้านวัตถุดิบลง และการหาเทคนิคใหม่ ๆ เพื่อเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต เป็นต้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว พบว่าอุตสาหกรรมของไทยส่วนใหญ่เน้นมีวัตถุดิบที่เป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตคือ เหล็กกล้าคาร์บอน

เนื่องจาก เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นที่ต้องการมากในอุตสาหกรรมการผลิต จึงทำให้ราคามีแนวโน้มสูงขึ้น ดังนั้น เพื่อควบคุมต้นทุนทางด้านวัตถุดิบ สิ่งที่สำคัญในการปฏิบัติในกระบวนการผลิตคือ ควบคุมกระบวนการผลิตให้ได้ชิ้นงานที่ตรงตามแบบ และอยู่ในค่าความเผื่อให้มากที่สุด เพื่อลดปัญหาการเกิดของเสียในระบบ

1.1.2 การพัฒนาด้านเทคโนโลยีการผลิต [3]

การพัฒนาของเทคโนโลยีสำหรับระบบการผลิตได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีจุดเริ่มต้นจากระบบอัตโนมัติ คือ การสร้างเครื่องจักรควบคุมเชิงตัวเลข (Numerical Control) ต่อจากนั้นมีการพัฒนามาเป็นระบบการควบคุมเชิงตัวเลขทางตรง (Direct NC, DNC) และในลำดับต่อมา คอมพิวเตอร์กลาง ถูกนำมาใช้ในการควบคุมเชิงตัวเลขหลาย ๆ เครื่อง โดยระบบดีเอ็นซีถูกบ่งชี้ในรูปแบบของผลลัพธ์ของการควบคุมการไหลของวัสดุในระบบการผลิต ซึ่งก็คือระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น (Flexible Manufacturing System, FMS) โดยชิ้นงานและเครื่องมือต่าง ๆ ได้ถูกขนส่งระหว่างคลังสินค้ากับเครื่องจักรอย่างอัตโนมัติโดยรถเอจีวี (Automated Guide Vehicles, AGVs) และมีการขนถ่ายโดยหุ่นยนต์อุตสาหกรรมและอื่น ๆ ซึ่งเครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่มีความซับซ้อน เช่น เครื่องกลึงซีเอ็นซีเซ็นเตอร์ (CNC Turning Center: TC) ได้มีบทบาทเป็นอย่างมาก ในความเป็นจริงแล้วระบบแบบยืดหยุ่นนั้นจะเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบ ๆ เท่านั้น ซึ่งระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นนั้นยังคงต้องการการลงทุนสูงในการติดตั้งระบบและในขณะเดียวกันก็ไม่ง่ายที่จะปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อที่จะจัดการกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์ ด้วยเหตุนี้ระบบการผลิตแบบเซลล์

(Flexible Manufacturing Cell, FMC) จึงเข้ามาแทนที่ระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น ซึ่งระบบการผลิตแบบเซลล์เป็นที่นิยมมากกว่า และบางครั้งการตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติด้วยระบบการผลิตแบบเซลล์นั้นมีต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น นอกจากนี้ยังเดินเครื่องได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นมากกว่าที่จะจัดการกับความเปลี่ยนแปลงของการสั่งซื้อของลูกค้า



รูปที่ 1.2 การพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตเชิงกล [3]

การผลิตแบบผสมผสานด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Integrated Manufacturing, CIM) เป็นการนำความสามารถของคอมพิวเตอร์มาช่วยในการประมวลผลสารสนเทศของระบบการผลิต โดยเพิ่มเข้ามาในขอบเขตของกิจกรรมการผลิตอันได้แก่ การควบคุมกระบวนการผลิต และการบริการ แต่อย่างไรก็ตาม ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนำมาซึ่งความยืดหยุ่นและความสามารถในการผลิตที่เพิ่มขึ้นในการผลิตจริง ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น มีความคาดหวังว่าระบบการผลิตที่แจกจ่ายได้ด้วยตัวเอง (Autonomous distributed manufacturing systems) ที่ประกอบด้วยเทคโนโลยีสารสนเทศขั้นสูงจะเป็นคำตอบของการผลิตในอนาคตที่สามารถผลิตสินค้าที่มีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ใหม่ได้มากขึ้นอันเนื่องมาจากอุปสงค์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาจากลูกค้า ระบบนี้มีชื่อว่ารระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing System, IMS) เพื่อตอบสนองต่อระบบ

การผลิตอัจฉริยะ ดังนั้นเครื่องจักรกลอัจฉริยะจึงได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้น โดยเครื่องจักรกลที่มีความอัจฉริยะอยู่ในจะสามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง สามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่น ๆ และสิ่งอำนวยความสะดวกทางการผลิต เพื่อให้มีความเข้าใจในประวัติของการพัฒนาของกระบวนการผลิตจากในอดีตไปจนถึงกระบวนการผลิตที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.2

เทคโนโลยีควบคุมเครื่องจักรกลซีเอ็นซีได้ถูกพัฒนาไปอย่างมาก ซึ่งเครื่องจักรกลเชิงปัญญาถูกคาดหวังอย่างมากในอนาคต ในเรื่องความสามารถตัดสินใจแทนผู้ปฏิบัติงานและเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของการตัดได้โดยอัตโนมัติ ในขณะที่เครื่องจักรกลปัจจุบันจะต้องกำหนดเงื่อนไขการตัดให้แน่นอนก่อนที่จะเริ่มทำการตัด เครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลขนั้นมีความสามารถมากกว่าเครื่องจักรกลแบบธรรมดา อัตราผลิตภาพจะเพิ่มขึ้นอย่างมากด้วยการลดเวลาที่ไม่ได้ผลิต (Non-productive time) ในวัฏจักรการผลิตลง เครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่ซับซ้อนหลายเครื่องได้ถูกพัฒนา และนำมาใช้ในทางปฏิบัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ซึ่งเครื่องจักรกลซีเอ็นซีสมัยใหม่ได้มีการติดตั้งชุดเปลี่ยนเครื่องมืออัตโนมัติ ทำให้ช่วยลดเวลาการเปลี่ยนเครื่องมือตัดลงได้มาก ความก้าวหน้าที่สำคัญของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีคือ การควบคุมที่สามารถปรับได้ (Adaptive control, AC) กระบวนการตัดได้ถูกรวมอยู่ในวงจรการควบคุมแบบป้อนกลับของเครื่องจักร เช่นเซอร์หลายรูปแบบได้ถูกพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องจักรกลซีเอ็นซีเพื่อตรวจสอบสถานะของการตัดเพื่อที่จะป้อนกลับสารสนเทศต่าง ๆ ด้วย

1.1.3 ที่มาและความสำคัญ

ขณะที่การแข่งขันในภาคอุตสาหกรรมมีความรุนแรงมากขึ้น โดยผู้ประกอบการแต่ละแห่งมีการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต ลดของเสียในระบบ เพื่อควบคุมต้นทุนการผลิต นั้นหมายความว่าความผิดพลาดของขนาดและรูปร่างทางเรขาคณิตของชิ้นงานนั้นจะต้องมีการควบคุมและจำกัดขอบเขตให้มากยิ่งขึ้น โดยทั่วไป ชิ้นงานหลักในกระบวนการผลิต มักมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก เช่น แกนล้อ, เพลา ซึ่งข้อจำกัดที่จะนำมาระบุความแม่นยำของรูปร่าง และขนาดของชิ้นงานเหล่านี้ คือ ขนาด (diameter), ความกลม (roundness) ความเป็นทรงกระบอก (cylindrical), ความเรียบ (flatness) และความตรง (straightness) ในการออกแบบเชิงวิศวกรรมจะต้องมีการกำหนดข้อจำกัดของขนาด รูปร่าง และค่าความเผื่อไว้ และสิ่งเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดให้ชิ้นงานที่ออกมาจากกระบวนการผลิตสามารถนำไปใช้งานต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตที่จำเป็นจะต้องมีการประกอบด้วยชิ้นส่วนหลาย ๆ ชิ้นเข้าด้วยกัน หากเกิดการบิด

เบี้ยวของรูปร่างชิ้นงาน อันเนื่องมาจากข้อจำกัดเหล่านี้ จะก่อให้เกิดการหยุดชะงักในสายการผลิต เป็นเหตุให้เวลาในการผลิตล่าช้า ส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตเป็นอย่างมาก

ความตรง (Straightness) เป็นตัวกำหนดความแม่นยำของรูปร่างชิ้นงานที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการออกแบบเชิงวิศวกรรม ยกตัวอย่างเช่น แกนสปินเดิลมอเตอร์ที่เป็นส่วนประกอบสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ กระบอกลูกสูบ ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาวิธีการตรวจสอบความตรงของชิ้นงานด้วยวิธีการต่าง ๆ [4, 5] เพื่อให้ได้รับค่าที่แม่นยำมากขึ้น แต่ด้วยข้อจำกัดของการวัดที่ต้องกระทำหลังจากจบกระบวนการผลิต ทำให้ไม่สามารถรู้ได้ทันทีว่าชิ้นงานเหล่านั้นตรงตามแบบหรือไม่ ก่อให้เกิดปัญหาด้านต้นทุนที่สูงขึ้นหากชิ้นงานที่ออกมานั้นผิดจากแบบ ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงาน ที่ได้รับอิทธิพลแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ และเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ เพื่อพัฒนาไปสู่การทำนายลักษณะความตรงของชิ้นงานในระหว่างกระบวนการผลิต เพื่อลดระยะเวลาในการตรวจสอบชิ้นงาน โดยอาศัยปัจจัยดังต่อไปนี้

ลักษณะรูปร่างของชิ้นงานที่ถูกต้อนั้น เกิดจากปัจจัยในการตัดหลายอย่างซึ่งสามารถจำแนกได้ 4 อย่างหลัก คือ

- 1) ปัจจัยจากเงื่อนไขการตัด เช่น ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด
- 2) ปัจจัยของมีดตัด เช่น เนื้อวัสดุของมีด รัศมีจุมุมมีด รูปร่างของมีด
- 3) ปัจจัยของชิ้นงาน เช่น เนื้อวัสดุ ขนาดชิ้นงาน
- 4) ปัจจัยที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติของการตัด เช่น ความสั่นสะเทือน การเกิดรูปร่างของเศษโลหะ เป็นต้น [6-8]

สำหรับตัวแปรที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด เช่น แรงตัด ความสั่นสะเทือน อุณหภูมิ เสียง เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นจริงในขณะตัด แต่สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคโนโลยีเซนเซอร์ ซึ่งจะสามารถให้สารสนเทศที่เกี่ยวกับสถานะของกระบวนการกลึงได้ทุกขณะตัด ดังนั้น ไดนาโมมิเตอร์ เป็นเซนเซอร์ที่ถูกเลือกเพื่อนำมาใช้เพื่อวัดแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการใช้เก็บค่าสัญญาณแรงตัดเพื่อนำมาศึกษาความสัมพันธ์ของแรงตัดที่มีต่อความตรงของชิ้นงานในขณะตัดเป็นอย่างมาก

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีตระหนักถึงปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพชิ้นงานหลังจบกระบวนการ ซึ่งเกิดจากการผิดรูปของรูปร่างทางเรขาคณิต และหนึ่งในนั้นก็คือความตรงของชิ้นงาน และได้มีการแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขการตัด นั่นคือ อัตราป้อนตัด ความเร็วตัด และระยะป้อนลึก เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อ

คุณภาพของชิ้นงานในกระบวนการกลึง และยังมีการศึกษาเกี่ยวกับเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณภาพของความตรงของชิ้นงานที่ดี [9-12]

1.1.4 เทคโนโลยีเครื่องจักรกลอัจฉริยะและเซนเซอร์วัดแรง

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว พบว่าความตรงของชิ้นงานมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการตัดมากมาย รวมถึงมีเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของชิ้นงานอีกประการหนึ่ง ซึ่งในความเป็นจริงแล้วในระหว่างกระบวนการไม่สามารถที่จะวัดความตรงของชิ้นงานได้อย่างทันท่วงที ดังนั้น เพื่อที่จะควบคุมกระบวนการผลิตไม่ให้เกิดของเสียขึ้นในระบบ จึงต้องมีการเลือกใช้เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม โดยได้มีการศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานในระหว่างกระบวนการได้อย่างทันท่วงที

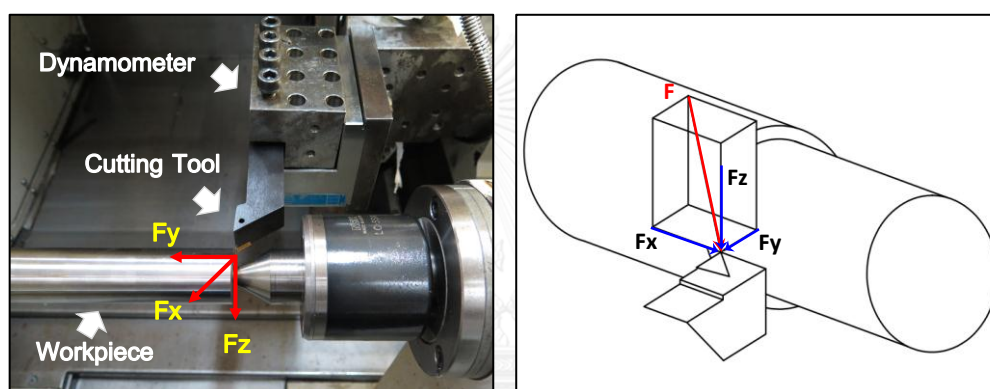
เพื่อตอบสนองต่อระบบการผลิตอัจฉริยะ ระบบการผลิตในอนาคตถูกนำมาพัฒนาให้มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เครื่องจักรกลอัจฉริยะถูกนำมาวิจัยและพัฒนาขึ้น โดยคาดหวังว่าเครื่องจักรกลที่มีความอัจฉริยะ จะสามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง และสามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่น ๆ เพื่ออำนวยความสะดวกในการผลิตได้

เครื่องจักรกลอัจฉริยะที่ควบคุมโดยตัวเลขมีความสามารถมากกว่าเครื่องจักรกลแบบธรรมดาในด้านการตัดสินใจแทนผู้ปฏิบัติงาน และเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดให้เหมาะสมกับเหตุการณ์ได้โดยอัตโนมัติ นอกจากนี้ ยังทำให้อัตราผลิตภาพเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยการลดเวลาที่ไม่ได้ผลิต (Non-productive time) ในวัฏจักรการผลิตลง เครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่ซับซ้อนได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในทางปฏิบัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ความก้าวหน้าที่สำคัญของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี คือ การควบคุมที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ในกระบวนการตัด (Adaptive control, AC) ซึ่งจะถูกควบคุมด้วยระบบซีเอ็นซี เช่น การนำเซ็นเซอร์หลายรูปแบบมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องจักรกลซีเอ็นซี เพื่อตรวจจับสถานะของการตัด ซึ่งใช้ในการป้อนกลับ และปรับการทำงานเพื่อให้ได้เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่สุด

ชนิดของเซนเซอร์ที่ใช้สำหรับการตรวจติดตามกระบวนการผลิต และกระบวนการตัดมีมากมาย ซึ่งเซนเซอร์ที่นิยมใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมการตัด คือ เซ็นเซอร์วัดแรง เซ็นเซอร์วัดกำลัง และเซนเซอร์อะคูสติกอิมพัลส์ ทั้งนี้การออกแบบเซนเซอร์ขั้นสูงร่วมกับเทคโนโลยีการผลิตทำให้เกิดการปรับปรุงสารสนเทศเกี่ยวกับสถานะของระบบ เพื่อที่จะทำให้เกิดกระบวนการที่เหมาะสม และควบคุมได้ ดังนั้นการเลือกใช้เซนเซอร์แต่ละชนิดนั้น จึงต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในการติดตั้งใน

กระบวนการผลิต นอกจากนี้ การศึกษาค้นคว้าเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยการใช้เซนเซอร์ติดตั้ง เพื่อทำงานกับเครื่องจักรในระหว่างกระบวนการผลิต ทำให้ทราบได้ว่าเกิดข้อผิดพลาดประการใดขึ้นในกระบวนการผลิตแบบทันที เนื่องจากสามารถส่งผ่านข้อมูลในขณะตัดได้ทันที

ในการตรวจติดตามกระบวนการผลิตด้วยการใช้เซนเซอร์ตรวจวัดสัญญาณ เช่น แรงตัด อุณหภูมิ เป็นการตรวจติดตามโดยทางอ้อม (Indirect monitoring process) โดยการนำสัญญาณที่ตรวจจับได้ในกระบวนการผลิตมาแปลงค่าเพื่อให้ทราบสถานะของกระบวนการผลิตโดยไม่จำเป็นต้องหยุดกระบวนการผลิตเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ เช่น การใช้ไดนามิเตอร์วัดแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด และนำค่าที่ได้มาแปลงเพื่อให้ได้ค่าของตัวแปรที่ต้องการจะวัดต่อไป



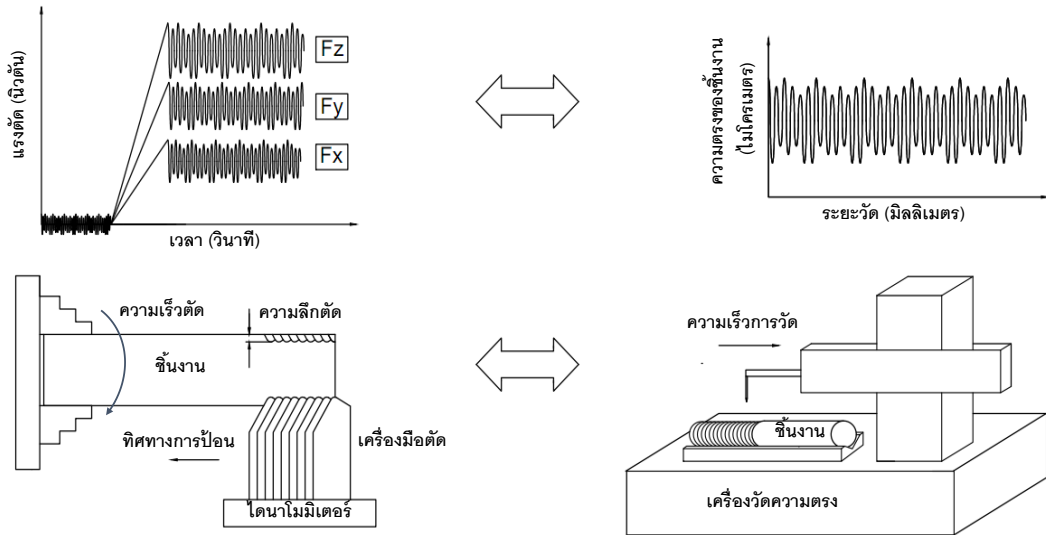
รูปที่ 1.3 แรงตัดในแนวแกน 3 มิติ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกลึง

จากรูปที่ 1.3 แรงตัดที่ตรวจจับได้จากไดนามิเตอร์ในกระบวนการกลึง ประกอบด้วยแรง 3 แรง ใน 3 ทิศทาง ตามแกน X, Y และ Z คือ แรงตัดแนวรัศมี (Radial force, F_x), แรงตัดป้อน (Feed force, F_y) และแรงตัดหลัก (Main force, F_z) ตามลำดับ [13-15] ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้นำแรงตัดที่วัดได้ในขณะตัดมาทำนายความตรงของชิ้นงาน และพบว่าแรงป้อนตัดเป็นแรงที่มีอิทธิพลต่อความตรงของชิ้นงานมากที่สุด [16, 17]

1.1.5 กรอบแนวคิดงานวิจัย

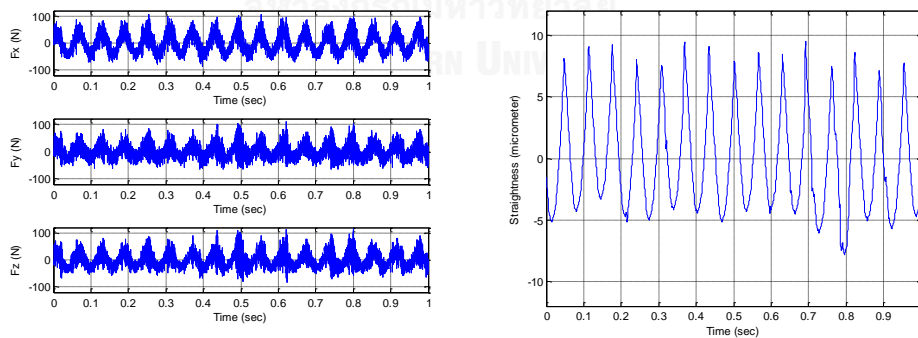
กรอบแนวคิดงานวิจัยนี้ สามารถอธิบายได้จากรูป 4 นั่นคือ ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงตัดพลวัต และความตรงของชิ้นงาน เมื่อพิจารณาที่โดเมนเวลา พบว่าสัญญาณของแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นเป็นลูกคลื่นซ้ำ ๆ กัน และมีความสอดคล้องกับอัตราป้อนตัดชิ้นงาน ซึ่งกล่าวได้ว่าการตัดที่อัตราป้อนตัดใด ๆ แรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดจะมีลักษณะเป็นลูกคลื่นซ้ำ ๆ กัน และพบว่าแรงที่

เกิดขึ้นนั้นมีความสอดคล้องกันกับรอยป้อนตัด (feed mark) ที่เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงานที่เป็นค่าบ่งบอกความตรงของชิ้นงาน โดยมีลักษณะเป็นลูกคลื่นที่สอดคล้องกัน



รูปที่ 1.4 กระบวนการกลึงชิ้นงานและการวัดความตรงของชิ้นงาน

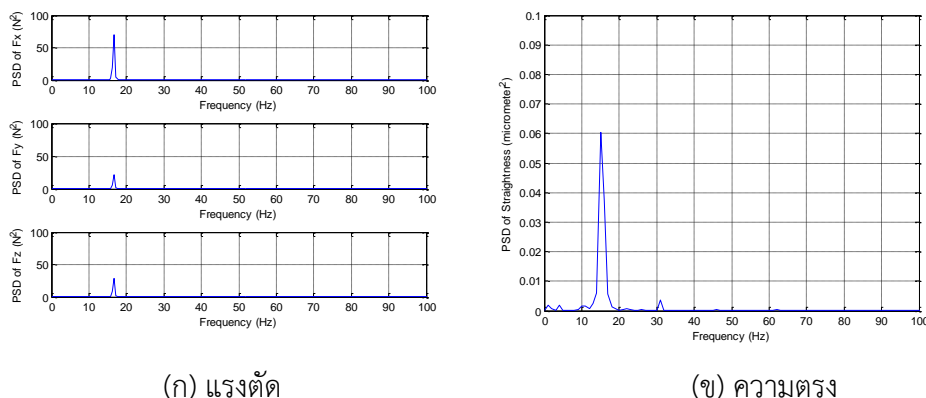
จากตัวอย่างผลการทดลอง ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัต และข้อมูลความตรงได้ ดังต่อไปนี้



(ก) แรงตัด

(ข) ความตรง

รูปที่ 1.5 การวิเคราะห์แรงตัด และความตรงของชิ้นงานในโดเมนเวลา



รูปที่ 1.6 การวิเคราะห์แรงตัด และความตรงของชิ้นงานในโดเมนความถี่

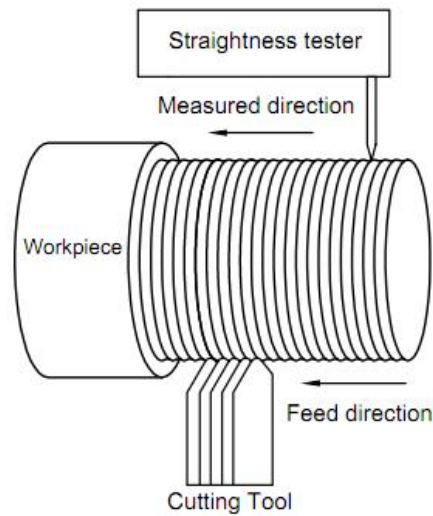
จากรูปที่ 1.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงตัดพลวัต และความตรงของชิ้นงานในโดเมนเวลา พบว่าลักษณะการเกิดลูกคลื่นของสัญญาณทั้งสองคล้ายคลึงกัน รวมถึงจำนวนลูกคลื่นที่เกิดขึ้นมีจำนวนใกล้เคียงกันอีกด้วย

จากรูปที่ 1.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงตัดพลวัต และความตรงของชิ้นงานในโดเมนความถี่ พบว่าสัญญาณทั้งสองเกิดขึ้นที่ความถี่ใกล้เคียงกันคือ 16 Hz ดังนั้นมีความเป็นไปได้ว่าสัญญาณทั้งสองน่าจะมีความสอดคล้องกันเช่นเดียวกับในโดเมนความถี่

ดังนั้น สามารถอธิบายได้ว่าแรงตัดพลวัตสามารถนำมาทำนายความตรงของชิ้นงานได้ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

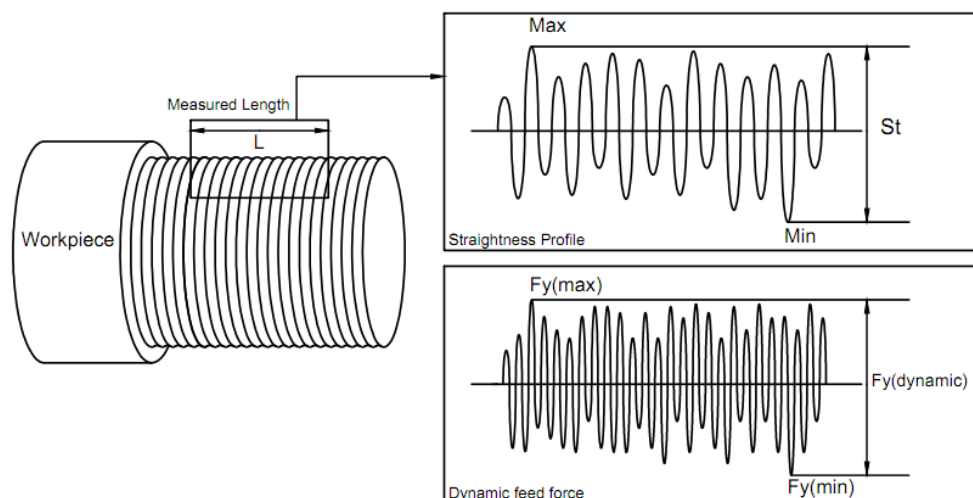
1.1.6 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและแรงตัด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแนะนำเสนอสมการในการทำนายความขรุขระของชิ้นงานในกระบวนการกลึงโดยใช้แรงป้อนตัด [9, 18, 19] สำหรับงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงป้อนตัดกับความตรงของชิ้นงาน จากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าแรงป้อนตัดสามารถอธิบายความขรุขระ และความตรงของชิ้นงานได้ เนื่องจากทิศทางของแรงป้อนตัด และทิศทางของการวัดผิวชิ้นงานเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.7 และแรงป้อนตัดเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดรอยป้อนตัด (feed mark) ขึ้นบนผิวชิ้นงานซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าของความตรงของชิ้นงาน



รูปที่ 1.7 แสดงทิศทางการวัดความตรงของชิ้นงานและทิศทางการป้อนตัดชิ้นงาน

จากรูปที่ 1.8 สามารถอธิบายได้ว่าส่วนต่าง ๆ ของแรงตัดพลวัตที่มากที่สุด ($F_{y(max)}$) กับที่น้อยที่สุด ($F_{y(min)}$) มีค่าที่สัมพันธ์โดยตรงกับค่าความตรงที่เป็นส่วนต่าง ๆ ของความสูงของค่าความขรุขระผิวที่สูงที่สุด (Max) กับค่าที่น้อยที่สุด (Min) ดังแสดงในรูป แต่อย่างไรก็ตาม แรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัด ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการตัด เช่น ความแข็งของชิ้นงาน เพื่อเป็นการกำจัดอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดที่เกิดขึ้น อัตราส่วนแรงตัดจึงถูกเสนอขึ้นในงานวิจัยนี้ เพื่อให้สามารถทำนายความตรงของชิ้นงานได้ไม่ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนไป โดยที่อัตราส่วนแรงตัดสามารถคำนวณได้จากผลต่างของแรงตัดพลวัตมากที่สุดกับน้อยที่สุดเทียบกับแรงป้อนตัดสถิตในช่วงเวลาที่วัด ซึ่งสอดคล้องกับความตรงของชิ้นงานที่ต้องการจะทำนายในขณะกลึงชิ้นงาน



รูปที่ 1.8 แสดงแรงที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัดในแนวป้อนตัดชิ้นงานระหว่างตัด

ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัด และความตรงของชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{Straightness, } S_t \propto V, f, D, R_n, \gamma \left(\frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}} \right) \quad (1.1-1)$$

$$S_t = C_1 \cdot (V)^{a_1} \cdot (f)^{a_2} \cdot (D)^{a_3} \cdot (R_n)^{a_4} \cdot \gamma \cdot \left(\frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}} \right)^{a_5} \quad (1.1-2)$$

โดยที่ V คือ ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที), f คือ อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ), D คือ ความลึกตัด (มิลลิเมตร), R_n คือ รัศมีมุมมีด (มิลลิเมตร), γ คือ มุมคายเศษโลหะ (องศา), $\left(\frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}} \right)$ คือ อัตราส่วนแรงตัดพลวัตต่อแรงตัดสถิตในทิศทางป้อนตัด และ $C_1, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ และ a_6 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการ

งานวิจัยนี้มีการนำเทคนิคการออกแบบการทดลองมาใช้ร่วมกับระบบเซนเซอร์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับแรงตัดที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปประมาณค่าความตรงในขณะตัดเพื่อช่วยลดของเสียในกระบวนการผลิตอันเนื่องมาจากชิ้นงานผิดรูป หรือเกิดข้อผิดพลาดของความตรง (out of straightness) และลดเวลาในการตรวจสอบชิ้นงานหลังการผลิต ซึ่งถือว่าเป็นกิจกรรมที่ไม่เพิ่มมูลค่า (non-value activity) ซึ่งข้อดีของการตรวจติดตามรูปร่างชิ้นงานในขณะตัดนั้นสามารถนำไปพัฒนาเครื่องจักรกลอัจฉริยะ และเพิ่มคุณภาพชิ้นงานให้ดีขึ้น อีกทั้งยังลดต้นทุนให้กับกระบวนการผลิตอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) กระบวนการกลึงปอกด้วยการตัดแบบแห้ง (Dry cutting) บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น NEXUS 200MY/MSY
- 2) เซนเซอร์วัดแรง (3-Component Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9121 สำหรับวัดแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดชิ้นงาน

- 3) วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กกล้าคาร์บอน S45S รูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 34 – 40 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร โดยแยกเป็นระยะสำหรับจับด้วยหัวจับ (chuck) 100 มิลลิเมตร และระยะสำหรับตัด 180 มิลลิเมตร โดยเว้นระยะห่างจากหัวจับ 20 มิลลิเมตร
- 4) ด้ามมีดกลึง (Cutting tool holder) มี 2 ประเภท แบ่งเป็น ด้ามมีดเบอร์ PDJNR2525M-15 (ด้ามมีดลบ) และ ด้ามมีดเบอร์ SDJCR2525M-11 (ด้ามมีดบวก)
- 5) เม็ดมีดสำหรับตัด เป็นแบบคาร์ไบด์เคลือบผิว (Coated Carbide)
- 6) การทดลองจะใช้เม็ดมีดใหม่ที่มีค่าการสึกหรอไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร
- 7) ปัจจัย และระดับปัจจัยสำหรับการทดลอง ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เงื่อนไขการตัด

ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	100, 150 และ 200
อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.15, 0.20 และ 0.25
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.4, 0.6 และ 0.8
รัศมีจุกมีด (มิลลิเมตร)	0.4 และ 0.8
มุมคายเศษโลหะ (องศา)	-6 และ +11

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ เพื่อใช้ในการทำนายและวิเคราะห์ความตรงของชิ้นงานในขณะกลึง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) พัฒนาเครื่องกลึงซีเอ็นซีอัจฉริยะ เพื่อรองรับระบบการผลิตอัจฉริยะในอนาคต
- 2) เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการตรวจติดตามความตรงของผิวชิ้นงานในขณะตัดสำหรับกระบวนการตัดอื่น ๆ

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี และสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งศึกษาปัจจัยในกระบวนการกลึงที่ คาดว่ามีผลต่อผิว และรูปร่างในเชิงเรขาคณิตของชิ้นงาน เช่น ความขรุขระผิว ความตรง ความกลม ความเป็นทรงกระบอก และเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน เป็นต้น
- 2) ศึกษาข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ การเก็บข้อมูล สำหรับแรงตัด และวิธีการใช้งานพื้นฐานสำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซี
- 3) ออกแบบการทดลอง และกำหนดเงื่อนไขที่คาดว่าจะมีผลต่อคุณภาพของรูปร่างของ ชิ้นงานหลักกล้าที่เลือกใช้
- 4) ทำการทดลองตามแผนการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ผลการตัดสำหรับเงื่อนไขการตัดแบบแห่ง บนเครื่องกลึงซีเอ็นซีสำหรับชิ้นงานหลักกล้า
- 5) วัดและเก็บค่าแรงตัดในขณะตัด และความตรงของชิ้นงานหลังจากทำการตัดตามเงื่อนไขที่กำหนด
- 6) ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดและความตรงของชิ้นงานด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform)
- 7) วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multi Regression) เพื่อหาสมการแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานและแรงตัด
- 8) สรุปผลการดำเนินการวิจัย และข้อเสนอแนะ
- 9) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

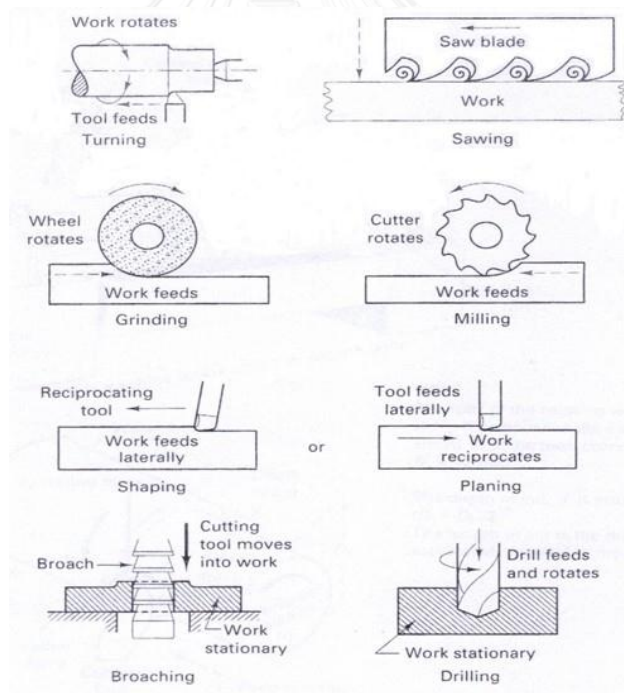
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 กระบวนการตัดเฉือน (Machining Process) [20]

กระบวนการตัดเฉือน (Machining Process) หมายถึง การบวนการขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้เครื่องมือตัดหรือมีดตัด (Cutting tool) ในการกำจัดเนื้อวัสดุส่วนเกินออกจากชิ้นงานให้มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ เป็นกรรมวิธีในการผลิตชิ้นงานที่สำคัญที่สุดวิธีหนึ่ง ซึ่งถ้าชิ้นงานเป็นโลหะแล้ว กระบวนการนั้นมักจะถูกระบุเรียกว่า กระบวนการตัดโลหะ หรือกระบวนการกำจัดโลหะ (Metal removal Process) หมายถึง กรรมวิธีการผลิตที่กำจัดเอาเนื้อโลหะส่วนที่ไม่ต้องการออกให้เหลือส่วนที่ต้องการใช้งาน โดยใช้เครื่องมือตัด และเครื่องมือกล (Machine tool)

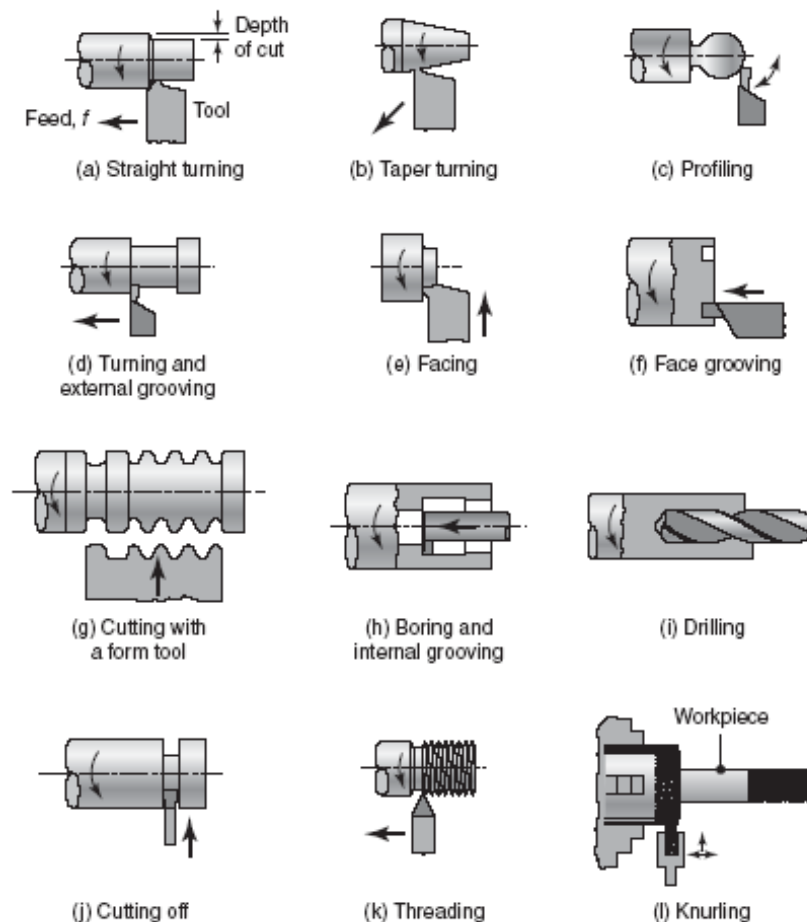


รูปที่ 2.1 รูปแบบพื้นฐานของกระบวนการตัด [21]

โดยกระบวนการตัดจะประกอบไปด้วย 3 กระบวนการหลัก ๆ คือ การกลึง การเจาะ และการกัด ดังรูปที่ 2.1 ส่วนกระบวนการตัดอื่น ๆ นั้นประกอบไปด้วยการไส (Shaping) การแทงขึ้นรูป (Broaching) และการเลื่อย (Sawing) รวมถึงกระบวนการที่ใช้ผงขัด (Abrasive) ในการกัดเนื้อวัสดุออก เช่น การเจียรระโน (Grinding)

2.1.2 กระบวนการกลึง (Turning Process) [20]

การกลึงเป็นกระบวนการสร้างผิวหน้าใหม่ด้วยการกำจัดเนื้อวัสดุที่ไม่ต้องการออกจากพื้นผิวของชิ้นงานทรงกระบอก (Cylindrical shape) ที่กำลังหมุนอยู่โดยใช้เครื่องมือตัดที่มีคมตัดเดียว (Single cutting edge) เคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน การกลึงมีสองลักษณะใหญ่ ๆ คือ การกลึงปาดหน้า เป็นการตัดโลหะโดยให้มีดตัดชิ้นงานไปตามแนวขวาง (Across the work) และการกลึงปอก เป็นการตัดโลหะโดยให้มีดตัดเคลื่อนที่ตัดชิ้นงานไปตามแนวนานกับแนวแกนของชิ้นงาน โดยหลักการของการกลึงสามารถดัดแปลงให้ผลิตชิ้นงานได้มากมาย ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะงานที่สร้างขึ้นจากการกลึง [22]

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

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

อัตราการป้อน (Feed Rate) คือ อัตราเร็วของการเดินมีดไปในทิศทางตามแกนการหมุนของชิ้นงาน กล่าวคือ ระยะทางที่ใบมีดกลึงเคลื่อนที่ไปได้ต่อการหมุนของชิ้นงานหนึ่งรอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อรอบ (mm/rev) หรือนิ้วต่อรอบ (in/rev)

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

ผลที่จะเกิดตามมาก็คือ ขนาดของชิ้นงาน (Workpiece Dimension) ลักษณะความถูกต้องทางเรขาคณิตของชิ้นงาน (Workpiece's geometrical accuracy) ความละเอียดของผิวชิ้นงาน (Surface Roughness) เศษโลหะ (Chip) การสึกหรอของมีดกลึง (Tool Wear)

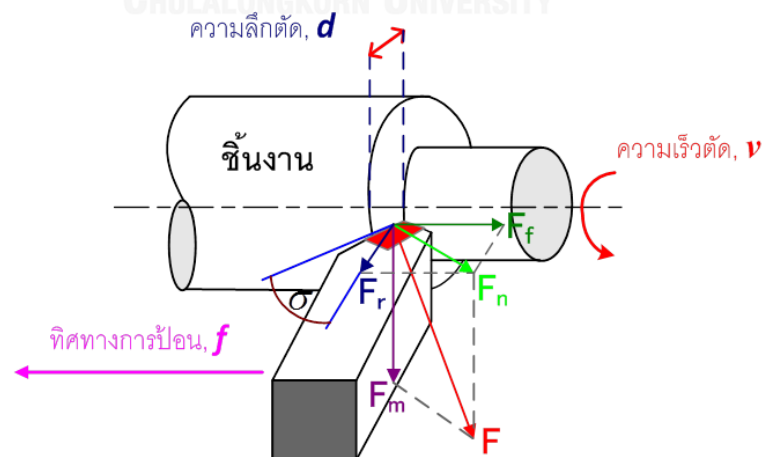
จากอดีตจนถึงปัจจุบัน สำหรับเครื่องกลึงซีเอ็นซี (Computer Numerical Control Turning Machine: CNC Turning Machine) มีองค์ประกอบพื้นฐานเดียวกันกับเครื่องกลึงธรรมดาทั่วไป แต่ในปัจจุบันสิ่งที่เพิ่มขึ้นมาคือ สามารถควบคุมการทำงานได้โดยใช้คอมพิวเตอร์ ส่งผลให้เครื่องกลึงสามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติ ด้วยเหตุนี้เครื่องกลึงซีเอ็นซีจึงสามารถผลิตชิ้นงานซ้ำ ๆ กันได้อย่างรวดเร็วและมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า เพื่อตอบสนองต่อความต้องการที่เพิ่มมากขึ้น ภาคอุตสาหกรรม รวมถึงการผลิตชิ้นส่วนที่ซับซ้อน และมีปริมาณมากโดยใช้ระยะเวลาอันรวดเร็ว



รูปที่ 2.3 เครื่องกลึง CNC (CNC Turning Machine)

2.1.3 เงื่อนไขการตัด (Cutting Condition) [20]

ในกระบวนการตัดเฉือนอาศัยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (Relative movement) ระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงานอันประกอบด้วย Primary motion เรียกว่า ความเร็วตัด (Cutting speed, v), Secondary motion เรียกว่า อัตราป้อนตัด (Feed rate, f) และขนาดการตัด เรียกว่า ความลึกตัด (Depth of cut, d) ทั้งสามองค์ประกอบนี้ถูกเรียกว่า เงื่อนไขการตัด (Cutting Conditions) เมื่อพิจารณาความเร็วสัมพัทธ์ที่คมตัดของมีดกลึงในรูปที่ 2.4 พบว่า ความเร็วตัดซึ่งหมายถึง ความเร็วของเนื้อวัสดุที่เคลื่อนที่เข้าหาคมตัด (Cutting edge) เกิดจากผลรวมของความเร็วที่เกิดขึ้นจากการหมุนรอบแกนของชิ้นงานและความเร็วที่เกิดจากการป้อน ดังนั้น ความเร็วตัดจึงเป็นผลรวมทางเวกเตอร์ของความเร็วที่เกิดจากการหมุนและความเร็วที่เกิดจากการป้อน



รูปที่ 2.4 ความเร็วตัดในการกลึง

$$V_c = \frac{v}{\cos \theta} \quad (2.1-1)$$

โดยที่ V_c = ความเร็วตัด (เมตร/นาที)
 V = ความเร็วผิว (เมตร/นาที)
 θ = มุมระหว่างความเร็วตัดและความเร็วผิวของชิ้นงาน (องศา)

แต่ความเร็วที่เกิดจากการป้อนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความเร็วผิวชิ้นงาน ดังนั้น จึงให้ค่า $\cos \theta \rightarrow 1$ จึงสามารถประมาณได้ว่า

$$V_c = V \quad (2.1-2)$$

และความสัมพันธ์ของความเร็วตัดและความเร็วรอบ (Spindle speed) แสดงได้ดังนี้

$$V = \frac{\pi D N_w}{1000} \quad (2.1-3)$$

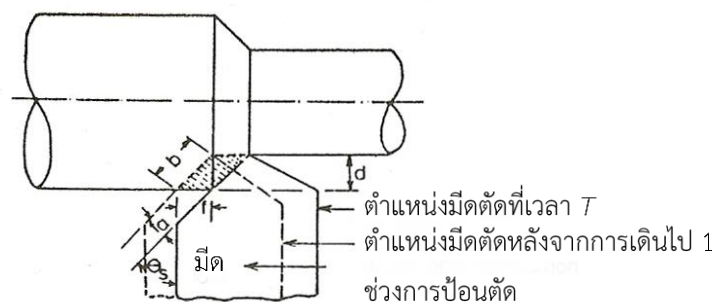
โดยที่ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)
 N_w = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

สำหรับอัตราการป้อนตัดในกระบวนการกลึงซึ่งหมายถึงการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเมื่อชิ้นงานหมุนครบหนึ่งรอบ จากรูปที่ 2.5 เมื่อกำหนดให้มีดกลึงมีมุมข้างคมตัด (Side cutting edge angle) เท่ากับ θ และกำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราการป้อนตัด f สามารถคำนวณความหนาของเศษวัสดุก่อนตัด f_a และความกว้างของการตัด b หาได้จาก

$$f_a = f \cos \theta_a \quad (2.1-4)$$

$$b = \frac{d}{\cos \theta_a} \quad (2.1-5)$$

โดยที่ f = อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)
 d = ความลึกในการตัด (มิลลิเมตร)



รูปที่ 2.5 ลักษณะทางเรขาคณิตของการกลึงงานรูปทรงกระบอก

ความเร็วป้อน (Feed speed) หมายถึงความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดในกรณีของการกลึงสามารถคำนวณได้จาก

$$V_f = f \cdot N_w \quad (2.1-6)$$

โดยที่ V_f = ความเร็วป้อน (มิลลิเมตร/นาที)

อัตราการกำจัดโลหะ (Metal removal rate) หมายถึง ปริมาตรของวัสดุที่สามารถตัดได้ต่อหน่วยเวลา สามารถคำนวณได้จาก

$$Z_w = 1000 \cdot f \cdot d \cdot V \quad (2.1-7)$$

โดยที่ Z_w = อัตราการกำจัดโลหะ (มิลลิเมตร³/นาที)

เวลาในการตัด (Cutting time) เวลาที่ต้องใช้เพื่อเคลื่อนเครื่องมือตัดจากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งสุดท้ายของการตัด สามารถคำนวณได้จาก

$$T_m = \frac{L}{V_f} \quad (2.1-8)$$

โดยที่ T_m = เวลาในการตัด (นาที)

L = ความยาวของส่วนที่ต้องการกลึง (มิลลิเมตร)

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

ในกระบวนการตัดเฉือนทั่วไปจะมีการตัดหยาบหนึ่งครั้งหรือมากกว่านั้น และตามด้วยการตัดละเอียดอีกหนึ่งหรือสองครั้ง การตัดหยาบนั้นจะใช้ระยะป้อน และความลึกของการตัดสูง โดยปกติค่าการป้อนจะเป็น 0.015-0.050 in/rev. (0.4-1.25 mm/rev.) และความลึกของการตัดเป็น 0.100-0.750 in (2.5-20 mm) ส่วนการตัดละเอียดนั้นจะใช้ค่าการป้อนและความลึกของการตัดต่ำ ได้แก่ ค่าการป้อนที่ 0.005-0.015 in/rev. (0.125-0.4 mm/rev.) และความลึกของการตัดที่ 0.030-0.075 in (0.75-2.0 mm) [19]

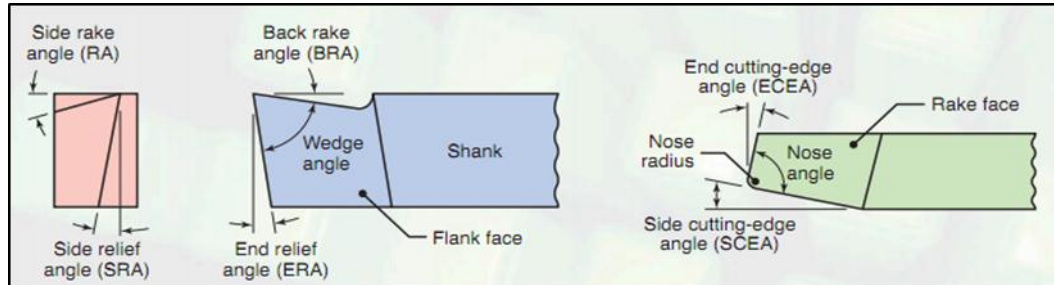
2.1.4 เครื่องมือตัด (Cutting Tool)

เครื่องมือตัดที่ใช้ในการตัดเฉือนชิ้นงานให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ มีทั้งหนึ่งคมตัดและหลายคมตัด แต่สำหรับในกระบวนการกลึงจะเป็นคมตัดเดียว โดยเครื่องมือตัดจะต้องมีความแข็งสูงกว่าวัสดุชิ้นงาน จึงจะเกิดการตัดได้ แต่ความแข็งเพียงอย่างเดียวยังไม่เพียงพอ ยังต้องมีคุณสมบัติที่จำเป็นต้องพิจารณา ได้แก่ ความสามารถในการต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง ความมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ความต้านทานต่อการขีดสี และความเหนียวที่เพียงพอในการต้านทานต่อการแตกร้าวได้ อย่างไรก็ตามปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติข้างต้นซึ่งต้องคำนึงถึง คือ วัสดุที่ใช้ทำมีดตัด (Tool materials) และรูปทรงเรขาคณิตของมีดตัด (Tool Geometry)

โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่ใช้ทำมีดตัดมีหลายประเภท ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมปานกลาง เหล็กกล้าอบสูง โคบอลต์หล่อผสม เซรามิก เพชร เป็นต้น โดยวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดที่ต่างกันจะมีการรวมกันของคุณสมบัติในแต่ละด้านในระดับที่แตกต่างกัน เพื่อให้เหมาะสมกับประเภทและลักษณะงานนั้น ๆ

สำหรับรูปทรงเรขาคณิตของมีดตัดมีการกำหนดสัญลักษณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งในแต่ละส่วนมีความสำคัญต่างกันไป โดยผิวหน้ามีดตัดมีอยู่ 2 ส่วนที่ควรพิจารณา ได้แก่ ผิวคาย (Rake face) และผิวหลบ (Flank face) โดยผิวคาย คือ ผิวหน้ามีดตัดบริเวณที่ระบายหรือคายเศษตัดออกจากชิ้นงาน ส่วนผิวหลบ คือ ผิวหน้ามีดตัดบริเวณที่ทำให้เกิดช่องว่าง (Clearance) ระหว่างมีดตัดกับผิวหน้างานที่เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งช่องว่างนี้จะป้องกันผิวงานจากการขัดถูกับมีดตัดอันจะเป็นผลให้คุณภาพของผิวงานเสียไป โดยผิวคายของมีดตัดจะถูกกำหนดด้วยมุม 2 มุม คือ มุมคายด้านหลังมุมคาย (Back rake angle, α_b) และมุมคายด้านข้าง (Side rake angle, α_s) ซึ่งเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของเศษโลหะบนผิวคาย ส่วนบนผิวหลบจะประกอบด้วยมุมหลบด้านหลัง (End relief angle, ERA) และมุมหลบด้านข้าง (Side relief angle, SRA) ที่เป็นตัวกำหนดระยะห่างระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานที่ตัดแล้ว ในขณะที่คมตัดของมีดตัดที่มีคมตัดเดียวจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ มุมของคมตัดด้านข้าง (Side cutting edge angle, SCEA) ซึ่งจะช่วยลดแรงกระแทกขณะมีดเข้าไปยังชิ้นงาน และมุมของคมตัดด้านหลัง (End cutting edge angle, ECEA) ที่ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างมีดตัดกับชิ้นงาน และส่วนสุดท้าย คือ รัศมีปลายมีด (Nose Radius, NR) ซึ่งส่งผลต่อพื้นผิวของชิ้นงาน โดยยิ่งรัศมีปลายมีดเล็ก พื้นผิวของชิ้นงานก็จะยิ่งขรุขระ แต่อย่างไรก็ตาม รัศมีปลายมีดที่ใหญ่ก็อาจทำให้เกิด

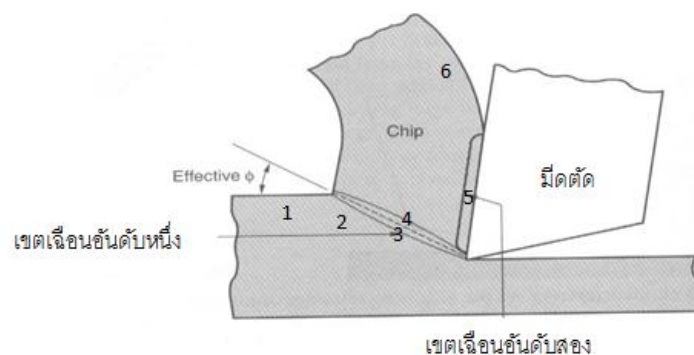
แซตเตอร์ขึ้นได้ ดังนั้นการเลือกวัสดุที่ใช้ทำมีดตัด รวมถึงการออกแบบรูปร่างและขนาดของมีดตัด ถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของงานตัด



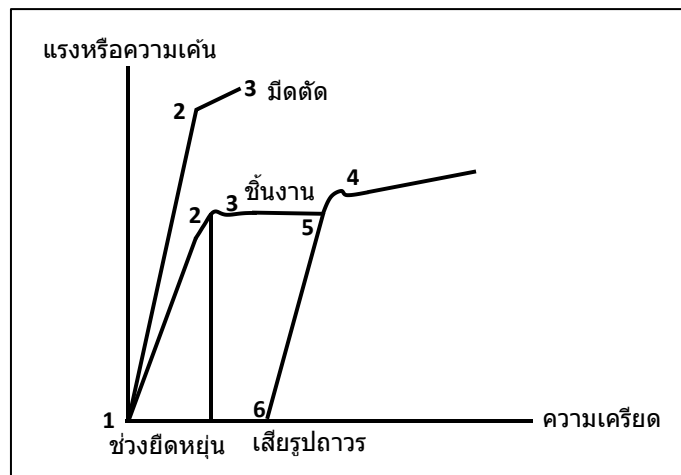
รูปที่ 2.6 รูปทรงเรขาคณิตของมีดตัด [22]

2.1.5 การวิเคราะห์กระบวนการตัดโลหะ

การตัดวัสดุชิ้นงานจะรับแรงกระทำจากเครื่องมือตัดผ่านทางคมตัด ซึ่งจะมีผลให้ชิ้นงานเกิดความเค้นขึ้นในหลายลักษณะ ดังแสดงใน รูปที่ 2.7 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 สภาวะความเค้นที่จุดต่าง ๆ สามารถกำหนดลงในกราฟความเค้น - ความเครียด ได้ดังในรูปที่ 2.8



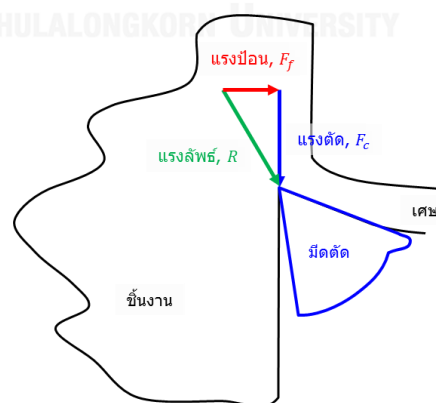
รูปที่ 2.7 แบบจำลองของการตัด



รูปที่ 2.8 สภาวะความเค้นที่จุดต่าง ๆ บนกราฟความเค้น – ความเครียด

2.1.6 แรงในการตัด

แรงบนคมตัด หมายถึง แรงที่กระทำที่คมตัดของเครื่องมือตัดขณะเกิดการตัด ในเบื้องต้นนี้จะใช้แบบจำลองของการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) ในการวิเคราะห์เนื่องจากทำให้ระบบของแรงบนคมตัดมีเพียง 2 มิติเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ จากรูปที่ 2.9 พบว่าแรงลัพธ์ (Resultant force) สามารถแยกออกเป็น 2 องค์ประกอบย่อย คือ แรงในทิศขนานกับทิศของความเร็วตัด เรียกว่าแรงตัด (Cutting force) และแรงในทิศขนานกับทิศของการป้อน เรียกว่า แรงป้อน (Feed force) ซึ่งแรงตัดและแรงป้อนนี้สามารถวัดได้โดยใช้อุปกรณ์วัดแรงตัด ทำให้สามารถคำนวณแรงลัพธ์ได้จากสมการที่ 2.1-9



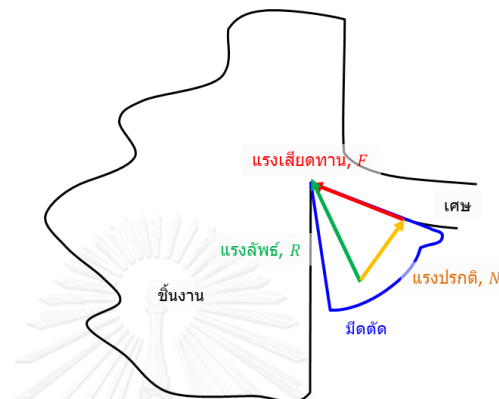
รูปที่ 2.9 ระบบแรงบนคมตัดของการตั้งฉาก

$$R = \sqrt{F_c^2 - F_f^2} \quad (2.1-9)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{F_f}{F_c} \quad (2.1-10)$$

แรงเสียดทาน

การที่เศษวัสดุเคลื่อนที่ผ่านผิวคายเศษวัสดุของเครื่องมือตัด ทำให้เกิดแรงขึ้นอีกระบบ ดังในรูปที่ 2.10 คือ แรงเสียดทาน (Friction force) และแรงกดบนผิวคายเศษวัสดุ (Normal force on force) สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างเศษวัสดุและผิวคายเศษวัสดุ เมื่อ กำหนดให้ β คือ มุมเสียดทาน (Friction angle)



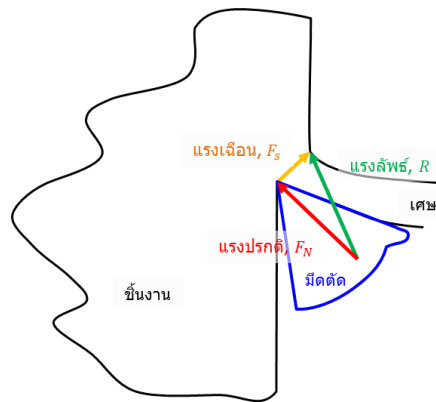
รูปที่ 2.10 ระบบแรงเสียดทาน

$$\mu = \frac{F}{N} = \tan\beta \quad (2.1-11)$$

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

แรงเฉือน

แรงเฉือน หมายถึง แรงที่กระทำบนระนาบเฉือน เป็นแรงที่ทำให้วัสดุชิ้นงานเกิดการแปรรูปถาวรกลายเป็นเศษวัสดุ แสดงในรูปที่ 2.11 โดยกำหนดให้ F_s คือ แรงเฉือน (Shear force)



รูปที่ 2.11 ระบบของแรงเฉือน

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

$$R = \sqrt{F_s^2 + F_N^2} \quad (2.1-12)$$

2.1.7 ความเค้นเฉือน

ในการตัดชิ้นงานนั้น ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนระนาบเฉือนจะเท่ากับความแข็งแรงทางเฉือน สำหรับการตัดในขณะนั้น กรณีนี้ต้องทำความเข้าใจว่าความแข็งแรงทางเฉือนของการตัดอาจไม่เท่ากับความแข็งแรงทางเฉือนที่ได้จากการทดลองวัดคุณสมบัติทางกล เนื่องจากการตัดเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนมากกว่าการเฉือนในทางกลศาสตร์ รวมถึงอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ความเค้นเฉือนสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 2.1-13

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \quad (2.1-13)$$

สามารถคำนวณพื้นที่ระนาบเฉือนได้จาก $A_s = \frac{f \cdot d}{\sin \phi}$ ดังนั้นเมื่อแทนค่าลงใน สมการที่ 2.1-13 จะได้

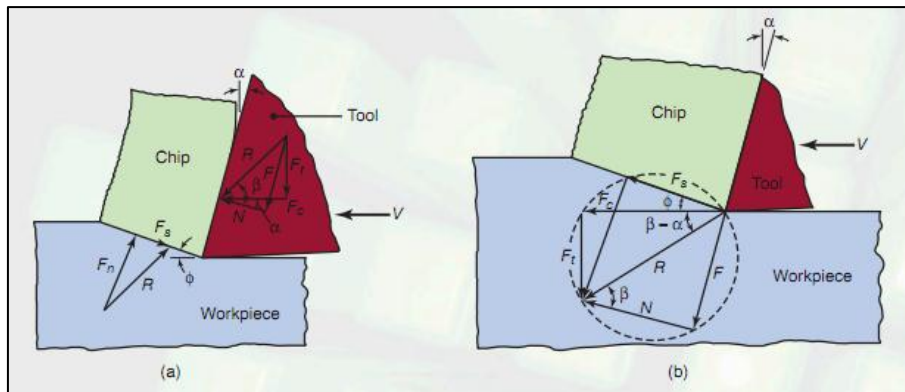
$$\tau = \frac{F_s \sin \phi}{f \cdot d} \quad (2.1-14)$$

แต่จากการที่อุปกรณ์วัดแรง จะวัดแรงตัดและแรงป้อนได้โดยสะดวก ดังนั้นจากรูปที่ 20 (b) สามารถสร้างความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

$$F_s = F_c \cos \phi - F_s \sin \phi \quad (2.1-15)$$

แทนค่าลงในสมการ 2.1-14 จะได้

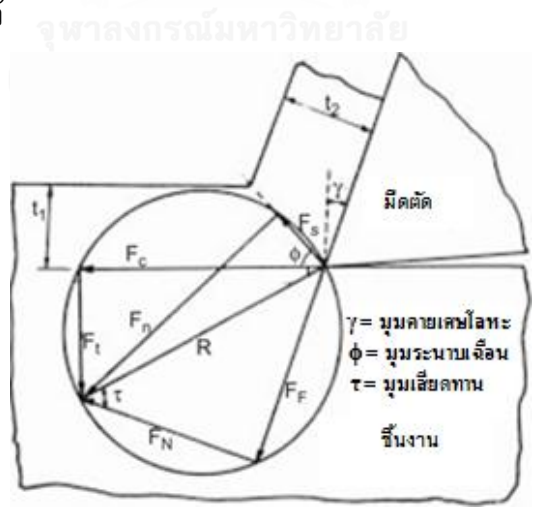
$$\tau = \frac{F_c \cos \phi \sin \phi - F_s \sin \phi}{f \cdot d} \quad (2.1-16)$$



รูปที่ 2.12 (a) แรงเฉือนที่กระทำบนระนาบเฉือนในการกลึง
(b) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน แรงตัด และแรงป้อน [22]

2.1.8 รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงของการตัด

การใช้รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงเป็นวิธีทางกราฟที่ใช้แรงแทนการคำนวณได้อย่างสะดวก และถูกต้อง ดังในรูปที่ 2.13 โดยการกำหนดเวกเตอร์ของแรงตัดและแรงป้อน จะได้ผลลัพธ์โดยการบวกเวกเตอร์ทั้งสอง (ขั้นตอนที่ 1) ใช้แรงลัพธ์เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางสร้างวงกลม จากนั้นลากเส้นต่อจากผิวคายเศษวัสดุตัดกับวงกลม จะได้แรงเสียดทานและแรงกดผิวคายเศษวัสดุ (ขั้นตอนที่ 2) คำนวณมุมระนาบเฉือน (ϕ) จากนั้นกำหนดมุมนี้ลงในรูป จากจุดตัดของมุมนี้กับวงกลม จะได้แรงเฉือนและแรงกดบนระนาบเฉือน (ขั้นตอนที่ 3) สามารถวัดขนาดของแรงได้จากรูปที่สร้างขึ้นเทียบกับมาตราส่วนที่กำหนดเอาไว้



รูปที่ 2.13 รูปหลายเหลี่ยมแทนแรงและวิธีการสร้าง

จากรูปที่ 2.13 การใช้แผนภาพของแรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการตัดโลหะ

(Force diagram) นั้นจะสามารถคำนวณค่าของแรง F , N , F_s และ F_n ได้โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงตรีโกณมิติของแรงที่สามารถวัดได้ (F_c , F_t) ซึ่งจะได้ค่าของแรงต่าง ๆ ดังสมการที่ 2.1-17 ถึง 2.1-20

$$F = F_c \sin \mu + F_t \cos \alpha \quad (2.1-17)$$

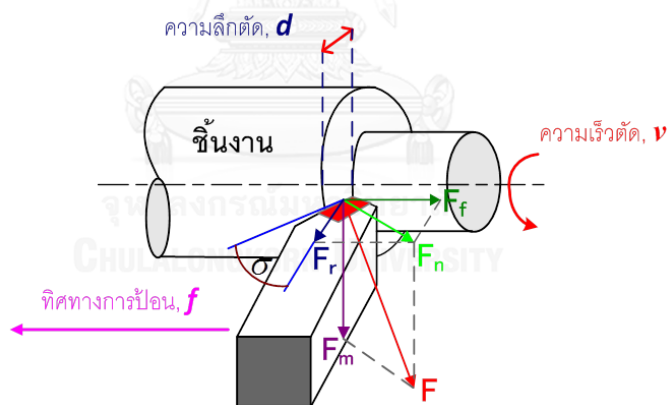
$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (2.1-18)$$

$$F_s = F_c \cos \alpha - F_t \sin \phi \quad (2.1-19)$$

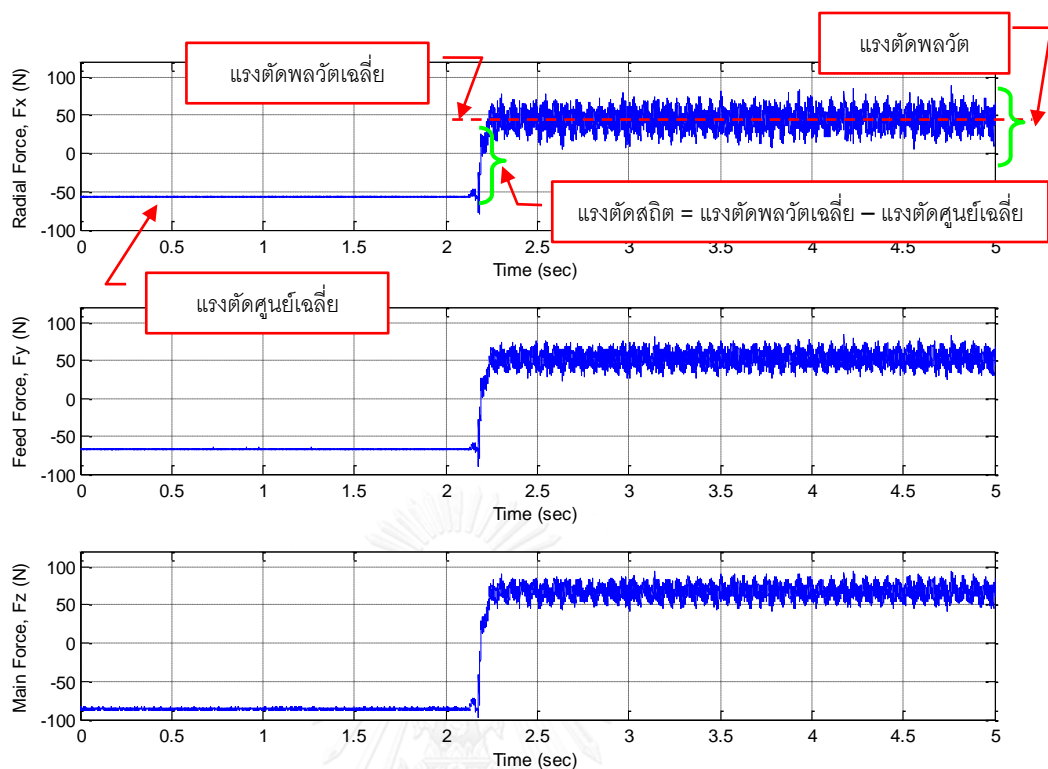
$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \quad (2.1-20)$$

2.1.9 สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น

จากรูป 2.14 สามารถแบ่งได้เป็น 3 แรงหลัก ประกอบด้วย แรงตัดที่เกิดในแนวรัศมี เรียกว่าแรงรุนหรือแรงรัศมี (Radial Force, F_r หรือ F_x) แรงในทิศทางขนานกับทิศของการป้อน เรียกว่า แรงป้อนตัด (Feed force, F_f หรือ F_y) และแรงในทิศทางขนานกับทิศของความเร็วตัด เรียกว่า แรงตัดหลัก (Main force, F_m หรือ F_z) [13-15]



รูปที่ 2.14 แรงที่เกิดในขณะตัดชิ้นงานของกระบวนการกลึง



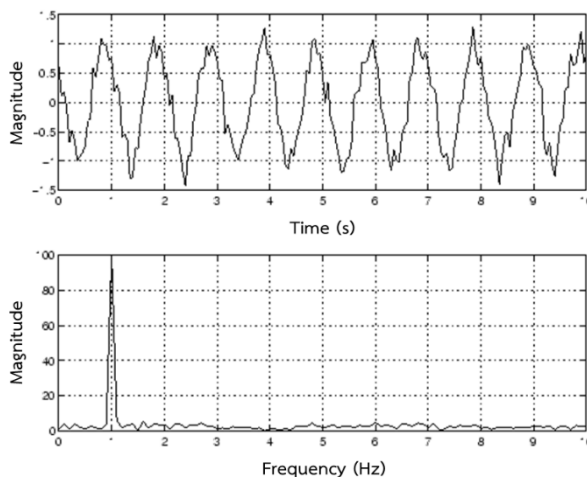
รูปที่ 2.15 สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นจริงในการทดลองที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมกมีด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา โดยแรงทั้งสามแนวแกน จะถูกแสดงสัญญาณจากไดนาโมมิเตอร์ ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ แรงตัดศูนย์กลาง แรงตัดพลวัต (Dynamic Force) และแรงตัดสถิต (Static Force) โดยแรงตัดศูนย์กลาง คือแรงที่ยังไม่เกิดการตัดจริง ซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวน (Noise) ของอุปกรณ์ แรงตัดพลวัตเป็นแรงที่เกิดขึ้นจริงขณะทำการตัดจริง และแรงตัดสถิต คือ แรงตัดเฉลี่ยที่กำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น โดยเกิดจากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแรงตัดพลวัตและค่าเฉลี่ยแรงตัดศูนย์กลาง

2.1.10 การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing)

การวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analysis) เป็นสิ่งสำคัญในการประมวลผลของสัญญาณนั้น ซึ่งถ้ารู้ถึงองค์ประกอบต่างๆของสัญญาณว่าส่วนไหนสำคัญ ส่วนไหนสามารถตัดทิ้งได้โดยไม่ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากนัก ก็สามารถที่จะประมวลผลสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

โดยการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ดังรูปที่ 2.16 และสมการที่ 2.1-21 โดยที่ $F(t)$ คือสัญญาณใด ๆ



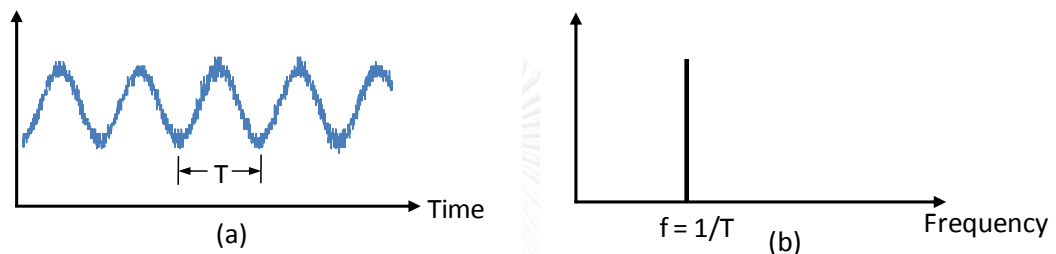
รูปที่ 2.16 การแปลงสัญญาณจากโดเมนของเวลาไปยังโดเมนความถี่

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2\pi ft} dt \quad (2.1-21)$$

ในการวิเคราะห์สัญญาณใด ๆ นั้น บางครั้งการพิจารณาที่โดเมนเวลาของสัญญาณอย่างเดียวอาจไม่สามารถให้ข้อมูลเพียงพอต่อการวิเคราะห์ได้ การเปลี่ยนมุมมองของสัญญาณสามารถช่วยให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้น ซึ่งการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) เป็นตัวอย่างหนึ่งของการเปลี่ยนมุมมองนี้ โดยการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่นั้น ใช้หลักการที่ว่าสัญญาณบางประเภทสามารถสังเคราะห์จากผลรวมของฟังก์ชันไซน์ (Sine Function) ที่ความถี่และขนาดต่าง ๆ ได้ เมื่อรู้เกี่ยวกับความถี่และขนาดของฟังก์ชันไซน์ที่เป็นองค์ประกอบของสัญญาณ หรือที่เรียกว่าสเปกตรัมของความถี่ (Frequency Spectrum) ของสัญญาณนั้น โดยจะทำให้รู้ถึงการกระจายกำลังของสัญญาณในความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์สัญญาณนั้น ๆ เพราะจะทำให้รู้ว่ากำลังของสัญญาณนั้นอยู่ในย่านไหนของสเปกตรัมของความถี่ และส่วนไหนที่สำคัญหรือไม่สำคัญ

2.1.11 การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) [23]

ข้อมูลโดยทั่วไปที่อยู่ในโดเมนเวลา (Time domain) สามารถแสดงในโดเมนความถี่ (Frequency domain) ได้โดยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว เช่น ข้อมูลของความขรุขระผิวเมื่อนำมาพล็อตเทียบกับเวลาจะได้รูปแบบของข้อมูลที่อยู่ในลักษณะของคลื่นไซน์ (Sine wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (a) จะเห็นได้ว่าข้อมูลความขรุขระผิวนี้จะเกิดการแกว่งขึ้นลงเป็นรูปแบบซ้ำๆ โดยรูปแบบที่แกว่งขึ้นลงครบหนึ่งรอบใช้เวลา T ซึ่งเรียกว่าคาบ คาบมีความสัมพันธ์กับความถี่คือ $f = 1/T$ คือจำนวนของคาบคลื่นใน 1 วินาที ข้อมูลดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ในเชิงความถี่ดังในรูปที่ 2.17 (b)



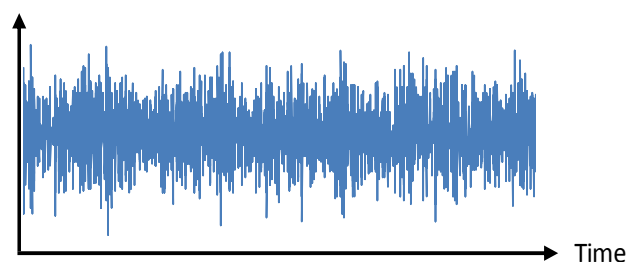
(a) สัญญาณในโดเมนเวลา

(b) สัญญาณในโดเมนความถี่

รูปที่ 2.17 ตัวอย่างคลื่นสัญญาณ

อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงส่วนใหญ่ข้อมูลที่เก็บมานั้นมักไม่ได้มีรูปแบบที่สามารถคำนวณได้โดยง่าย ซึ่งข้อมูลที่เก็บมามีสัญญาณรบกวน (Noise) ปะปนมาด้วยเสมอ ดังเช่นรูปที่ 2.18 ดังนั้นวิธีการที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบทางความถี่ของข้อมูลที่ซับซ้อนออกมาได้ คือ การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว โดยมีฟังก์ชัน $F(f)$ ดังสมการที่ 2.1-22

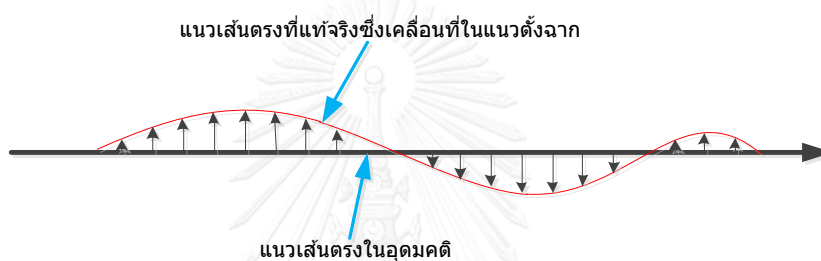
$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2\pi fjt} dt \quad (2.1-22)$$



รูปที่ 2.18 ข้อมูลที่ไม่มีรูปแบบแน่นอน

2.1.12 ความตรง (Straightness)

ความตรง (Straightness) เป็นคุณสมบัติของรูปร่างในเชิงเรขาคณิตของชิ้นงาน และมีผลต่อคุณสมบัติ และประสิทธิภาพในการทำงานของชิ้นงานนั้น ๆ เช่น ลูกสูบที่มีลักษณะบิดงอมาก จะทำให้เกิดการเสียดสีขณะใช้งาน ทำให้ต้องใช้แรงในการขับเคลื่อนมากขึ้น การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความร้อนสูง ชิ้นส่วนจำพวกแกนล้อ หรือชิ้นส่วนประเภทงานสวม จำเป็นจะต้องมีค่าความแม่นยำสำหรับความตรงของชิ้นงานเป็นอย่างมาก เพื่อให้สามารถประกอบเข้ากับชิ้นงานอื่นได้ ซึ่งหากรูปร่างของชิ้นงานไม่สมบูรณ์อาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการประกอบล่าช้า และประสิทธิภาพของชิ้นส่วนนั้น ๆ ลดลงอีกด้วย

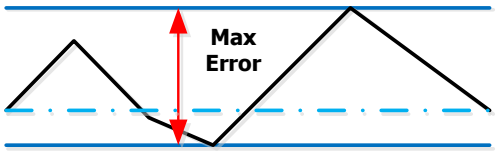
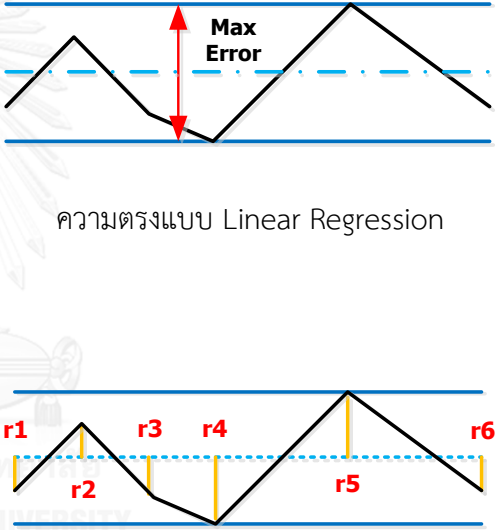
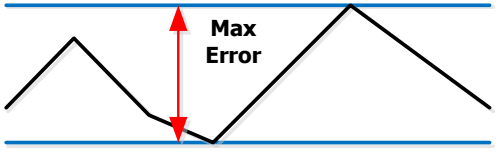


รูปที่ 2.19 คำจำกัดความของความตรง [24]

ข้อผิดพลาดแนวตรง หมายถึง การเบี่ยงเบนแบบตั้งฉากกับทิศทางของการเดิน ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.19 สมมุติว่าแนวทางเดินในอุดมคติเป็นเส้นตรง การเบี่ยงเบนใด ๆ จากเส้นตรงแนวนอนเรียกว่า ความตรงแนวนอน (Horizontal Straightness) และในแนวตั้งฉากเรียกว่า ความตรงแนวตั้งฉาก (Vertical Straightness) การวัดความตรงด้วยความแม่นยำอย่างเช่น ด้วยเครื่องจักรเลเซอร์ (Laser interferometer) และปริซึมวอลเลสต์ตัน (Wollaston Prism) ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของทางเดินของเส้น [24]

โดยในปัจจุบันความตรงที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดลักษณะของความตรงต่าง ๆ [25]

รูปแบบ	รูปแสดงลักษณะ
<p>1) แบบ Endpoint เกิดจากการลากเส้นตรง (เส้นประ) จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้าย ค่าความตรงแบบ Endpoints คือ ค่าระยะระหว่างเส้นคู่ขนานที่ขนานกับเส้นประ โดยเส้นหนึ่งลากผ่านจุดสูงสุด และเส้นหนึ่งลากผ่านจุดต่ำสุด</p>	 <p>ความตรงแบบ Endpoint</p>
<p>2) แบบ Linear Regression เกิดจากการสร้างเส้นตรง (เส้นประ) ด้วยวิธีการ Least Square ซึ่งก็คือ ค่าระยะระหว่างเส้นขนานที่ขนานกับเส้นประ โดยเส้นหนึ่งลากผ่านจุดสูงสุด และอีกเส้นหนึ่งลากผ่านจุดต่ำสุด Least Square method เป็นการสร้างเส้นตรงให้เป็นตัวแทนของข้อมูลโดยการเฉลี่ย โดยตั้งสมมติฐานว่าเส้นตรง มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (XแปรผันตรงกับY) โดยขนาดของ $(r1)^2 - (r2)^2 + (r3)^2 + (r4)^2 - (r5)^2 + (r6)^2$ มีค่าน้อยที่สุด ถ้ากรณีค่าน้อยที่สุดมีค่าเป็น 0 จะได้ว่า $(r1)^2 - (r2)^2 + (r3)^2 + (r4)^2 - (r5)^2 + (r6)^2 = 0$ หรือ $(r1)^2 - (r3)^2 + (r4)^2 + (r6)^2 = (r2)^2 + (r5)^2$</p>	 <p>ความตรงแบบ Linear Regression</p> <p>การสร้างเส้นตรงแบบ Least Square Method</p>
<p>3) แบบ ISO1101 (Minimum Zone) เกิดจากการสร้างเส้นตรงคู่ขนาน โดยให้เส้นที่เราพิจารณานั้นน้อยอยู่ในเส้นคู่ขนานดังรูป ค่าความตรงแบบ ISO 1101 คือ ค่าระยะระหว่างเส้นขนานที่สั้นที่สุด</p>	 <p>เส้นตรงแบบ ISO 1101</p>

พิถีความเฝือของความตรง (Straightness tolerance)

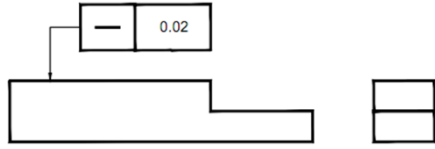
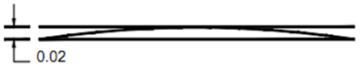
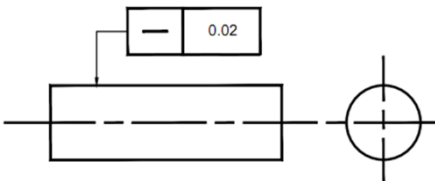

พิถีความเฝือของความตรง สามารถนำมาใช้ในการควบคุมองค์ประกอบพื้นผิว, แกน หรือระนาบศูนย์กลาง เมื่อนำมาใช้ในการควบคุมพื้นผิวเรียบ ซึ่งจะใช้ในมุมมองที่ซึ่งจะควบคุมให้เป็นเส้นตรง เมื่อนำมาใช้ในการควบคุมเส้นในทิศทางเดียวเท่านั้น จะแตกต่างจากความเรียบ (Flatness) ที่ครอบคลุมพื้นผิวทั้งหมดมากกว่า พิกัดความเฝือของความตรงยินยอมให้บริเวณของพิถีความเฝือของความกว้างที่ระบุไว้ภายในซึ่งทุกจุดบนเส้นที่ต้องวางอยู่ ความตรงโดยทั่วไปจะใช้องค์ประกอบตามแนวยาว

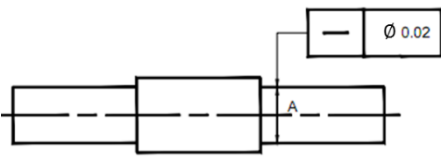
เราสามารถใช่ความเป็นเส้นตรงในการกำหนดค่าความเฝือสำหรับ

- ความเป็นเส้นตรงของเส้น
- ความเป็นเส้นตรงของแกนในระนาบ
- ความเป็นเส้นตรงของแกนรูปทรงกระบอกแบบต่างๆ (solids of revolution)

การกำหนดรูปร่างบนแบบ

ตารางที่ 2.2 แสดงรายละเอียดการระบุพิถีความเฝือของความตรงบนแบบ

Straightness		ทุก ๆ เส้นจริงบนพื้นผิวด้านบน ขนานกับระนาบของภาพฉายในสิ่งซึ่งค่าความเฝือของกรอบถูกแสดงต้องอยู่ระหว่างเส้นทั้งสองที่ขนานกันในแนวอนระยะห่าง 0.02 mm 
		ทุก ๆ ตำแหน่งของทรงกระบอกจะต้องวางอยู่ระหว่างเส้นตรงสองเส้นที่ขนานกันบนพื้นผิวที่มีระยะห่าง 0.02 mm 

		<p>แกนของทรงกระบอก A เท่านั้นต้อง วางอยู่ในบริเวณค่าความเผื่อของ ทรงกระบอกที่ 0.02 mm ของเส้นผ่าน ศูนย์กลาง</p>
--	---	---

ความตรงของพื้นผิวเรียบ (Straightness of a flat surface)

พิกัดความเผื่อของความตรงถูกใช้ในงานเขียนแบบเพื่อระบุองค์ประกอบของพื้นผิวเรียบ (Flat surface) พิกัดความเผื่อของความตรงถูกใช้ในพื้นผิวด้านบน ส่วนความผิดพลาดความตรงของพื้นผิวด้านล่างถูกควบคุมโดยข้อจำกัดของขนาด ในกรณีนี้พิกัดความเผื่อของความตรงถูกใช้เพื่อควบคุมความละเอียดของพื้นผิวด้านบนเท่านั้น สภาวะของขอบข่ายการควบคุมลักษณะซึ่งองค์ประกอบใด ๆ ตามแนวยาวสำหรับพื้นผิวที่มีการอ้างอิงในทิศทางที่จะระบุจะต้องอยู่ระหว่างเส้นตรงสองเส้นขนานกันซึ่งห่างกัน 0.002 นิ้ว

ความตรงของแกนหรือระนาบศูนย์กลาง (Straightness of an axis or center plan)

สำหรับการหาแกนของชิ้นส่วน สิ่งที่ต้องรู้คือขนาดของชิ้นส่วน เพื่อหาระนาบศูนย์กลาง (Center plane) ของทั้งระนาบทั้งสองระนาบที่ขนานกัน จะต้องรู้ระยะระหว่างระนาบทั้งสอง ซึ่งเป็นตัวอย่างของสิ่งที่เรียกว่าคุณลักษณะของขนาด เหตุผลในการควบคุมแกนของชิ้นส่วนและขอบเขตการควบคุมลักษณะจะต้องนำไปใช้กับการกำหนดขนาดของชิ้นส่วนนั้น หรือควบคุมระนาบศูนย์กลางของชิ้นส่วนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมื่อความตรงถูกนำไปใช้ในการควบคุมลักษณะของแกน สำหรับพิกัดความเผื่อที่เป็นทรงกระบอกและการเพิ่มความยาวแบบเต็มรูปแบบของลักษณะที่ถูกควบคุม ความตรงถูกนำไปใช้ในการควบคุมระนาบศูนย์กลางของชิ้นงานที่มีลักษณะไม่เป็นทรงกระบอก ซึ่งคล้ายกับความตรงของลักษณะทรงกระบอก ยกเว้นบริเวณพิกัดความเผื่อคือความกว้าง และไม่มีการนำสัญลักษณ์เส้นผ่านศูนย์กลางมาใช้ภายในขอบเขตการควบคุมลักษณะ

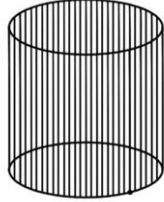
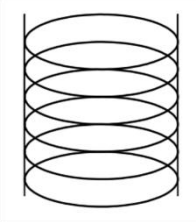
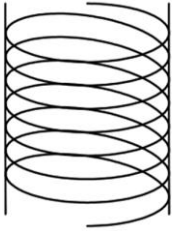
ความตรงของพื้นผิวทรงกระบอก (Straightness of a cylindrical surface)

ความตรงถูกนำไปใช้กับพื้นผิวของรูปทรงกระบอก ซึ่งคล้ายกับพื้นผิวเรียบพร้อมกับข้อยกเว้นอีกอย่างหนึ่ง นับตั้งแต่พื้นผิวที่กลม องค์ประกอบของเส้นของพื้นผิวตรงข้ามจะต้องได้รับการพิจารณาเมื่อตรวจสอบความตรง พิกัดความเผื่อของความตรงแบบเต็มรูปแบบอาจไม่สามารถใช้ได้

สำหรับองค์ประกอบเหล่านี้ เนื่องจากเงื่อนไขเช่น การสูญเสียนอกจากนี้พิกัดความเื้อของความตรงไม่ได้เป็นตัวเพิ่มพิกัดความเื้อของขนาด

พิจารณาเส้นตรงบนผิวงานทรงกระบอกทั้ง 3 แบบ ที่พื้นผิวของทรงกระบอกในแนวตั้งพบว่าสามารถเกิดลักษณะของเส้นตรงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะเส้นตรงบนพื้นผิวทรงกระบอก [26]

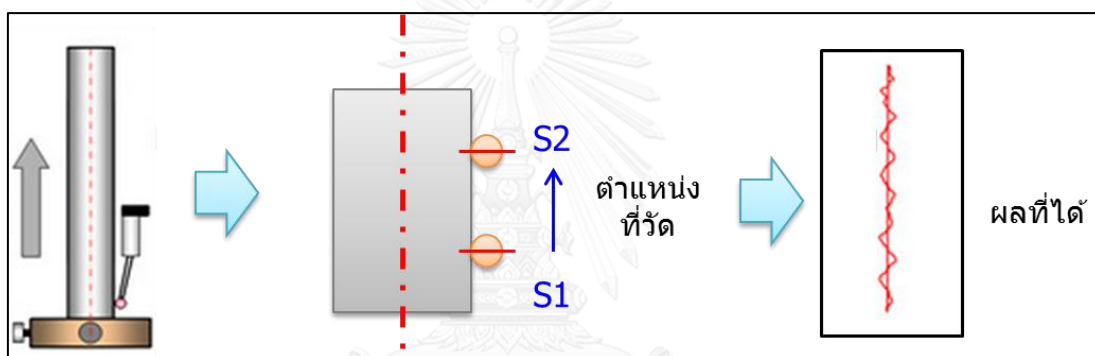
ลักษณะ	รูปภาพ
เกิดจากเส้นตรงในแนวตั้ง (Vertical Generators are straight)	
เกิดจากวงกลมเสมือนเป็นเส้นตรง (Generating circles are intrinsically straight)	
เกิดจากเกลียวขดเป็นเส้นตรง (Helices are intrinsically straight)	

2.1.13 ความตรงของชิ้นงาน

การตรวจสอบความตรงเป็นการตรวจสอบรูปร่างของชิ้นงาน โดยใช้ปลายเข็มสแกนลากไปบนผิววัสดุ เมื่อปลายเข็มลากบนชิ้นงานจะถูกแปลงเป็นสัญญาณผ่านระบบวิเคราะห์สัญญาณ แสดงผลเป็นแผนภาพและค่าความตรงในหน่วยไมโครเมตร

ความตรงตามแนวแกน Z (Z-axis straightness)

การวัดความตรงในแนวตั้ง หรือตามแนวแกน Z นั้น ได้มาโดยการวัดเชิงเส้นตรง (rectilinearly) หรือการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวตรง ความตรงจะถูกกำหนดโดยการเบี่ยงเบนจากแนวเส้นตรงที่ถูกต้องทางเรขาคณิตของรูปร่างเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.20

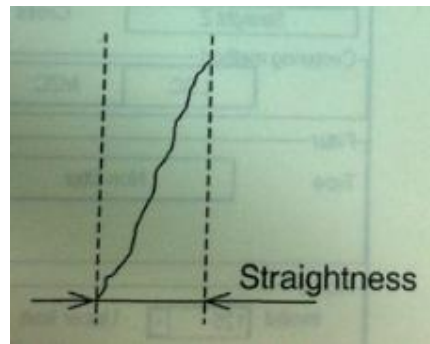


รูปที่ 2.20 แสดงผลที่ได้จากการวัดความตรง

สำหรับการตัดสินความตรงนั้นมีใช้กันอยู่ 3 วิธี คือ N.C., SLC และ MZC ดังต่อไปนี้

1) N.C. [27]

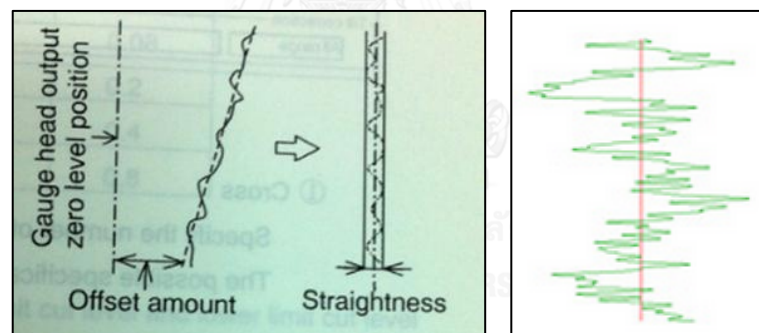
ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ความตรงถูกแทนด้วยผลต่างของระยะทาง (เป็นการยอมรับค่า P-P จากข้อมูลการวัด) จากระนาบเรียบ ซึ่งข้อมูลจากการวัดจะอยู่ระหว่างระนาบที่ขนานกับแกน Z โดยไม่มีการคำนวณเพื่อแก้ไขข้อมูลที่วัด เมื่อนำการวัดแบบ N.C. มาใช้ ข้อผิดพลาดจากการเอียงของชิ้นงานจะรวมอยู่กับค่าของความตรง ดังนั้น เพื่อให้ได้ค่าความตรงที่ถูกต้องแม่นยำ จึงมีความจำเป็นที่จะอ่านด้วยสายตาโดยการประยุกต์ใช้กับข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้



รูปที่ 2.21 วิธีการตัดสินแบบ N. C.

2) LSC (Least square method) [27]

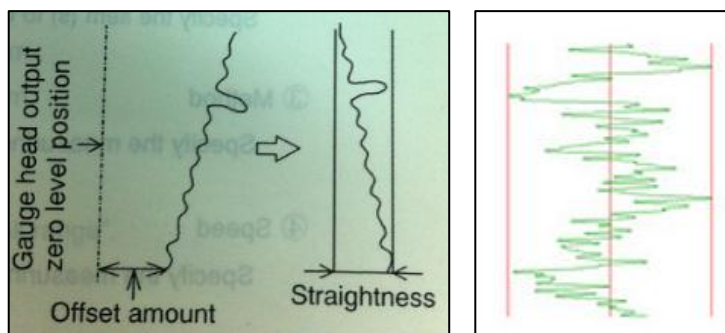
ดังแสดงในรูปที่ 2.22 การคำนวณการเอียงจากข้อมูลที่วัดโดย Least square method จะได้ความตรงเมื่อค่าที่วัดอยู่ระหว่างระนาบ 2 ระนาบที่ขนานไปกับการเอียง เมื่อศึกษาการนำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ พบว่า ข้อผิดพลาดที่เกิดจากการเอียงของชิ้นงานซึ่งจะปรากฏอยู่ในวิธี N.C. สามารถถูกกำจัดออกไป นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดปัจจัย (จำนวน offset) ซึ่งเกิดจากการดันหัวเกจไปยังชิ้นงานเพื่อให้ง่ายต่อการอ่านรายละเอียดที่บันทึกไว้ และมีการแสดงข้อมูลให้เห็นอีกด้วย



รูปที่ 2.22 วิธีการตัดสินแบบ LSC

3) MZC (Minimum Zone Method) [27]

ดังแสดงในรูปที่ 2.23 การหาค่าที่ทำให้ได้ระยะทางที่น้อยที่สุดระหว่างระนาบ 2 ระนาบเมื่อข้อมูลอยู่ระหว่าง 2 ระนาบที่ขนานกัน และถือว่าตรง ข้อมูลจะถูกเก็บหลังจากการเอียงของระนาบนั้นมีการแก้ไขให้ถูกต้อง สิ่งนี้จะสามารถกำจัดความผิดพลาดที่เกิดจากการเอียงของชิ้นงาน ที่เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับการวัดความตรงแบบ N.C. นอกจากองค์ประกอบ (ระยะ offset) ที่เกิดจากการกดหัวเกจไปยังชิ้นงานจะถูกกำจัดออกเพื่อให้ง่ายต่อการดูรายละเอียดที่บันทึก และเมื่อรายละเอียดถูกแสดงออกมา



รูปที่ 2.23 วิธีการตัดสินแบบ MZC

2.1.14 การวิเคราะห์ความถดถอย (Multiple Regression) [28]

1) รูปแบบของสมการความถดถอยเชิงพหุคูณ

การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นที่ทำหน้าที่พยากรณ์ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปกับตัวแปรตาม 1 ตัว ในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณนั้นจะต้องหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation Coefficient) เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นจำนวนทั้ง 3 ตัวกับตัวแปรตามว่ามีความสัมพันธ์กันเช่นใด สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ จะต้องหาสมการถดถอยเพื่อใช้ในการพยากรณ์ของตัวแปรตาม (Y) และหาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน รวมทั้งหาค่าสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation) เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่เป็นไปได้สูงสุดระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม รูปแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณที่มีตัวแปรถดถอย k ตัว มีรูปแบบดังสมการที่ 2.1-26

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + e \quad (2.1-23)$$

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

2) สมมติฐานหรือเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ

- ความคลาดเคลื่อน e เป็นตัวแปรที่มีการแจกแจงแบบปกติ
- ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ นั่นคือ $E(e) = 0$
- ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า

$$V(e) = \sigma^2$$

- e_i และ e_j เป็นอิสระต่อกัน; ($i \neq j$) คือ $\text{covariance}(e_i, e_j) = 0$

2.1.15 การวิเคราะห์ผล [29]

1) การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

การสรุปผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่งคือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ค่า α หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด โดย P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้นี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value จะแสดงถึงค่าที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถข้อสรุปผลการทดลองที่ระดับนัยสำคัญอื่น ๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0

โดยปกติแล้วค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 ถูกปฏิเสธ ดังนั้น เราอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็น α ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ เมื่อรู้ค่า P-Value แล้ว ผู้ทดลองก็จะสามารถทราบว่าข้อมูลมีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

2) การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ

วิธีการทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบที่นิยมใช้มี 3 วิธี คือ

- การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination) เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอยหรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าจะสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนเท่าใด ค่ายิ่งมาก สมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่าค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจมีความไวในการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป จึงนิยมใช้ค่าที่ทำการปรับค่าแล้ว R^2_{adj} แทน

- การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-Fit test; LOF) การ

ทดสอบนี้จะทำขึ้นเฉพาะกรณีที่มีการเก็บข้อมูลซ้ำ แต่ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าต่างกัน มักจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เนื่องจากต้องทำการเก็บค่าซ้ำ โดยพิจารณาจากค่า P-Value ของ LOF ถ้ามีค่ามากกว่าค่า α ที่กำหนดแล้ว แสดงว่าสมการมีความเหมาะสม

- การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยและการประมาณค่าแบบช่วง (Hypothesis testing for regression coefficients and interval estimation) การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยจัดได้ว่าเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่จะนำสมการไปใช้ในการพยากรณ์ โดยจะทำการประมาณค่าพยากรณ์ที่ต้องการโดยใช้ค่าประมาณแบบจุดและช่วงต่อไป โดยทั่วไปมักนิยมทดสอบสมมติฐานเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยซึ่งจะทำให้ทราบว่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้นจะสามารถลดรูปลงอีกได้หรือไม่

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและทำการพิสูจน์เกี่ยวกับอิทธิพลของแรงตัด และเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ นั้นมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพผิวชิ้นงาน เช่น รูปร่างของชิ้นงาน ความขรุขระผิว ความเรียบผิว ความตรง รวมถึงความเป็นเรขาคณิตของชิ้นงาน โดยได้มีการนำความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้ มาพัฒนาเป็นแบบจำลองในการทำนายคุณภาพของชิ้นงาน เพื่อให้ได้เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่สุดที่จะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพที่ดีที่สุด ลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต และยังสามารถลดต้นทุนได้อีกด้วย เช่น

W. Polini, U. Prisco (2003) [30]

ทำการศึกษาแบบจำลองของแรงตัด (cutting force model) เพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าความผิดพลาดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานเนื่องมาจากกระบวนการกลึง โดยมีการเปรียบเทียบแบบจำลองต่าง ประกอบไปด้วย Kronenberg's model และ Amarego's model ซึ่งผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า Amarego's model ให้ผลที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าการทดลองมากที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า Amarego's model เหมาะสมที่จะนำมาพยากรณ์ค่าความผิดพลาดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานมากที่สุด

Süleyman Yıldız, Faruk Ünsaşar (2005) [15]

ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแรงตัดที่เกิดจากการตัดโลหะมีอิทธิพลโดยตรงต่อการเกิดความร้อน ในระหว่างกระบวนการ, การสึกหรอของมีดตัด, คุณภาพของผิวชิ้นงาน และความแม่นยำของรูปร่าง ชิ้นงาน ในการศึกษาที่ใช้ไดนาโมมิเตอร์สำหรับการกลึง ซึ่งสามารถวัดแรงตัดสถิต (static cutting force) และแรงตัดพลวัต (Dynamic cutting force) โดยใช้สเตรนเกจ (Strain gauge) และ Piezo-electric accelerometer ตามลำดับ โดยสัญญาณของแรง (Force signals) ที่ถูกตรวจจับและนำมาประมวลผลการใช้งานอย่างเหมาะสมกับระบบการจัดเก็บข้อมูล จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ไดนาโมมิเตอร์สามารถนำมาใช้ในการวัดแรงตัดแบบสถิตและพลวัตได้ โดยสเตรนเกจถูกเชื่อมต่อกับ ข้อมูลของระบบที่ประกอบด้วยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ไดนาโมมิเตอร์สามารถวัดองค์ประกอบแรง ตัดได้ทั้ง 3 แกนที่ตั้งฉากกันในช่วงที่ทำการตัด โดยวัดค่าเป็นข้อมูลเชิงตัวเลข และสามารถเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ ในกระบวนการกลึงผลลัพธ์ที่เหมาะสมจะได้อาจจากการวัดแรงตัด ซึ่งผลที่ได้รับจากการ ทดสอบเครื่องจักรที่การตัดที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าไดนาโมมิเตอร์สามารถเชื่อถือได้สำหรับการวัด แรงตัด

Libao An (2010) [9]

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอแบบจำลองโดยใช้ Integer Programming เพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการกลึง เพื่อให้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด ซึ่งการเลือกเงื่อนไขการ ตัดที่เหมาะสม เช่น ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัด เป็นสิ่งสำคัญ เพราะสิ่งเหล่านี้มี อิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณภาพของชิ้นงาน และต้นทุนการผลิต ซึ่งเงื่อนไขการตัดตั้งที่ได้กล่าว มาแล้วทั้งหมดนี้เป็นตัวจำกัดอายุการใช้งานของมีดตัด, ความขรุขระผิว, แรงตัด และกำลังตัด จาก ผลการทดลองตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกลึงสามารถหาได้จากแบบจำลอง integer programming โดยในตัวอย่งการกลึงเดียวกันโปรแกรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นให้ค่าใกล้เคียงกับต้นทุน การผลิตต่ำสุดที่ได้รับ ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าผลการทดลองในบทความนี้สามารถเชื่อถือได้ และใน บทความยังแสดงให้เห็นถึงระยะเวลาในการเปลี่ยนมีดตัดที่ได้รับผลกระทบจากผลของตัวแปรที่ เหมาะสมที่สุดอีกด้วย

P. Venkataramaiah, K. DharmaReddy, P. Meramma (2014) [11]

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของอัตราป้อนตัด เรขาคณิตของมีดตัดต่อแรงตัดในระหว่างกระบวนการกลึงโดยใช้ Taguchi Method และ Fuzz logic การออกแบบการทดลองแบบ Taguchi ถูกนำมาใช้ในการทดลองกลึงชิ้นงานอลูมิเนียมด้วยมีดตัด HSS ที่มีองศาในทางเรขาคณิต และอัตราป้อนตัดที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการบันทึกผลตอบสนองนั้นคือ แรงตัด

Fuzzy Rule ถูกนำมาพัฒนาเพื่อทำนายแรงตัดสำหรับค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จาก Taguchi method และการยืนยันผลการทดสอบโดยการนำ Fuzzy logic ทำนายค่าของตัวแปรที่ดีที่สุดที่ใช้ในการตัด และพบว่าค่าความผิดพลาดของการทำนายอยู่ที่ 4.56% และเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำอยู่ที่ 95.44 % จากผลการทดลองนี้ระดับความเหมาะสมของอัตราป้อนตัด และมุมคายเศษโลหะ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA ถูกใช้ในการตรวจสอบ และสามารถพิสูจน์ได้ว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงป้อนตัด คือ มุมคายเศษโลหะ, อัตราป้อนตัด และ, แรงตัดหลัก และแรงในแนวรัศมี คือ มุมคายเศษโลหะ, อัตราป้อนตัดและมุมของมีดตัด ตามลำดับ, แรงตัดหลัก คือ อัตราป้อนตัด, มุมของมีดตัด และมุมคายเศษโลหะตามลำดับ และสำหรับแรงในแนวรัศมี คือ มุมของมีดตัด, มุมคายเศษโลหะ และอัตราป้อนตัดตามลำดับ

Guo Jianliang, Han Rongdi (2006) [31]

Follower rest คือ ส่วนประกอบสำคัญของการกลึงในระหว่างกระบวนการผลิตชิ้นงานแท่งแบบเรียวยาว (slender bar) ซึ่งมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้อันงานกลึงที่มีลักษณะเป็นแท่งเรียวยาวเกิดการโก่งตัวหรือเสียรูปในระหว่างกระบวนการกลึง งานวิจัยนี้ได้พิจารณาอิทธิพลของ follower rest และเงื่อนไขการกลึงต่าง ๆ ที่มีต่อความผิดพลาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง แบบจำลองถูกนำมาพัฒนาเพื่อทำนายความผิดพลาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานแท่งแบบเรียวยาว ซึ่งแบบจำลองที่นำเสนอประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 3 อย่างคือ การพิจารณาทางเรขาคณิตของความผิดพลาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, แบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element model) ของการเสียรูปของชิ้นงาน และแบบจำลองทางสถิติของแรงตัด ซึ่งการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อยืนยันค่าความแม่นยำของแบบจำลองที่ได้กล่าวมาแล้ว และพบว่าค่าการพยากรณ์และค่าจากการวัดจริงเป็นที่ยอมรับได้ และยังพบว่าความผิดพลาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานแบบแท่งขึ้นอยู่กับที่ตั้ง follower rest ความลึกตัด และอัตราป้อนตัด แต่ความเร็วตัดมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ข้อจำกัดของงานวิจัย

นี่คือ แบบจำลองไม่เหมาะกับชิ้นงานกลึงที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (length-to-diameter ratio) มากกว่า 20

Bugra Kilic, Juan A. Aguirre-Cruz, Shivakumar Raman (2007) [32]

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อหาแบบจำลองสำหรับชิ้นงานทรงกระบอกซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปร ในกระบวนการกลึง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกกำหนดไว้สำหรับรูปทรงเรขาคณิตขึ้นอยู่กับของ อัตราป้อน (feed rate), รัศมีของชิ้นงานแบบแท่ง และมุมคาย (rake angle) นอกจากนี้แรงตัดใน แนวรัศมีและแนวเส้นสัมผัสรอบวงมีผลต่อการโก่งของชิ้นงาน และการเปลี่ยนความลึกของการตัด (depth of cut) เพียงเล็กน้อย ดังนั้นแบบจำลองการโก่งตัวได้ถูกบันทึกอยู่ในแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ที่กล่าวข้างต้น

การทดลองเลือกชิ้นงานที่แตกต่างกัน 4 ชิ้น เพื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแบบ จำลอง โดยมีการเก็บค่าแรงตัด และการวัดค่าจุดเบี่ยงเบนแต่ละจุดบนผิวของชิ้นงาน เพื่อนำมา คำนวณโดยอ้างอิงจากแบบจำลองการโก่งตัว ซึ่งการวัดชิ้นงานอาศัยการสุ่มตัวอย่างที่แตกต่างกันแต่ ละขนาดของกลุ่มตัวอย่างเดียวกัน ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear function) แต่ละอันนั้นถูก แก้ไขโดยใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB

Bodi Cui, Rong di Han (2008) [33]

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมถูกพัฒนาเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการ ตัดและค่าความผิดพลาดของเส้นผ่านศูนย์กลางในกระบวนการกลึงชิ้นงานแท่งแบบเรียว (slender bar) โดยชิ้นงานที่ใช้มีลักษณะเป็น Slenderness ratio (Length-to-Diameter, L/D) เป็น 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ซึ่งประกอบด้วยอิทธิพลของความแข็งของชิ้นงานที่มีต่อค่าความผิดพลาดของเส้น ผ่านศูนย์กลาง, เส้นผ่านศูนย์กลาง และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (length-to-diameter) ของชิ้นงานกลึง ได้ถูกนำมาพิจารณาการป้อนตัวแปรอิสระของแบบจำลอง โดยจาก การศึกษาสามารถสรุปขอบเขตเงื่อนไขการตัดที่ได้รับการตรวจสอบได้ดังนี้

1. แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการพัฒนาสามารถจำลองแบบค่าความ ผิดพลาดของเส้นผ่านศูนย์กลางได้อย่างแม่นยำสำหรับการกลึงชิ้นงานแบบเรียวในช่วงที่ทำการ พิจารณา

2. การเพิ่มความเร็วตัดเป็นการช่วยปรับปรุงค่าความผิดพลาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และ การเพิ่มอัตราป้อนตัด หรือ ความลึกตัดพบว่าค่าความผิดพลาดของชิ้นงานเป็นไปในทางที่แย่

3. ตัวแปรในการตัดที่มีอิทธิพลต่อการผิดพลาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานมากที่สุดคือ ความลึกตัด และอัตราป้อนตัดในกระบวนการกลึงชิ้นงานแบบเรียว แต่อิทธิพลของความเร็วดัดส่งผลกระทบบ้างเล็กน้อยเท่านั้น

การศึกษาตัวอย่างงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น [31-33] พบว่าอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดส่งผลต่อความโก่งตัวของชิ้นงานรูปทรงกระบอก และความผิดพลาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่ใช้การทดลองนั้นเป็นชิ้นงานแท่งแบบเรียว (slender bar) และยังมีข้อกำหนดขอบเขตความเป็น slenderness ratio หรืออัตราส่วนระหว่างความยาวชิ้นงานต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (length-to-diameter) ไว้ที่ 10 – 30 ดังนั้น สำหรับงานวิจัยนี้ชิ้นงานที่ใช้จะจำกัดค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 10 เพื่อป้องกันปัญหาจากการโก่งของชิ้นงาน เนื่องจากมีผลกระทบโดยตรงต่อความตรงของชิ้นงาน ซึ่งอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดในการทดลองได้

จากการพิจารณาเบื้องต้นพบว่าข้อมูลความตรงของชิ้นงานที่วัดได้จากชิ้นงาน มีลักษณะคล้ายคลึงกับข้อมูลของความขรุขระผิว ดังนั้น จึงได้มีการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการทำนายความขรุขระผิว และการพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัด, เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ และความขรุขระผิว เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการกลึงต่าง ๆ ต่อความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางของชิ้นงาน เช่น

S. Tangjitsitcharoen (2012) [16]

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวของชิ้นงานและสัดส่วนแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นจริงในขณะตัดบนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยค่าความขรุขระผิวจะถูกแสดงในรูปสมการถดถอยพหุคูณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดของสัดส่วนแรงตัดพลวัตและเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วดัด อัตราป้อนตัด รัศมีจุมุมกัด และความลึกตัด ของโดยใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% จากการทดลองโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ในการวัดแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นจริงในขณะตัด และการวัดค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจริงจากการตัด เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่พบว่าค่าความถี่ทั้งสองมีความสอดคล้องใกล้เคียงกัน จึงสามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ได้ในโดเมนเวลาโดยการคำนวณพื้นที่แรงตัดพลวัตโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูและสร้างเป็นแบบจำลองค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัด โดยแบบจำลองนี้มีค่าความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวอยู่ที่ 90.3%

S. Tangitsitcharoen (2011) [34]

งานวิจัยนี้อธิบายเกี่ยวกับการพยากรณ์ความขรุขระผิวของชิ้นงานในขณะตัดบนเครื่องกลึง ซึ่งพิสูจน์ได้ว่าความขรุขระผิวของชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีงูมมิต และอัตราส่วนแรงตัดสถิต โดยใช้ไดนามิเตอร์ในการตรวจวัดแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดจริงและใช้สมการถดถอยพหุคูณเพื่อแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนแรงตัด, รัศมีงูมมิตและความเร็วในการตัดสูงขึ้น ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้จะมีค่าลดลง ในขณะที่เมื่ออัตราป้อนตัดและความลึกตัดมากขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการสั่นสะเทือนของมีดตัดเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการที่ถูกสร้างขึ้นเทียบกับค่าความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นจริงพบว่ามีค่าความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยอยู่ที่ 87.3% และความขรุขระผิวสูงสุดอยู่ที่ 86.5% จึงสรุปได้ว่าสมการดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานได้จริงแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป

นอกจากนี้ งานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการศึกษาอิทธิพลของความไม่เป็นเส้นตรง (out-of-straightness) ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน ไม่ว่าจะเป็นอายุการใช้งานของชิ้นงาน การสึกหรอ รวมถึงประสิทธิภาพของการทำงานที่ด้อยลง และกล่าวถึงลักษณะของชิ้นงานที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น ชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีการระบุค่าความคลาดเคลื่อนในหน่วยไมโครเมตร (μm) ดังนั้น ความตรงจึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของชิ้นงาน ดังงานวิจัยต่อไปนี้

Salah Hamed Ramadan Ali, Hassan Hassan Mohamed and Mohamed Kamal Bedewy (2009) [12]

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการนำเครื่อง CMM (Coordinate measuring machine) ที่มีความแม่นยำสูงและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของความกลม (Roundness), ความตรง (Straightness) และจุดร่วมศูนย์กลาง (Concentricity) ในรูกระบอกสูบของเครื่องยนต์แบบ Air-Cooled Automotive Diesel เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของชิ้นงานที่บิดเบี้ยวกับการออกแบบส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์

นั่นคือ เพื่อติดตามขอบเขตของความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงการสึกหรอจนกระทั่งชำรุดของเครื่องยนต์ ซึ่งเกิดจากการบิดเบี้ยวทางรูปทรงเรขาคณิตในทิศทางตามขวาง (การไม่เป็นทรงกลม,

และการใช้จุดศูนย์กลางร่วม) และทิศทางตามยาว (การไม่เป็นเส้นตรง) ของชิ้นส่วนภายในนั้นคือ รู กระบอกสูบ ที่ต้องเสียดสีกับกระบอกสูบ โดยอาศัยการวัดขนาดและรูปทรงเรขาคณิตในระดับไมโคร ของความตรง, ความกลม, เส้นผ่านศูนย์กลางของรู และความเป็นศูนย์กลางร่วมของพื้นผิวภายใน ของลูกสูบเครื่องยนต์ที่มีการสึกหรอโดยใช้เครื่อง CMM เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ และ ปรับปรุงแก้ไขเครื่องยนต์เพื่อให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานยิ่งขึ้น และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการ บำรุงรักษาอีกด้วย

S. Tangjitsitcharoen, P. Tangpornprasert, Ch. Virulsri, N. Rojanarowan

(2008) [35]

บทความนี้เพื่อพัฒนาระบบการตรวจติดตามและควบคุมตำแหน่งของเพลากับแหวนในการ ประกอบชิ้นส่วนมอเตอร์ฮาร์ดดิสต์ด้วยพิถีพิถันความคลาดเคลื่อนเท่ากับ $\pm 2.5 \mu\text{m}$ โดยได้นำเสนอวิธีการ ตรวจติดตามและควบคุมปัญหาเพลาส่งของชิ้นส่วนที่ต้องการความแม่นยำสูงในกระบวนการประกอบ ระดับไมโครเมตร โดยตรวจจับความชันของชิ้นงาน ซึ่งได้ประยุกต์ใช้เซนเซอร์วัดแรงโดยติดตั้งไว้ได้ แทนจับยึดของแหวนเพื่อตรวจจับแรงกดขณะทำการประกอบ

โดยเครื่องตรวจจับความชันได้ถูกออกแบบและพัฒนาเพื่อตรวจวัดและหาอนุพันธ์ของ แรงกดในขณะทำงาน เพื่อคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงเป็นค่าชี้วัดในการควบคุมการทำงานของ เครื่องประกอบชิ้นส่วนระดับไมโครเมตร และเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าลัพท์ที่ได้มีค่าสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง ประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดความชันนี้ถูกประเมินและพิสูจน์แล้วว่าสามารถลดปัญหาเพลาส่งได้ จริง

การทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแรงตัดสถิต และแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในระหว่าง กระบวนการกลึง และเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ เช่น ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกัด และมุมคายเศษโลหะของมีดตัด ล้วนแล้วแต่มีอิทธิพลต่อลักษณะต่าง ๆ ของชิ้นงาน และความตรง ของชิ้นงานก็เป็นตัวแปรที่สำคัญตัวแปรหนึ่งในการระบุการควบคุมคุณภาพของชิ้นงาน ดังนั้น ทั้งหมด นี้เป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่จะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัด เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ กับ ความตรงเพียงหนึ่งศูนย์กลางของชิ้นงาน เพื่อสร้างเป็นสมการทำนายความตรงของชิ้นงาน โดยสามารถ นำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องจักรกลอัจฉริยะในอนาคต ในการทำนายความตรงของชิ้นงานที่เกิดขึ้นใน ระหว่างกระบวนการได้อย่างทันท่วงที เพื่อลดกระบวนการในการตรวจวัดชิ้นงาน ลดของเสียที่เกิดขึ้น ในระหว่างกระบวนการ เพื่อประหยัดต้นทุนในการผลิต

โดยจุดเด่นของงานวิจัยคือสามารถสร้างแบบจำลองในเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อนำมาทำนายความตรงของชิ้นงานในระหว่างตัด โดยมีการพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัด หรือตัวแปรที่ป้อนเข้าไปสำหรับเงื่อนไขการตัด เพื่อให้สมการแบบจำลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design) โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและแรงตัดสถิต รวมถึงเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ สำหรับนำไปพัฒนาสมการเพื่อทำนายความตรงของชิ้นงานในกระบวนการกลึง

3.2 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตรงของชิ้นงาน

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [9-11, 16] มีการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของชิ้นงาน เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน ความตรง ความเรียบผิว เป็นต้น ซึ่งก็คือเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ เช่น ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจมูกมีด และมุมคายเศษโลหะของมีดตัด ดังนั้นเงื่อนไขการตัดจึงถูกเลือกมาเพื่อพิจารณาหาความสัมพันธ์กับความตรงของชิ้นงาน เพื่อนำไปสู่การพัฒนาสมการการทำนายความตรงของชิ้นงานในกระบวนการกลึงโดยประยุกต์ใช้อัตราส่วนแรงป้อนตัด

3.2.2 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

การกำหนดระดับปัจจัย (Level) จะพิจารณาจากคู่มือการแนะนำของผู้ผลิตเครื่องมือตัด ประกอบกับพิจารณาให้อยู่ในช่วงที่ได้ผิวงานที่ละเอียด ซึ่งสามารถแบ่งเป็นระดับต่าง ๆ ดังนี้ ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการตัด

ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	100, 150 และ 200
อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.15, 0.20 และ 0.25
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิเมตร
รัศมีจมูกมีด (มิลลิเมตร)	0.4 และ 0.8
มุมคายเศษโลหะ (องศา)	-6 และ +11

ความเร็วตัด กำหนดเป็น 3 ระดับ คือ 100, 150 และ 200 เมตรต่อนาที เป็นความเร็วตัดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งการกำหนดระดับปัจจัยเป็น 3 ระดับนั้น เนื่องจากความเป็นไปได้ว่าความสัมพันธ์อาจไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ยังเป็นช่วงที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ที่พิสูจน์ว่าให้ผลการตัดที่ดีที่สุดที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที

อัตราการป้อนตัด กำหนดเป็น 3 ระดับ คือ 0.15, 0.20 และ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ เพื่อศึกษาแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น และมีความเป็นไปได้ว่าความสัมพันธ์อาจไม่เป็นเชิงเส้นตรง

ความลึกตัด กำหนดเป็น 3 ระดับ คือ 0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาแนวโน้มความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น และมีความเป็นไปได้ว่าความสัมพันธ์อาจไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งนี้การเลือกใช้ความลึกตัด ปกติจะใช้ความลึกตัดที่น้อยเพื่อให้ได้ผิวที่ดี แต่หากน้อยเกินไปจะถูกบดบังด้วยอิทธิพลของรัศมีจุมุมมีด

รัศมีจุมุมมีด กำหนดเป็น 2 ระดับ คือ 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาอิทธิพลของรัศมีจุมุมมีดที่เปลี่ยนแปลงไปต่อค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางของชิ้นงาน ทั้งนี้หากใช้รัศมีจุมุมมีดที่มากเกินไป มุมของรัศมีจะเพิ่มขึ้นขณะตัด จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือน และใช้แรงตัดมาก ท้ายที่สุดก็จะทำให้คุณภาพผิวของชิ้นงานหลังตัดออกมาไม่ดี รวมถึงรัศมีจุมุมมีดที่มากจะส่งผลให้มีอิทธิพลมาบดบังอิทธิพลของความลึกตัดที่น้อยอีกด้วย

มุมคายเศษโลหะ กำหนดเป็น 2 ระดับ คือ -6 และ $+11$ เพื่อศึกษาอิทธิพลของมุมคายเศษโลหะที่เปลี่ยนแปลงไปต่อค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางของชิ้นงาน

3.3 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 วัสดุชิ้นงาน (Work piece material)

วัสดุชิ้นงาน (Work piece material) เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45S รูปร่างเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 – 40 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร โดยแยกเป็นระยะสำหรับจับด้วยหัวจับ (chuck) 100 มิลลิเมตร และระยะสำหรับตัด 180 มิลลิเมตร โดยเว้นระยะห่างจากหัวจับ 20 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

3.3.2 เม็ดมีด (Insert)

- 1) มุมคายเศษโลหะ -6 องศา คาร์ไบด์เคลือบผิว เกรด KC9110 ยี่ห้อKENNAMETAL
 - รหัสเม็ดมีด DNMG 150604 FN



รูปที่ 3.2 เม็ดมีด รัศมีงมกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

- รหัสเม็ดมีด DNMG 150608 FN



รูปที่ 3.3 เม็ดมีด รัศมีงมกมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา

2) คายเศษโลหะ +11 องศา คาร์ไบด์เคลือบผิว เกรด CA5525 ยี่ห้อ KYOCERA

- รหัสเม็ดมีด DCMT 11T304 HQ



รูปที่ 3.4 เม็ดมีด รัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

- รหัสเม็ดมีด DCMT 11T308 HQ



รูปที่ 3.5 เม็ดมีด รัศมีจุกมีด 0.8 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ 11 องศา

3.3.3 ด้ามมีดกลึง (Tool holder)

- รหัสด้ามมีด PDJNR2525M-15 ยี่ห้อ KENNAMETAL



รูปที่ 3.6 ด้ามมีด (มุมคายเศษโลหะเป็นลบ)

- รหัสด้ามมีด SDJCR2525M-11 ยี่ห้อ KYOCERA



รูปที่ 3.7 ด้ามมีด (มุมคายเศษโลหะเป็นบวก)

3.3.4 เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Turning machine)

ชนิด 4 แกน ยี่ห้อ MAZAK รุ่น QUICK TURN NEXUS 200 MY/MSY (ขอบเขตของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถตัดได้ 380 mm, ขอบเขตของความยาวของชิ้นงานที่ยาวที่สุดที่สามารถตัดได้ 541 mm)



รูปที่ 3.8 เครื่องกลึงซีเอ็นซี ชนิด 4 แกน

3.3.5 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)

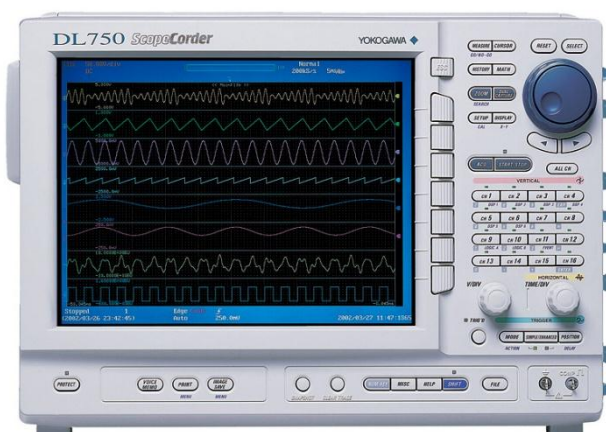
เซนเซอร์สำหรับวัดแรงตัด ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9121



รูปที่ 3.9 ไดนาโมมิเตอร์สำหรับวัดแรงตัด

3.3.6 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL750 สำหรับใช้ในการแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัดที่เกิดขึ้น
ในระหว่างกระบวนการตัด



รูปที่ 3.10 ออสซิลโลสโคป

3.3.7 เครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier)



รูปที่ 3.11 เครื่องขยายสัญญาณ

3.3.8 เครื่องวัดความขรุขระผิว (Roughness tester)

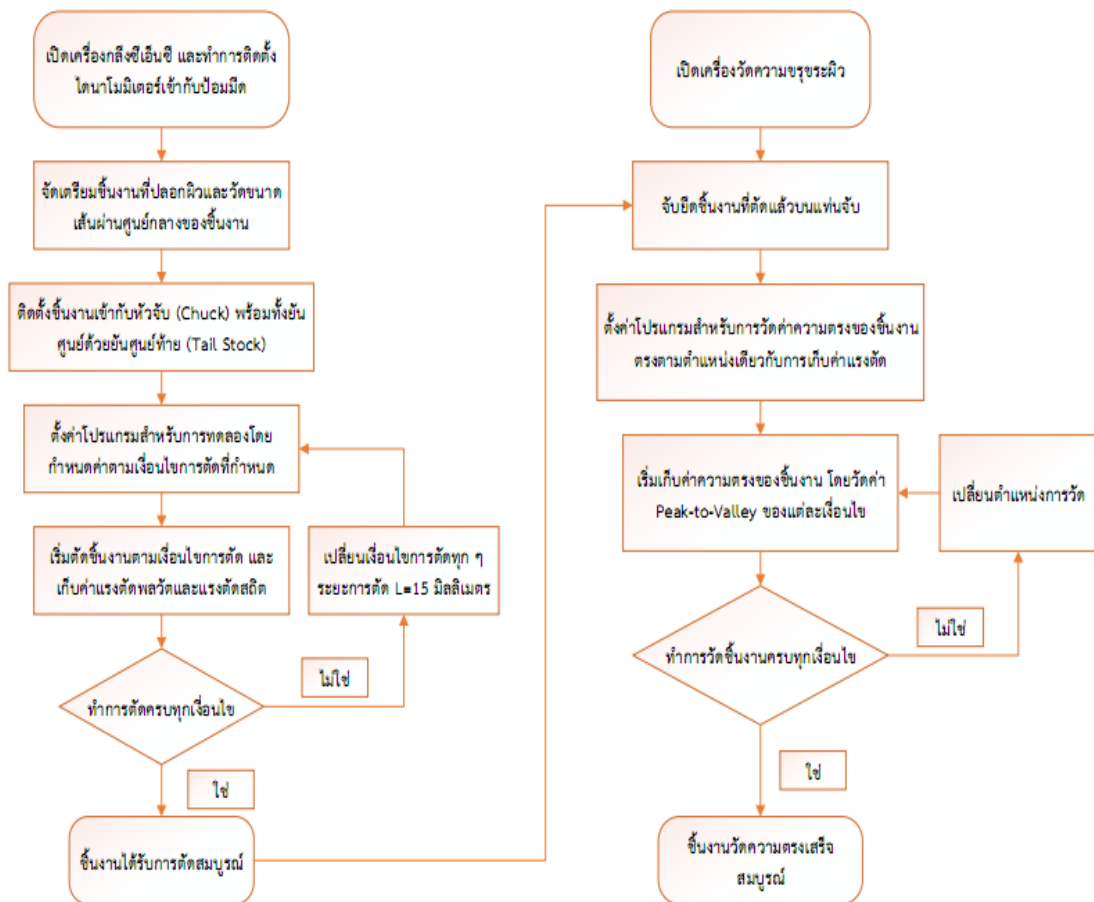
ยี่ห้อ MITUTOYO รุ่น SJ400 ใช้สำหรับวัดค่าความตรงของชิ้นงาน



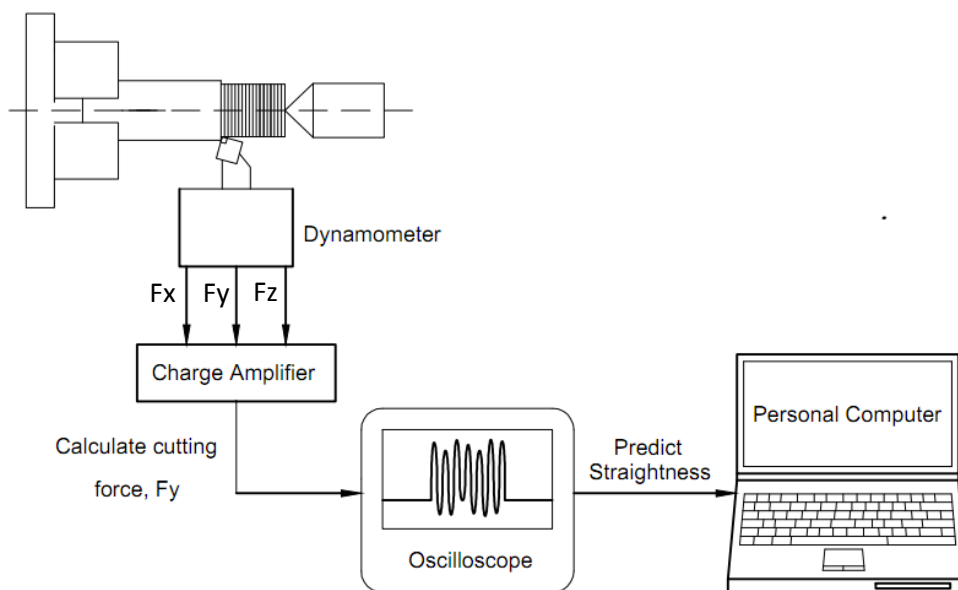
รูปที่ 3.12 เครื่องวัดความขรุขระผิว สำหรับวัดความตรง

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นกระบวนการกึ่งแบบแห้งโดยมีขั้นตอนการทดลองในแต่ละเงื่อนไขการตัด ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

- 3.4.1 ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) เข้ากับชุดป้อมมีด (Turret) ของเครื่องกลึงซีเอ็นซี เพื่อทำการวัดสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดชิ้นงาน
- 3.4.2 เชื่อมต่อสายสัญญาณของไดนาโมมิเตอร์เข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier)
- 3.4.3 เชื่อมต่อสายสัญญาณของเครื่องขยายสัญญาณเข้ากับออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่อแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด
- 3.4.4 ติดตั้งชิ้นงานเข้าหัวจับ (chuck) โดยระยะสำหรับติดตั้งเข้ากับหัวจับคือ 100 มิลลิเมตร และยื่นศูนย์ด้วยยื่นศูนย์ท้าย (Tail stock) เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานสั่นในขณะตัด
- 3.4.5 กลึงปลอกชิ้นงานเพื่อเตรียมผิวของชิ้นงาน และทำการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานก่อนทำการตัด
- 3.4.6 ทำการกลึงชิ้นงานด้วยการป้อนเงื่อนไขการตัด ตามตารางที่ 3.1 โดยกำหนดระยะสำหรับตัดในแต่ละเงื่อนไขเป็น 15 มิลลิเมตร และทำการเปลี่ยนเงื่อนไขในทุก ๆ ระยะการตัด
- 3.4.7 บันทึกค่าแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัด โดยสัญญาณแรงตัดพลวัตและแรงตัดสถิตที่วัดได้จากไดนาโมมิเตอร์ จะถูกขยายสัญญาณด้วยเครื่องขยายสัญญาณ และถูกกรองความถี่ย่านสัญญาณต่ำที่ 5,000 เฮิรตซ์ โดยอัตราการเก็บข้อมูลเป็น 10,000 ค่าต่อวินาที

3.4.8 เก็บตัวอย่างของเศษโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงาน

3.4.9 ตรวจสอบสภาพการสึกหรอของเม็ดเม็ดด้วยเครื่องวัดความสึกหรอ โดยความสึกหรอของเม็ดเม็ดที่ใช้จะต้องมีขนาดไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร

3.4.10 วัดค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางของชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยใช้ความเร็วในการลากเข็มวัด 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที และใช้อัตราการสุ่มเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที โดยระยะที่ทำการวัดเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร

3.4.11 วิเคราะห์รูปแบบความถี่ของค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางของชิ้นงาน และสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform)

3.5 การออกแบบการทดลอง

สำหรับการออกแบบการทดลอง ประกอบด้วยปัจจัยหลัก 5 ปัจจัย ในแต่ละปัจจัยมี 2 และ 3 ระดับ แสดงดังตารางที่ 3.2 เป็นการตัดแบบแฟกต์โดยมีจำนวนครั้งในการทำการทดลองทั้งหมด 108 การทดลอง ในแต่ละการทดลองมีการบันทึกผลค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางของชิ้นงาน แรงตัดพลวัต และแรงตัดสถิตที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึงตัดชิ้นงาน

ตารางที่ 3.2 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ			สัญลักษณ์
1. ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	100	150	200	V
2. อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.15	0.20	0.25	f
3. ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.4	0.6	0.8	D
4. รัศมีจุกมีด (มิลลิเมตร)	0.4	0.8	-	R_n
5. มุมคายเศษโลหะ (องศา)	-6	+11	-	γ

ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลอง

Run Order	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุ่มกมิต (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
1	150	0.2	0.6	0.8	11
2	200	0.15	0.6	0.8	11
3	150	0.15	0.4	0.8	11
4	100	0.2	0.8	0.4	-6
5	100	0.2	0.8	0.4	11
6	150	0.15	0.8	0.8	-6
7	200	0.15	0.8	0.4	-6
8	150	0.25	0.8	0.4	-6
9	100	0.2	0.8	0.8	11
10	200	0.15	0.4	0.4	-6
11	200	0.25	0.4	0.8	-6
12	150	0.2	0.6	0.8	-6
13	150	0.15	0.8	0.4	11
14	150	0.2	0.4	0.8	-6
15	200	0.15	0.6	0.4	11
16	100	0.2	0.8	0.8	-6
17	100	0.25	0.4	0.8	11
18	150	0.15	0.4	0.4	11
19	200	0.2	0.4	0.4	-6
20	100	0.25	0.8	0.8	11
21	150	0.25	0.6	0.4	-6
22	200	0.2	0.4	0.4	11
23	200	0.25	0.8	0.4	11
24	150	0.25	0.4	0.4	11
25	100	0.25	0.6	0.4	-6
26	150	0.2	0.8	0.8	-6
27	100	0.2	0.4	0.4	-6

Run Order	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุ่มกมิต (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
28	200	0.25	0.4	0.8	11
29	150	0.2	0.4	0.4	11
30	200	0.15	0.6	0.4	-6
31	100	0.15	0.8	0.8	-6
32	200	0.25	0.6	0.8	-6
33	100	0.15	0.6	0.8	-6
34	150	0.2	0.4	0.4	-6
35	150	0.25	0.4	0.4	-6
36	200	0.2	0.6	0.4	-6
37	200	0.15	0.8	0.8	11
38	200	0.25	0.4	0.4	11
39	100	0.25	0.6	0.8	11
40	150	0.15	0.8	0.4	-6
41	200	0.25	0.8	0.4	-6
42	150	0.25	0.4	0.8	-6
43	100	0.25	0.4	0.4	-6
44	150	0.2	0.6	0.4	-6
45	200	0.25	0.6	0.8	11
46	200	0.2	0.6	0.4	11
47	100	0.25	0.4	0.8	-6
48	100	0.25	0.8	0.4	11
49	150	0.25	0.6	0.4	11
50	200	0.2	0.4	0.8	11
51	150	0.15	0.6	0.8	11
52	100	0.15	0.8	0.4	11
53	200	0.25	0.8	0.8	-6
54	150	0.15	0.4	0.8	-6
55	150	0.25	0.8	0.4	11

Run Order	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุ่มกมิต (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
56	150	0.2	0.6	0.4	11
57	200	0.15	0.8	0.4	11
58	150	0.25	0.6	0.8	11
59	150	0.25	0.4	0.8	11
60	200	0.2	0.4	0.8	-6
61	100	0.25	0.8	0.8	-6
62	200	0.15	0.4	0.4	11
63	200	0.25	0.6	0.4	-6
64	100	0.25	0.4	0.4	11
65	100	0.15	0.4	0.4	-6
66	100	0.2	0.4	0.8	11
67	100	0.2	0.6	0.4	11
68	100	0.15	0.6	0.8	11
69	150	0.2	0.8	0.8	11
70	100	0.2	0.4	0.8	-6
71	100	0.15	0.4	0.8	-6
72	100	0.2	0.6	0.4	-6
73	150	0.15	0.4	0.4	-6
74	150	0.15	0.8	0.8	11
75	200	0.15	0.8	0.8	-6
76	200	0.2	0.8	0.8	-6
77	200	0.2	0.6	0.8	11
78	100	0.15	0.8	0.4	-6
79	100	0.15	0.8	0.8	11
80	100	0.2	0.6	0.8	11
81	200	0.2	0.8	0.4	-6
82	200	0.25	0.4	0.4	-6
83	200	0.15	0.4	0.8	-6

Run Order	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	รัศมีจุ่มกมิต (มิลลิเมตร)	มุมคายเศษโลหะ (องศา)
84	150	0.25	0.8	0.8	-6
85	100	0.15	0.4	0.8	11
86	150	0.2	0.8	0.4	11
87	150	0.2	0.8	0.4	-6
88	200	0.2	0.6	0.8	-6
89	100	0.15	0.6	0.4	-6
90	100	0.25	0.8	0.4	-6
91	200	0.25	0.8	0.8	11
92	150	0.25	0.8	0.8	11
93	200	0.2	0.8	0.4	11
94	150	0.15	0.6	0.4	-6
95	200	0.25	0.6	0.4	11
96	100	0.25	0.6	0.4	11
97	150	0.15	0.6	0.4	11
98	100	0.25	0.6	0.8	-6
99	200	0.15	0.6	0.8	-6
100	200	0.15	0.4	0.8	11
101	150	0.15	0.6	0.8	-6
102	100	0.2	0.4	0.4	11
103	100	0.15	0.4	0.4	11
104	100	0.2	0.6	0.8	-6
105	150	0.25	0.6	0.8	-6
106	150	0.2	0.4	0.8	11
107	100	0.15	0.6	0.4	11
108	200	0.2	0.8	0.8	11

3.6 การพัฒนาสมการทำนายความตรงของชิ้นงานในขณะตัด

สมการที่ใช้จะอยู่ในรูปฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล ตามทฤษฎีของความขรุขระผิว เนื่องจากข้อมูลความตรงของชิ้นงานมีลักษณะคล้ายกับข้อมูลของความขรุขระผิว แต่จะมีข้อแตกต่างในเรื่องของการคำนวณ โดยความขรุขระผิวจะคำนวณจากพื้นที่ผิวเฉลี่ย และความตรงจะคำนวณจากส่วนต่าง ๆ ของค่าความขรุขระผิวสูงสุด (Max) และค่าที่น้อยที่สุด (Min) ซึ่งสมการทำนายความตรงของชิ้นงานในขณะตัดนี้ จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดพลวัตและแรงตัดสถิตในทิศทางป้อนตัดและเงื่อนไขการตัดอื่น ๆ ดังนี้

$$S_t = C_1 \cdot (V)^{a_1} \cdot (f)^{a_2} \cdot (D)^{a_3} \cdot (R_n)^{a_4} \cdot (e)^{a_5 \gamma} \cdot \left(\frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}} \right)^{a_6} \quad (3.4-1)$$

โดยที่ S_t = ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงาน (ไมโครเมตร)

V = ความเร็วตัดชิ้นงานใน (เมตรต่อนาที)

f = อัตราการป้อนตัดใน (มิลลิเมตรต่อรอบ)

D = ความลึกตัดใน (มิลลิเมตร)

R_n = รัศมีจุมุมมีด (มิลลิเมตร)

γ = มุมคายเศษโลหะ (องศา)

$\frac{F_{f(\max)} - F_{f(\min)}}{F_s}$ = อัตราส่วนระหว่างแรงป้อนตัดพลวัตและแรงป้อนตัดสถิต

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ และ C_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการ

จากสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น 3.4-1 จะถูกแปลงและนำเสนอในรูปสมการถดถอยพหุคูณด้วยการใช้การแปลงลอการิทึม ดังนี้

$$\ln S_t = \ln C_1 + a_1 \ln V + a_2 \ln f + a_3 \ln D + a_4 \ln R_n + a_5 \gamma + a_6 \ln \left(\frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}} \right) \quad (3.4-2)$$

จากสมการถดถอยพหุคูณ 3.4-2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 \quad (3.4-3)$$

โดยที่ y แทนค่า $\ln S_t$ ตัวแปร x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 และ x_6 แทนด้วยค่า $\ln V, \ln f, \ln D, \ln R_n, \gamma$ และ $\ln \left(\frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}} \right)$ ตามลำดับ ค่า β_0 คือจุดตัดแกน y ของสมการ 3.4-3 เมื่อตัวแปร x_1 ถึง x_6 เท่ากับ 0 โดยที่ค่า $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ และ β_6 คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย ซึ่งได้มาจากการใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงพหุคูณ โดยใช้การประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method)

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.7.1 จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ได้แก่ ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงาน สัญญาณแรงตัดพลวัตและสัญญาณแรงตัดสถิต จะนำความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงานและสัญญาณแรงตัดพลวัตมาแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform ดังแสดงในภาคผนวก ก

3.7.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงาน และแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ เมื่อพบว่ามีคุณสมบัติคล่องกัน จะนำผลการทดลอง ณ เงื่อนไขการตัดนั้น ๆ มาใช้วิเคราะห์ต่อไป

3.7.3 คำนวณค่าอัตราส่วนของแรง โดยแรงตัดพลวัตคำนวณจากค่าแอมพลิจูดของสัญญาณแรงป้อนตัด (Peak to Valley) ในโดเมนเวลา ซึ่งแรงป้อนตัดพลวัตนี้เป็นตัวแปรตัวหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงาน และจะนำไปใช้ในการพัฒนาสมการความสัมพันธ์ โดยจะอยู่ในรูปของอัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตต่อแรงป้อนตัดสถิต

3.7.4 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยพหุคูณเพื่อยืนยันว่าสมการทำนายความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงานที่ได้มีความเหมาะสมด้วยข้อมูลที่นำเชื่อถือ จะต้องทำการทดสอบว่า ความผิดพลาดในสมการ ϵ_i มีการกระจายแบบปกติ และเป็นอิสระต่อกันหรือไม่ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 ซึ่งเขียนย่อได้เป็น ซึ่งจะ $\epsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ซึ่งจะส่งผลให้ค่า y จะมีการกระจายแบบปกติ และเป็นอิสระ ขั้นตอนการทดสอบประกอบด้วย

3.7.4.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality)

ในการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normal distribution assumption) นั้น จะพิจารณาจากการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ของตัวแปรผลตอบว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยนำค่าคลาดเคลื่อนมาสร้าง Normal Probability Plot และพิจารณาการกระจายตัว โดยการกระจายตัวควรเป็นตามแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงถือว่าเป็นการกระจายตัวแบบปกติ

3.7.4.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระนั้น จะตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ของตัวแปรตอบว่ามีความเกี่ยวพันกันหรือไม่ โดยการพล็อตค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล (Observation order) ค่าคลาดเคลื่อนไม่ควรมีแนวโน้มที่จำเพิ่มขึ้น หรือลดลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ จึงถือว่าข้อมูลเป็นอิสระ

3.7.4.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance stability)

การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนเป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของค่าคลาดเคลื่อน (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งการกระจายไม่ควรมีลักษณะที่เป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด จะถือว่ามีความเสถียรภาพของความแปรปรวน

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังจะกล่าวต่อไปนี้จะอธิบายให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงตัดในทิศทางป้อนตัด (Feed force, F_y) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด เพื่อนำไปสู่การพัฒนาสมการเพื่อทำนายความตรงในขณะตัด โดยปัจจัยที่นำมาประกอบการพิจารณา ได้แก่ เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด และมุมคายเศษโลหะ โดยการวิเคราะห์จะแสดงให้เห็นในแต่ละหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จากการทำการทดลองกลึงชิ้นงานตามเงื่อนไขการตัดตามตารางที่ 3.3 แสดงให้เห็นในตารางที่ 4.1 โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง และผลการทดลองที่นำมาพิจารณา ดังต่อไปนี้

ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ความเร็วตัด (V) หน่วย รอบต่อนาที
- 2) อัตราป้อนตัด (f) หน่วย มิลลิเมตรต่อรอบ
- 3) ความลึกตัด (D) หน่วย มิลลิเมตร
- 4) รัศมีจุมุมมีด (R_n) หน่วย มิลลิเมตร
- 5) มุมคายเศษโลหะ (γ) หน่วย องศา

ผลการทดลอง

- 1) ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางของชิ้นงาน (S_r) หน่วย ไมโครเมตร
- 2) อัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตต่อแรงตัดสถิต ($\frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}}$)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง

Run	V	f	D	R _n	γ	S _t	$\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_{y(s)}}$
1	150	0.20	0.6	0.8	11	10.24	0.6522
2	200	0.15	0.6	0.8	11	5.78	0.5175
3	150	0.15	0.4	0.8	11	7.21	0.5155
4	100	0.20	0.8	0.4	-6	22.58	1.3978
5	100	0.20	0.8	0.4	11	21.90	1.3558
6	150	0.15	0.8	0.8	-6	14.24	0.7611
7	200	0.15	0.8	0.4	-6	13.54	0.8027
8	150	0.25	0.8	0.4	-6	30.44	2.2214
9	100	0.20	0.8	0.8	11	13.09	0.8612
10	200	0.15	0.4	0.4	-6	12.22	0.6665
11	200	0.25	0.4	0.8	-6	14.48	0.8416
12	150	0.20	0.6	0.8	-6	15.61	0.8444
13	150	0.15	0.8	0.4	11	14.10	0.7939
14	150	0.20	0.4	0.8	-6	14.37	0.8553
15	200	0.15	0.6	0.4	11	12.49	0.6145
16	100	0.20	0.8	0.8	-6	18.97	1.1783
17	100	0.25	0.4	0.8	11	15.32	0.7960
18	150	0.15	0.4	0.4	11	12.11	0.5961
19	200	0.20	0.4	0.4	-6	16.49	0.9861
20	100	0.25	0.8	0.8	11	17.17	0.9713
21	150	0.25	0.6	0.4	-6	28.39	1.8924
22	200	0.20	0.4	0.4	11	15.92	0.8329
23	200	0.25	0.8	0.4	11	26.55	1.6969

Run	V	f	D	R _n	γ	S _t	$\frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}}$
24	150	0.25	0.4	0.4	11	23.71	1.3448
25	100	0.25	0.6	0.4	-6	30.56	2.2891
26	150	0.20	0.8	0.8	-6	16.09	0.9572
27	100	0.20	0.4	0.4	-6	19.50	1.2520
28	200	0.25	0.4	0.8	11	10.69	0.5930
29	150	0.20	0.4	0.4	11	16.029	0.8597
30	200	0.15	0.6	0.4	-6	12.643	0.7246
31	100	0.15	0.8	0.8	-6	17.012	0.8917
32	200	0.25	0.6	0.8	-6	15.002	0.8484
33	100	0.15	0.6	0.8	-6	13.943	0.8019
34	150	0.20	0.4	0.4	-6	17.919	1.1105
35	150	0.25	0.4	0.4	-6	24.107	1.4079
36	200	0.20	0.6	0.4	-6	17.470	1.0125
37	200	0.15	0.8	0.8	11	6.060	0.5335
38	200	0.25	0.4	0.4	11	23.259	1.2685
39	100	0.25	0.6	0.8	11	16.480	0.9580
40	150	0.15	0.8	0.4	-6	14.773	0.8244
41	200	0.25	0.8	0.4	-6	29.015	1.9790
42	150	0.25	0.4	0.8	-6	17.720	1.0734
43	100	0.25	0.4	0.4	-6	26.171	1.7335
44	150	0.20	0.6	0.4	-6	18.341	1.1126
45	200	0.25	0.6	0.8	11	11.919	0.6201
46	200	0.20	0.6	0.4	11	18.103	0.9737
47	100	0.25	0.4	0.8	-6	18.812	1.2097

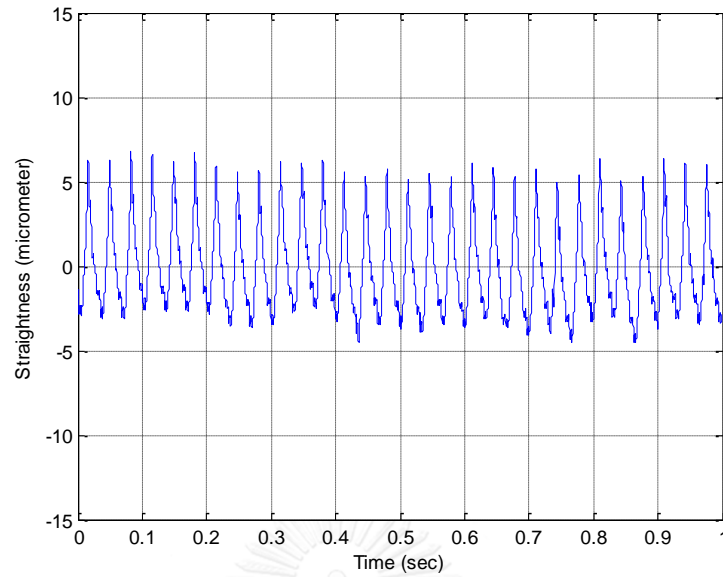
Run	V	f	D	R _n	γ	S _t	$\frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}}$
48	100	0.25	0.8	0.4	11	27.514	1.8508
49	150	0.25	0.6	0.4	11	24.426	1.5072
50	200	0.20	0.4	0.8	11	6.165	0.5083
51	150	0.15	0.6	0.8	11	8.122	0.5512
52	100	0.15	0.8	0.4	11	16.456	0.8081
53	200	0.25	0.8	0.8	-6	16.175	0.9402
54	150	0.15	0.4	0.8	-6	12.083	0.6211
55	150	0.25	0.8	0.4	11	27.332	1.8061
56	150	0.20	0.6	0.4	11	18.097	1.0828
57	200	0.15	0.8	0.4	11	12.619	0.6464
58	150	0.25	0.6	0.8	11	13.112	0.7339
59	150	0.25	0.4	0.8	11	12.121	0.7025
60	200	0.20	0.4	0.8	-6	10.794	0.6293
61	100	0.25	0.8	0.8	-6	21.079	1.3450
62	200	0.15	0.4	0.4	11	11.230	0.5793
63	200	0.25	0.6	0.4	-6	27.109	1.7428
64	100	0.25	0.4	0.4	11	23.999	1.4317
65	100	0.15	0.4	0.4	-6	13.801	0.7545
66	100	0.20	0.4	0.8	11	10.262	0.7194
67	100	0.20	0.6	0.4	11	21.012	1.2930
68	100	0.15	0.6	0.8	11	9.663	0.5956
69	150	0.20	0.8	0.8	11	11.375	0.7447
70	100	0.20	0.4	0.8	-6	17.846	1.1438
71	100	0.15	0.4	0.4	-6	13.436	0.7535

Run	V	f	D	R _n	γ	S _t	$\frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}}$
72	100	0.2	0.6	0.8	11	8.473	0.5675
73	150	0.15	0.4	0.8	-6	9.744	0.5706
74	150	0.15	0.8	0.8	-6	12.552	0.7001
75	200	0.15	0.8	0.8	11	7.715	0.5575
76	200	0.2	0.8	0.4	-6	17.201	0.9029
77	200	0.2	0.6	0.8	11	11.656	0.6266
78	100	0.15	0.8	0.8	11	12.005	0.7632
79	100	0.15	0.8	0.4	-6	17.631	0.7018
80	100	0.2	0.6	0.4	-6	22.891	1.3154
81	200	0.2	0.8	0.8	-6	8.272	1.1412
82	200	0.25	0.4	0.8	-6	19.563	1.3428
83	200	0.15	0.4	0.8	11	8.428	0.5579
84	150	0.25	0.8	0.4	11	20.362	1.2039
85	100	0.15	0.4	0.4	-6	20.724	0.5736
86	150	0.2	0.8	0.8	-6	11.431	1.1854
87	150	0.2	0.8	0.4	-6	16.080	1.2538
88	200	0.2	0.6	0.4	-6	32.141	0.6833
89	100	0.15	0.6	0.8	11	13.699	0.8464
90	100	0.25	0.8	0.8	11	15.787	2.6240
91	200	0.25	0.8	0.4	11	19.849	1.2039
92	150	0.25	0.8	0.4	-6	14.201	0.5736
93	200	0.2	0.8	0.4	11	24.069	1.1854
94	150	0.15	0.6	0.4	11	25.592	1.2538
95	200	0.25	0.6	0.4	11	13.250	0.6833

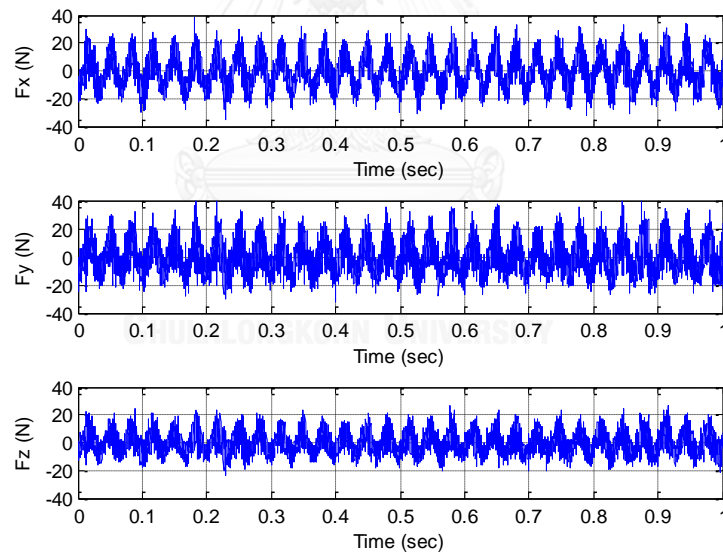
Run	V	f	D	R _n	γ	S _t	$\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_{y(s)}}$
96	100	0.25	0.6	0.8	-6	20.090	0.8464
97	150	0.15	0.6	0.8	-6	8.360	2.6240
98	100	0.25	0.6	0.8	11	5.097	1.2039
99	200	0.15	0.6	0.8	-6	13.634	0.5736
101	150	0.15	0.6	0.4	11	13.982	0.6640
102	100	0.2	0.4	0.8	-6	18.335	1.0073
103	100	0.15	0.4	0.8	-6	18.688	0.7680
104	100	0.2	0.6	0.8	11	8.945	1.1030
105	150	0.25	0.6	0.4	11	14.922	1.1414
106	150	0.2	0.4	0.8	11	9.842	0.6402
107	100	0.15	0.6	0.8	11	10.236	0.7813
108	200	0.2	0.8	0.8	11	5.775	0.5722

4.2 การวิเคราะห์ความตรงของชิ้นงาน และแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่

สำหรับการเลือกใช้อัตราส่วนของแรงป้อนตัดพลวัตและแรงป้อนตัดสถิตมาวิเคราะห์นั้น เริ่มจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงป้อนตัดกับข้อมูลของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ก่อน โดยอาศัยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) ของสัญญาณแรงป้อนตัดพลวัต และข้อมูลความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงานจากโดเมนเวลาให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่ ยกตัวอย่างความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นที่เงื่อนไขการตัดดังต่อไปนี้ ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ 11 องศา



รูปที่ 4.1 ลักษณะข้อมูลค่าความตรงของชิ้นงานในโดเมนเวลา



รูปที่ 4.2 ลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณแรงป้อนตัดพลวัต และลักษณะข้อมูลความตรงของชิ้นงานเทียบกับเวลาในโดเมนเวลา พบว่าสัญญาณทั้งสองมีลักษณะเป็นลูกคลื่นเช่นเดียวกัน และยังมีจำนวนลูกคลื่นใกล้เคียงกันอีกด้วย ข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์

นั้นจะพิจารณาที่จุดอ้างอิงเดียวกัน โดยระยะทางในการตัดที่นำมาพิจารณานั้นมีความจำเป็นต้องเท่ากับระยะทางในการวัด ซึ่งการหาระยะทางการตัดมีขั้นตอนการคำนวณ ดังต่อไปนี้

4.2.1 การคำนวณระยะทางการกลึงใน 1 วินาที

1) ความเร็วรอบของชิ้นงาน, N_w (รอบต่อนาที) สำหรับการคำนวณหาความเร็วป้อน ดังสมการ

$$N_w = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} \quad (4.2-1)$$

โดยที่ V คือ ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที) และ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มิลลิเมตร) ดังนั้น จะได้

$$N_w = \frac{1000 \cdot (100)}{\pi \cdot (34.4)} = 925.32 \quad \text{รอบต่อนาที}$$

2) ความเร็วป้อนตัดในแนวเส้นตรง, V_f (มิลลิเมตรต่อนาที) สำหรับการคำนวณหาระยะทางการตัด ดังสมการ

$$V_f = f \cdot N_w \quad (4.2-2)$$

โดยที่ f คือ อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ) ดังนั้น จะได้

$$V_f = (0.25) \cdot (925.32) = 231.33 \quad \text{มิลลิเมตรต่อนาที}$$

3) ระยะทางการตัด, S (มิลลิเมตร) สำหรับการคำนวณหาจำนวนข้อมูลในระยะเวลาการตัด 1 วินาที ดังสมการ

$$S = \frac{V_f}{60} \quad (4.2-3)$$

$$S = \frac{(231.33)}{60} = 3.86 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น ระยะเวลาในการตัด 1 วินาที คือ 3.86 มิลลิเมตร

4.2.2 การคำนวณจำนวนข้อมูลของความตรงของชิ้นงาน

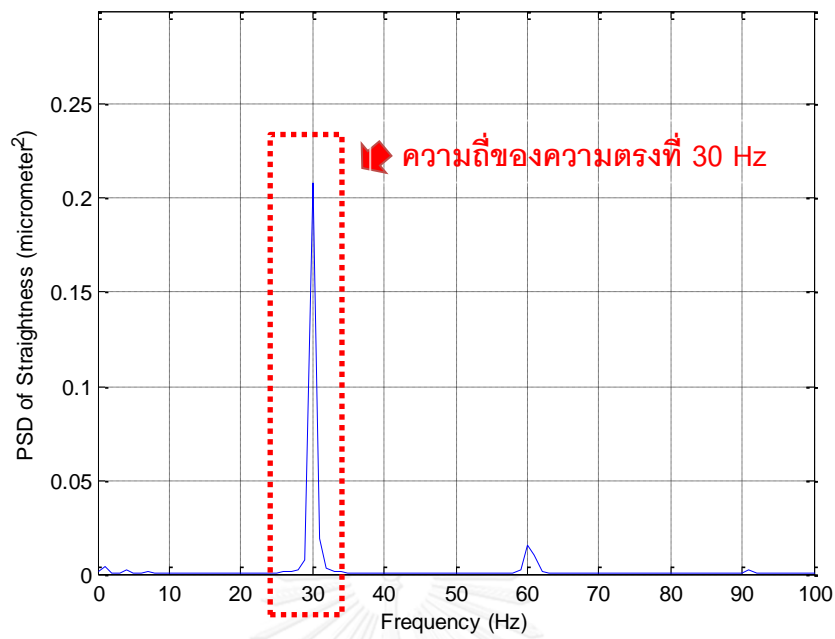
เนื่องจากอัตราสุ่มเก็บข้อมูลของสัญญาณแรงตัด และอัตราการสุ่มเก็บข้อมูลของการวัดความตรงของผิวชิ้นงานนั้นมีค่าแตกต่างกัน โดยแรงตัดใช้อัตราสุ่มเก็บข้อมูล (Sampling rate) เท่ากับ 10,000 ข้อมูลต่อวินาที ในขณะที่การเก็บข้อมูลของการวัดความตรงของชิ้นงานใช้อัตราสุ่มเก็บข้อมูล เท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการคำนวณหาจำนวนข้อมูลของการเก็บค่าความตรงของชิ้นงานที่เท่ากับระยะทางในการตัดใน 1 วินาที ซึ่งการวัดผิวชิ้นงานได้ทำการตั้งค่าความเร็วสำหรับการวัดผิวชิ้น คือ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ด้วยระยะทางการวัดเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร

ดังนั้นการวัดผิวชิ้นงานแต่ละครั้งจะใช้เวลาในการวัดทั้งหมดเท่ากับ 25 วินาที และสำหรับระยะทางในการตัด 1 วินาที สามารถคำนวณค่าได้ดังต่อไปนี้

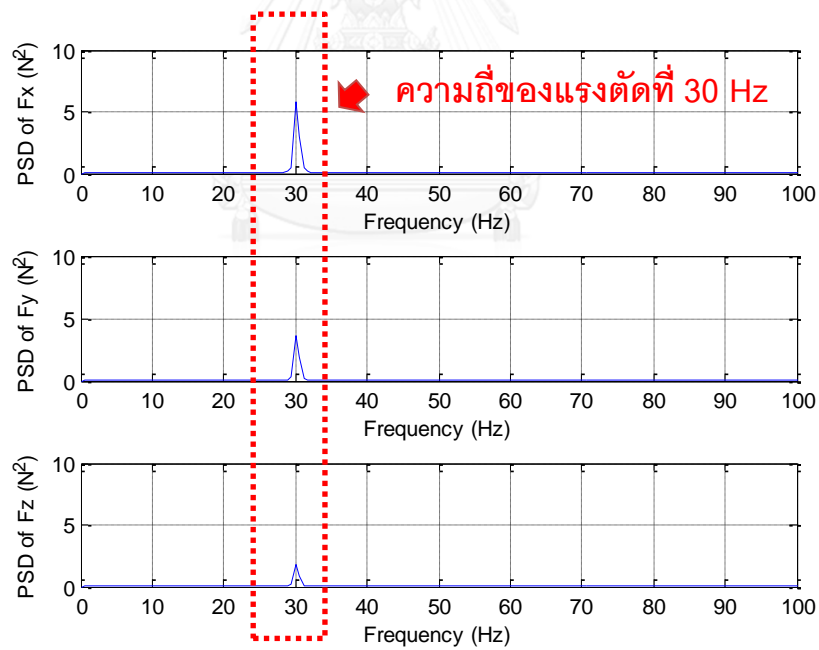
$$\text{จำนวนข้อมูล} = \frac{\text{จำนวนข้อมูลใน 1 วินาที}}{0.5} \times 400 = \frac{(3.86)}{0.5} \times 400 = 3,085 \text{ ข้อมูล}$$

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงลักษณะของคลื่นสัญญาณแรงป้อนตัดพลวัตและข้อมูลความตรงของชิ้นงานในโดเมนเวลาด้วยระยะทางในการตัด 1 วินาทีที่เท่ากัน พบว่าข้อมูลความตรงของชิ้นงาน และสัญญาณแรงป้อนตัดพลวัตจะเกิดจำนวนลูกคลื่นที่ใกล้เคียงกันในระยะเวลาที่เท่ากัน ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าทั้งค่าความตรงของชิ้นงานและสัญญาณแรงป้อนตัดพลวัตมีความถี่ที่สอดคล้องกัน

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงสัญญาณโดยใช้วิธีฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) จะให้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.3 คือ ข้อมูลความตรงของชิ้นงาน และสัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ตามลำดับ พบว่า ความถี่ของแรงป้อนตัดพลวัตมีค่าเท่ากับ 30 Hz และยังสอดคล้องกับความถี่ของข้อมูลความตรงที่ได้ ดังนั้นสรุปได้ว่าสัญญาณทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน และสามารถนำแรงป้อนตัดพลวัตมาทำนายความตรงของชิ้นงานในขณะตัดได้ สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานและแรงป้อนตัดพลวัตในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ สำหรับเงื่อนไขการตัดอื่น ๆ ดังแสดงให้เห็นในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.3 ลักษณะข้อมูลค่าความตรงของชิ้นงานในโดเมนความถี่ ที่ความถี่ 30 Hz



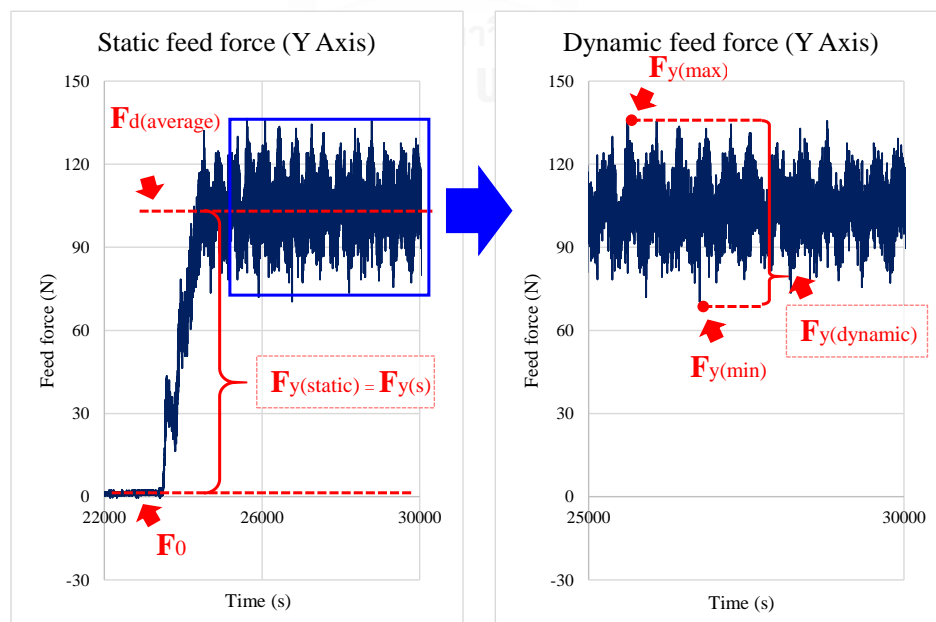
รูปที่ 4.4 ลักษณะข้อมูลค่าแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ ที่ความถี่ 30 Hz

4.3 การวิเคราะห์แรงตัดพลวัตในโดเมนเวลา

เมื่อวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตและค่าความตรงที่วัดได้จากชิ้นงานในโดเมนความถี่ที่เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ พบว่ามีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันในเชิงความถี่ ดังนั้น จึงสามารถนำเงื่อนไขการตัดนั้น ๆ มาพัฒนาเป็นสมการทำนายความตรงของชิ้นงานในขณะตัดที่เกิดขึ้นในโดเมนเวลาโดยการวิเคราะห์หาอัตราส่วนแรงตัดที่เหมาะสม

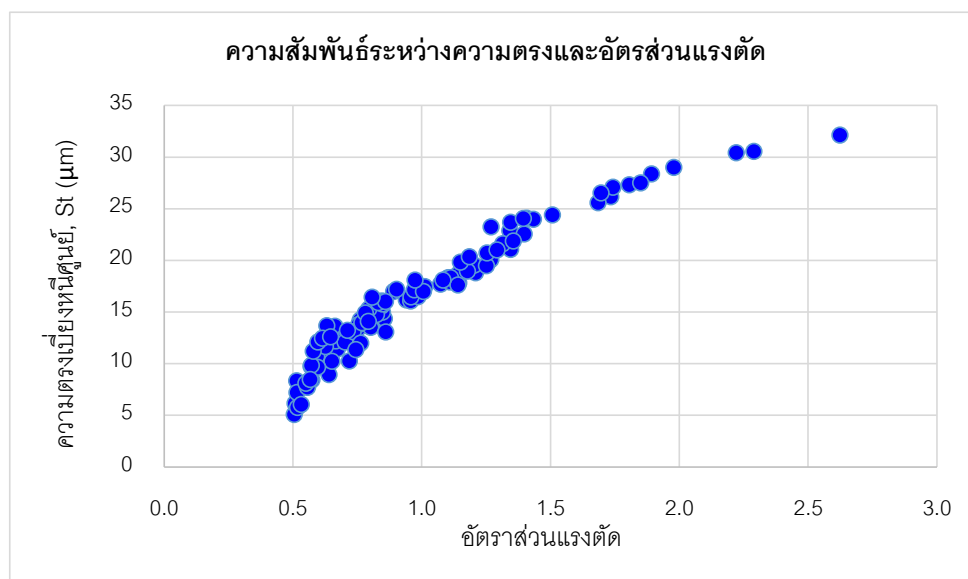
การคำนวณค่าของแรงตัดจากโดเมนเวลานั้น จะพิจารณาที่ค่าแอมพลิจูดของแรงป้อนตัดพลวัต นั่นคือค่าแรงป้อนตัดพลวัตที่มากที่สุด ($F_{y(max)}$) ลบด้วยค่าแรงป้อนตัดพลวัตที่น้อยที่สุด ($F_{y(min)}$) ซึ่งสัมพันธ์กับความตรงของชิ้นงานที่พิจารณาความสูงของความขรุขระผิวที่สูงที่สุด (Max) กับค่าที่น้อยที่สุด (min) ซึ่งวิธีการพิจารณาการคำนวณแรงตัดเพื่อหาอัตราส่วนแรงนั้น แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.5

อย่างไรก็ตาม ขนาดของแรงตัดพลวัตอาจแปรเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น ความแข็งของวัสดุของชิ้นงาน ซึ่งกระทบต่อขนาดและผิวสำเร็จของชิ้นงาน ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างแรงป้อนตัดพลวัตและแรงป้อนตัดสถิต จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อประมาณค่าความตรงของชิ้นงาน โดยสันนิษฐานว่า อัตราส่วนแรงตัดสามารถคำนวณความตรงของชิ้นงานได้โดยไม่แปรเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขการตัด โดยการประยุกต์ใช้อัตราส่วนระหว่างแรงทั้งสอง ทำให้สามารถอธิบายความตรงของชิ้นงานได้แม้เงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงไป [9-11] ผลการคำนวณอัตราส่วนของแรงทั้งสองได้แสดงไว้ตามตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.5 แสดงการคำนวณแรงป้อนตัดสถิตและแรงป้อนตัดพลวัต

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงาน และอัตราส่วนแรงตัด



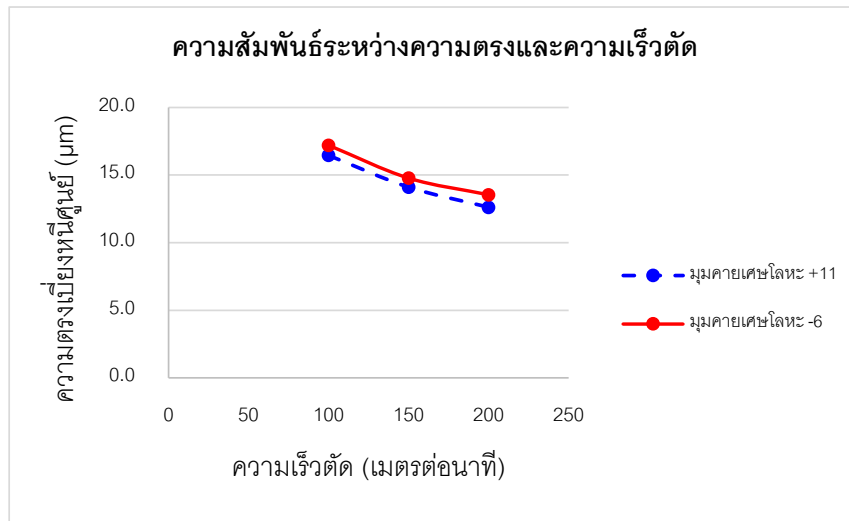
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานและอัตราส่วนแรงป้อนตัด

จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางที่วัดได้จากผิวชิ้นงานและอัตราส่วนแรงป้อนตัด พบว่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางของชิ้นงานมีลักษณะแปรผันตามอัตราส่วนแรงป้อนตัด กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนแรงป้อนตัดเพิ่มขึ้น ค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางของชิ้นงานจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากลักษณะดังกล่าว สรุปได้ว่า ค่าอัตราส่วนแรงป้อนตัดมีอิทธิพลต่อความตรงของชิ้นงาน และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป

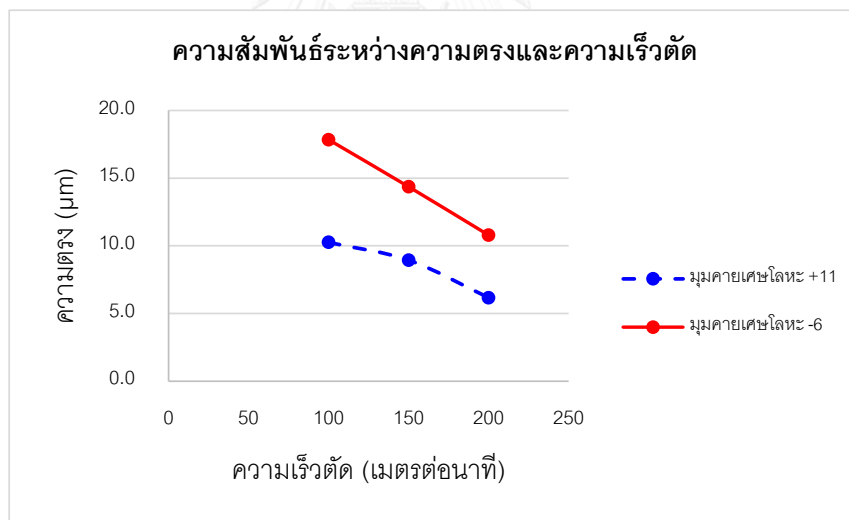
4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับเงื่อนไขการตัดและการเกิดเศษโลหะ

จากผลการทดลอง สามารถแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแนวโน้มของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางของชิ้นงาน ที่ได้รับอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รวมถึงลักษณะรูปร่างทางเรขาคณิตของเม็ดมีด รัศมีจุมุมมีด และมุมคายเศษโลหะ ดังจะแสดงให้เห็นในรายละเอียดดังต่อไปนี้

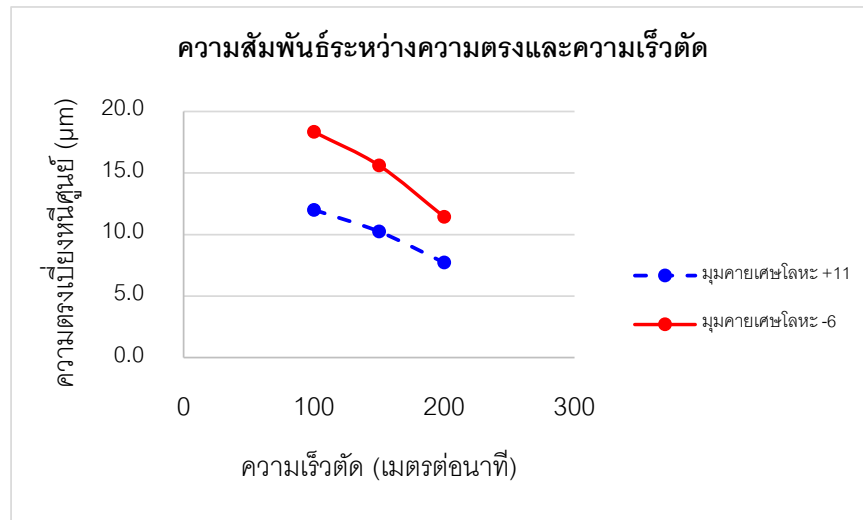
4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานและความเร็วตัด



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับความเร็วตัดต่าง ๆ ที่อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.4 มิลลิเมตร



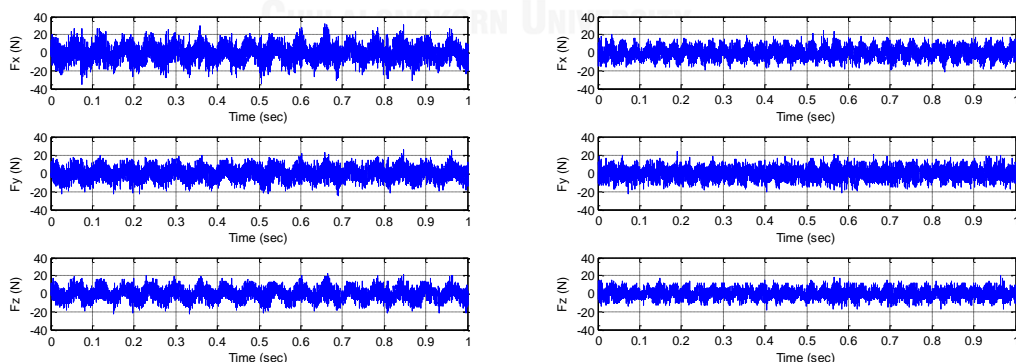
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับความเร็วตัดต่าง ๆ ที่อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับความเร็วตัดต่าง ๆ ที่อัตราการป้อนตัด 0.2

มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมิต 0.8 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.7 – 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงาน และความเร็วตัดที่เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้นความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ (S) ของชิ้นงานจะลดลง แสดงว่าความตรงของชิ้นงานจะมีแนวโน้มดีขึ้น เนื่องจากความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิในขณะตัดสูงขึ้น และเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อน วัสดุก็จะมีลักษณะอ่อนนุ่ม ง่ายต่อการตัด แรงที่ใช้ในการตัดจึงน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้นแรงที่ใช้ในการตัดลดลง และยังสอดคล้องกับค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ที่มีลดลงอีกด้วย

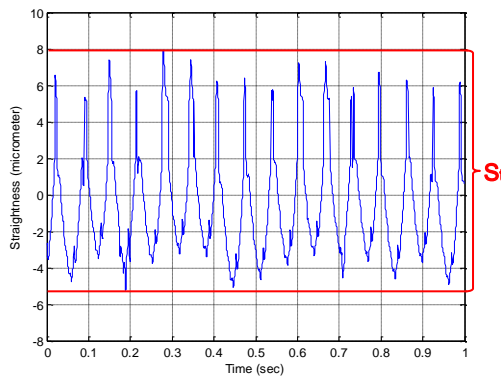


(ก) ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที

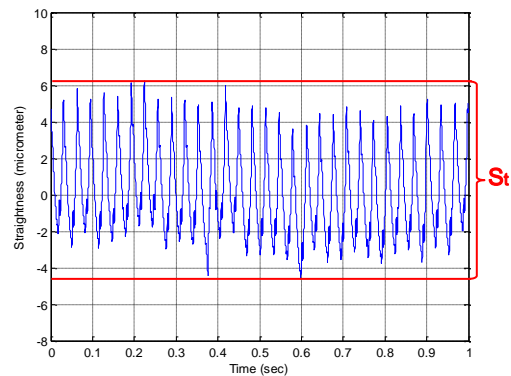
(ข) ความเร็ว 200 เมตรต่อนาที

รูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง อัตราป้อนตัด 0.2

มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุมุมิต 0.8 และ คุมคานพิเศษโลหะ -6 องศา



(ก) ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที



(ข) ความเร็ว 200 เมตรต่อนาที

รูปที่ 4.11 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของความตรงของชิ้นงานในกระบวนการกลึง อัตราป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.8 และ คุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนตัดและการเกิดเศษโลหะ



(ก) 100 เมตรต่อนาที

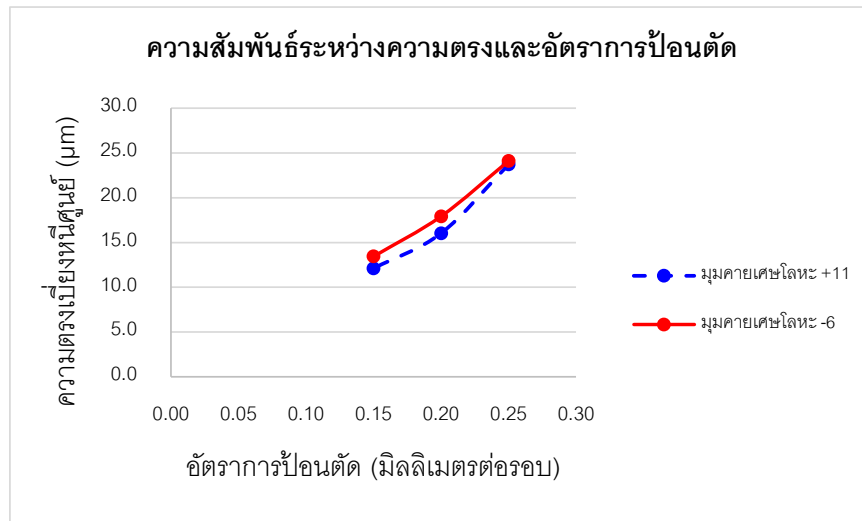
(ข) 150 เมตรต่อนาที

(ค) 200 เมตรต่อนาที

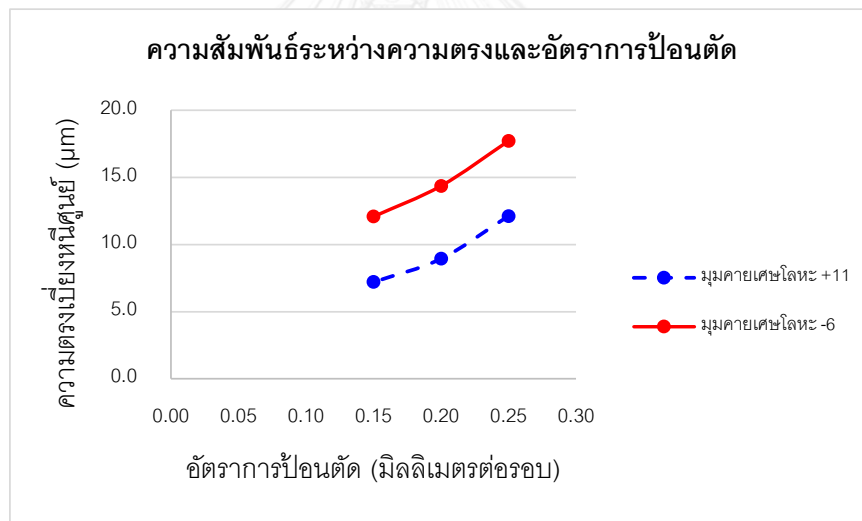
รูปที่ 4.12 แสดงเศษโลหะที่ความเร็วตัดต่าง ๆ ที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุกมีด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

จากรูปที่ 4.12 แสดงลักษณะของเศษโลหะที่ตัดด้วยความเร็วตัดที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อใช้ความเร็วตัดที่สูงกว่าจะทำให้ได้เศษโลหะที่มีความยาวต่อเนื่องมากกว่า ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าเมื่อความเร็วตัดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดสูงขึ้น และเมื่อวัสดุของชิ้นงานได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและทำให้เนื้อวัสดุมีลักษณะเหนียว เคลื่อนที่ออกมาได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้น ความยาวของเศษโลหะจึงมากกว่าการตัดที่ความเร็วที่ต่ำกว่า กล่าวคือ ในเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องจะส่งผลให้ความตรงของชิ้นงานมีแนวโน้มที่ดีกว่าเงื่อนไขการตัดที่ให้เศษโลหะแบบแตกหัก

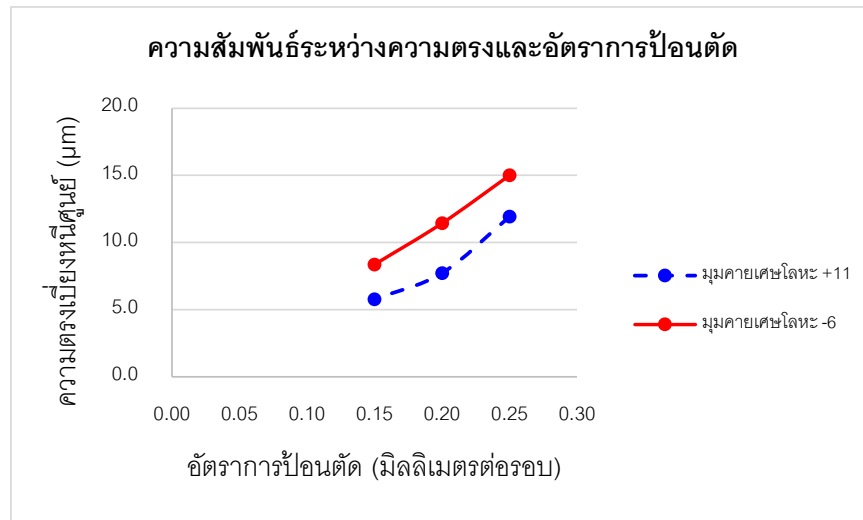
4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานและอัตราป้อนตัด



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร

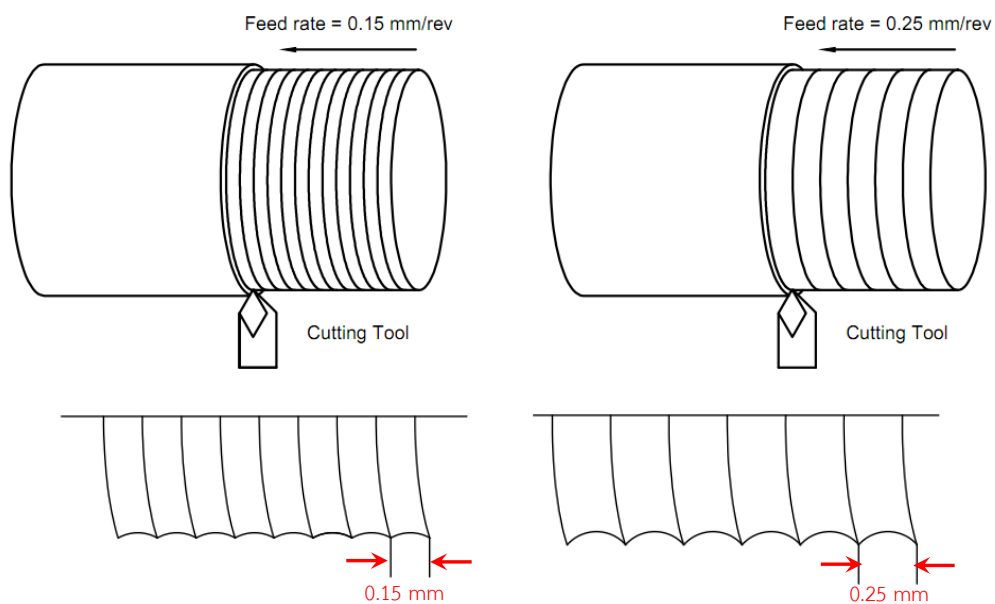


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุกมีด 0.8 มิลลิเมตร



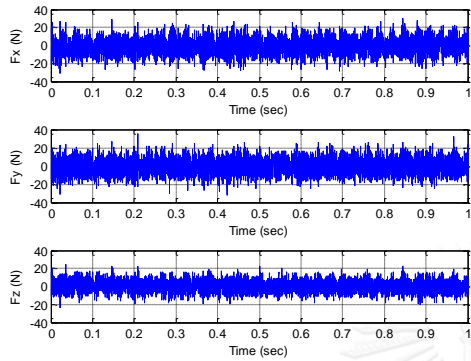
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับอัตราป้อนตัดต่าง ๆ และความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร

จากรูป 4.13 – 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับอัตราป้อนตัดต่าง ๆ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอัตราป้อนตัดส่งผลกระทบต่อค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลาง (S_r) ของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าความตรงของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง

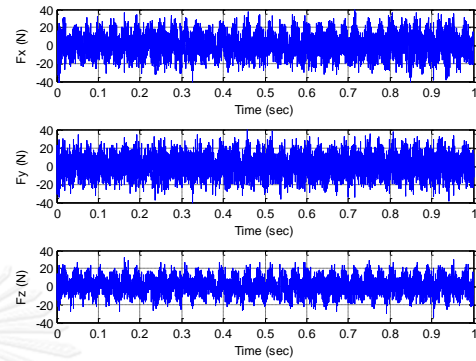


รูปที่ 4.16 แสดงพื้นที่การตัดสำหรับอัตราการป้อนตัดที่แตกต่างกัน

ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มอัตราป้อนตัดจะทำให้พื้นที่การตัดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และอาจเป็นสาเหตุให้เกิดแรงสั่นสะเทือนในขณะตัด ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แรงตัดเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงให้เห็นว่าแรงตัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราป้อนตัด และยังสอดคล้องกับความตรงเปียงหนีศูนย์ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราป้อนตัดเพิ่มขึ้น

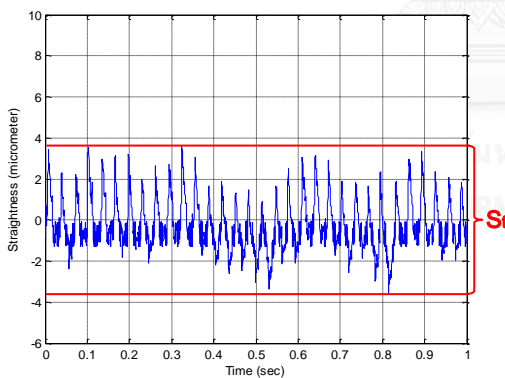


(ก) อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ

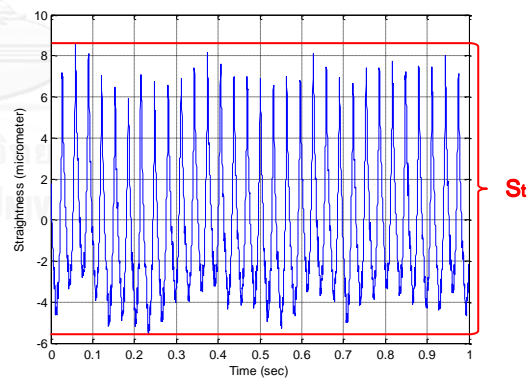


(ข) อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ

รูปที่ 4.17 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีงูมกมิต 0.8 และ คุมคายเศษโลหะ -6 องศา



(ก) อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ



(ข) อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ

รูปที่ 4.18 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของความตรงของชิ้นงานในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีงูมกมิต 0.8 และ คุมคายเศษโลหะ -6 องศา

จากรูปที่ 4.19 แสดงลักษณะของเศษโลหะที่ตัดด้วยอัตราป้อนตัดที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อใช้อัตราการป้อนตัดที่เพิ่มมากขึ้น พบว่าเศษโลหะเกิดการแตกหักมากขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้อัตราการป้อนตัดที่สูง ส่งผลให้ความกว้างของเศษโลหะเพิ่มขึ้น เกิดการโค้งงอ และเคลื่อนชนกับหน้าคายเศษโลหะของมิตตัด ซึ่งนำไปสู่การแตกหักของเศษโลหะได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ขนาดความยาวของเศษโลหะสั้นกว่าในเมื่อกรณีที่ใช้อัตราการป้อนตัดที่สูงขึ้น และยังส่งผลให้ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางของชิ้นงานเพิ่มขึ้นในกรณีที่เศษโลหะสั้นลง

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนตัดและการเกิดเศษโลหะ



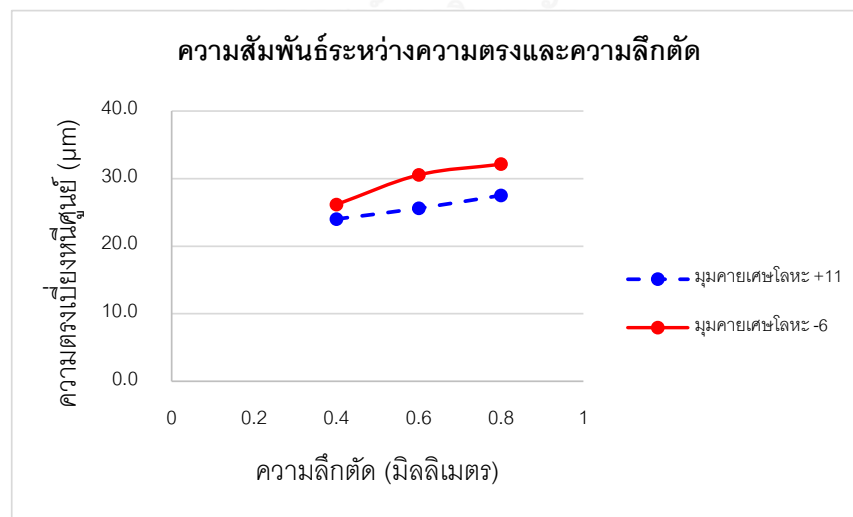
(ก) 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ

(ข) 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ

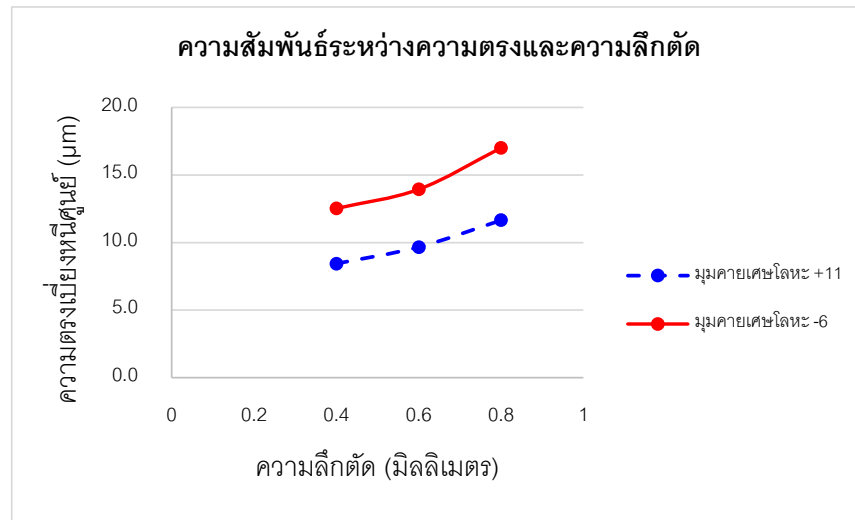
(ค) 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ

รูปที่ 4.19 แสดงเศษโลหะที่อัตราป้อนตัดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร รัศมีจุกมิต 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

4.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานและความลึกตัด

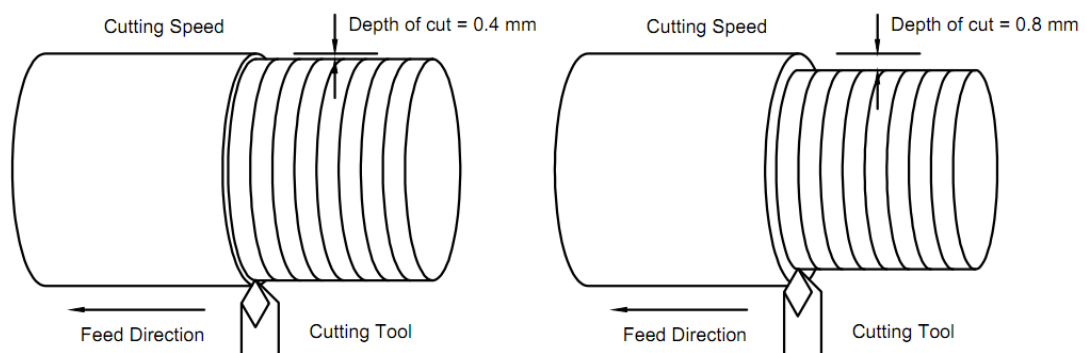


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับความลึกตัดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ และรัศมีจุกมิต 0.4 มิลลิเมตร

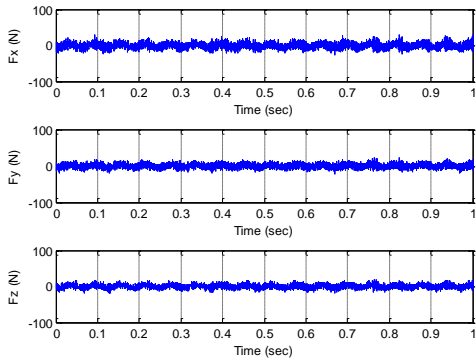


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับความลึกตัดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 100 เมตร ต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ และรัศมีจุมุมมีด 0.8 มิลลิเมตร

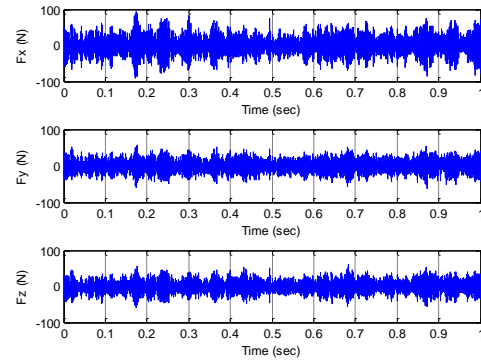
จากรูป 4.20 และ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลาง (S_r) ของชิ้นงานกับความลึกตัดที่เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ พบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ การเพิ่มความลึกตัดในการตัดชิ้นงาน ส่งผลให้ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลางของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าการใช้ความลึกตัดที่มีค่าสูงขึ้น จะเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นในขณะตัด เพราะพื้นที่ในการตัดเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 4.22 แรงตัดจึงเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ชิ้นงานที่ได้จึงมีแนวโน้มของความตรงของชิ้นงานลดลง และเมื่อสังเกตความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว พบว่าความชันต่างกันเพียงเล็กน้อย นั่นคือ นอกเหนือจากความลึกตัดที่มีผลต่อความตรงของชิ้นงานแล้ว ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อความตรงร่วมด้วย เช่น อัตราป้อนตัด และรัศมีจุมุมมีด เป็นต้น



รูปที่ 4.22 แสดงพื้นที่การตัดสำหรับความลึกตัดที่แตกต่างกัน แต่อัตราการป้อนตัดคงที่

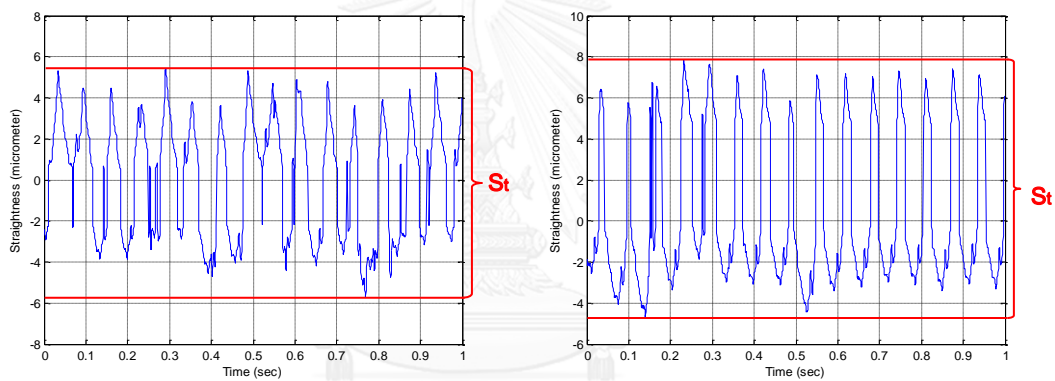


(ก) ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร



(ข) ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.23 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีจุมุมมีด 0.8 และ คุมคายเศษโลหะ -6 องศา



(ก) ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร

(ข) ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.24 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของความตรงของชิ้นงานในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีจุมุมมีด 0.8 และ คุมคายเศษโลหะ -6 องศา

ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกตัดและการเกิดเศษโลหะ

จากรูปที่ 4.25 แสดงลักษณะของเศษโลหะที่ตัดด้วยความลึกตัดที่ต่างกัน พบว่าเมื่อใช้ความลึกตัดที่มีค่าต่ำ ๆ จะทำให้ได้เศษโลหะที่มีความยาวต่อเนื่องมากกว่า นั่นคือ เมื่อเพิ่มความลึกตัด พื้นที่ในการตัดมากขึ้น เศษโลหะมีความหนาเพิ่มขึ้น และเมื่อเคลื่อนที่ชนกับหน้าคายเศษโลหะของมีดตัดจะทำให้เกิดการแตกหักของเศษโลหะได้ง่ายกว่า ในกรณีที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักความตรงเพียงหนีศูนย์กลางของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น ความตรงของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง



(ก) 0.4 มิลลิเมตร

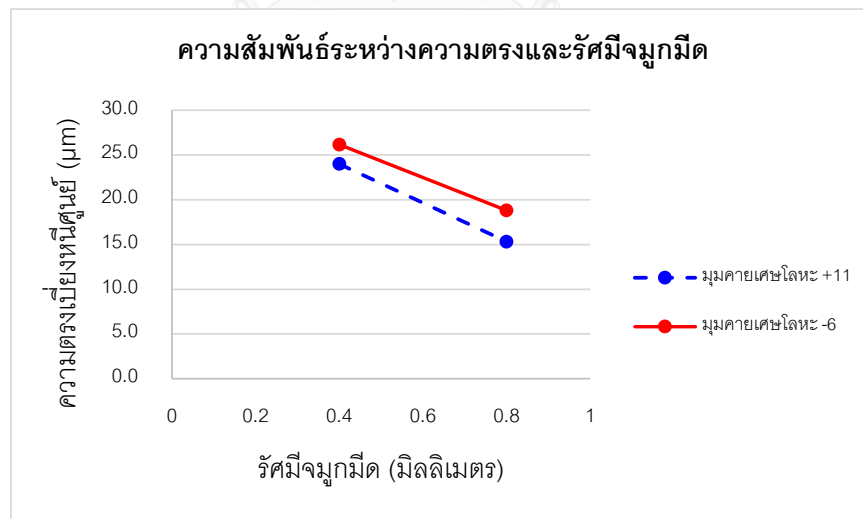
(ข) 0.6 มิลลิเมตร

(ค) 0.8 มิลลิเมตร

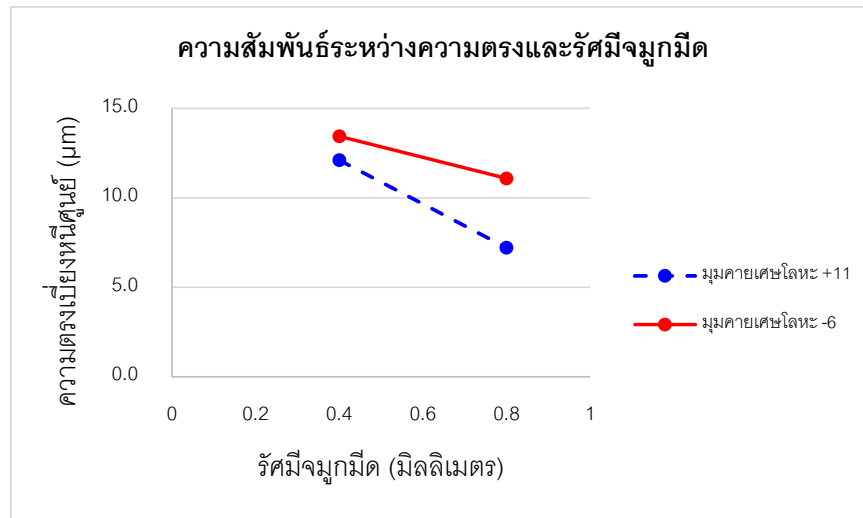
รูปที่ 4.25 แสดงเศษโลหะที่ความลึกตัดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่ออนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ รัศมีจุมูกมีด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดและเศษโลหะที่เกิดขึ้น รูปร่างของเศษโลหะที่ต่างกัน จะให้ผลของแรงตัดที่เกิดแตกต่างกันด้วย โดยพบว่าเมื่อเศษโลหะเป็นแบบแตกหัก จะเกิดแรงตัดที่มีค่าสูงซึ่งอาจเกิดจากอิทธิพลการแตกหักของเศษโลหะ และเมื่อนำแรงตัดมาทำนายค่าความตรงของชิ้นงาน อาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากอิทธิพลของแรงจากการเกิดเศษโลหะมีค่าสูงกว่าแรงตัดที่แท้จริง ดังนั้น จึงควรหาวิธีในการแยกสัญญาณของความตรงที่แท้จริงออกมา เพื่อให้ได้ความแม่นยำในการทำนายมากขึ้น

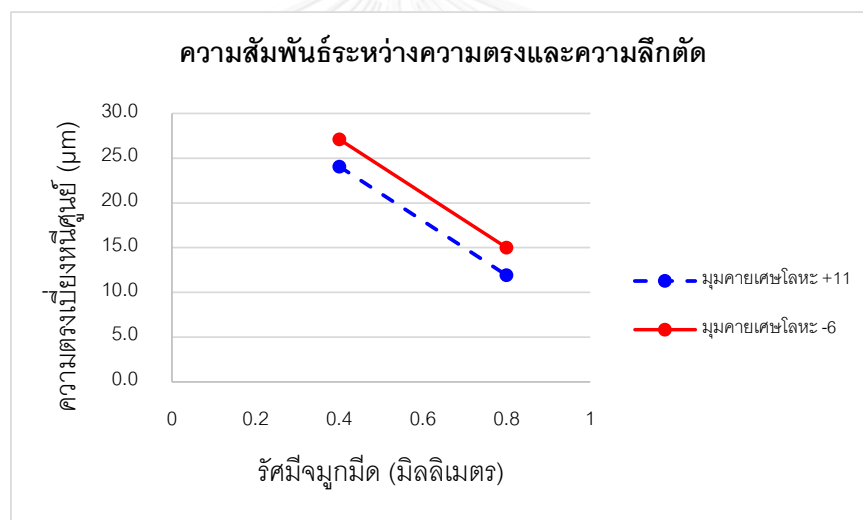
4.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานและรัศมีจุมูกมีด



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับรัศมีจุมูกมีดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่ออนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร

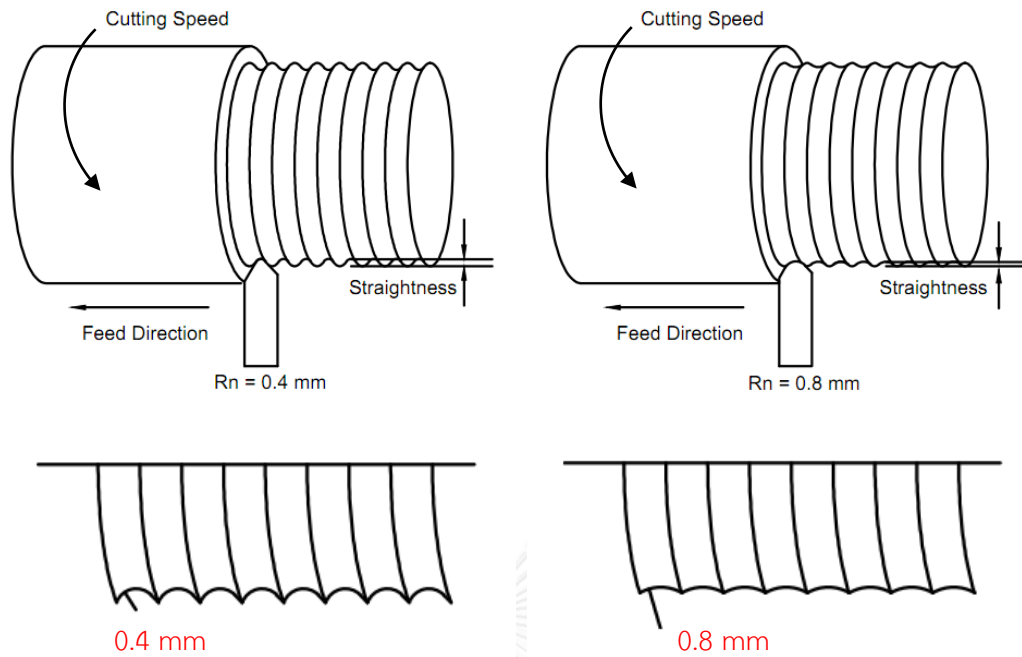


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับรัศมีจุมุกมิดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 150 เมตร ต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร

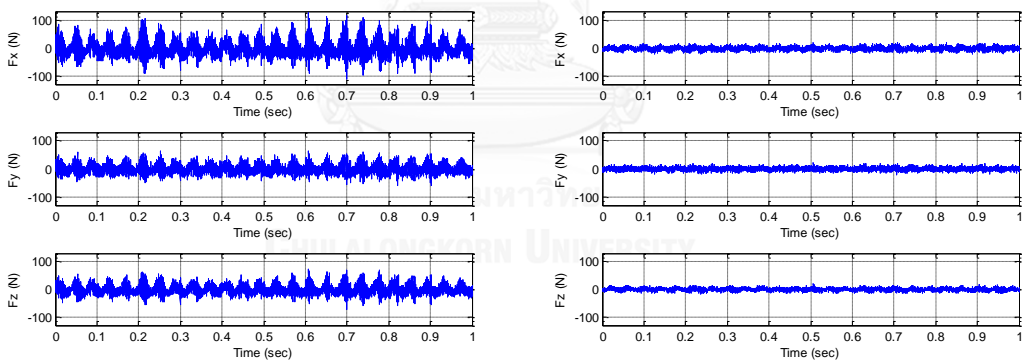


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับรัศมีจุมุกมิดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 200 เมตร ต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร

จากรูป 4.26 ถึง 4.28 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับรัศมีจุมุกมิดที่เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ พบว่าค่าทั้งสองแปรผกผันต่อกัน กล่าวคือความตรงเบี่ยงหนีศูนย์กลาง (S_r) ของชิ้นงานที่ได้จะมีค่าลดลง เมื่อใช้มีดตัดที่มีรัศมีจุมุกมิดขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้รัศมีจุมุกมิดใหญ่จะช่วยลบรอยป้อนตัด (Feed mark) ที่เกิดจากการป้อนของมีดตัด ดังรูปที่ 4.29 และพบว่าแรงตัดมีขนาดลดลงเมื่อใช้รัศมีจุมุกมิดใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.29 และ 4.30



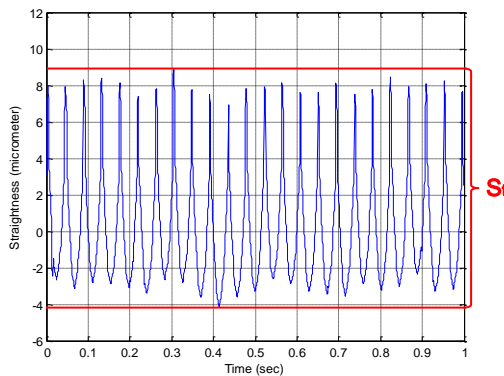
รูปที่ 4.29 แสดงอิทธิพลของรัศมีงูมกมิตต่อผิวของชิ้นงาน



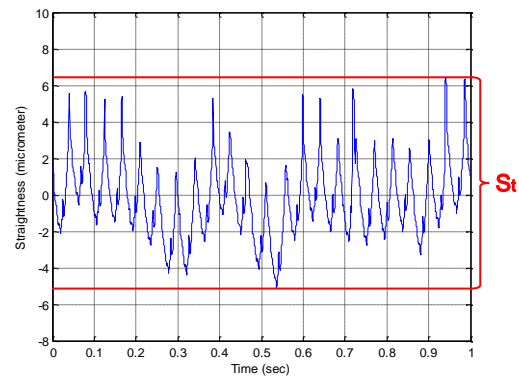
(ก) รัศมีงูมกมิต 0.4 มิลลิเมตร

(ข) รัศมีงูมกมิต 0.8 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.30 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร มุมคายเศษโลหะ -6 องศา



(ก) รัศมีจุ่มกมิต 0.4 มิลลิเมตร



(ข) รัศมีจุ่มกมิต 0.8 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.31 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของความจริงของชิ้นงานในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และ มุมคายเศษ โลหะ -6 องศา

ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีจุ่มกมิตและการเกิดเศษโลหะ

จากการสังเกตลักษณะของเศษโลหะที่ได้จากการทดลองที่มีรัศมีจุ่มกมิตที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อใช้รัศมีจุ่มกมิตที่ใหญ่กว่าจะเกิดเศษโลหะที่ได้มีความยาวต่อเนื่องมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.32 โดยสามารถอธิบายได้ว่า รัศมีจุ่มกมิตที่น้อยกว่า จะทำให้เศษโลหะมีความหนามากกว่า และเมื่อเคลื่อนที่ชนกับหน้าคายเศษโลหะของมีดตัดจึงทำให้แนวโน้มการแตกหักของเศษโลหะเกิดขึ้นได้ง่าย ส่งผลให้ขนาดความยาวของเศษโลหะสั้นกว่าเมื่อเทียบกับการตัดด้วยมีดตัดที่รัศมีจุ่มกมิตใหญ่ ๆ



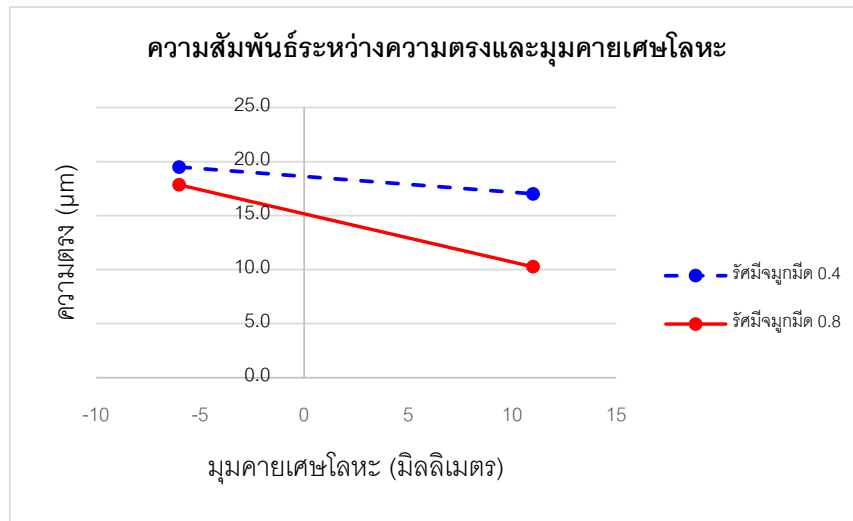
(ก) 0.4 มิลลิเมตร



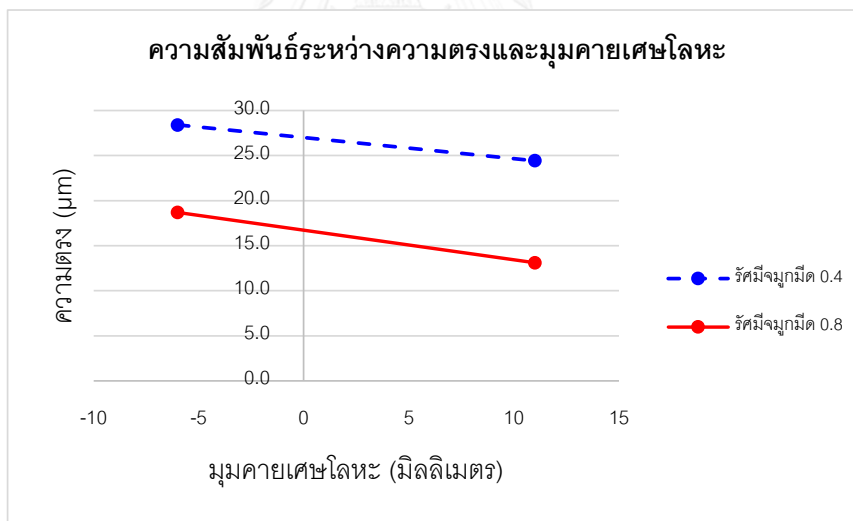
(ข) 0.8 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.32 แสดงเศษโลหะที่ใช้รัศมีจุ่มกมิตต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา

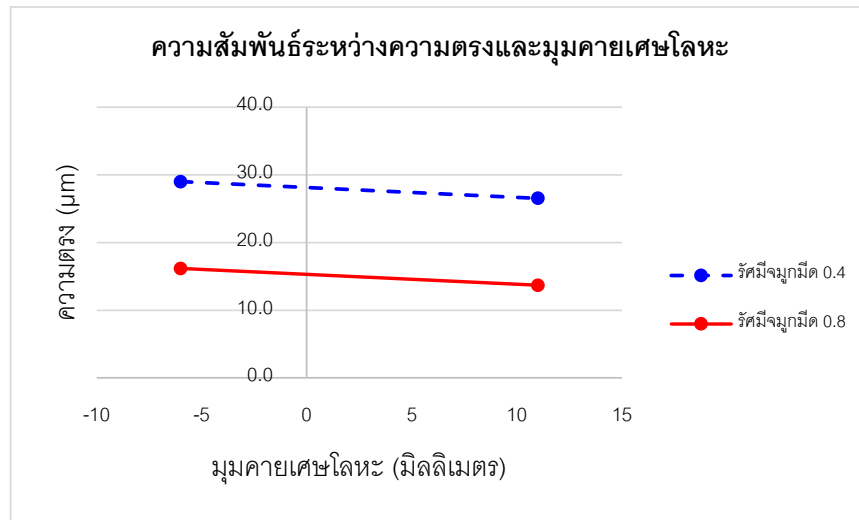
4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานและมุมคายเศษโลหะ



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับมุมคายเศษโลหะต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 100 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร

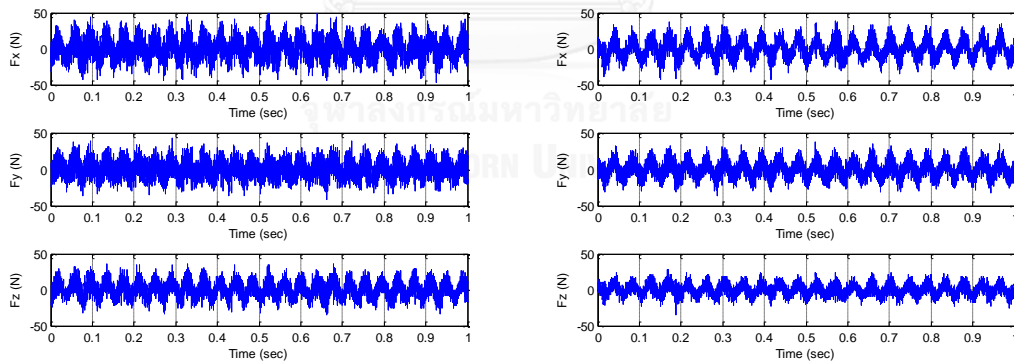


รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับมุมคายเศษโลหะต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับมุมคายนเฉยโลหะต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร

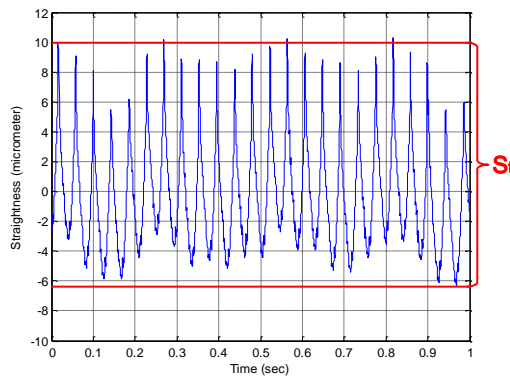
จากรูป 4.33 - 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับมุมคายนเฉยโลหะ พบว่าเมื่อมุมคายนเฉยโลหะมีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้เศษโลหะที่เกิดขึ้นในขณะตัดสามารถเคลื่อนที่ออกได้ง่าย และสะดวกขึ้น นั่นคือ ความต้านทานการเคลื่อนที่ของมีดตัดจะน้อย ดังนั้น แรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดก็จะน้อยลงไปด้วย คุณภาพผิวชิ้นงานที่ได้จึงดี



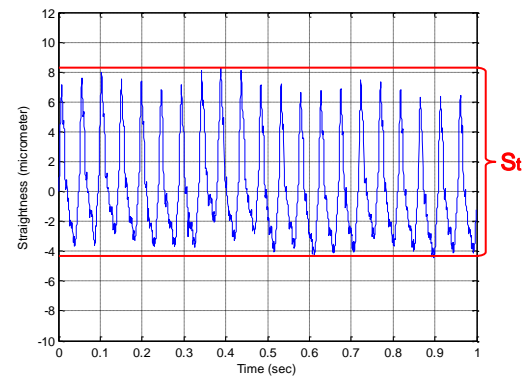
(ก) มุมคายนเฉยโลหะ -6 องศา

(ข) มุมคายนเฉยโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.36 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร มุมคายนเฉยโลหะ -6 องศา



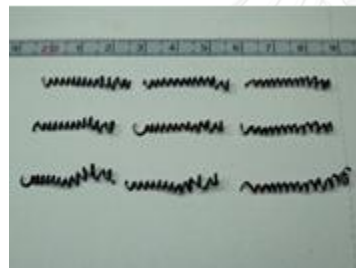
(ก) มุมคายพิเศษโลหะ -6 องศา



(ข) มุมคายพิเศษโลหะ 11 องศา

รูปที่ 4.37 แสดงตัวอย่างผลการทดลองของความจริงของชิ้นงานในกระบวนการกลึง ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.6 มิลลิเมตร มุมคายพิเศษโลหะ -6 องศา

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมคายพิเศษโลหะ และการเกิดเศษโลหะ



(ก) -6 องศา



(ข) +11 องศา

รูปที่ 4.38 แสดงเศษโลหะที่ใช้มุมคายพิเศษโลหะต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.2 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.4 มิลลิเมตร และรัศมีจุกมีด 0.4 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.38 แสดงลักษณะของเศษโลหะที่ตัดด้วยมีดตัดที่มีมุมคายพิเศษโลหะที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อใช้มุมคายพิเศษโลหะที่มากกว่า เศษโลหะที่เกิดขึ้นจะมีความยาวต่อเนื่องมากกว่า เพราะมุมคายพิเศษโลหะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อมุมระนาบเฉือน เมื่อมุมคายพิเศษโลหะเล็กกว่าจะทำให้เศษโลหะมีความหนาเพิ่มขึ้น และเกิดการแตกหักของเศษโลหะได้ง่ายเมื่อเคลื่อนที่ชนกับหน้าคายพิเศษโลหะของมีดตัด เป็นผลทำให้ความตรงเบี่ยงหนีศูนย์มีค่าเพิ่มมากขึ้น

จากการทดลองพบว่าเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด และมุมคายเศษโลหะ ล้วนมีผลทำให้เศษโลหะที่ได้มีลักษณะที่แตกต่างกัน ทั้ง ขนาด ความยาว ความกว้าง และความหนา ดังแสดงในภาคผนวก ข นอกจากนี้ปัจจัยด้านเงื่อนไขที่ใช้ในการตัดแล้ว การเกิดเศษโลหะยังถือว่าเป็นกลไกที่ค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งการเปลี่ยนรูปชิ้นงานโลหะเป็นเศษโลหะที่เกิดขึ้น อยู่ภายใต้อิทธิพลของปัจจัยหลาย ๆ อย่าง เช่น ชนิดของวัสดุ รูปทรงเรขาคณิตของมีดตัด อุณหภูมิการตัด แรงที่เกิดขึ้นขณะตัด และลักษณะการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ของเครื่องกลึง เป็นต้น

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเปียงหินศูนย์และการเกิดเศษโลหะ พบว่าเงื่อนไขการตัดที่เกิดเศษโลหะเป็นแบบต่อเนื่องให้ผลของค่าความตรงของชิ้นงานมีแนวโน้มที่ดีกว่าการเกิดโลหะเป็นแบบแตกหัก และพบว่าแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดสำหรับเงื่อนไขการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหักจะมีค่าสูงกว่าการเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง ซึ่งอาจมีสัญญาณแรงจากการแตกหักร่วมอยู่ด้วย จึงส่งผลให้ความตรงของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง

4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองของความตรงของชิ้นงาน (S_p) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) จะต้องทำการทดสอบข้อมูล โดยมีสมมติฐานว่า ข้อมูลมีความผิดพลาดแบบสุ่ม เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวน (σ^2) มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่า โดยสามารถทดสอบตามลำดับ ดังนี้

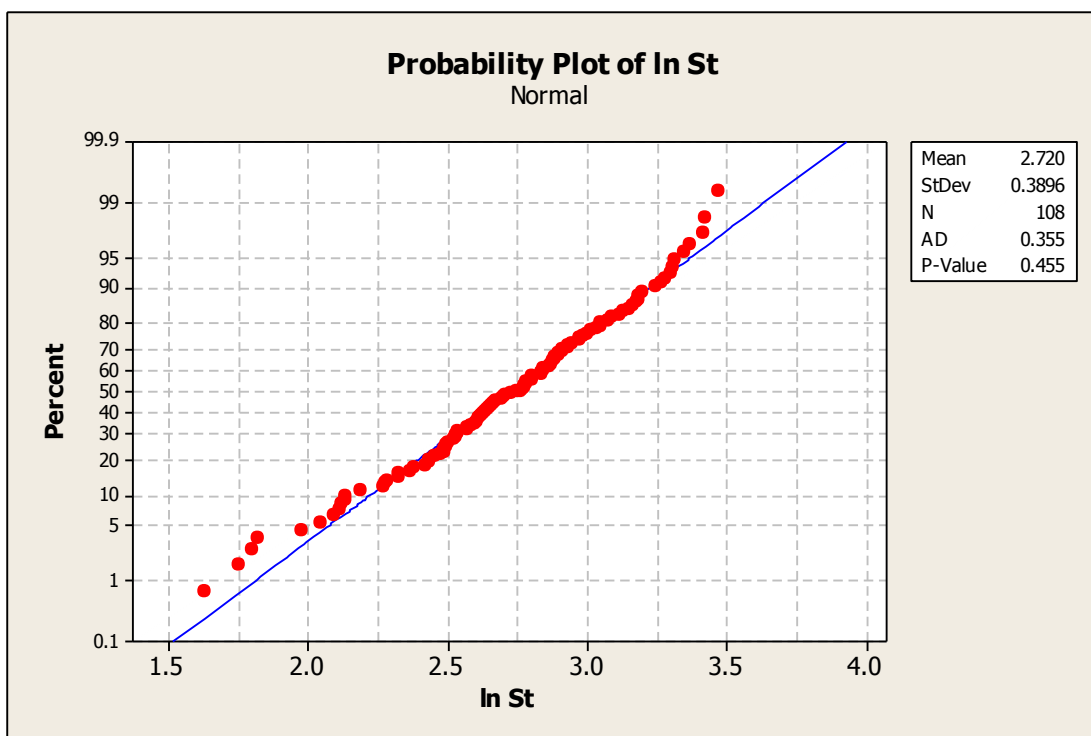
- 1) การทดสอบการแจกแจงปกติ
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

4.6.1 การทดสอบการแจกแจงปกติ

การตรวจสอบสมมติฐานของความปกติสามารถทำได้โดยการสร้าง Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) โดยมีสมมติฐานการทดสอบ ดังนี้

H_0 : ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

H_a : ข้อมูลไม่ได้มีการกระจายตัวแบบปกติ

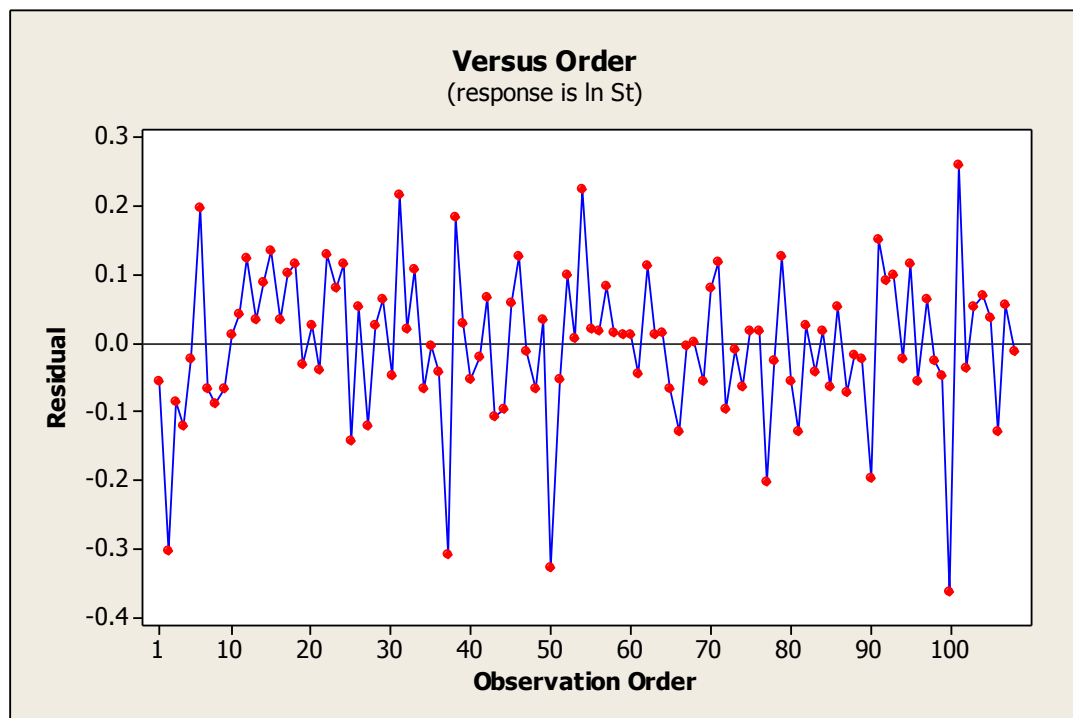


รูปที่ 4.39 Normal Probability Plot ของข้อมูลความตรงของผิวชิ้นงาน (S_i)

การทดสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ของความตรงของผิวชิ้นงาน แสดงในรูป 4.39 จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มที่เป็นลักษณะของเส้นตรง และมีค่า P-Value = 0.469 ซึ่งกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5% ($\alpha = 0.05$) ดังนั้นเมื่อ P-Value มากกว่า α จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ทำให้สรุปได้ว่า ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

4.6.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาหรือไม่ ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ ค่าคลาดเคลื่อนไม่มีความเกี่ยวข้องกับเวลา ซึ่งบางครั้งอาจเกิดขึ้นได้ เนื่องจากขณะทำการทดลอง ผู้วิจัยอาจมีการพัฒนาทักษะเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ทำให้ลักษณะของข้อมูลมีความเกี่ยวข้องตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบโดยนำค่าคลาดเคลื่อนพล็อตกับเวลา หรือจำนวนครั้งที่ทำการทดลอง

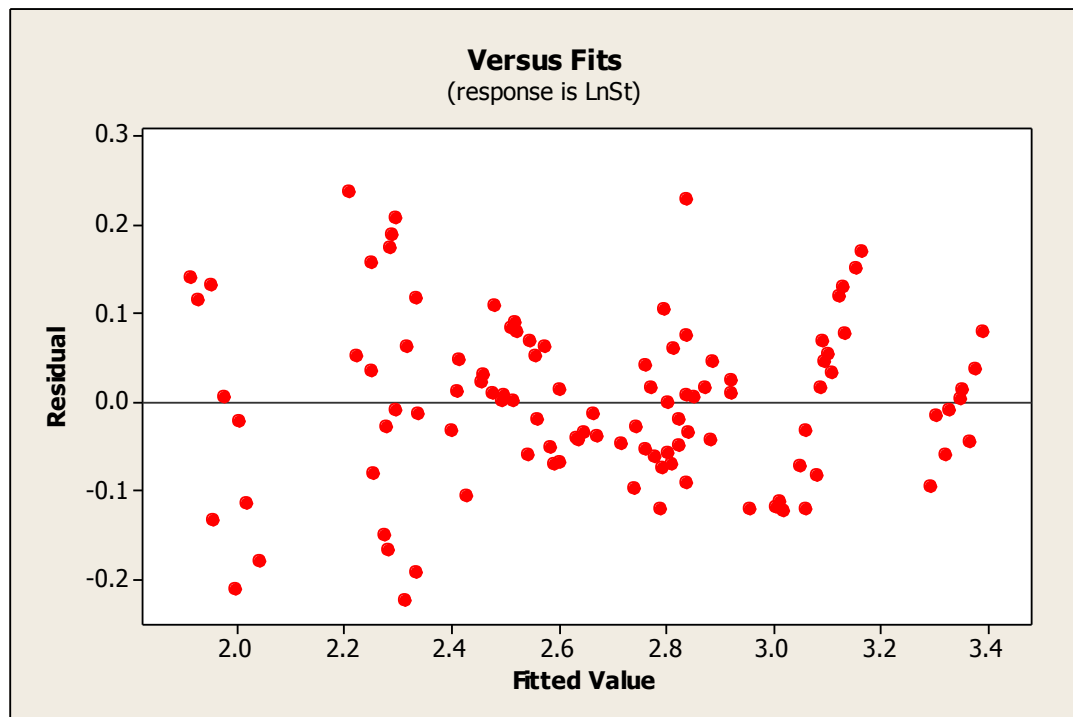


รูปที่ 4.40 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความตรงของชิ้นงาน (St)

จากรูป 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับในการเก็บข้อมูลของความตรงของชิ้นงาน ซึ่งพบว่าลักษณะของค่าคลาดเคลื่อนจากรูปไม่มีลักษณะเป็นรูปแบบใดแบบหนึ่ง หรือเป็นวัฏจักร และมีการกระจายตัวอยู่รอบ 0 อย่างสม่ำเสมอ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลได้จากการทดลองนี้มีความเป็นอิสระ

4.6.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนเป็นการตรวจสอบความสม่ำเสมอของการกระจายข้อมูล โดยจะทำการทดสอบว่าค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่มีรูปแบบ หรือโครงสร้างใด ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คือไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระใด ๆ รวมถึงค่าตอบสนองที่ถูกทำนาย (Predicted Response) ซึ่งก็คือค่าความตรงของชิ้นงาน การทดลองทำได้โดยการพล็อตค่าคลาดเคลื่อนกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value)



รูปที่ 4.41 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความตรงของผิวชิ้นงาน (S_t)

จากรูปที่ 4.41 แสดงการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความตรงของชิ้นงาน (S_t) พบว่าค่าคลาดเคลื่อนของทั้งสองรูปมีการกระจายตัวอยู่รอบ 0 อย่างสม่ำเสมอ โดยไม่มีลักษณะเป็นรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งที่ชัดเจน และไม่มีจุดที่ออกห่างจาก 0 มากกว่าจุดอื่น ๆ อย่างผิดปกติ ซึ่งง่ายถึงความแปรปรวนของชุดข้อมูลมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง

4.7 การสร้างสมการทำนายความตรงของชิ้นงาน

จากผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.1 สามารถนำมาพัฒนาสมการทำนายความตรงของชิ้นงาน โดยเมื่อนำเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิต และมุมคายเศษโลหะ รวมถึงอัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตกับแรงป้อนตัดสถิตมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Linear Regression Analysis) และใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยได้สมการทำนายความตรงของชิ้นงาน ดังนี้

$$\ln S_t = 4.52 - 0.202 \ln V + 0.53 \ln f + 0.133 \ln D - 0.355 \ln R_n - 0.00672\gamma + 0.493 \ln \left(\frac{F_{y(max)} - F_{y(min)}}{F_{y(s)}} \right) \quad (4.8-1)$$

จากนั้นทำการทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย
- 2) การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว

4.7.1 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย

การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย คือ การทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง หรือค่าความตรงของชิ้นงาน และตัวแปรอิสระ ที่ประกอบด้วยความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมกมิต และมุมคายเศษโลหะ หรือไม่ แสดงขั้นตอนดังต่อไปนี้

เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ ความตรงของชิ้นงาน (S_r) มีสมมติฐาน ดังนี้

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

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

ซึ่งสามารถตรวจสอบความมีนัยสำคัญได้จากตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้ผลดังนี้

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	14.9790	2.4965	200.17	0.000
Residual Error	101	1.2597	0.0125		
Total	107	16.2387			

Source	DF	Seq SS
ln V	1	1.4036
ln f	1	5.9515
ln D	1	0.5907
ln Rn	1	5.3561
r	1	1.2601
ln [Fy(max)-Fy(min)/Fy(s)]	1	0.4171

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย S_r

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

4.7.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว

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

เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ ความตรงของชิ้นงาน (S_i) มีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0$$

ซึ่งสามารถตรวจสอบความมีนัยสำคัญที่ได้จากตารางที่ 4.xx ซึ่งทำการคำนวณด้วยโปรแกรมให้ผลดังนี้



The regression equation is
 $\ln St = 4.52 - 0.202 \ln V + 0.530 \ln f + 0.133 \ln D - 0.355 \ln Rn - 0.00672 r + 0.493 \ln [Fy(max) - Fy(min) / Fy(s)]$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4.5191	0.3792	11.92	0.000
ln V	-0.20159	0.05115	-3.94	0.000
ln f	0.5302	0.1146	4.63	0.000
ln D	0.13291	0.04373	3.04	0.003
ln Rn	-0.35503	0.05860	-6.06	0.000
r	-0.006721	0.001634	-4.11	0.000
ln [Fy(max) - Fy(min) / Fy(s)]	0.49302	0.08525	5.78	0.000

S = 0.111677 R-Sq = 92.2% R-Sq(adj) = 91.8%

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย St

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว พบว่าตัวแปรที่อยู่ในสมการได้แก่ $\ln V$, $\ln f$, $\ln D$, $\ln R_n$, γ , และ $\ln \frac{Fy(max) - Fy(min)}{Fy(s)}$ โดยค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า α ซึ่งกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5% ($\alpha = 0.05$) ดังนั้นจึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปได้ว่า ตัวแปรดังกล่าวควรมีอยู่ในสมการถดถอย และสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าความตรงของชิ้นงานได้อย่างมีนัยสำคัญ

พบว่าค่า $\ln V$, $\ln f$, $\ln D$, $\ln R_n$, γ , และ $\ln \frac{F_y(max) - F_y(min)}{F_y(s)}$ สามารถใช้อธิบาย

ตัวแปร y ในสมการได้ โดยพบว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละปัจจัยมีค่า และเครื่องหมายที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์สามารถบ่งบอกได้ทั้งขนาดและทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้น ๆ ที่มีต่อความตรงของชิ้นงาน โดยหากปัจจัยมีสัมประสิทธิ์ที่เป็นเครื่องหมายบวก จะหมายถึงปัจจัยนั้นมีความสัมพันธ์ต่อความตรงในลักษณะแปรผันตรงต่อกัน

ในทางตรงกันข้ามถ้าปัจจัยมีสัมประสิทธิ์ที่เป็นเครื่องหมายลบ จะหมายถึงปัจจัยนั้นมีลักษณะแปรผกผันกับความตรงของชิ้นงาน ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ความเร็วตัด มีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความเร็วตัดเพิ่มมากขึ้น ค่าความตรงของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากที่ความเร็วตัดสูงจะส่งผลให้อุณหภูมิในการตัดสูงตามไปด้วย ทำให้วัสดุของชิ้นงานที่ตัดจะอ่อนนุ่มลง สามารถตัดได้ง่ายขึ้น ดังนั้นจึงใช้แรงในการตัดน้อยลงทำให้ความตรงของชิ้นงานมีค่าน้อย ได้ผิวที่มีคุณภาพที่ดีตามไปด้วย

อัตราการป้อนตัดและความลึกตัด มีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก สามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออัตราการป้อนตัด และความลึกตัดเพิ่มขึ้น ความตรงของชิ้นงานจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือคุณภาพของชิ้นงานจะแย่ลง เนื่องจาก การเพิ่มอัตราการป้อนตัด และความลึกตัด เป็นการเพิ่มพื้นที่ในการตัด จึงทำให้ต้องใช้แรงตัดที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงสั่นสะเทือนที่ชิ้นงาน คุณภาพผิวที่ได้จึงไม่ดี

การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

จากการวิเคราะห์การถดถอย ตามที่แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า สมการทำนายความตรงของชิ้นงาน มีค่า R^2 และ R^2_{adj} เท่ากับ 92.2% และ 91.8% ตามลำดับ นั้นหมายถึงตัวแปรอิสระสามารถอธิบายตัวแปรตอบสนอง หรือความตรงของชิ้นงานได้เป็นอย่างดี

ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.41 งานวิจัยนี้จะนำเสนอสมการซึ่งอยู่ในรูปของเอกซ์โพเนนเชียลเช่นเดียวกับสมการตามทฤษฎีของความขรุขระผิว ดังนั้นจะต้องทำการจัดรูปสมการทำนายความตรงที่ได้ในสมการที่ 4.9-1 ซึ่งเป็นสมการที่เกิดจากการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึม ดังนั้นจะได้สมการทำนายความตรงของชิ้นงาน ดังนี้

$$S_t = 91.84 \cdot V^{-0.202} \cdot f^{0.53} \cdot D^{0.133} \cdot R_n^{-0.355} \cdot e^{-0.00672\gamma} \cdot \left(\frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}} \right)^{0.493} \quad (4.8-2)$$

จากสมการ 4.8-2 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

1) จากผลที่ได้พบว่า สัญลักษณ์หน้าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปรในสมการมีทั้งค่าบวกและลบ ซึ่งแสดงถึงค่าความตรงของชิ้นงานที่แปรผันต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรนั้น ๆ กล่าวคือ สัญลักษณ์หน้าสัมประสิทธิ์ที่เป็นบวกจะให้ผลของความตรงของชิ้นงานแปรผันตามค่าของตัวแปร เช่น เมื่ออัตราป้อนตัด และความลึกตัดเพิ่มขึ้น ค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ (S_t) มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้แนวโน้มของความตรงของชิ้นงานลดลง และในทางกลับกันสัญลักษณ์หน้าสัมประสิทธิ์ที่เป็นลบจะให้ผลของความตรงของชิ้นงานแปรผันตรงข้ามกับกับค่าของตัวแปร เช่น เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ค่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ (S_t) จะลดลง ส่งผลให้ความตรงของชิ้นงานมีแนวโน้มที่ดีขึ้น

2) ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราป้อนตัด และรัศมีจุมุมมีค่ามากที่สุดตามลำดับ ส่งผลให้ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและตัวแปรทั้งสองมีความชันมากขึ้น ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า อัตราป้อนตัด และรัศมีจุมุมมีอิทธิพลต่อความตรงของชิ้นงานมากที่สุด

4.8 การทดสอบความแม่นยำของสมการ

สมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ จะต้องมีการทดสอบความแม่นยำโดยคาดหวังว่าสมการสามารถใช้ทำนายความตรงของชิ้นงานสำหรับงานกลึงได้ดี สำหรับเงื่อนไขการตัดอื่น ๆ โดยเงื่อนไขการตัดใหม่เพื่อใช้ทดสอบความแม่นยำได้แบ่งเป็น 3 การทดสอบ คือ

- 1) การทดสอบที่อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม
- 2) การทดสอบที่อยู่นอกขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม

4.8.1 การทดสอบที่อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขการตัดเดิม

เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความตรงของชิ้นงาน เงื่อนไขการตัดใหม่ที่อยู่ภายใต้ขอบเขตการทดลองได้ถูกกำหนด และใช้ทดสอบขึ้น โดยแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เงื่อนไขการตัดสำหรับทดสอบความแม่นยำของสมการ

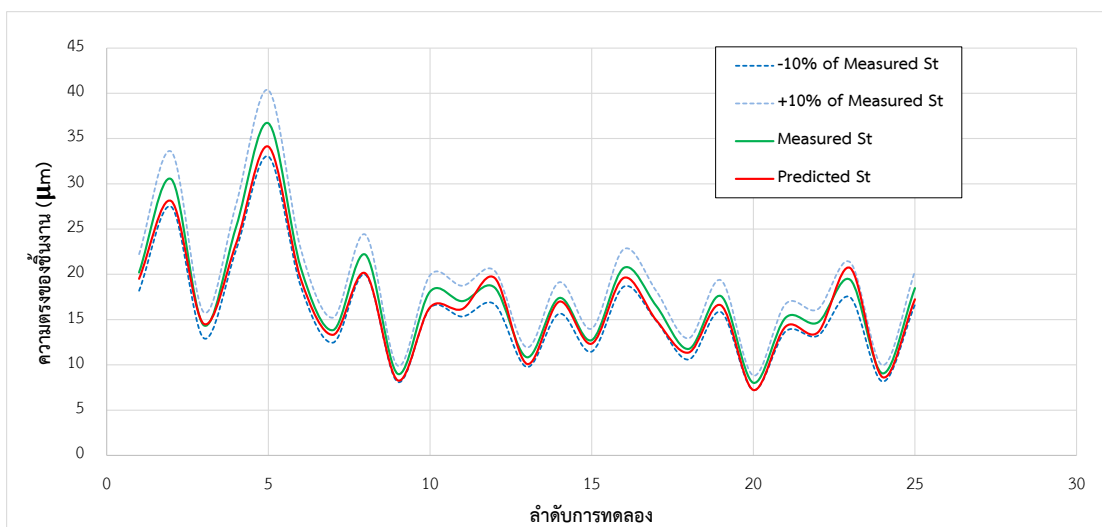
เม็ดมีตคาร์ไบด์	DCMT 11T304 HQ, DCMT 11T308 HQ
	DNMG 150604 FN, DNMG 150608 FN
ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	120, 250
อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.18, 0.30
ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.2, 0.5
รัศมีจุ่มกมิด (มิลลิเมตร)	0.4, 0.8
มุมคายเศษโลหะ (องศา)	-6, +11

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองที่ใช้ทดสอบความแม่นยำของสมการ โดยทำการวิเคราะห์ผล

ลำดับ	V	f	D	Rn	γ	อัตราส่วน แรงตัด	ความตรง (การวัด)	ความตรง (สมการ)
1	120	0.3	0.5	0.4	-6	1.999	36.688	34.110
2	120	0.18	0.2	0.4	11	1.358	17.391	16.984
3	120	0.18	0.2	0.4	-6	1.427	20.206	19.507
4	250	0.3	0.5	0.8	-6	1.714	32.746	21.319
5	250	0.18	0.2	0.4	-6	1.061	14.379	14.536
6	120	0.18	0.5	0.8	-6	1.255	17.039	16.175
7	120	0.3	0.2	0.4	-6	1.725	30.499	28.084
8	120	0.3	0.5	0.4	11	1.922	34.679	29.846
9	120	0.18	0.2	0.8	-6	1.083	13.835	13.318
10	250	0.18	0.5	0.4	-6	1.504	20.748	19.502
11	120	0.3	0.2	0.8	11	1.230	17.593	16.578
12	250	0.3	0.2	0.8	11	1.219	15.212	14.229
13	250	0.3	0.2	0.4	11	31.753	20.428	28.5777
14	120	0.18	0.2	0.8	11	0.989	11.759	11.359

ลำดับ	V	f	D	Rn	γ	อัตราส่วน แรงตัด	ความตรง (การวัด)	ความตรง (สมการ)
15	250	0.3	0.2	0.8	-6	1.281	18.090	16.350
16	120	0.3	0.5	0.8	-6	1.070	18.538	19.602
17	250	0.18	0.5	0.4	11	1.102	16.504	14.923
18	250	0.18	0.2	0.8	-6	0.559	9.007	8.289
19	250	0.18	0.5	0.8	-6	0.652	10.837	10.097
20	120	0.3	0.2	0.8	-6	1.444	22.177	20.111
21	120	0.18	0.5	0.4	-6	1.605	25.163	23.354
22	250	0.3	0.5	0.4	11	1.700	33.034	24.221
23	250	0.18	0.5	0.8	11	0.599	9.058	8.638
24	120	0.18	0.5	0.4	11	1.421	20.726	19.621
25	250	0.3	0.2	0.4	-6	1.605	27.21	23.371
26	250	0.18	0.2	0.8	11	0.534	8.019	7.225
27	120	0.3	0.5	0.8	11	1.506	18.391	20.692
28	120	0.18	0.5	0.8	11	1.112	14.688	13.594
29	120	0.3	0.2	0.4	11	1.564	33.983	23.868
30	250	0.18	0.2	0.4	11	0.960	12.730	12.342
31	250	0.3	0.5	0.8	11	1.405	18.476	17.242
32	250	0.3	0.5	0.4	-6	1.776	33.642	27.744

จากตารางที่ 4.5 สังเกตได้ว่าค่าความตรงของชิ้นงานที่ได้จากการวัดจริง กับค่าที่ได้จากสมการทำนายความตรงของชิ้นงานตามสมการที่ 4.9-2 ที่เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ จะเห็นว่ามีความแตกต่างกันอยู่บ้าง ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.41 ที่แสดงถึงความแม่นยำของสมการที่เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ



รูปที่ 4.42 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของผิวชิ้นงาน (S_t)

$$\text{ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \frac{f_t - a_t}{a_t} \quad (4.9-1)$$

โดยที่

- f คือ ค่าความตรงของชิ้นงานที่ได้จากสมการทำนายความตรง
- a_t คือ ค่าความตรงของชิ้นงานที่ได้จากการวัด
- t คือ ค่าข้อมูลที่ 1 ถึง n

ซึ่งจากการคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของสมการทำนายความตรงของชิ้นงาน (S_t) พบว่ามีค่าเท่ากับ 8.15% นั่นคือ สมการทำนายความตรงของชิ้นงานมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 91.85% ซึ่งถือว่าสามารถทำนายความตรงของชิ้นงานได้ในระดับที่ยอมรับได้

4.9 การวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตด้วยการแปลงเวฟเล็ต

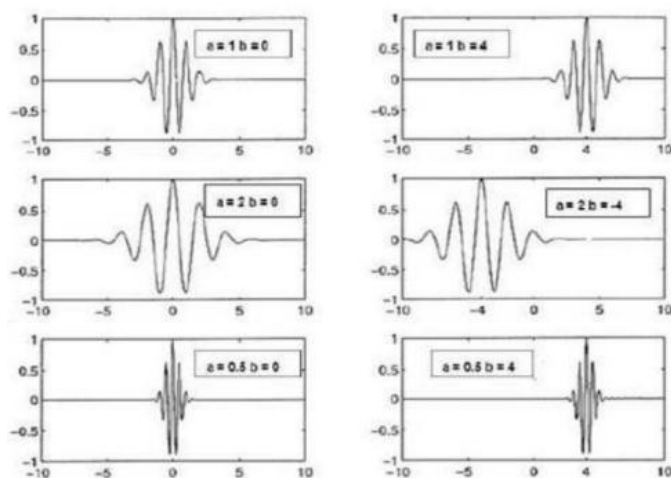
ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น สำหรับเงื่อนไขการตัดที่เกิดเศษโลหะแบบแตกหัก แรงตัดที่เกิดขึ้นมีค่าสูง ทั้งนี้อาจได้รับอิทธิพลจากการแตกหักของเศษโลหะ ดังนั้นการนำแรงตัดที่เกิดขึ้นมาคำนวณอาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำนายความตรงของชิ้นงาน เนื่องจากไม่ใช่แรงตัดที่แท้จริง ดังนั้น การแปลงสัญญาณแรงตัดพลวัตด้วยการวิเคราะห์เวฟเล็ต จะทำให้สามารถใช้แรงตัด

พลวัตในการอธิบายความตรงของชิ้นงานได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น ในกรณีที่แรงตัดเกิดจากเงื่อนไขที่พิเศษ โลหะเป็นแบบแตกหัก

การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) และการแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform) เป็นการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปสู่โดเมนความถี่เช่นเดียวกัน และสามารถแปลงจากโดเมนความถี่ไปเป็นโดเมนเวลาได้ โดยการแปลงกลับ (Inverse Transform) ได้เช่นกัน ซึ่งหลักการของทั้ง 2 วิธีที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจะคล้ายคลึงกัน คือ ฟังก์ชันสามารถแทนได้ด้วยผลรวมเชิงเส้นของสัมประสิทธิ์ (Coefficient) และฟังก์ชันพื้นฐาน (Basic function) สำหรับการแปลงฟูรีเยร์ ค่าสัมประสิทธิ์ คือ a_1, a_2, \dots และฟังก์ชันพื้นฐาน คือ $\sin(x_1), \dots$ และ $\cos(x_1), \dots$ แต่การแปลงเวฟเล็ต ในส่วนฟังก์ชันพื้นฐาน ส่วนใหญ่เรียกว่าฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ (Mother Wavelet Function) ซึ่งมีคุณสมบัติในการสเกลและเลื่อนตำแหน่งได้

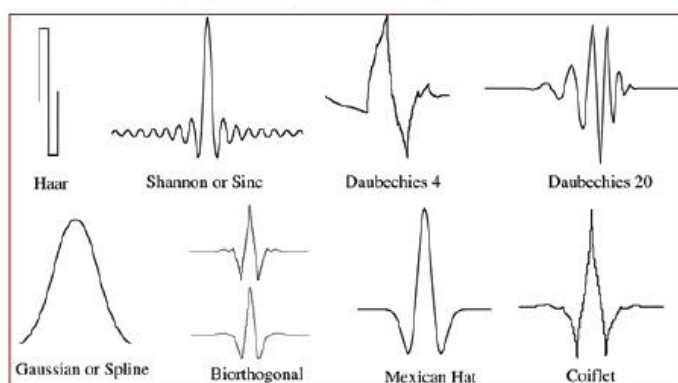
$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4.10-1)$$

โดยที่ a เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ ซึ่งจะถูกลดสเกลและเลื่อนตำแหน่งโดยพารามิเตอร์ a และ b ซึ่งการสเกล หมายถึง การหดเข้า (Compressing) หรือ ขยายออก (Dilation) โดยที่ a แทนการหดหรือขยาย ซึ่งเป็นการเปลี่ยนความถี่ การเลื่อนตำแหน่ง หมายถึง การเลื่อนตำแหน่งของการเกิดคลื่นบนแกนเวลา โดยแทนด้วยพารามิเตอร์ b รูปที่ 4.43 แสดงเวฟเล็ตที่ถูกลดสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า a และ b ต่าง ๆ กัน จากสมการ พบว่าจะมีการปรับค่าเพื่อให้สัญญาณที่ได้หลังจากปรับสเกลแล้ว มีพลังงานเท่ากับเวฟเล็ตแม่ด้วยการคูณ $\frac{1}{\sqrt{a}}$



รูปที่ 4.43 เวฟเล็ตที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า a และ b ต่าง ๆ กัน

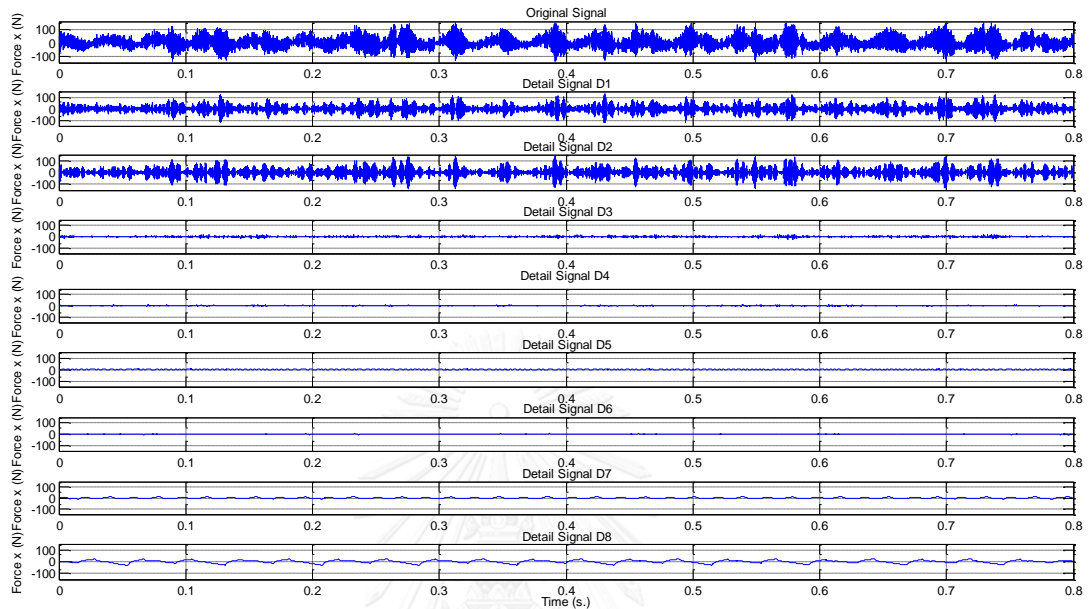
เมื่อนำข้อมูลสัญญาณใด ๆ มาวิเคราะห์ด้วยกระบวนการแปลงเวฟเล็ต เปรียบเหมือนการแยกสัญญาณให้ออกมาดังรูปของเวฟเล็ตแม่ ที่การปรับสเกล และตำแหน่งที่แตกต่างกันไป เวฟเล็ตถูกแบ่งออกเป็นหลายลักษณะ ซึ่งเรียกลักษณะต่าง ๆ ว่า แฟมมิลี (Family) โดยมีรูปแบบคลื่นสัญญาณที่แตกต่างกันออกไป เช่น คลื่นเวฟเล็ตแบบฮาร์, คลื่นเวฟเล็ตแบบเมเยอร์ และคลื่นเวฟเล็ตแบบคอเบชีส์ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.44



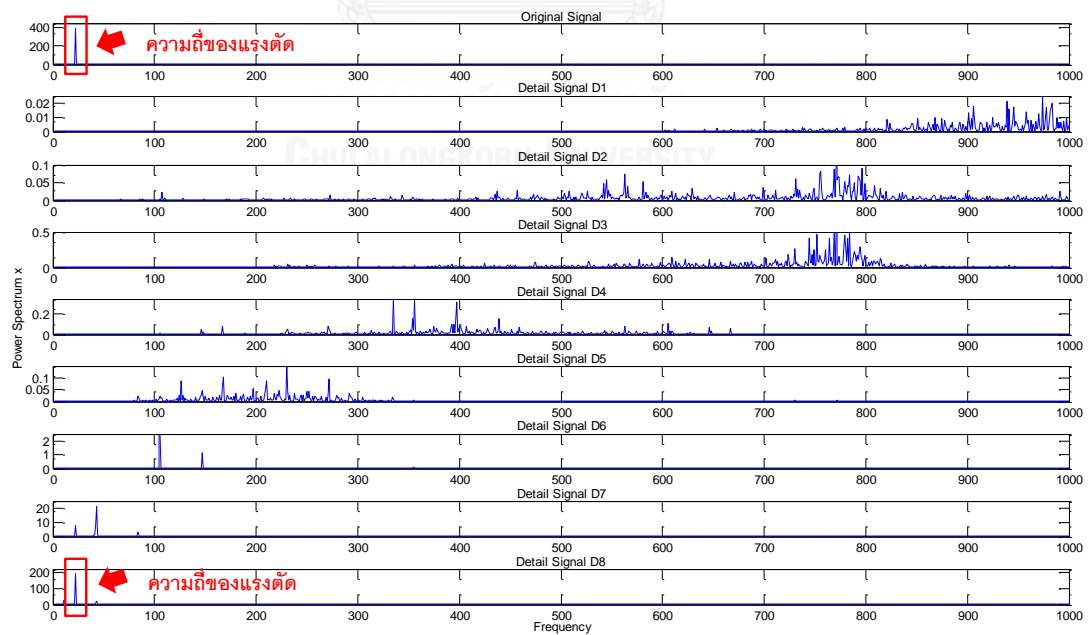
รูปที่ 4.44 ลักษณะของเวฟเล็ตที่แฟมมิลีต่าง ๆ

จากลักษณะสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้น มีลักษณะใกล้เคียงกับลักษณะเวฟเล็ตแบบคอเบชีจึงเลือกใช้ฟังก์ชันดังกล่าวในการแปลงสัญญาณแรงตัดพลวัต ในการพิจารณาตัวอย่างการทดลองวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตสำหรับการตัดที่ให้เศษโลหะแบบแตกหักด้วยการแปลงเวฟเล็ต

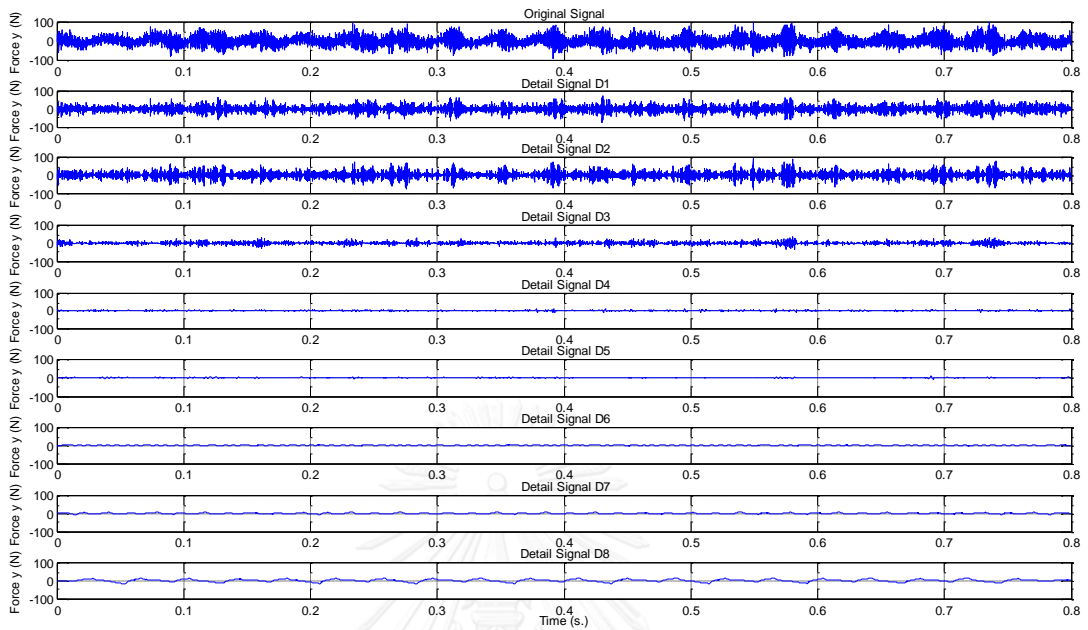
ที่ความเร็วตัด 150 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.8 มิลลิเมตร
 วัสดุมีงุมมีด 0.8 มิลลิเมตร และมุมคายเศษโลหะ -6 องศา ดังต่อไปนี้



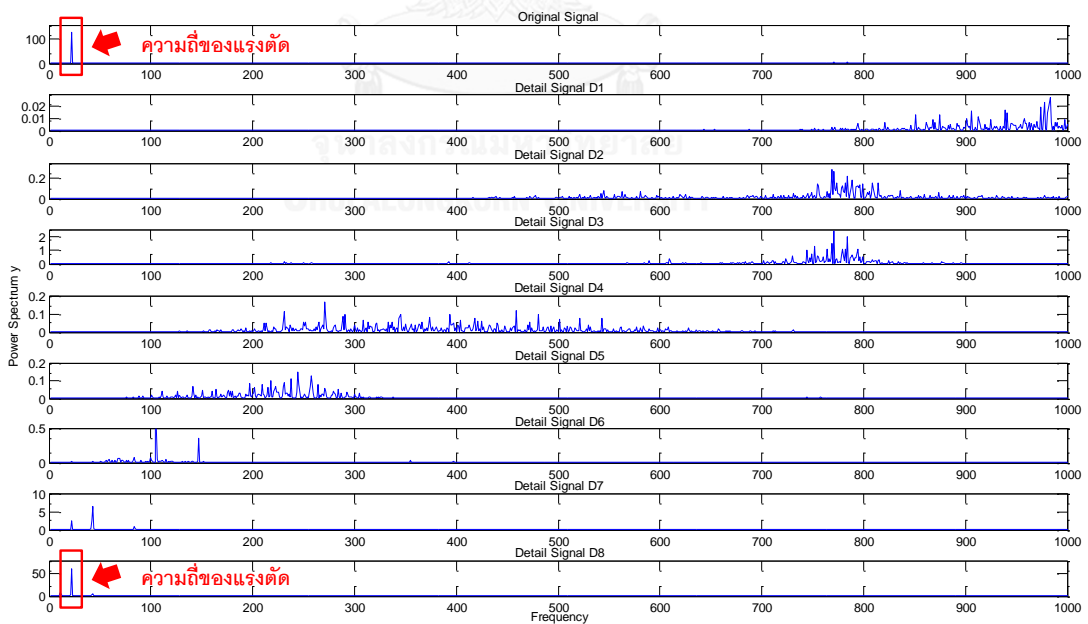
รูปที่ 4.45 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเล็ทในโดเมนเวลาของ F_x



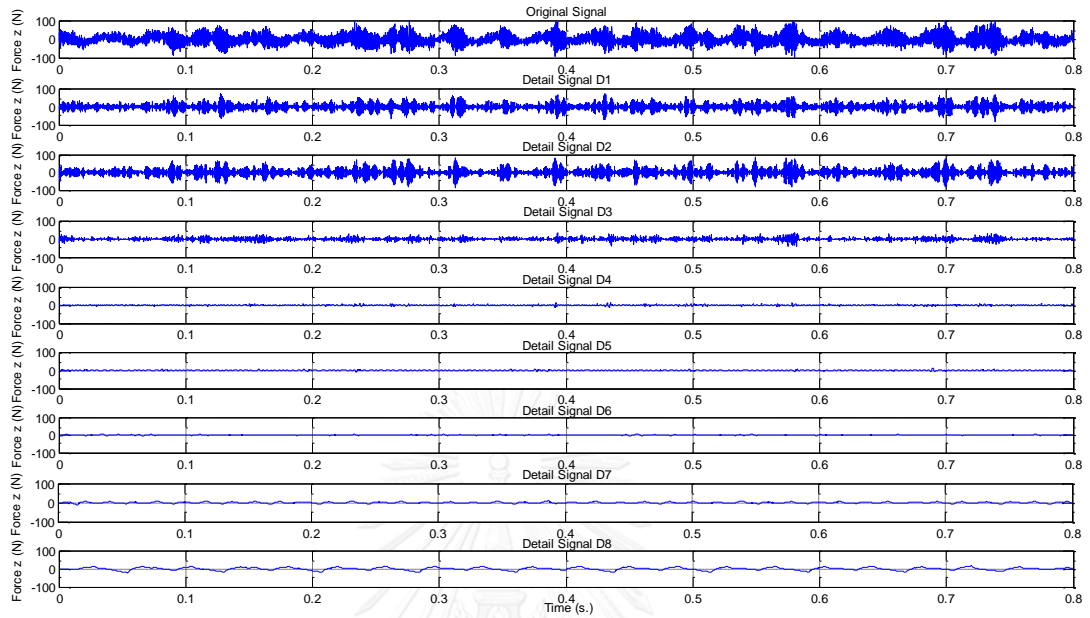
รูปที่ 4.46 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเล็ทในโดเมนความถี่ของ F_x



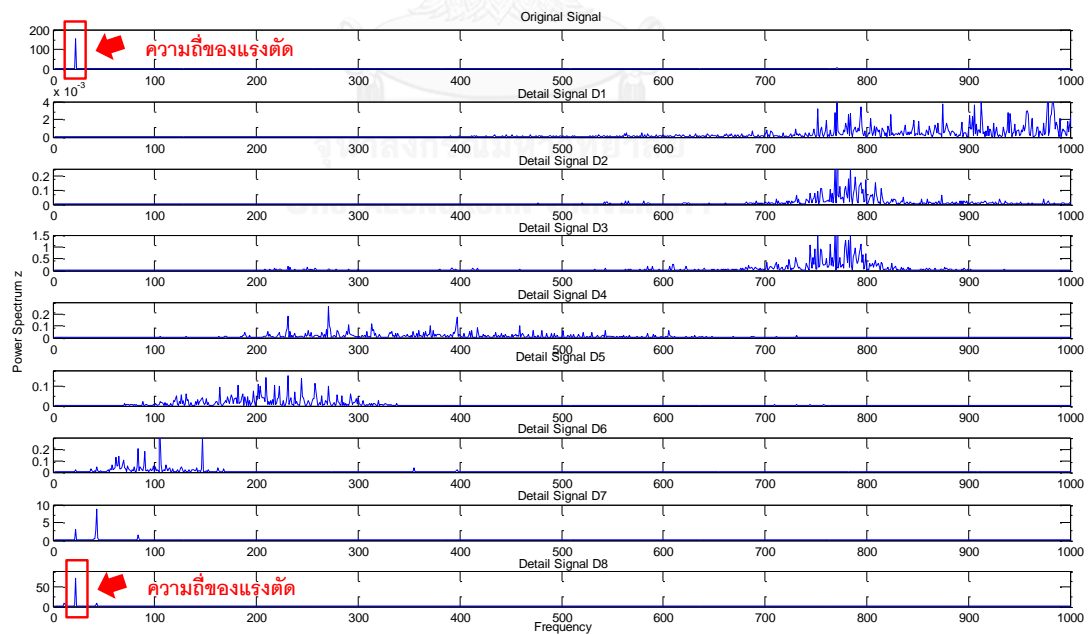
รูปที่ 4.47 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเล็ทในโดเมนเวลาของ F_y



รูปที่ 4.48 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเล็ทในโดเมนความถี่ของ F_y



รูปที่ 4.49 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเล็ทในโดเมนเวลาของ F_z



รูปที่ 4.50 แสดงการแปลงสัญญาณเวฟเล็ทในโดเมนความถี่ของ F_z

จากการทดลองแปลงสัญญาณเวฟเล็ทของแรงตัดพลวัต ดังรูปที่ 4.45 – 4.50 พบว่า สามารถแยกสัญญาณแรงตัดออกมาได้ทั้งหมด 8 ระดับ ซึ่งอัตราการสุ่มเก็บข้อมูล (Sampling rate) จะมีผลต่อระดับในการแยกแรงของการแปลงเวฟเล็ท เนื่องจากความสามารถในการแยกแยะระดับของ สัญญาณแต่ละระดับไม่เท่ากัน โดยเมื่อพิจารณาที่โดเมนความถี่พบว่าที่ระดับ 8 จะพบความถี่ของ แรงตัดซึ่งตรงกับสัญญาณ Original นั่นคือความถี่ที่แท้จริงของแรงตัด



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดและแรงป้อนตัดสถิต สำหรับเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี โดยการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำไปสู่การพัฒนาเป็นสมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ทำนายความตรงของชิ้นงานในขณะตัดชิ้นงาน สำหรับชิ้นงานเหล็ก S45C ด้วยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว

5.1 สรุปผลการวิจัย

สมการสำหรับทำนายความตรงของชิ้นงานในขณะตัดนั้นได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยอยู่ในรูปฟังก์ชันของเงื่อนไขการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีจุมุมมีด มุมคายเศษโลหะ และอัตราส่วนแรงป้อนตัด ในขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้มีการติดตั้งไดนามิเตอร์เพื่อตรวจวัดสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดชิ้นงาน ซึ่งเป็นตัวแปรตัวหนึ่งในการทำนายความตรงของชิ้นงาน โดยจะอยู่ในรูปของอัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตต่อแรงป้อนตัดสถิต

ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตและแรงตัดป้อนตัดสถิตที่เกิดขึ้น และเงื่อนไขการตัดอื่น ๆ ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการใช้สมการแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล เนื่องจากข้อมูลความตรงมีลักษณะคล้ายกับความขรุขระผิวของชิ้นงาน จึงอาศัยทฤษฎีความสัมพันธ์ของความขรุขระผิว ทั้งนี้การหาความสัมพันธ์แบบถดถอยพหุคูณถูกนำมาใช้วิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลองความตรงของชิ้นงานด้วยการใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

จากการวิจัยพบว่า อัตราการป้อนตัด และอัตราส่วนแรงตัดเป็นสองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความตรงของชิ้นงานมากที่สุด และสามารถอธิบายความตรงของชิ้นงานได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ความตรงของชิ้นงานจะมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อใช้ความเร็วตัด รัศมีจุมุมมีด และมุมคายเศษโลหะที่มีค่ามาก ๆ ในขณะที่ใช้อัตราการป้อนตัด และความลึกตัดที่น้อย ๆ ดังแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ในสมการทำนายความตรงของชิ้นงาน 4.7-1 จากการทดลองซ้ำเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการ

โดยเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลอง พบว่าสมการทำนายความตรงของชิ้นงาน (S_r) มีความแม่นยำเท่ากับ 91.85%

สำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงในอนาคตคาดหวังว่า ยกตัวอย่างชิ้นงานที่ต้องการความตรงที่มีความแม่นยำสูง นั่นคือ แกนสปินเดิลสำหรับฮาร์ดดิส ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและต้องการค่าความเผื่อของการออกแบบน้อย ๆ เป็นต้น เมื่อติดตั้งระบบตรวจวัดสัญญาณแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัด ระบบจะทำการประมวลค่าความความตรงของชิ้นงานที่ได้จากเงื่อนไขการตัดนั้น ๆ ซึ่งผลจากการใช้สมการทำนายความตรงนี้ จะทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพมากขึ้น ได้ลักษณะของรูปร่างชิ้นงานที่มีความแม่นยำมากขึ้น รวมทั้งสามารถหยุดกระบวนการตัดได้ทันเวลาที่ ถ้าระบบประเมินได้ว่าความตรงของชิ้นงานไม่เป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการ ซึ่งส่งผลให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิตลดน้อยลง คาดหวังว่าสมการทำนายความตรงที่ได้นี้ จะมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น และจะนำไปสู่การพัฒนาของเครื่องจักรกลอัจฉริยะที่พิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น ท้ายที่สุดเป็นการประกันความเชื่อมั่นของระบบการผลิตอัจฉริยะที่สูงขึ้นด้วย

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

- 1) การใช้อัตราส่วนแรงป้อนตัดพลวัตและแรงป้อนตัดสถิต สามารถนำมาใช้ในการทำนายความตรงของชิ้นงานได้ โดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป
- 2) จากการพัฒนาสมการพบว่า อัตราป้อนตัด มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์มากที่สุด เนื่องจากรอยป้อนตัดที่เกิดขึ้นส่งผลต่อระยะความขรุขระผิวที่มากที่สุด (max) และน้อยที่สุด (min) นั่นคือข้อมูลของความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงานนั่นเอง โดยความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราป้อนตัดพบว่าความตรงเบี่ยงหนีศูนย์มีค่ามากขึ้น หมายความว่า ความตรงของชิ้นงานลดลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อใช้อัตราป้อนตัดน้อย ๆ ความตรงของชิ้นงานจะมีแนวโน้มที่ดี
- 3) จากการทดสอบความแม่นยำของสมการ พบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดผิวชิ้นงาน ตำแหน่งในการติดตั้งมีดตัดที่ต้องมีการติดตั้งใหม่ทุกครั้งที่ทำกรทดลอง และรวมไปถึงอิทธิพลของเศษโลหะที่มีผลต่อแรง

ตัดที่เกิดขึ้น โดยค่าความคลาดเคลื่อน 8.15% ที่เกิดขึ้น อาจเกิดจากปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่ได้นำมาวิเคราะห์ในการทดลอง

4) จากการพิจารณาสัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ และข้อมูลความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ พบว่าความถี่ของสัญญาณทั้งสอง มีความคลาดเคลื่อนกันบ้างในบางเงื่อนไขการตัด แต่ก็ยังคงอยู่ในค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถยอมรับได้ ดังภาคผนวก ก ทั้งนี้ อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของการกำหนดจุดอ้างอิงในการลากเส้นวัด กับจุดที่เริ่มตัดอาจคลาดเคลื่อนกันบ้างในบางเงื่อนไขการทดลอง

5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย

- 1) เนื่องจากต้องมีการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ใหม่ทุกครั้ง ในทุก ๆ การตัด ซึ่งใช้เวลาติดตั้งค่อนข้างนาน ทั้งนี้ อาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของมีดตัดที่ไม่เหมือนกันในแต่ละครั้ง โดยมีผลกระทบต่อแรงตัดที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งในแต่ละครั้ง
- 2) เนื่องจากเครื่องวัดความขรุขระผิวที่ใช้สำหรับเก็บค่าความตรงของชิ้นงาน มีข้อจำกัดในเรื่องของแท่นจับชิ้นงาน ซึ่งรูปร่างและชิ้นงานที่ถูกจับยึดในแต่ละครั้ง จะต้องมีการปรับแท่นจับยึดใหม่ในทุก ๆ ครั้ง ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าของชิ้นงานที่วัดในแต่ละครั้งอีกด้วย
- 3) สำหรับข้อจำกัดในเรื่องระยะการวัดผิวชิ้นงานของเครื่องวัดความขรุขระผิวมีมาตรฐานอยู่ที่ 12.5 มิลลิเมตร ดังนั้น ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจึงใช้ระยะตัด 15 มิลลิเมตร ซึ่งสมการการทำนายความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ที่ได้นั้น อาจไม่แม่นยำเมื่อใช้กับชิ้นงานที่มีความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก ๆ โดยชิ้นงานที่ใช้ควรมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (length-to-diameter) ไม่เกิน 10

5.4 ข้อเสนอแนะ

- 1) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแรงตัดพลวัต และความตรงเบี่ยงหนีศูนย์ของชิ้นงาน สามารถใช้การวิเคราะห์เวฟเล็ตเพื่อแยกสัญญาณการแตกหักของเศษโลหะและสัญญาณของแรงตัดได้ เพื่อให้สมการที่ทำนายความตรงของชิ้นงานมีความแม่นยำมากขึ้น และสามารถนำไปใช้ได้จริงในทุกกรณีแล้ว ยังคาดหวังว่าจะให้ค่าความแม่นยำที่มากขึ้นด้วย

2) ควรทดลองเปลี่ยนชิ้นงานเป็นวัสดุประเภทอื่น เพื่อยืนยันความแม่นยำของสมการว่า สมการการทำนายความตรงของชิ้นงานจะสามารถใช้ได้กับเงื่อนไขการตัดอื่น ๆ อีกหรือไม่



รายการอ้างอิง

1. กระทรวงอุตสาหกรรม, แผนแม่บทการพัฒนาอุตสาหกรรมไทย พ.ศ. 2555-2574. 2554.
2. สำนักวิจัยเศรษฐกิจอุตสาหกรรม and สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, สรุปสถานการณ์การผลิตภาคอุตสาหกรรมเดือนกรกฎาคม 2557. 2557.
3. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, วิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. 2555, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร.
4. Saglam, H., *Pneumatic non-contact data acquisition system for straightness measurement of cylindrical parts*. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 2011.
5. Kim, S.-C. and S.-C. Chung, *Synthesis of the multi-step straightness control system for shaft straightening processes*. *Mechatronics* 12, 2002: p. 139-156.
6. Benardos, P.G. and G.-C. Vosniakos, *Predicting surface roughness in machining*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003. 43: p. 833-844.
7. 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.
8. Ozel, T. and Y. Karpat, *Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005. 45: p. 467-479.
9. An, L., *Turning parameter optimization for minimum production cost by integer programming*, in *International Conference on System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization*. 2010.
10. S., T. and R. S., *Monitoring of cutting conditions with dry cutting on CNC turning machine*. *Journal of Key Engineering Materials*, 2010. 443: p. 382-387.
11. 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*. *International Conference on Advances in Manufacturing and Materials Engineering*, 2014: p. 1692-1701.

12. 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.
13. Shawky, A.M. and M.A. Elbestawi, *In-process evaluation of workpiece geometrical tolerances in bar turning*. Int. J. Mach Tools Manufact., 1996. 36(1): p. 33-46.
14. Tangjitsitharoen, 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.
15. Yaldiz, S. and F. Unsacar, *Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement*. Materials and Design 27, 2006: p. 839-846.
16. Tangjitsitharoen, 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.
17. S., T., *In-process prediction of surface roughness by utilizing the cutting force ratio*. Transactions of NAMRI/SME, 2010. 38: p. 307-315.
18. Hessainia, Z., et al., *On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations*. Measurement 46, 2013: p. 1671-1681.
19. กัญยานต์ สมานมิตร, การทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการโดยประยุกต์ใช้แรงตัดพลวัตในการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C โดยใบมีดคาร์ไบด์เคลือบผิว, in ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2556, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
20. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, เอกสารประกอบการสอนวิชาการตัดโลหะ.
21. E.P., D., B. J.T., and R.A. Kohser, *Materials and process in manufacturing*, ed. t. Edition. 2004, USA: John Willey and Son.
22. S., K. and S. S, *Manufacturing Engineering and Technology*, ed. t. Edition. 2006, Singapore: Pearson Prentic Hall.
23. จักร จันทลักษณ์, การแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (FFT) และการประยุกต์ใช้เพื่อวินิจฉัยสภาพเครื่องจักร ตอนที่ 1 : แกนอ้างอิงเทียบทางความถี่ด้วยการวิเคราะห์แบบฟูริเยร์. วารสารพัฒนาเทคนิค 15, 2545: p. 17-22.

24. Liotto, G. and C. Wang, *Straightness measurement of a long guide way a comparision of dual-beam laser technique and optical collimator*. ISPM04GLiotto&CWangs.doc, 2004.
25. วัชรินทร์ สามิตร. ความตรง. 2554 23 ตุลาคม 2557 [cited 13; Available from: <http://www.nimt.or.th/nimt/upload/linkfile/sys-metrology-606-101.pdf>.
26. Department of Mathematics, C.U., *Chapter 4 Straightness on cylinders and cones*. 2011.
27. Tokyo Seimitsu Co., L., *Operation manual for roundness and cylindrical profile measuring instrument RONDCOM 43C/41C/31C*. 2004.
28. กัลยา วานิชย์บัญชา, หลักสถิติ. 2553, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
29. ปารเมศ ชูติมา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. 2545, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
30. W., P. and P. U., *The estimation of the diameter error in bar turning : a comparison among three cutting force models*. Int J Adv Manuf Technol, 2003: p. 465-474.
31. 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 46, 2006: p. 1002-1012.
32. Bugra, K., A.-C.J. A., and R. Shivakumar, *Inspection of the cylindrical surface feature after turning using coordinate metrology*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 47, 2007: p. 1893-1903.
33. Cui, B. and R. Han, *Modeling of dimensional errors in slender bar turning using artificial neural networks*, in *7th World Congress on Intelligent Control and Automation*. 2008: China.
34. Tangjitsitcharoen, S., *In-process monitoring and prediction of surface roughness in CNC turning process*. Advanced Materials Research, 2011. 199-200: p. 1958-1966.
35. S., T., et al., *In-process monitoring and control of microassembly by utilizing force sensor*. Journal of Key Engineering Materials, 2008. 31(2): p. 588-594.





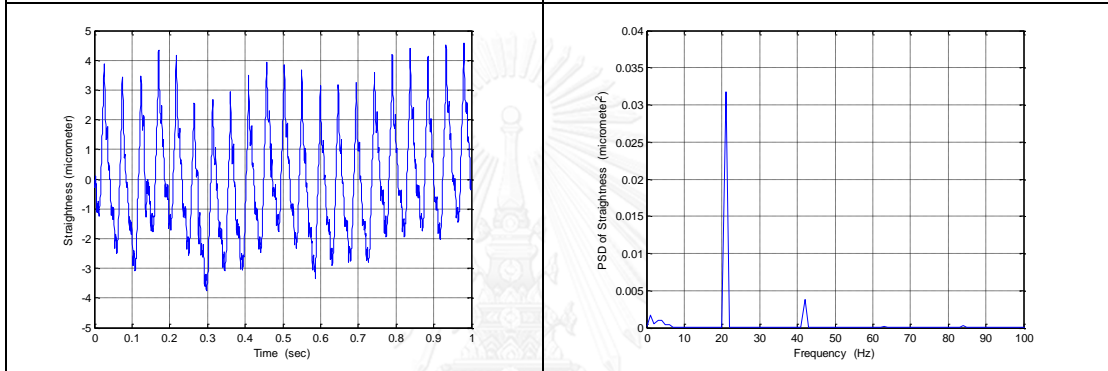
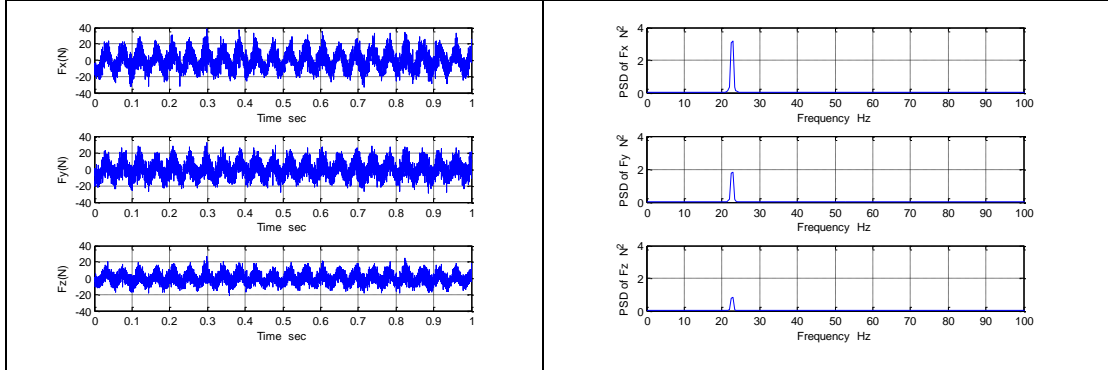
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

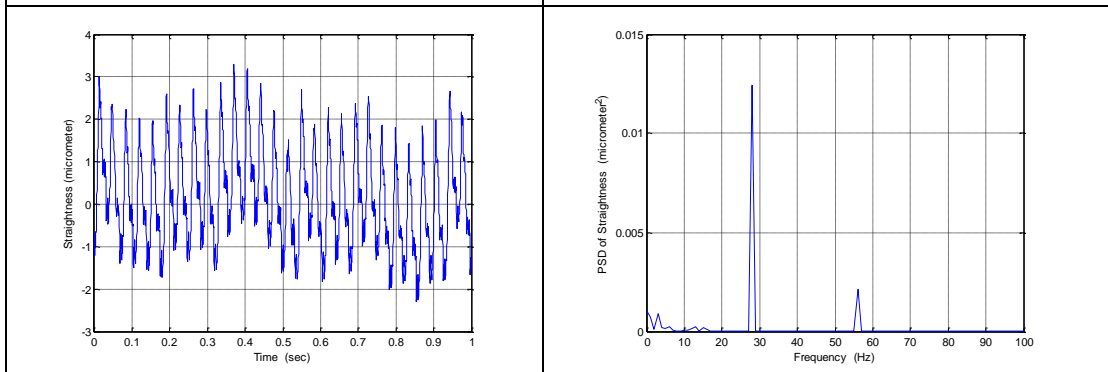
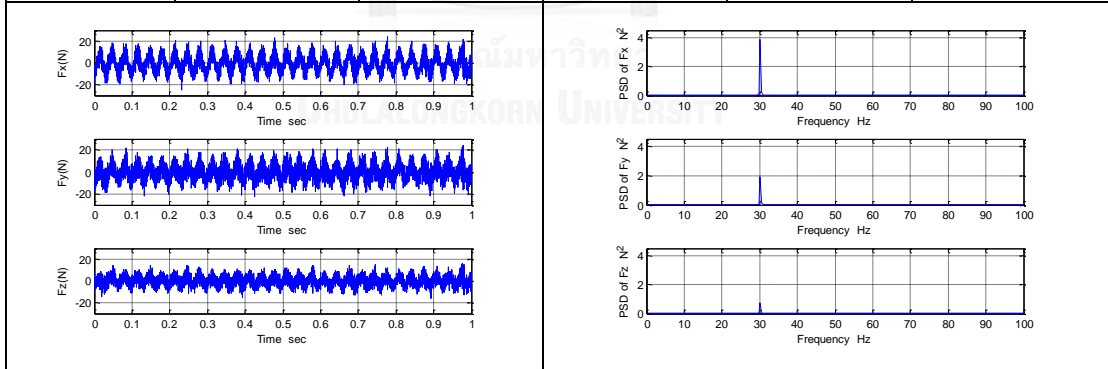
ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์ FFT สำหรับเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ

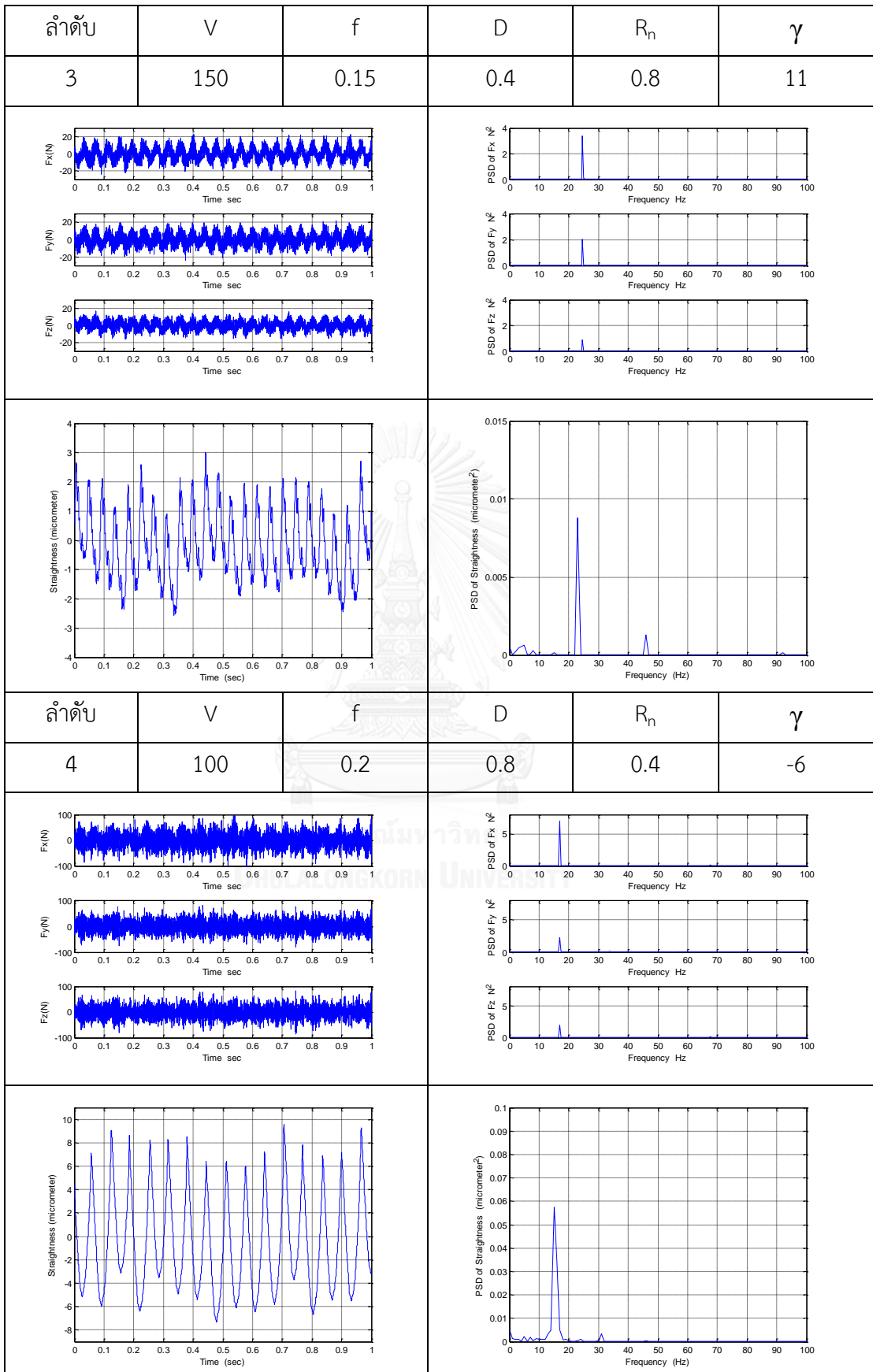
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

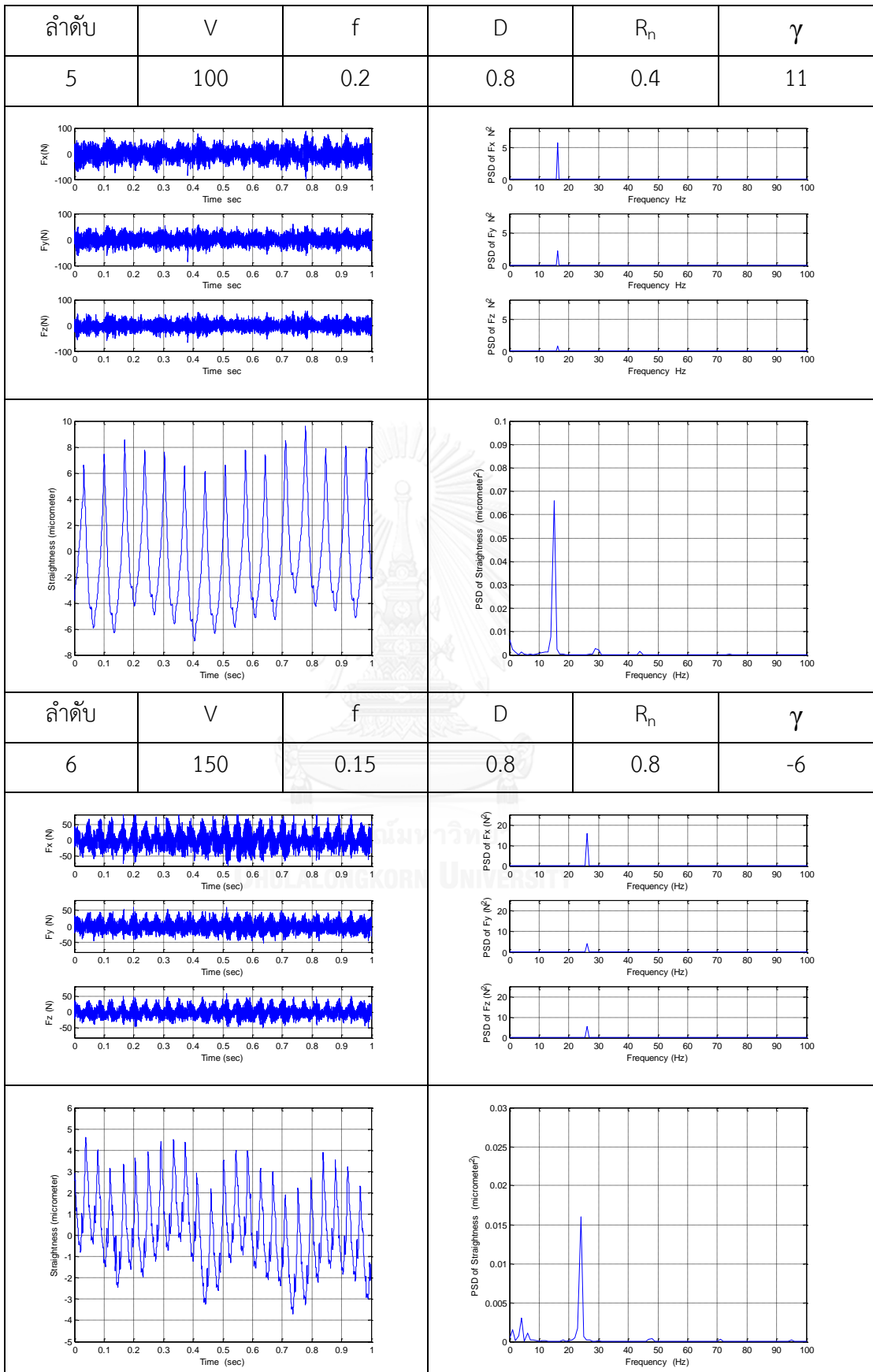
ลำดับ	V	f	D	R _n	γ
1	150	0.2	0.6	0.8	11

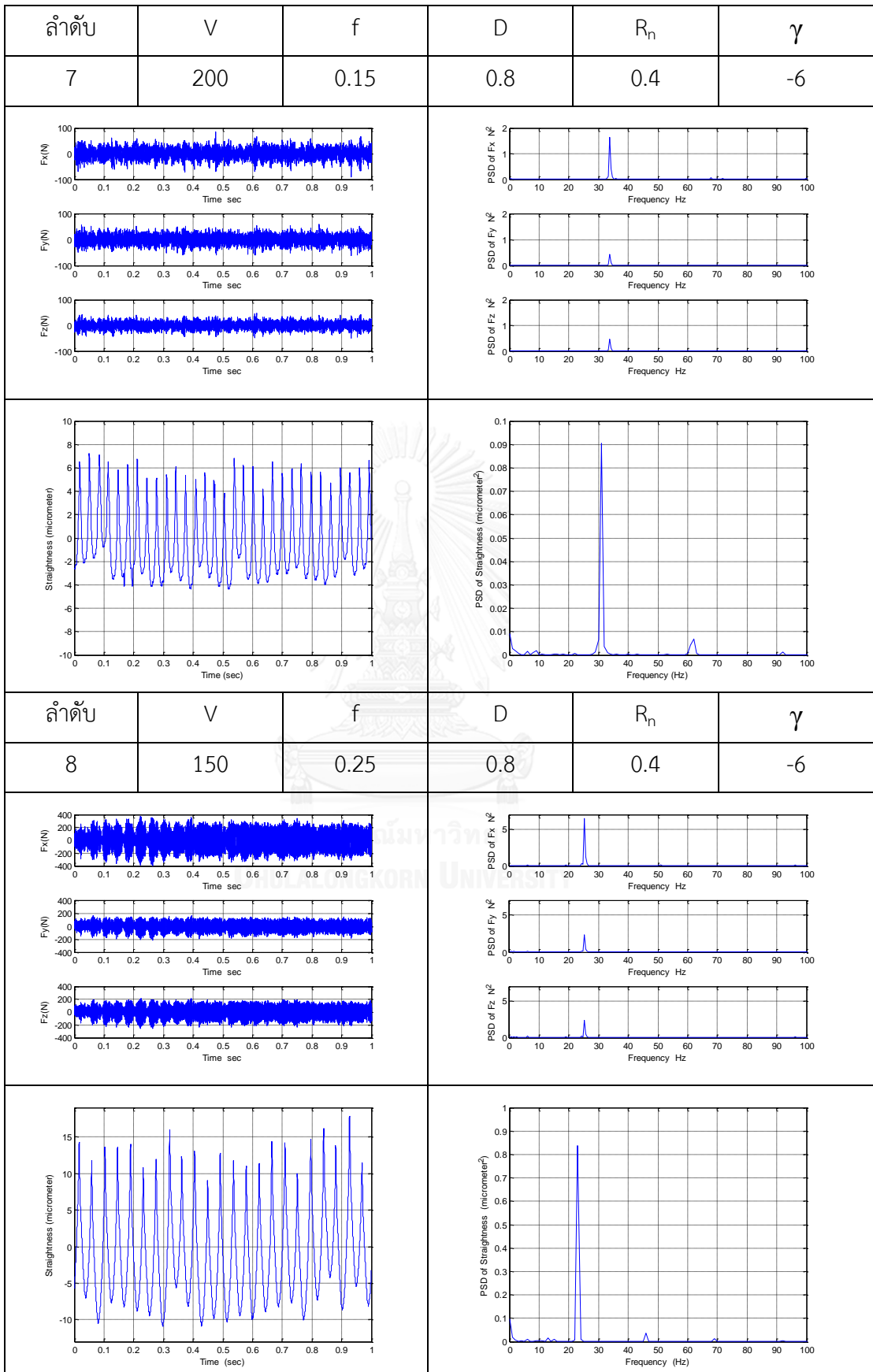


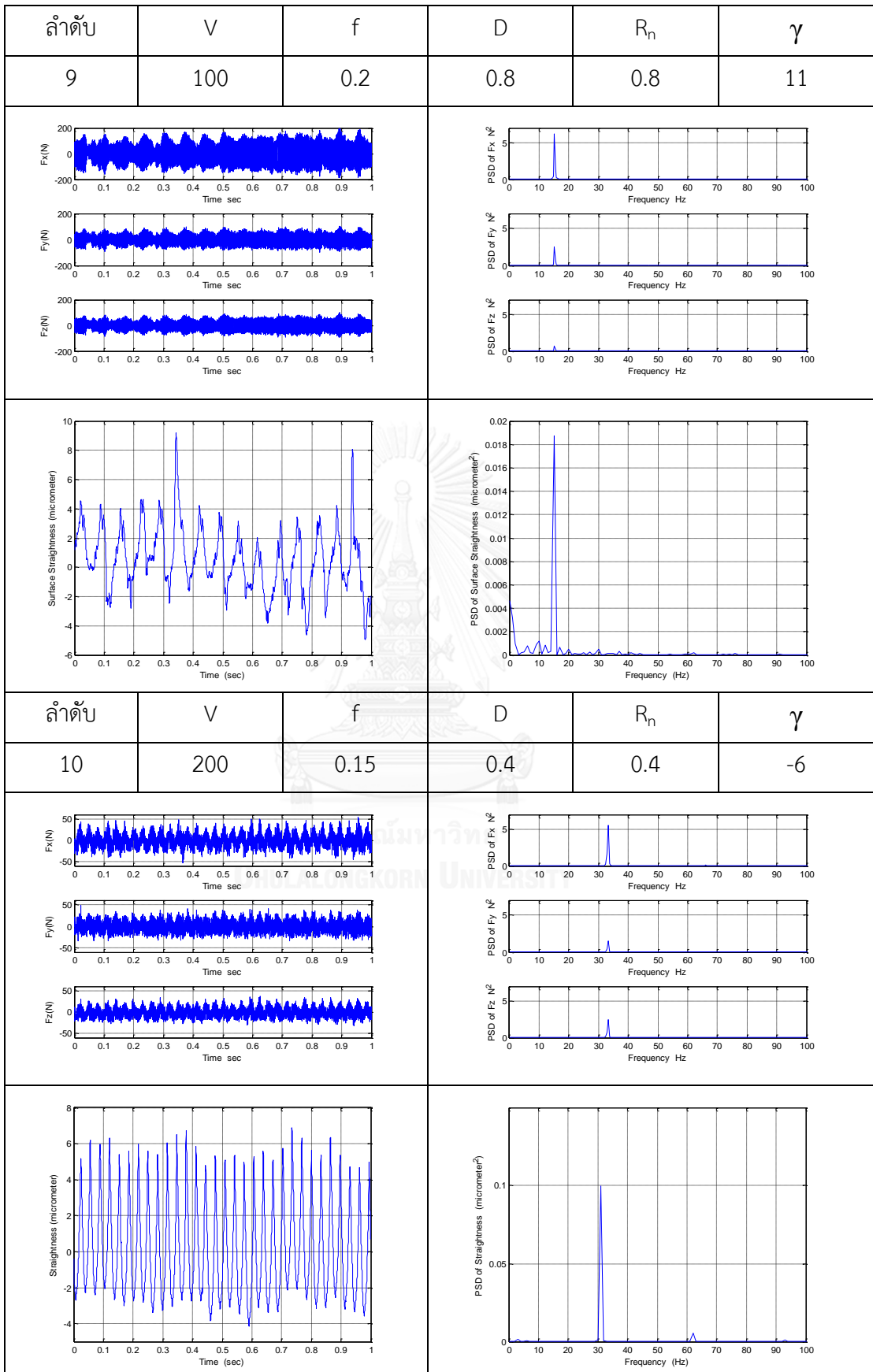
ลำดับ	V	f	D	R _n	γ
2	200	0.15	0.6	0.8	11

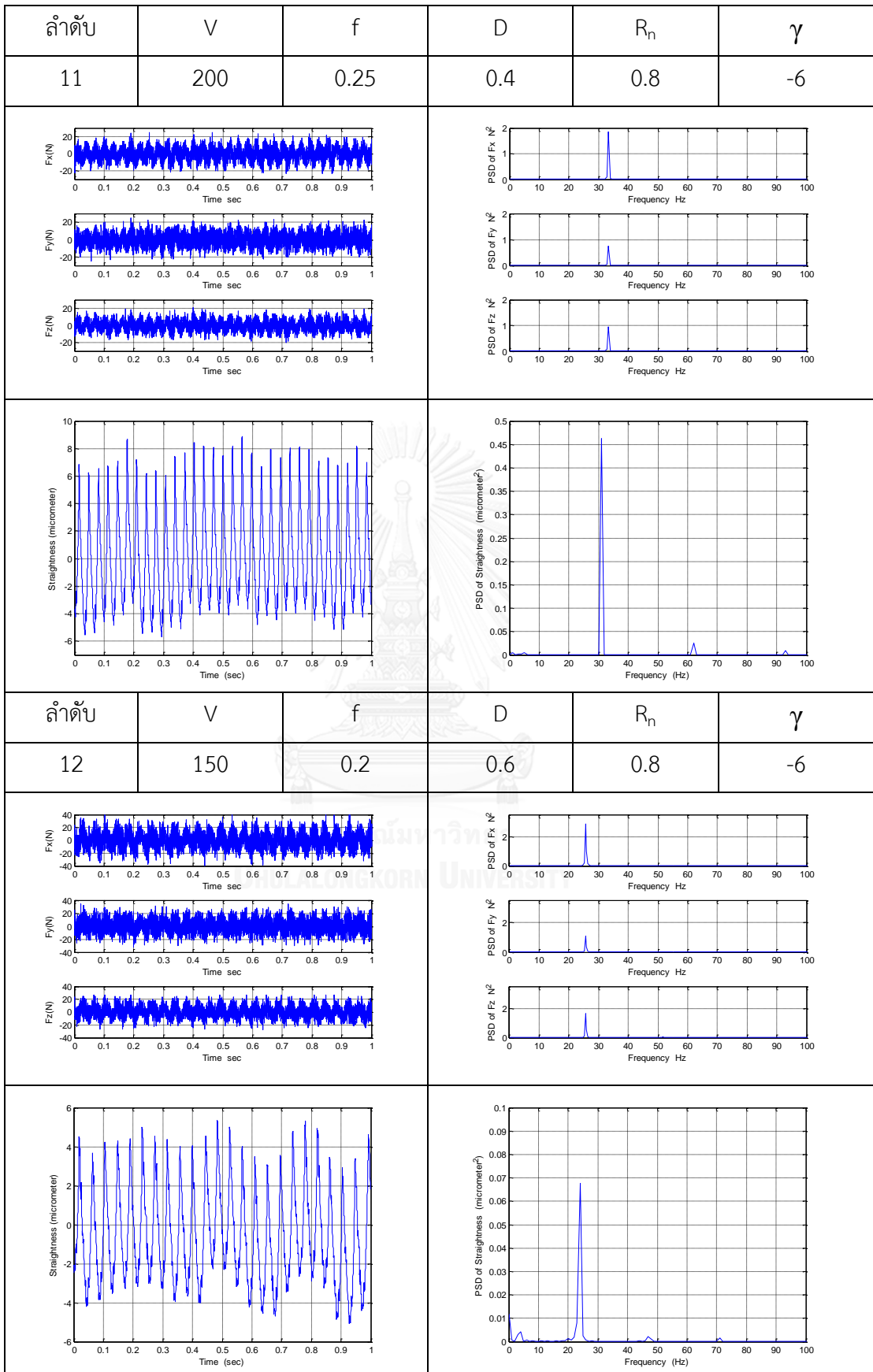


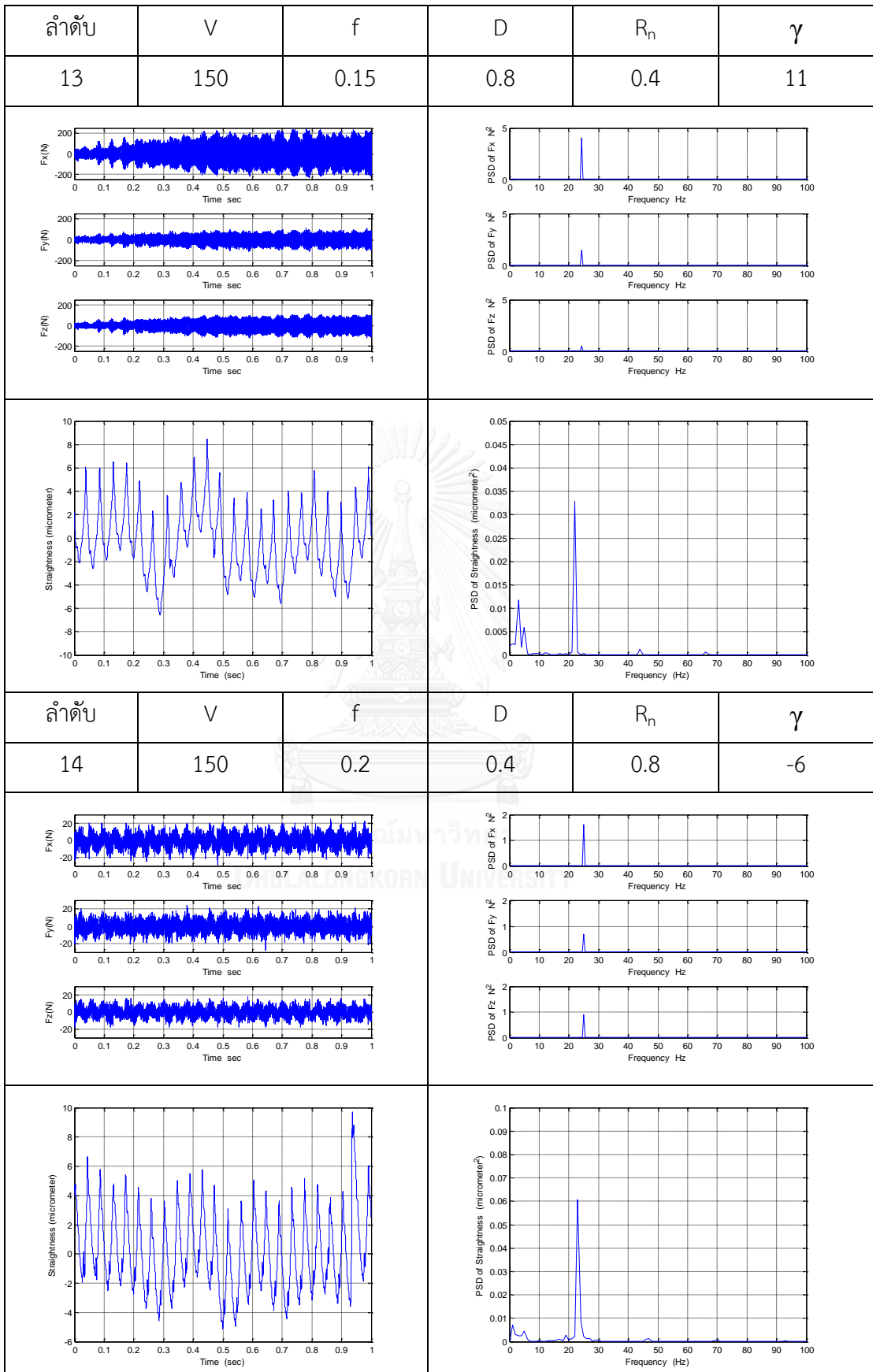


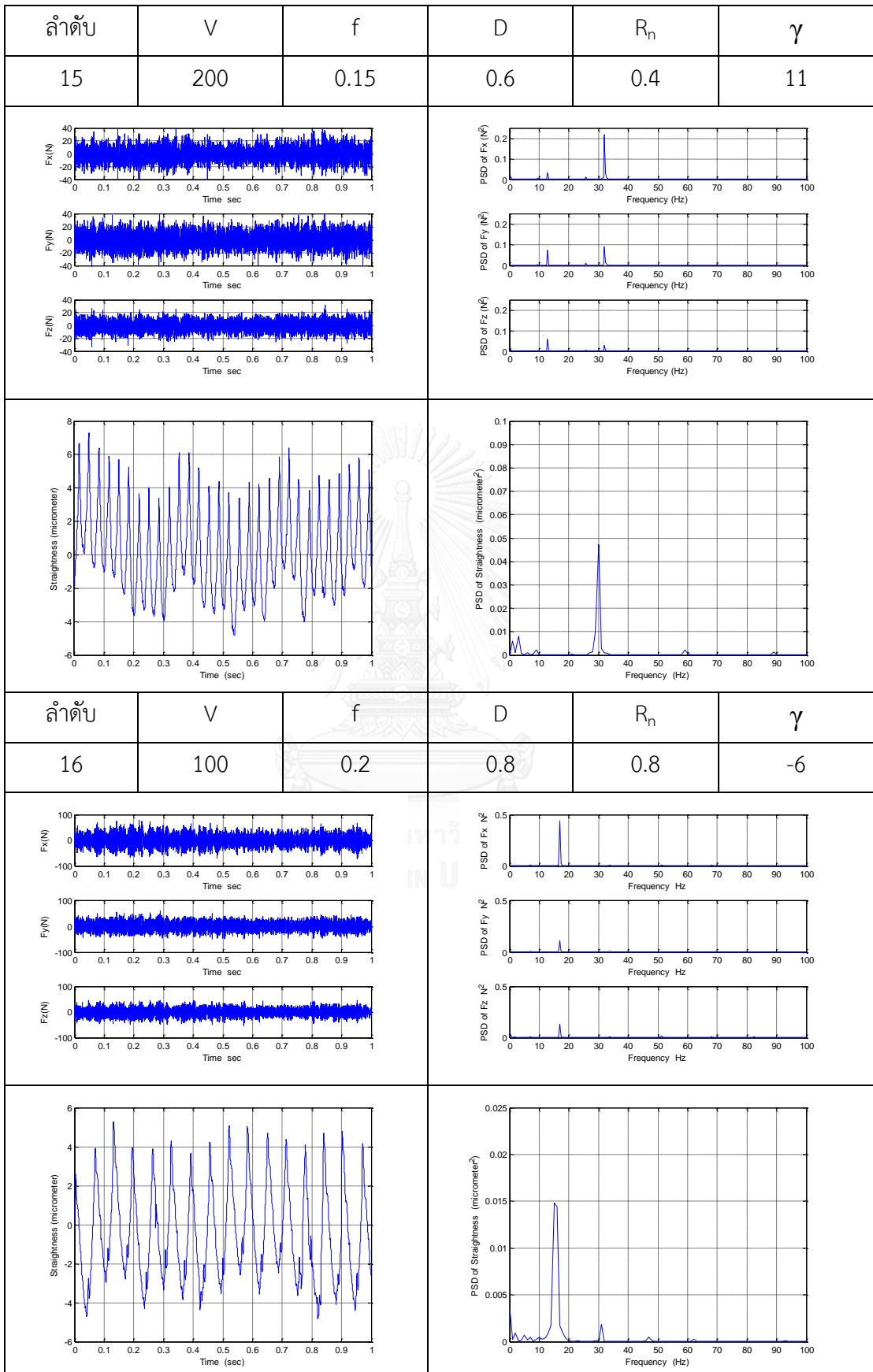


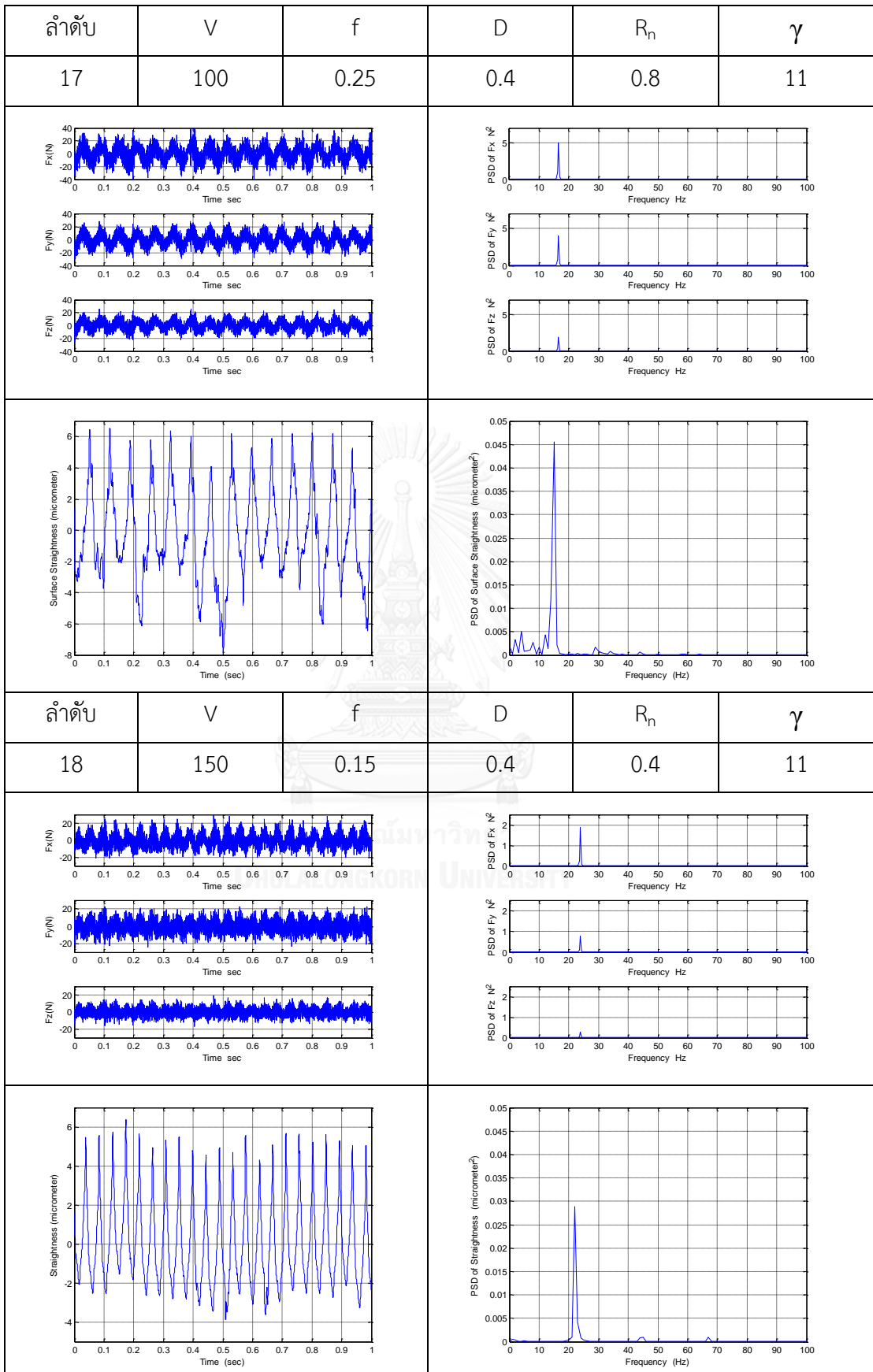


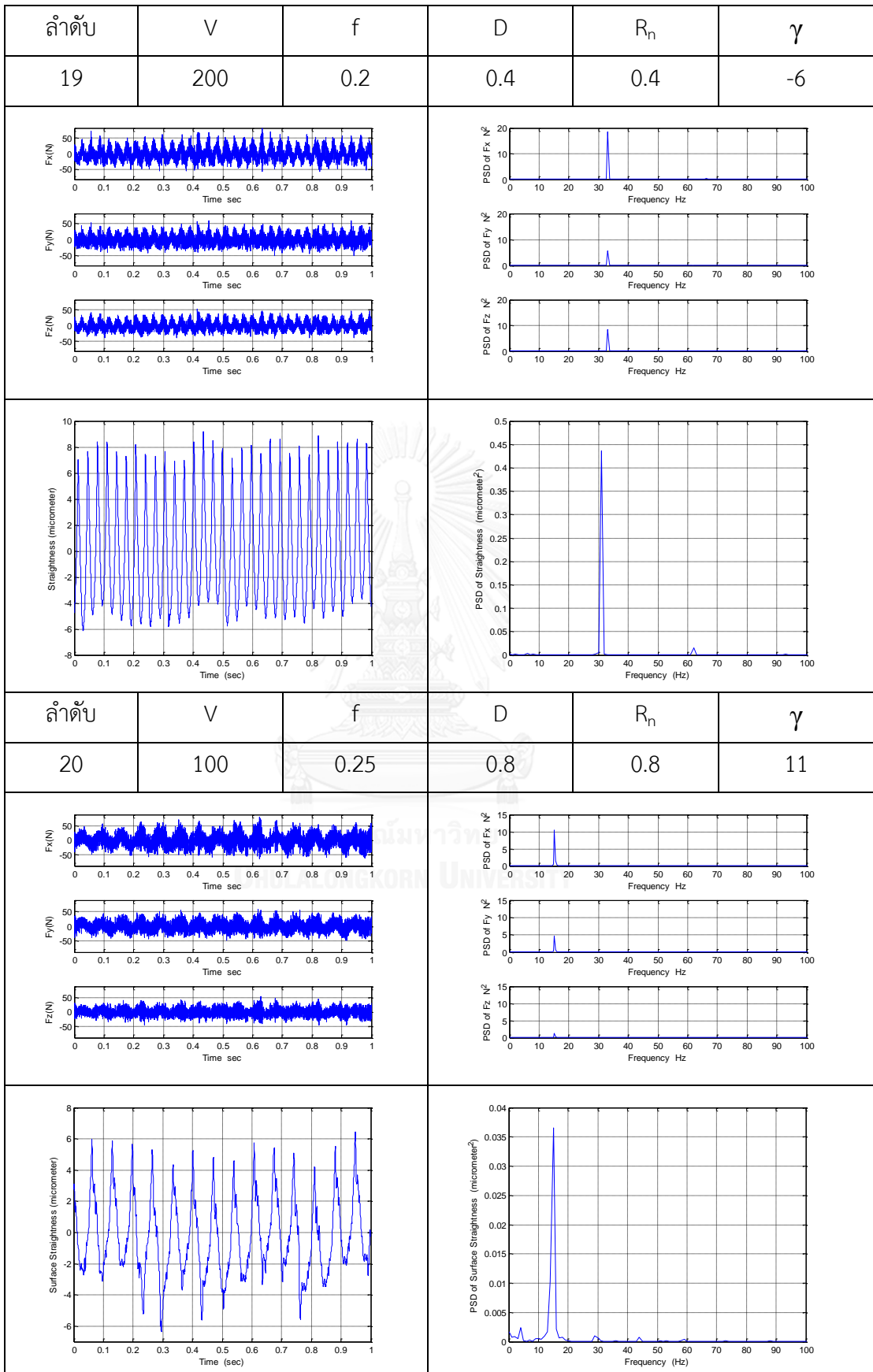


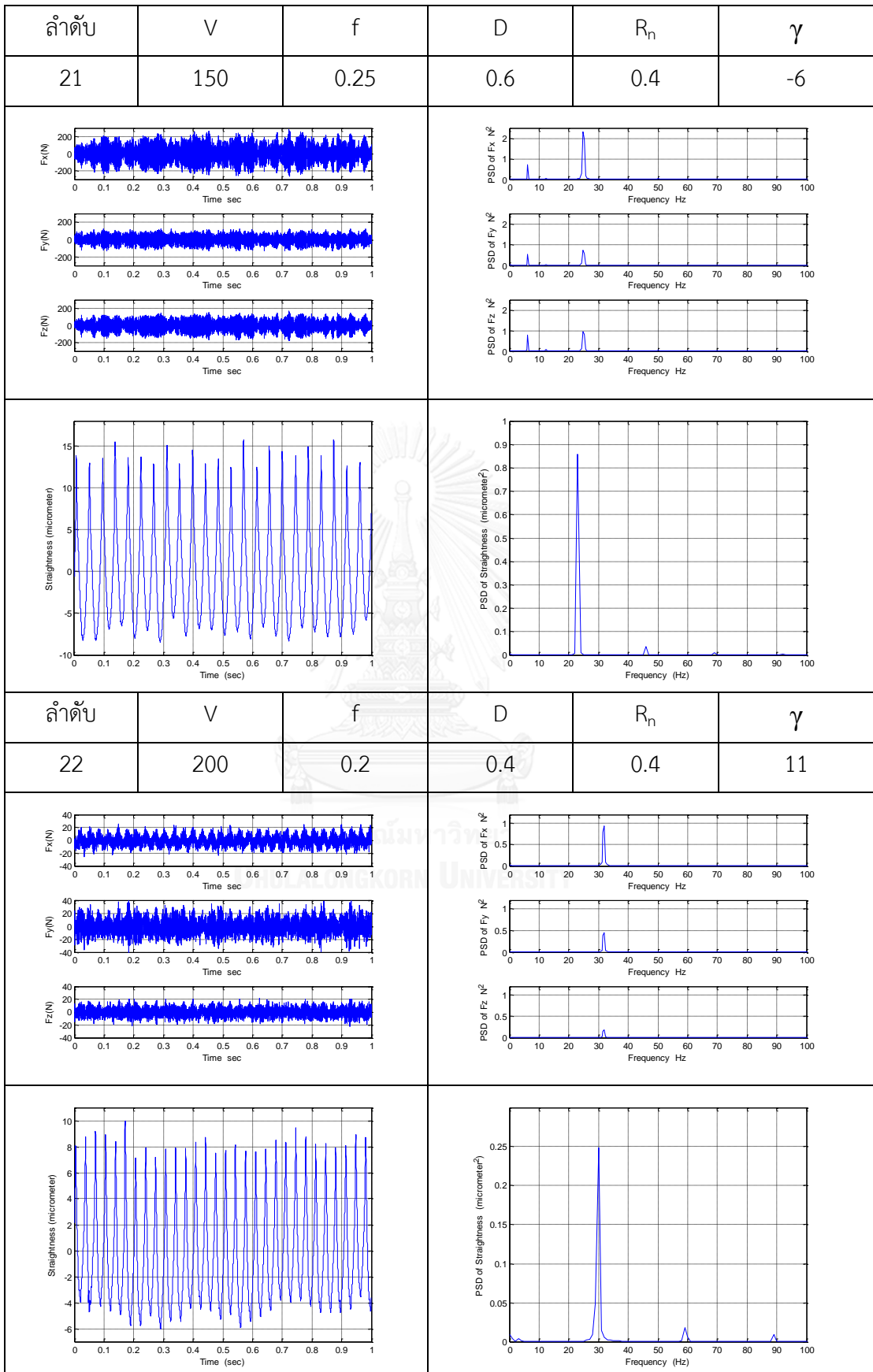


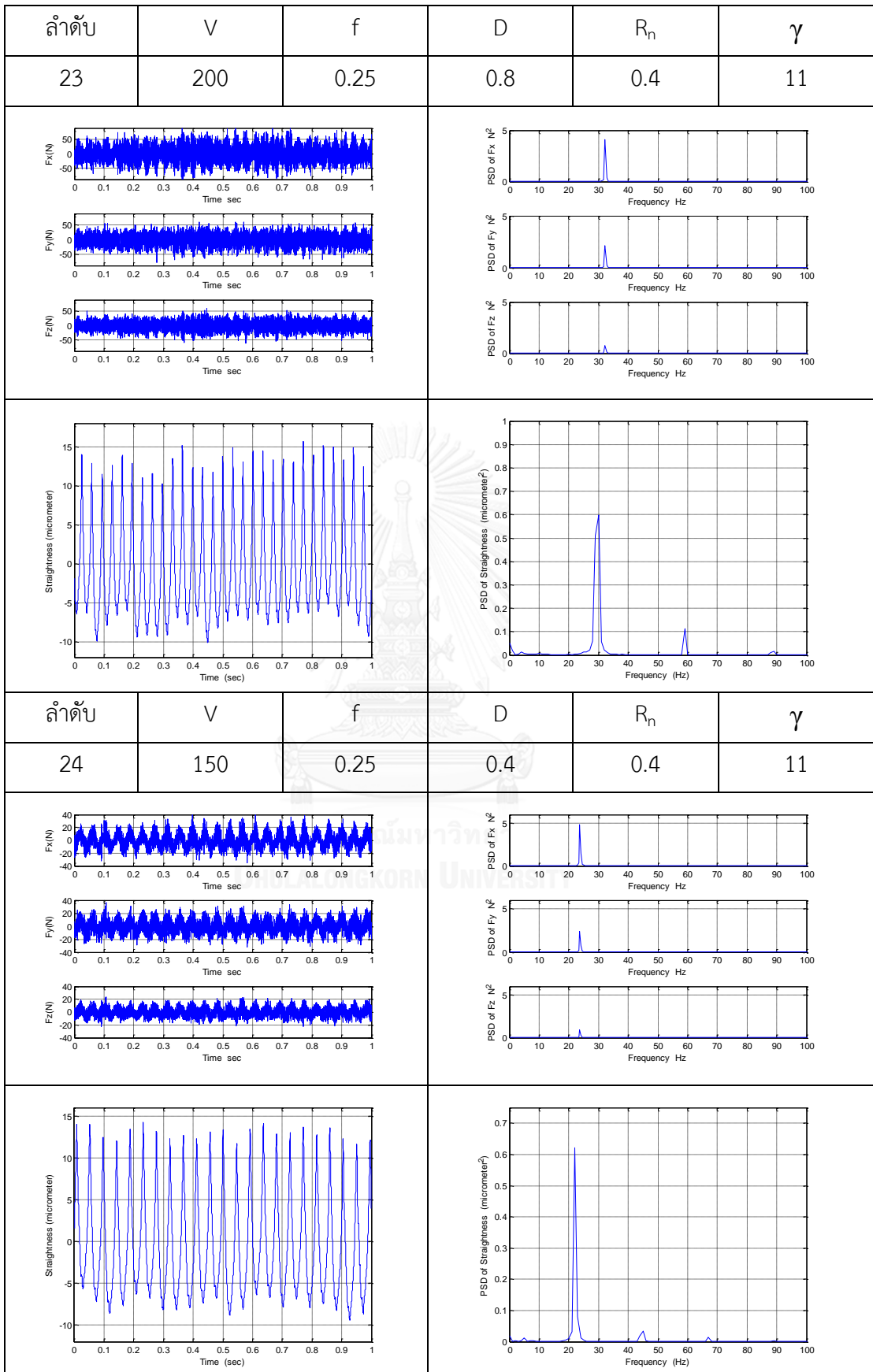


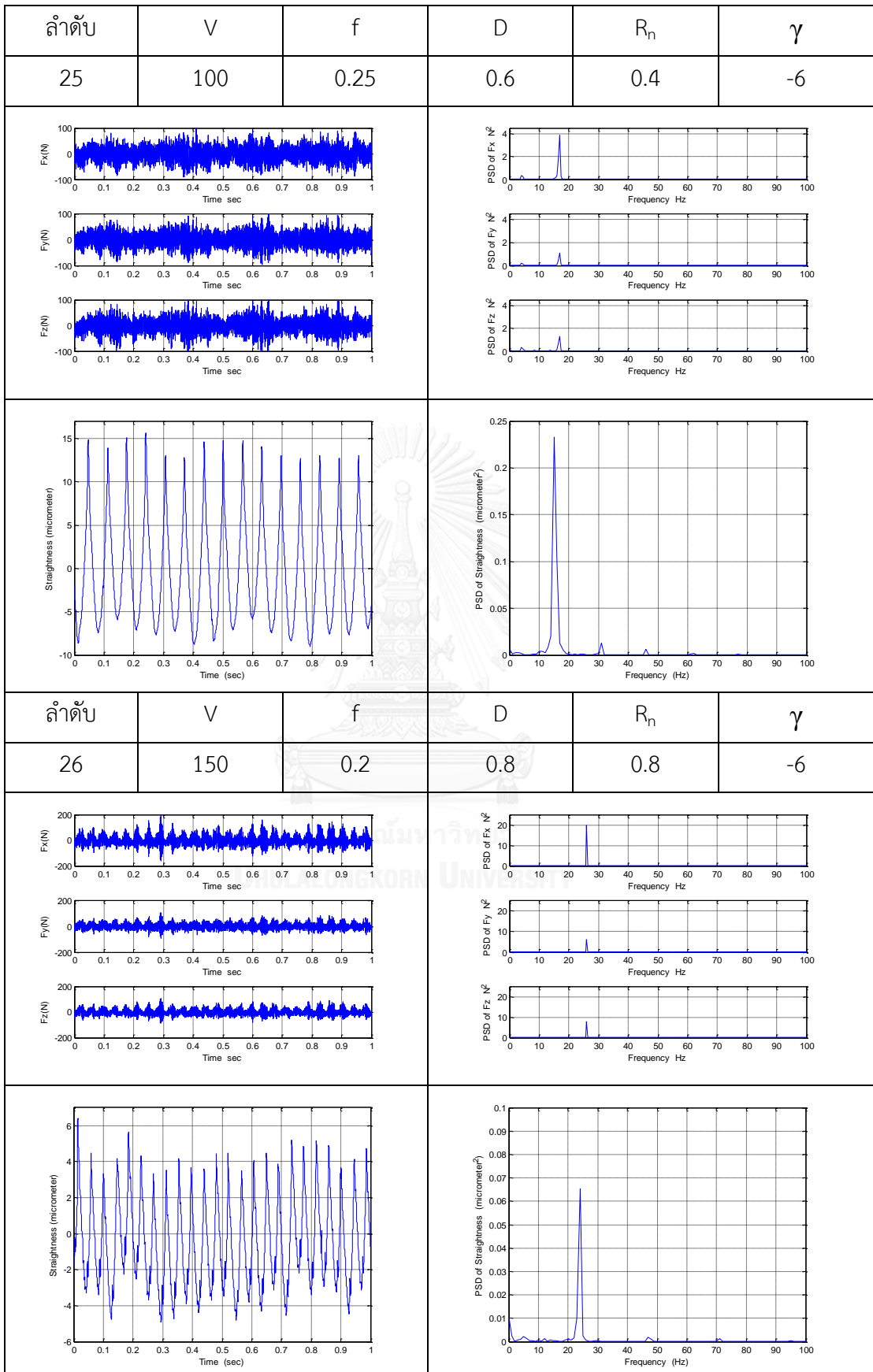


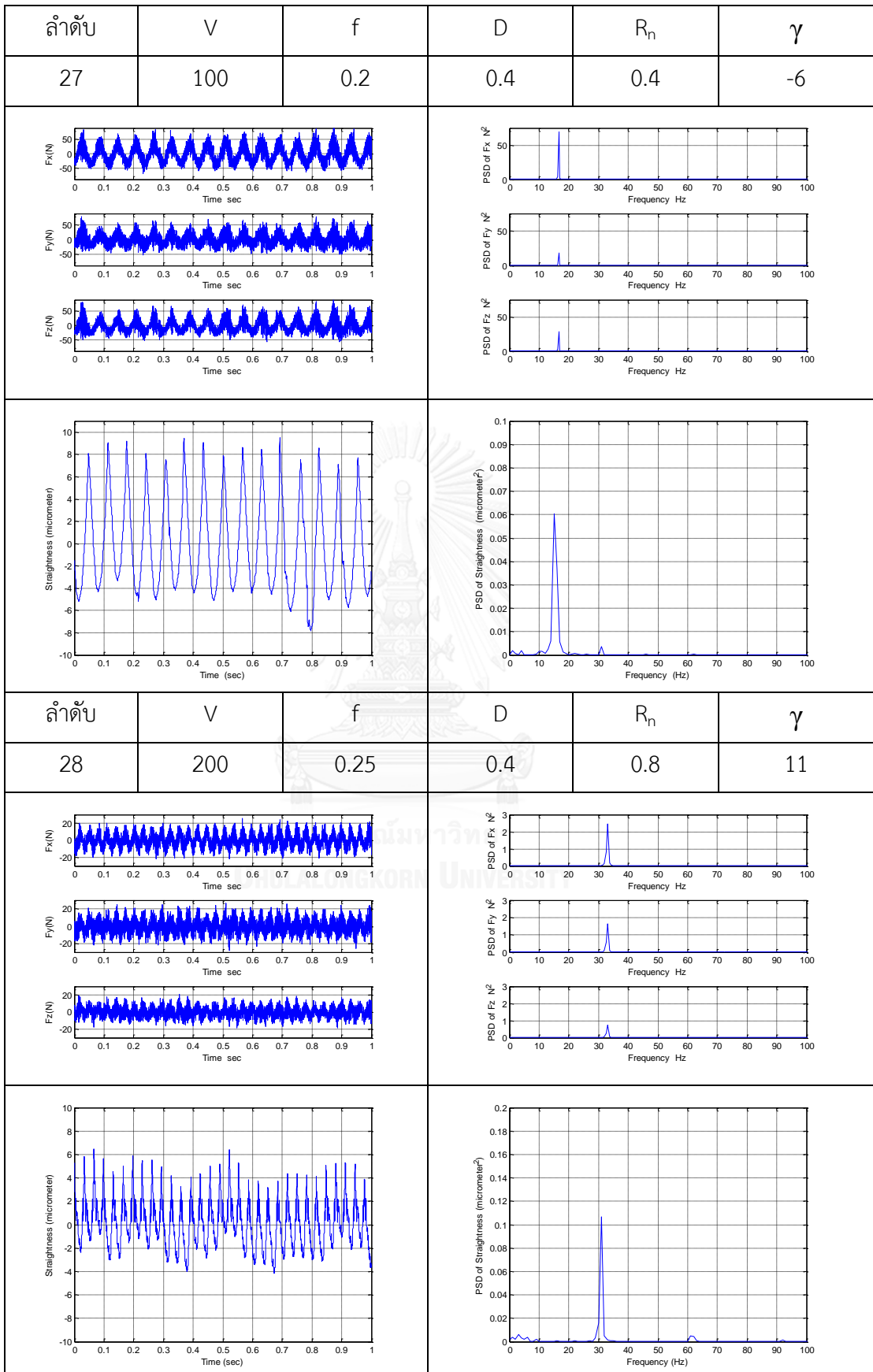


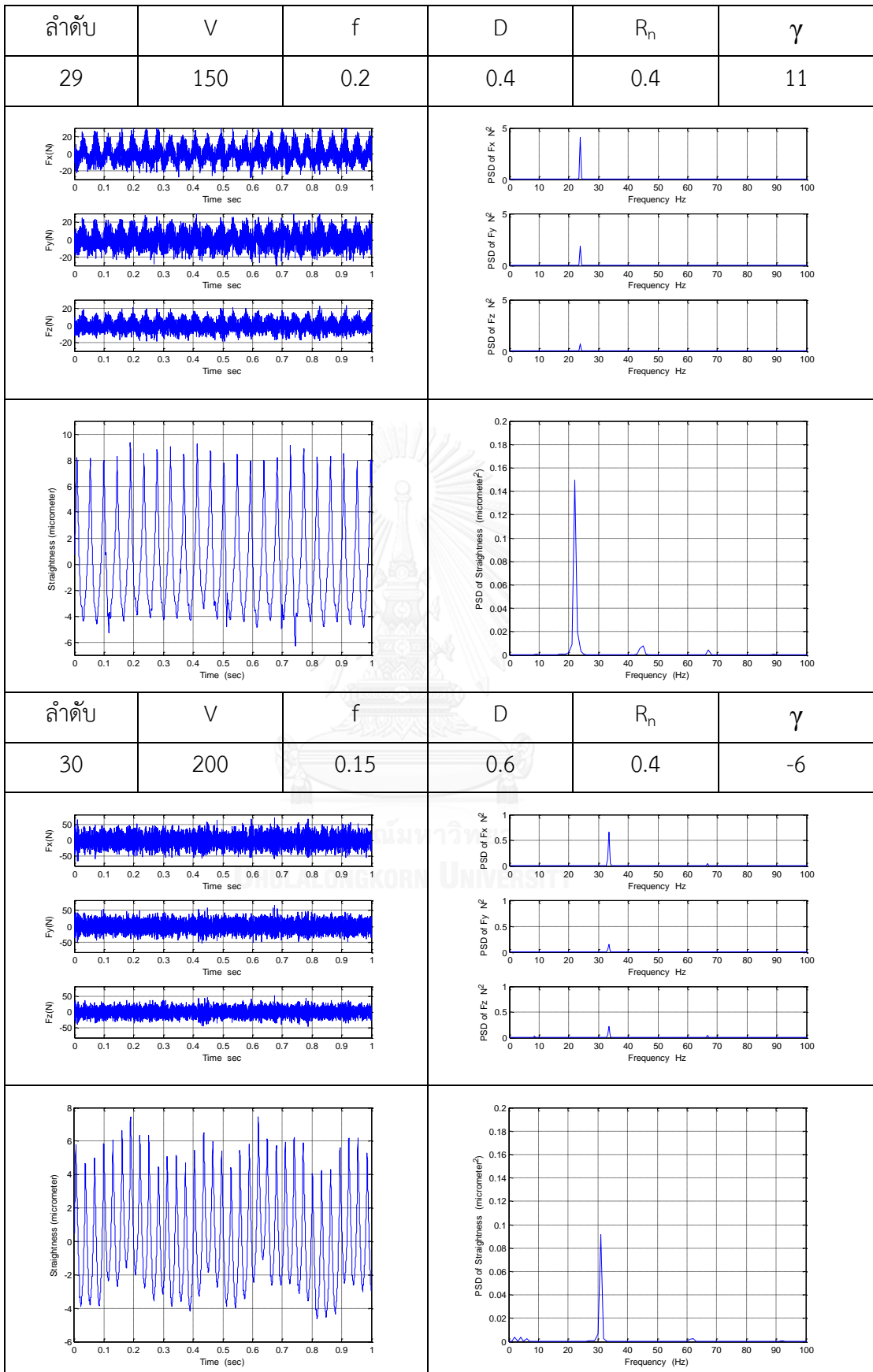


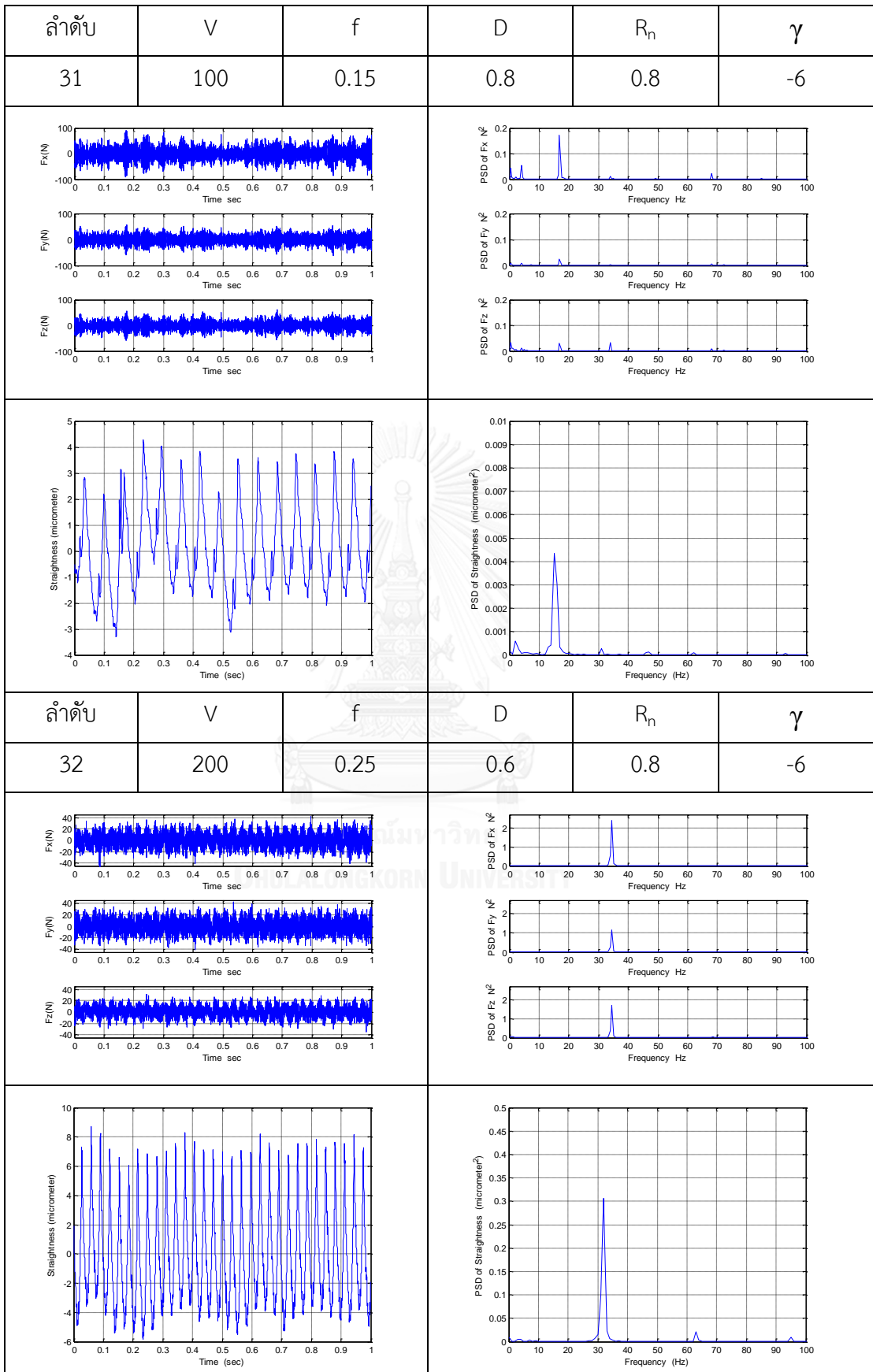


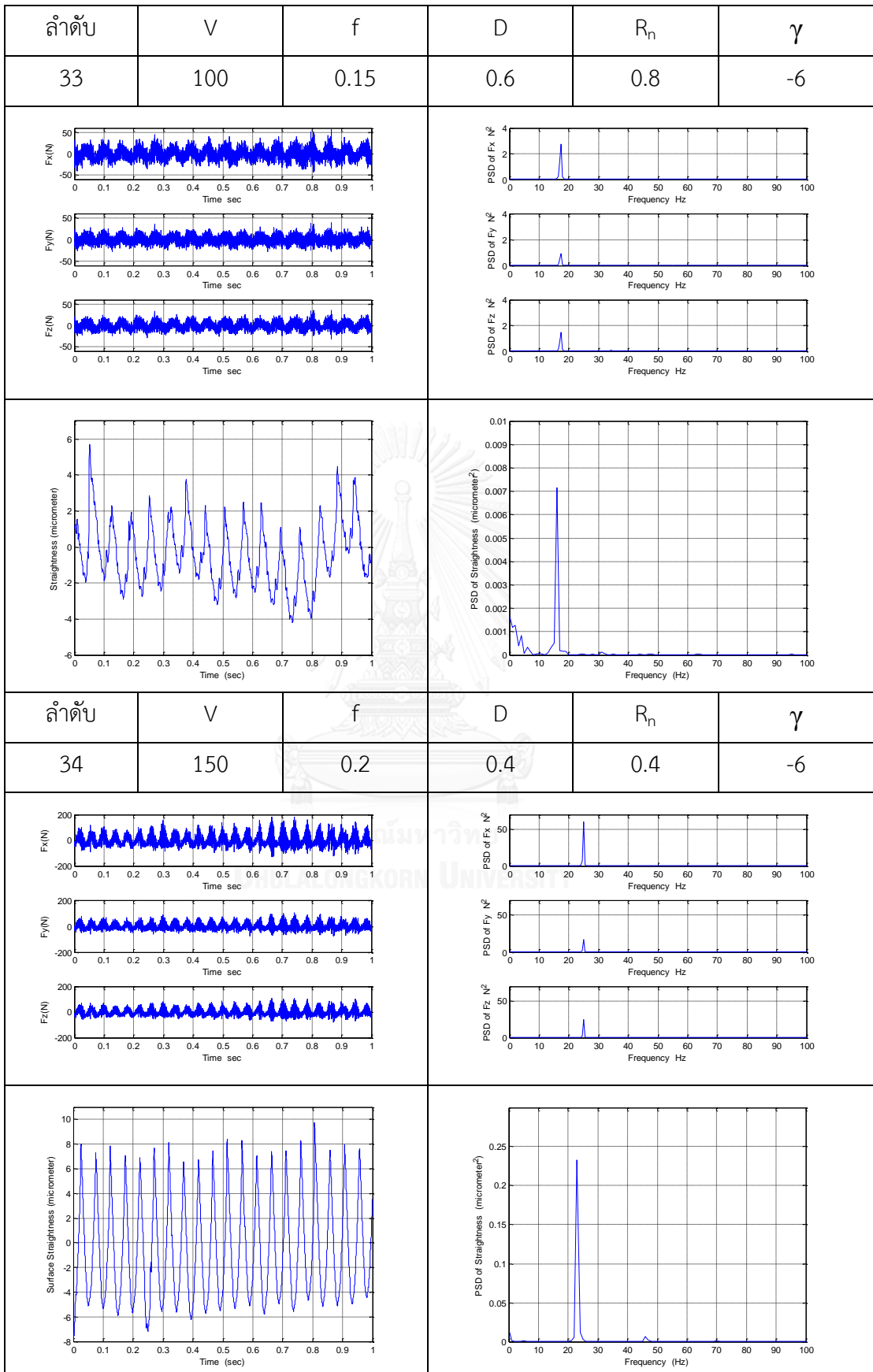


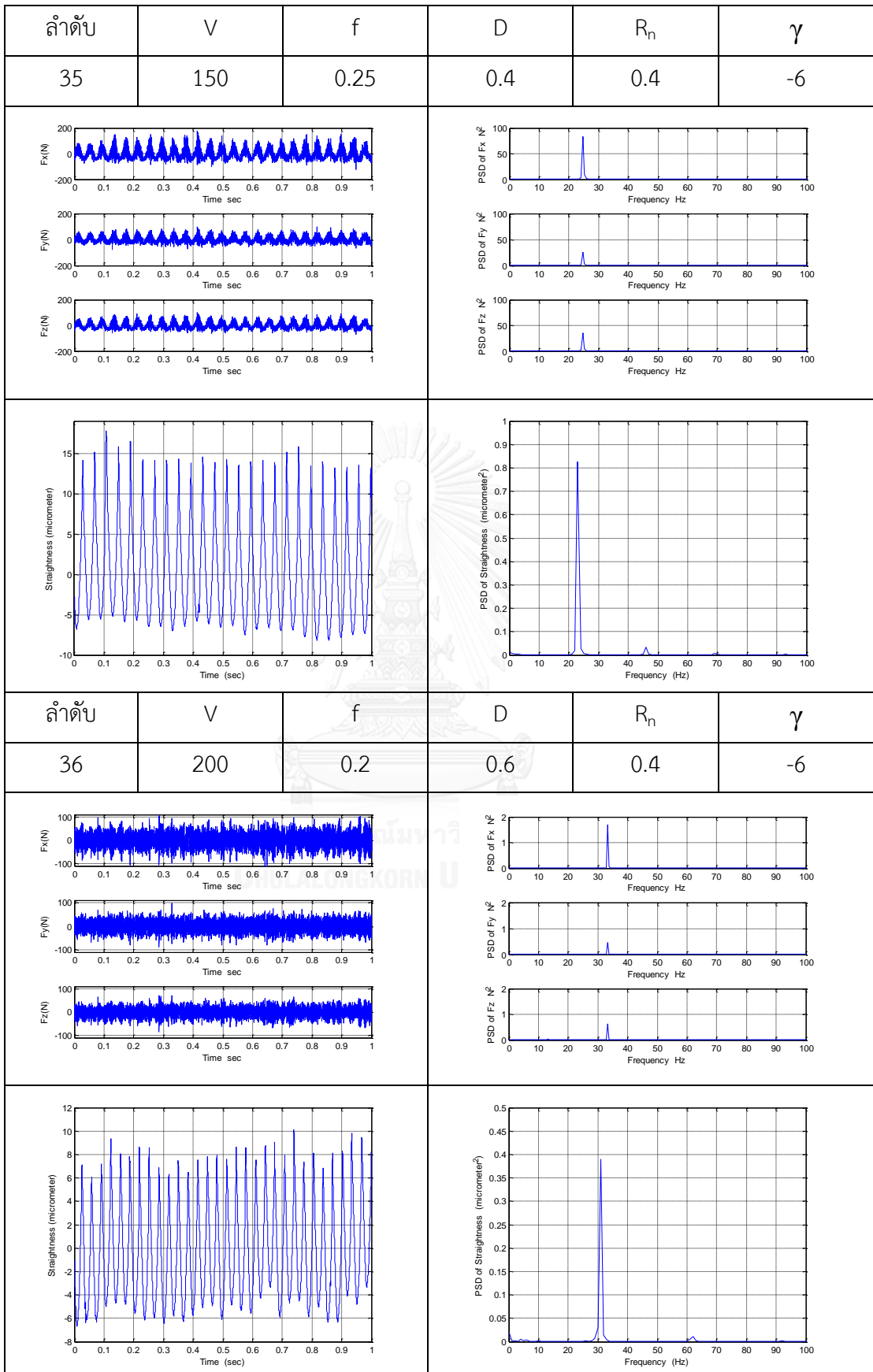


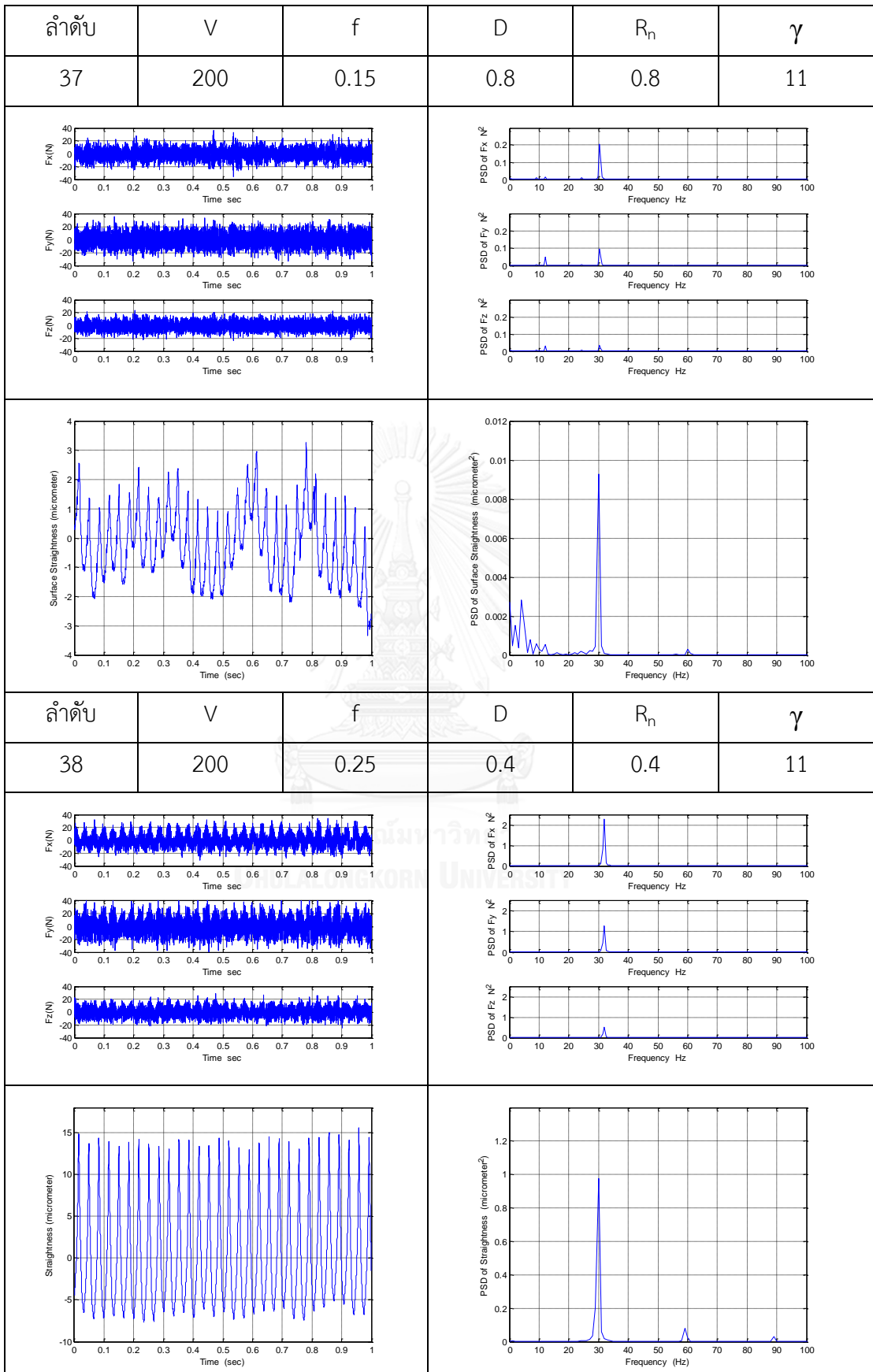


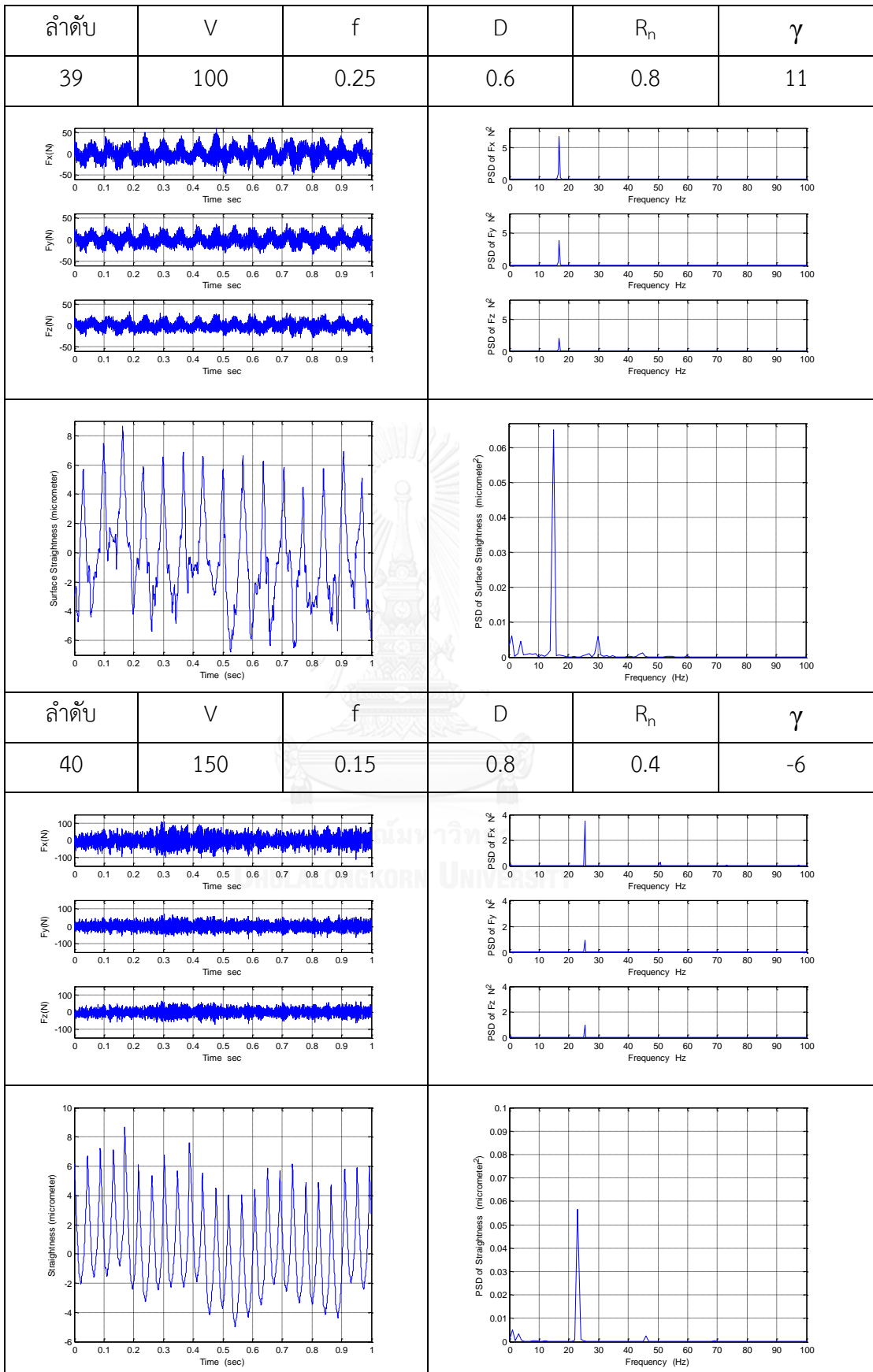


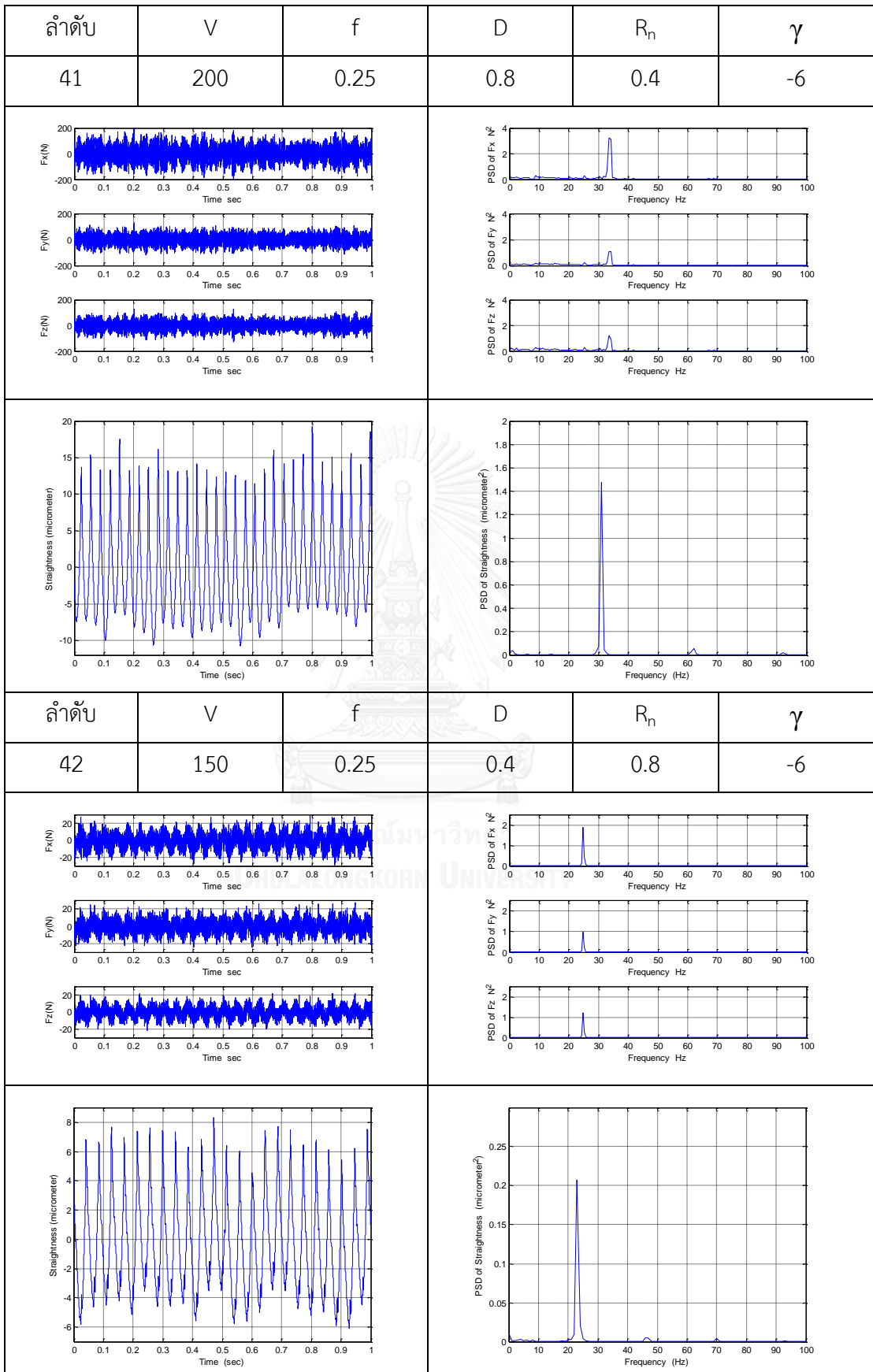


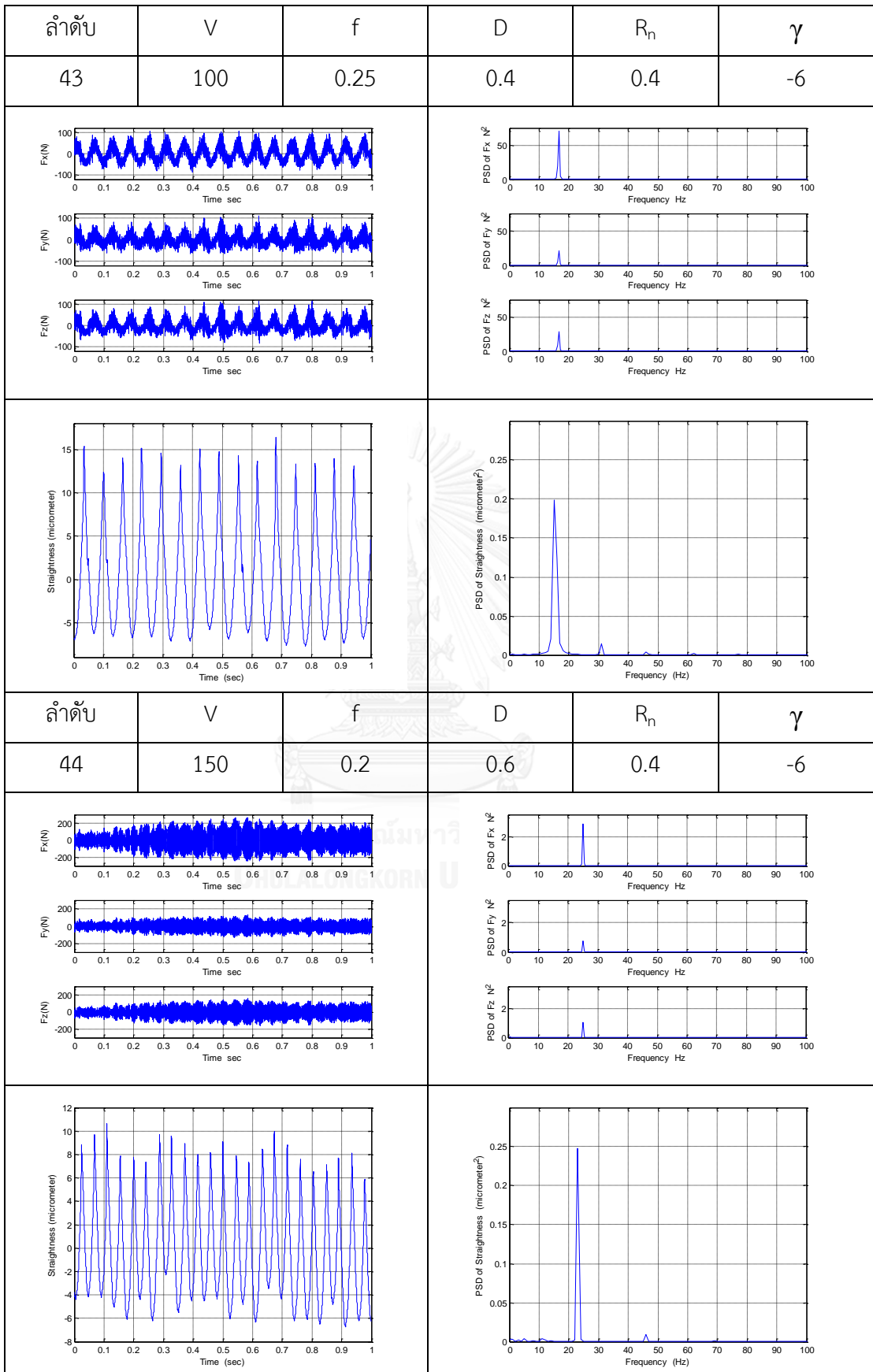


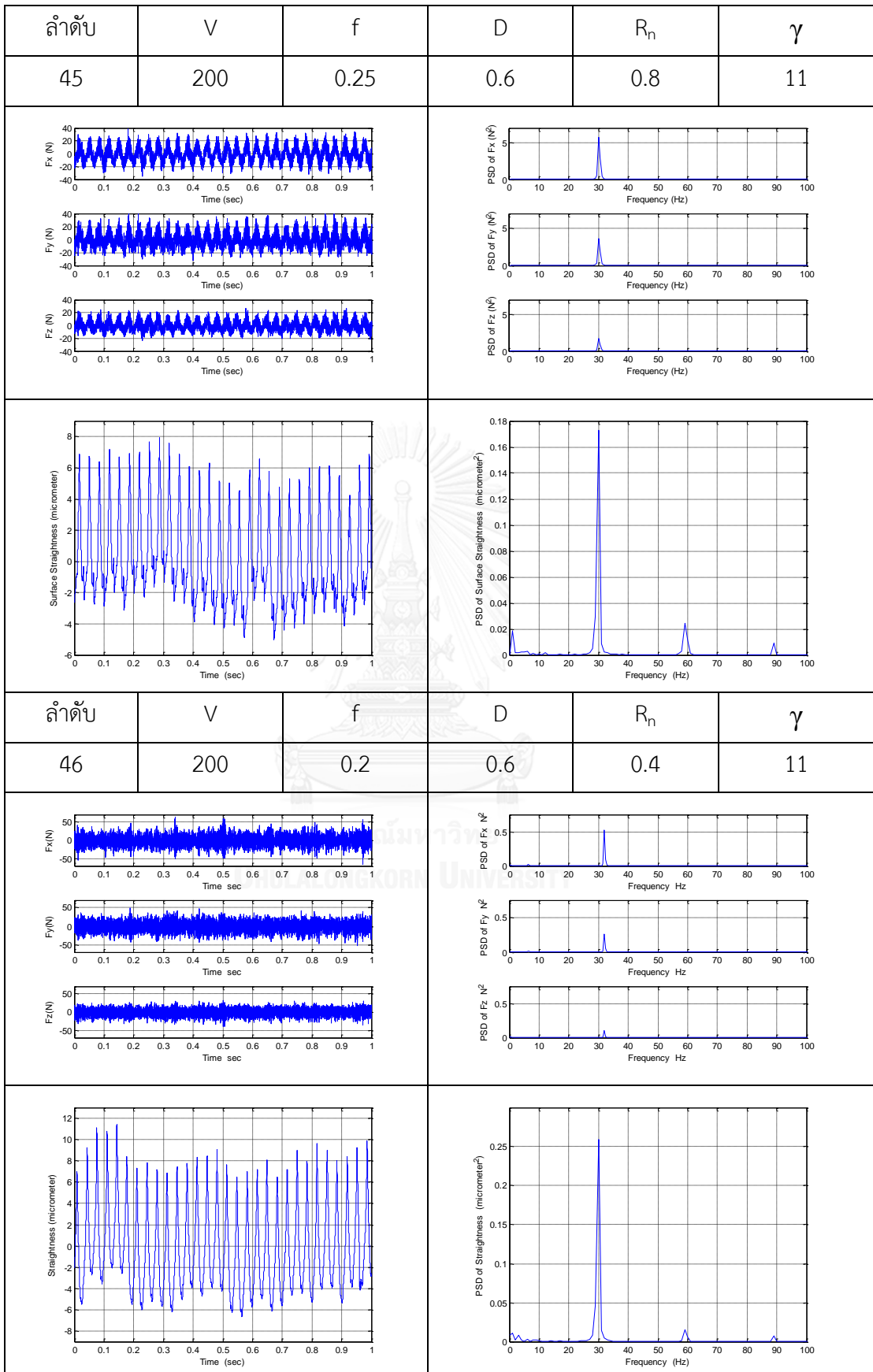


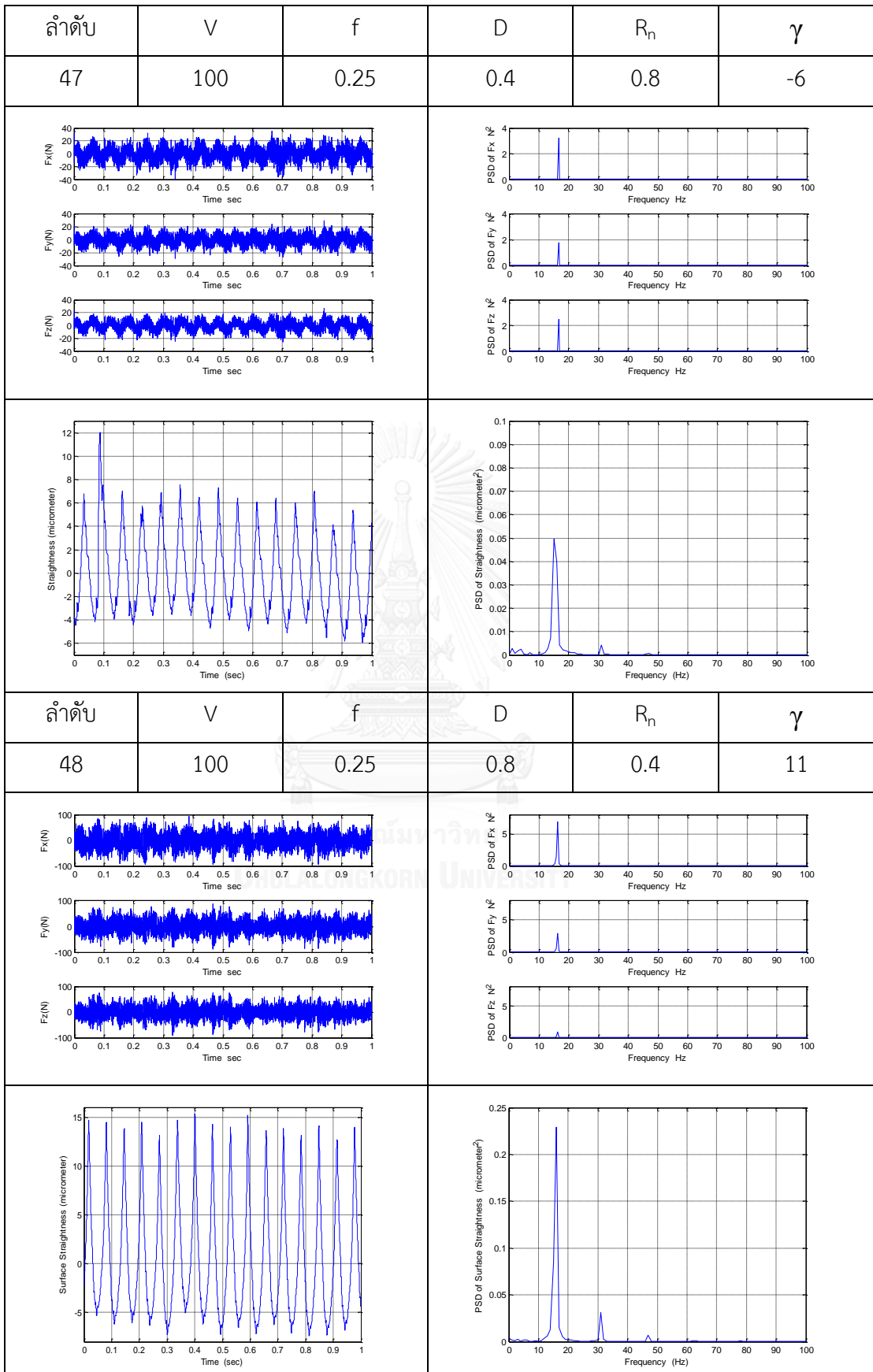


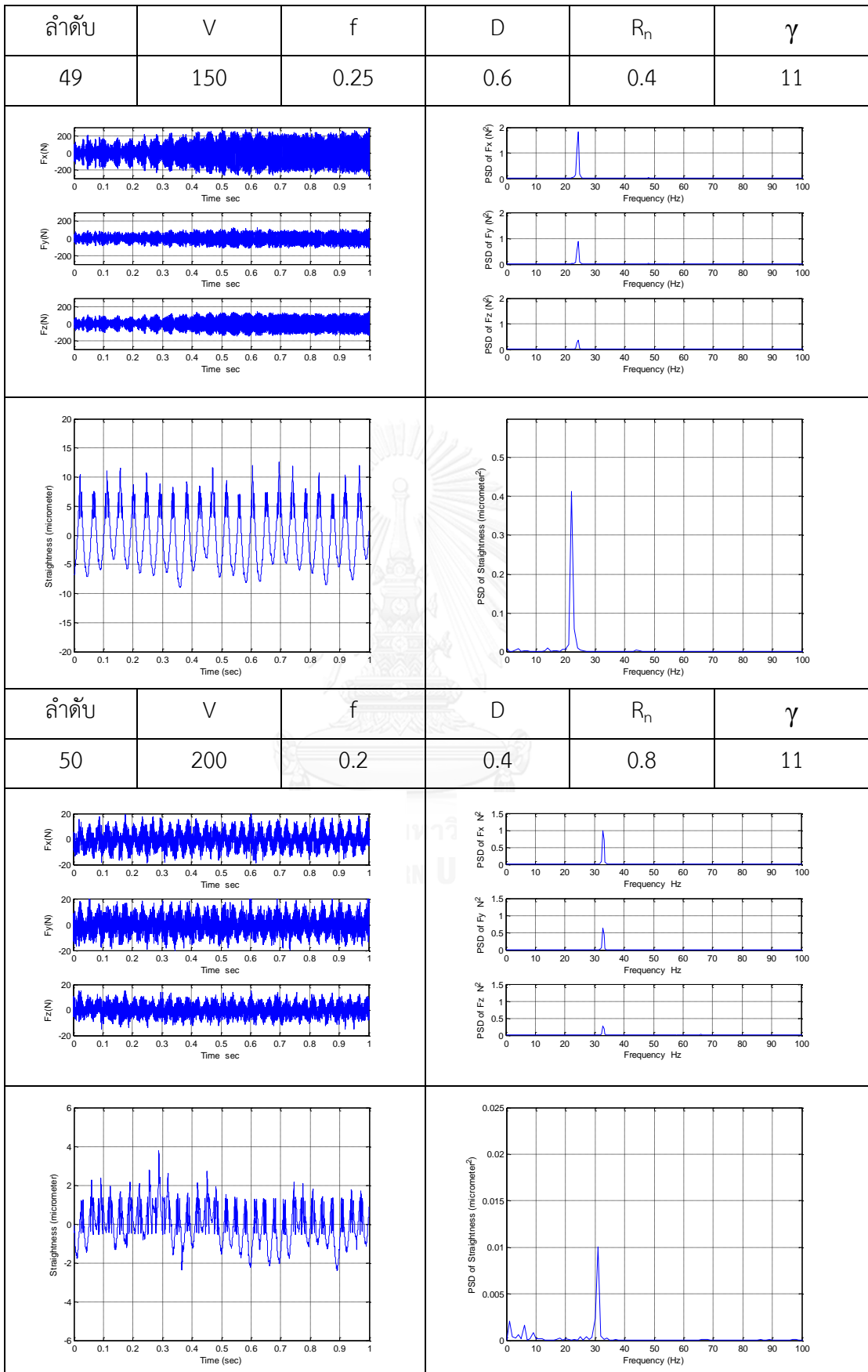


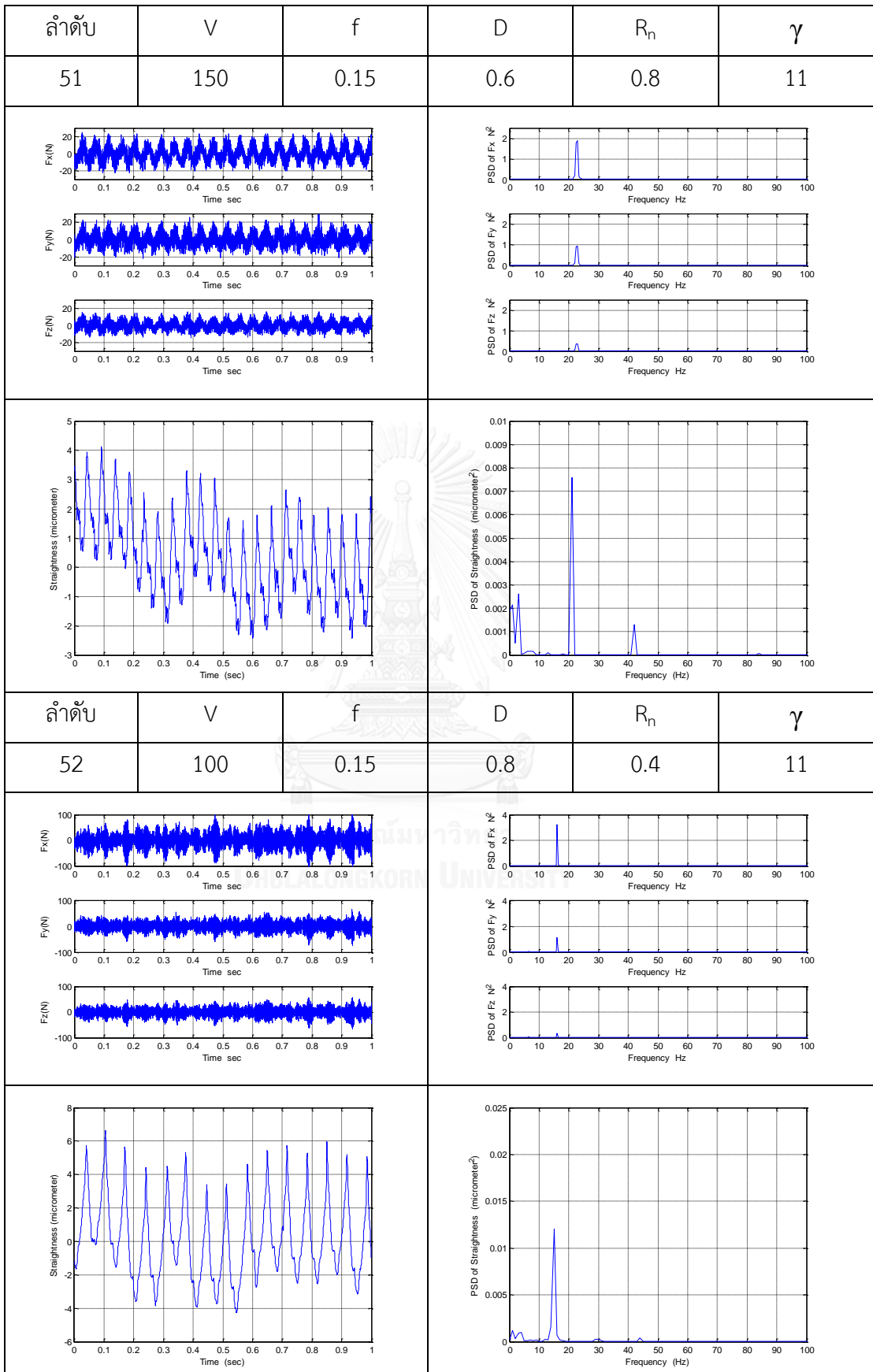


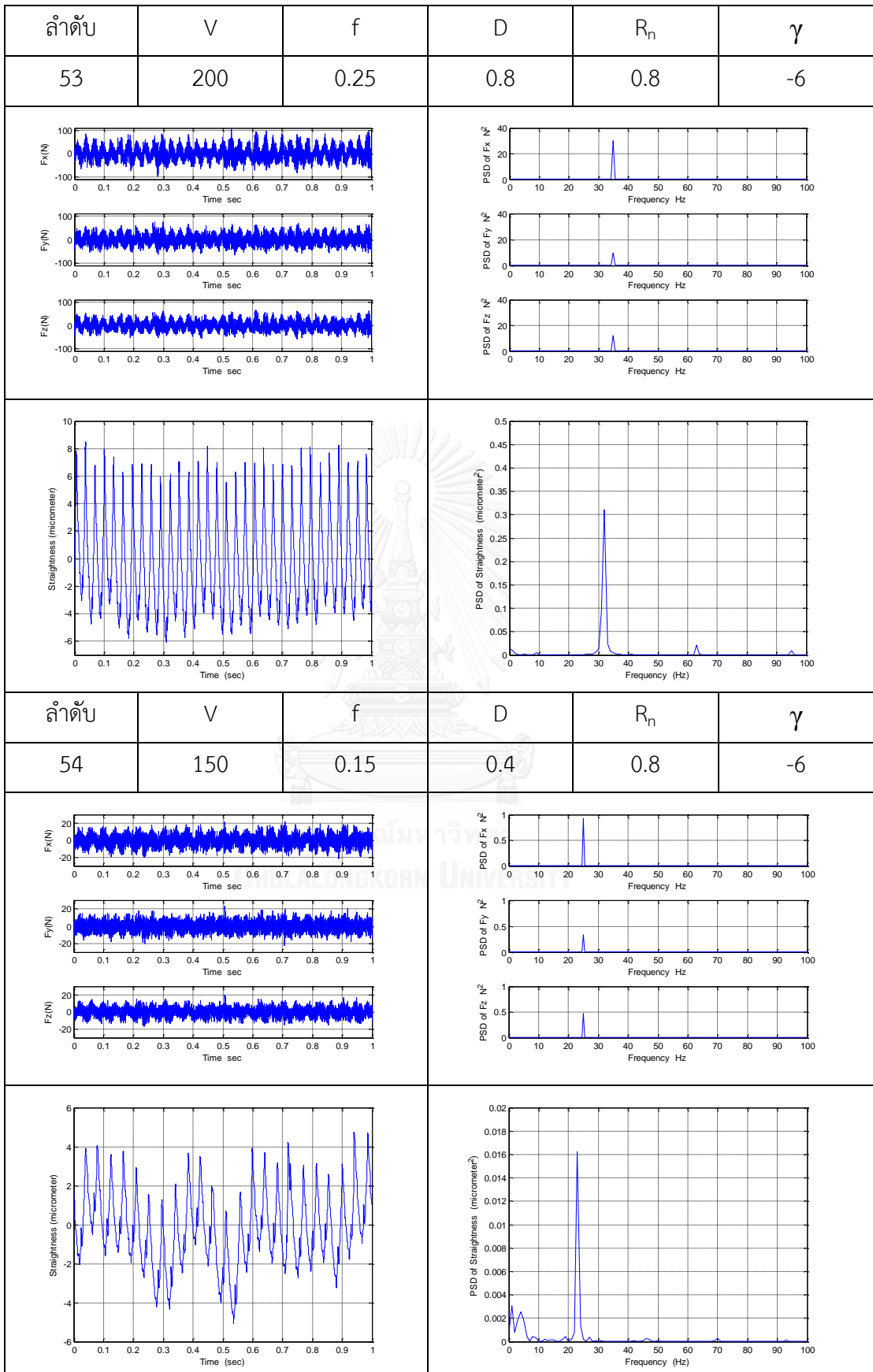


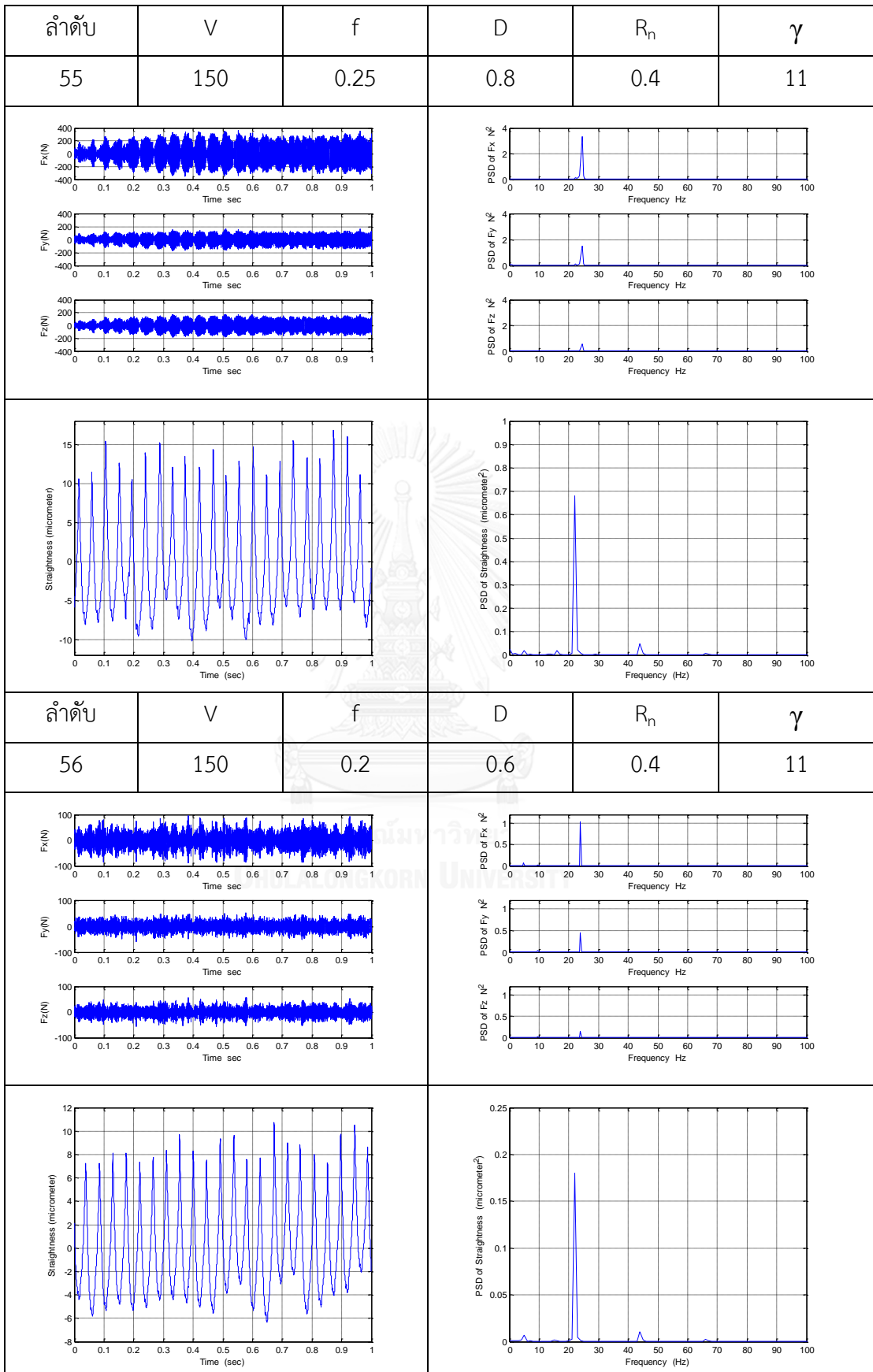


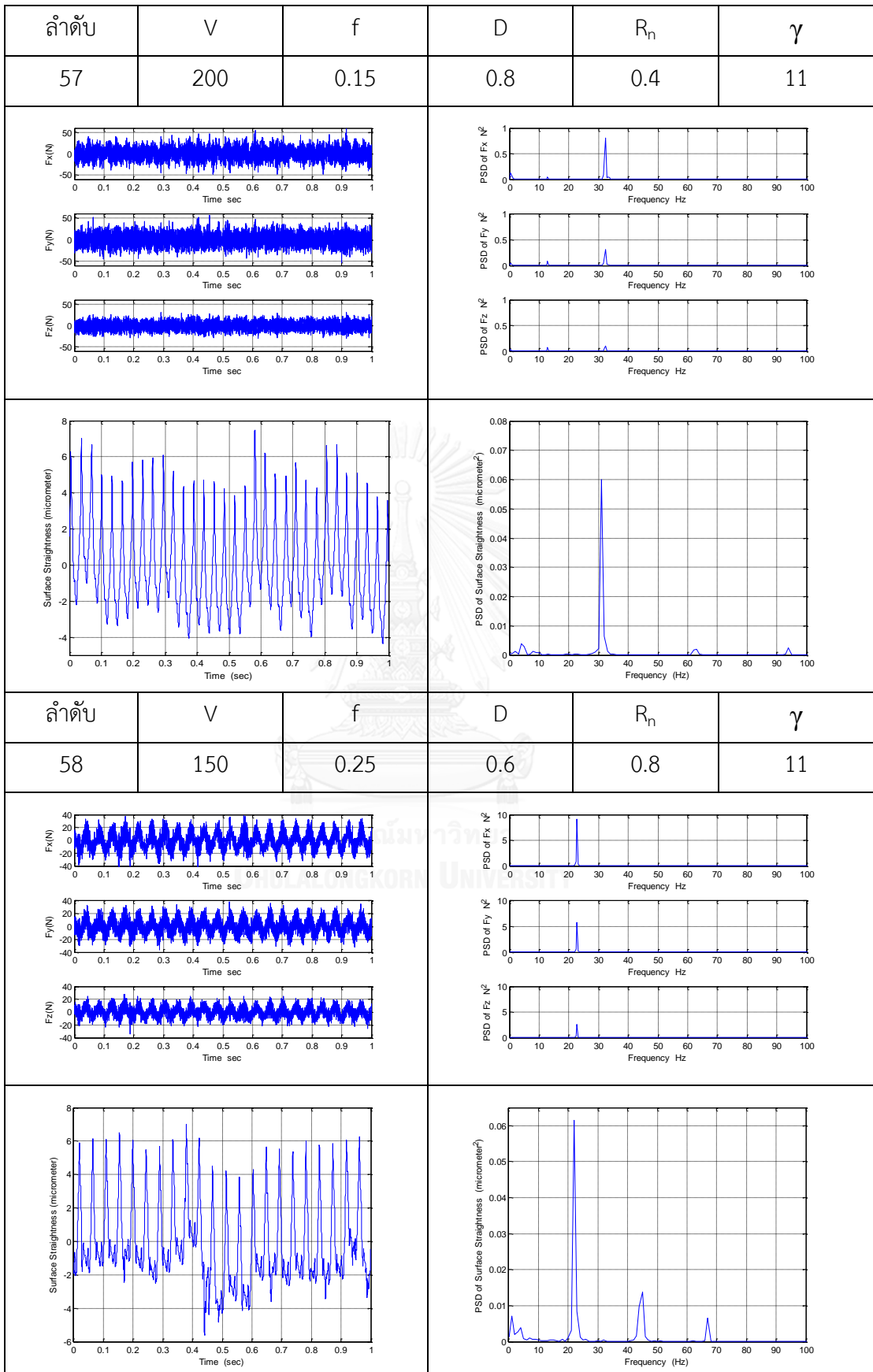


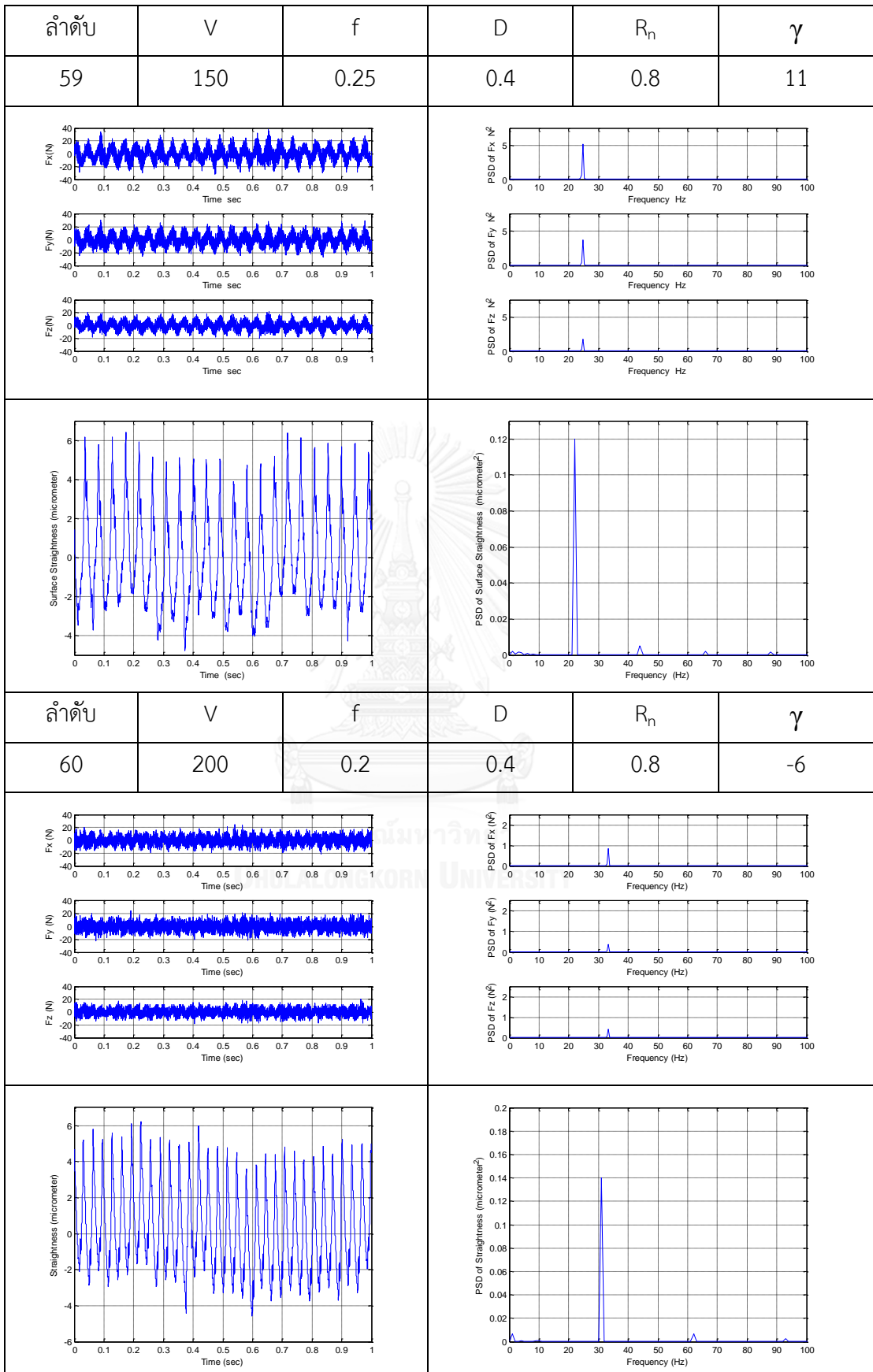


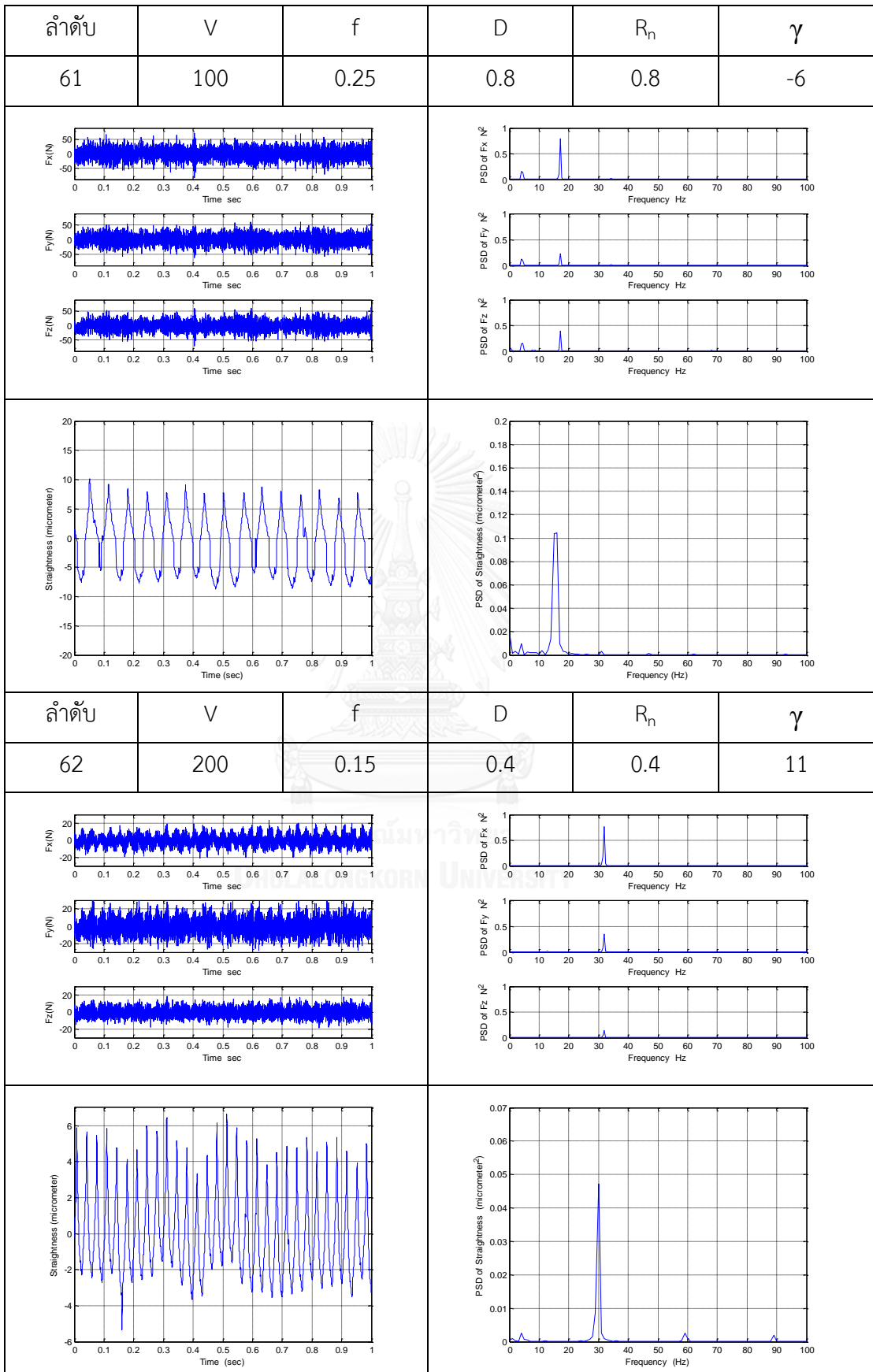


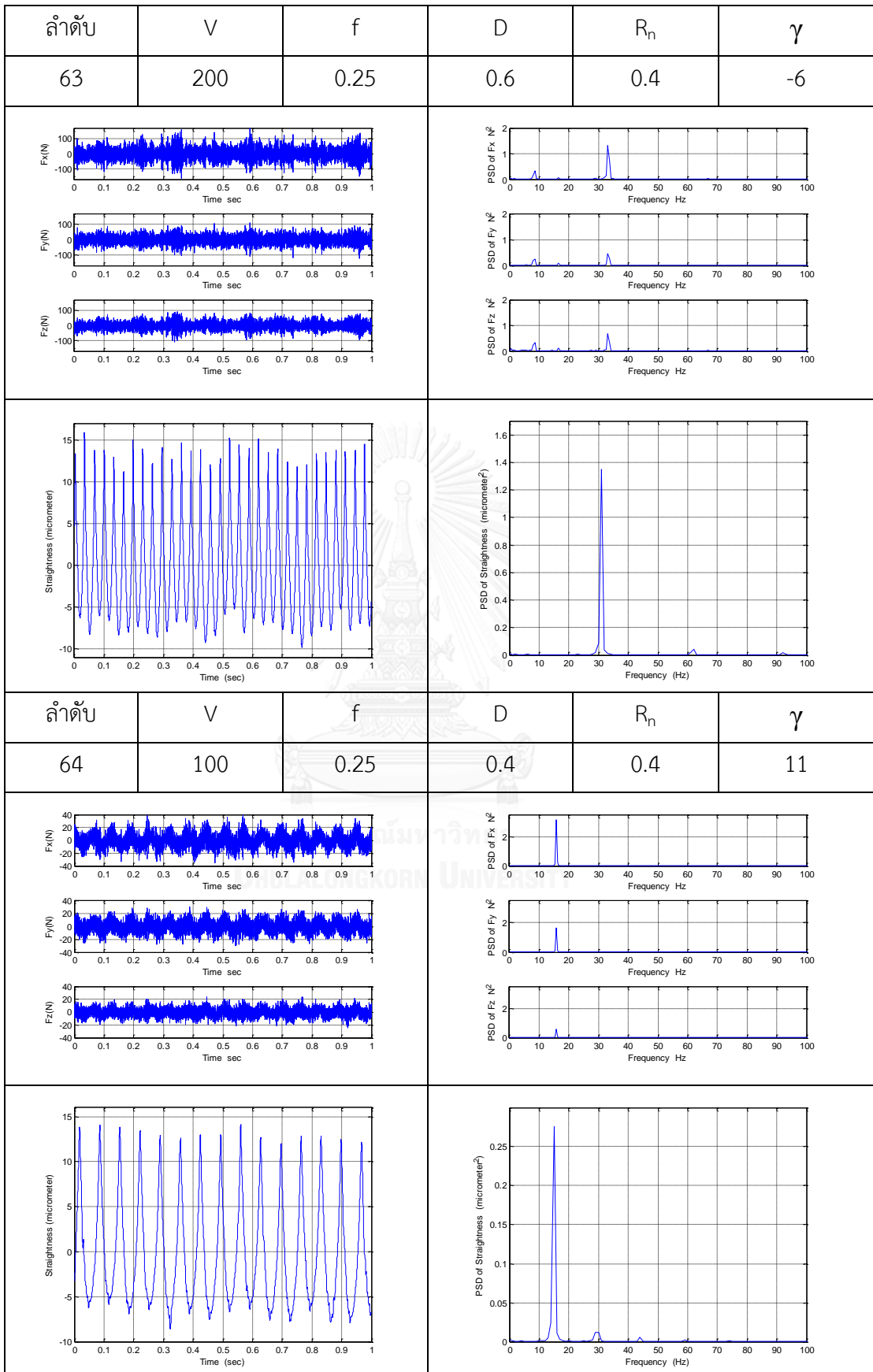


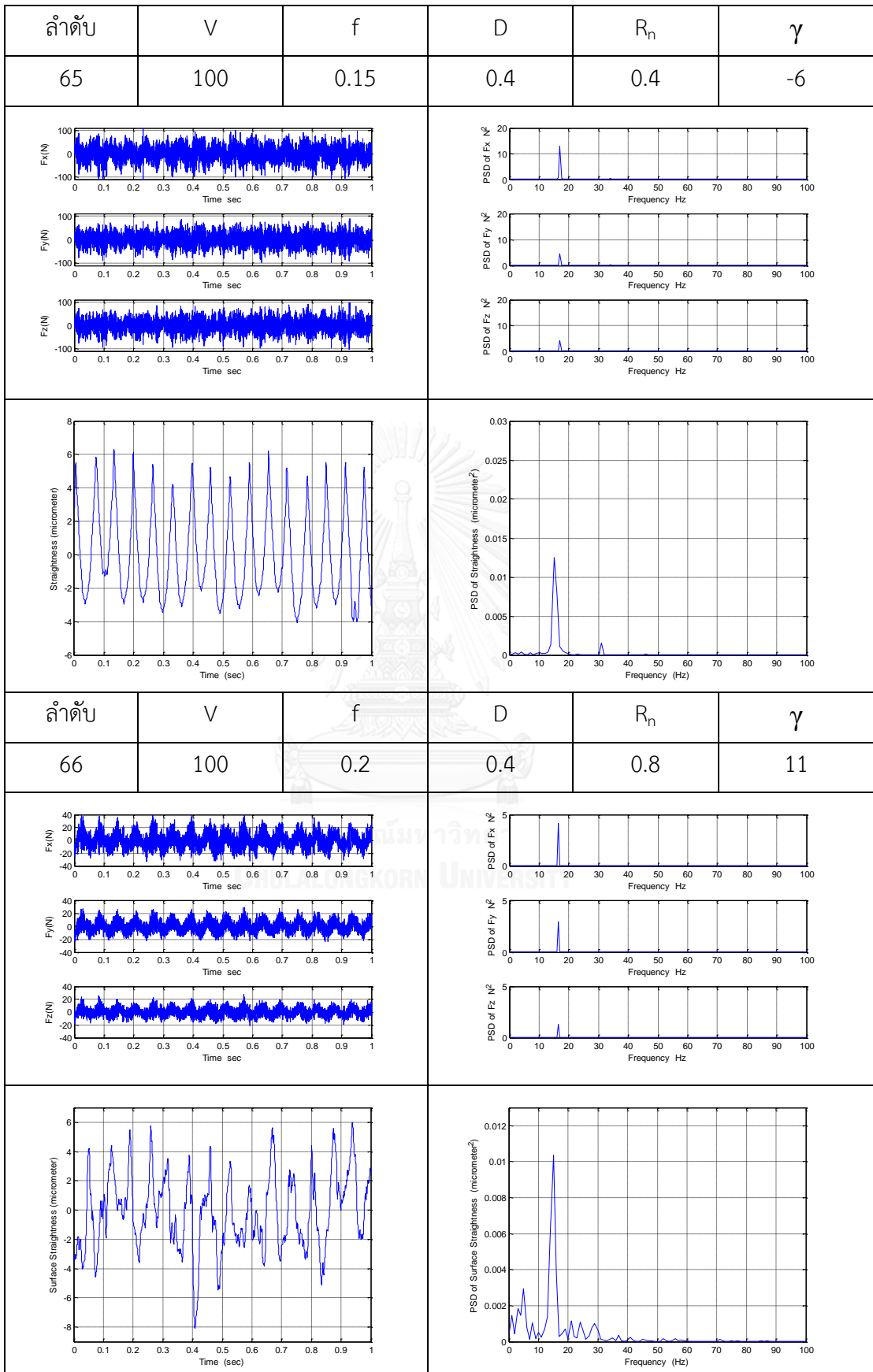


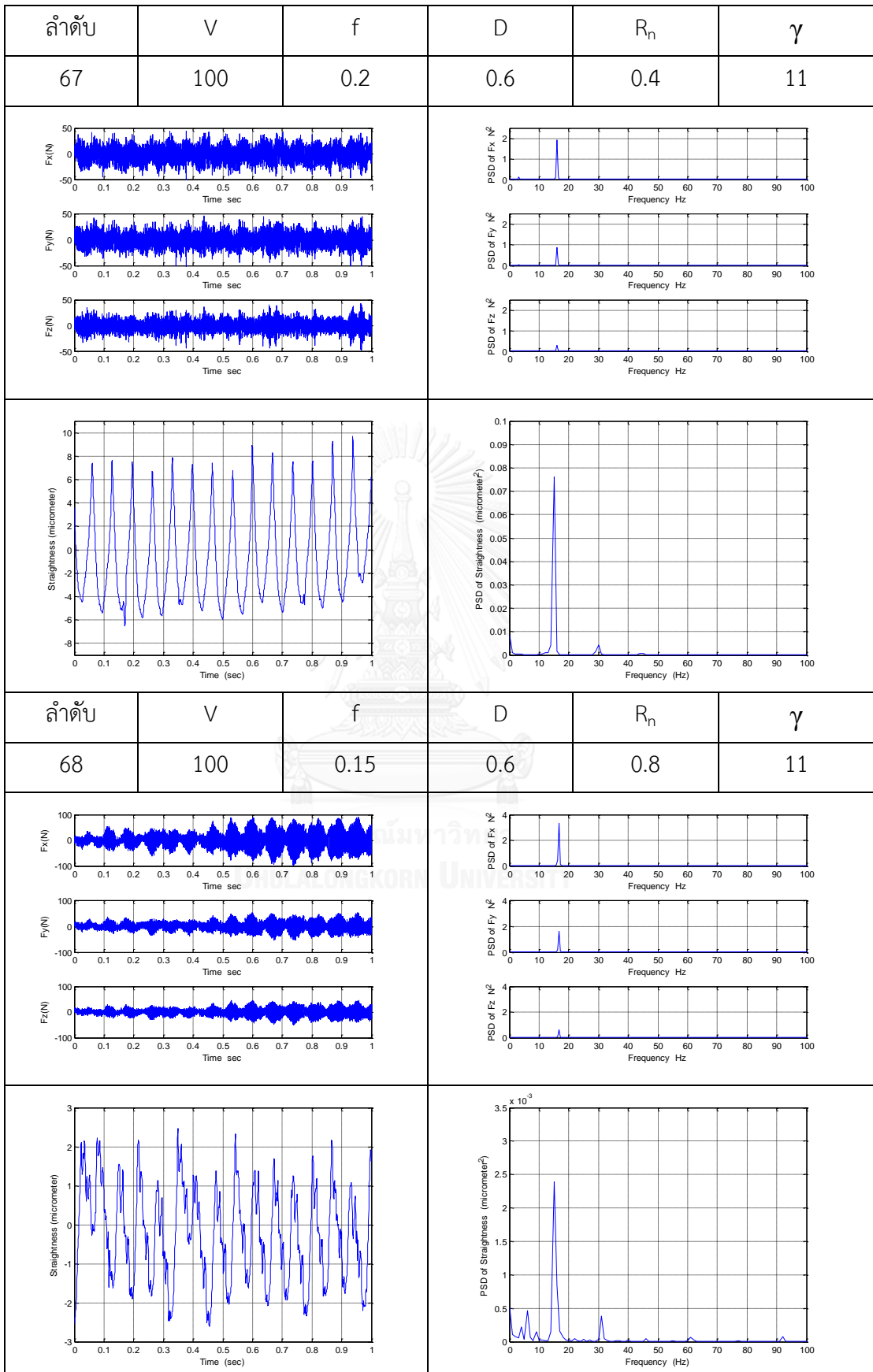


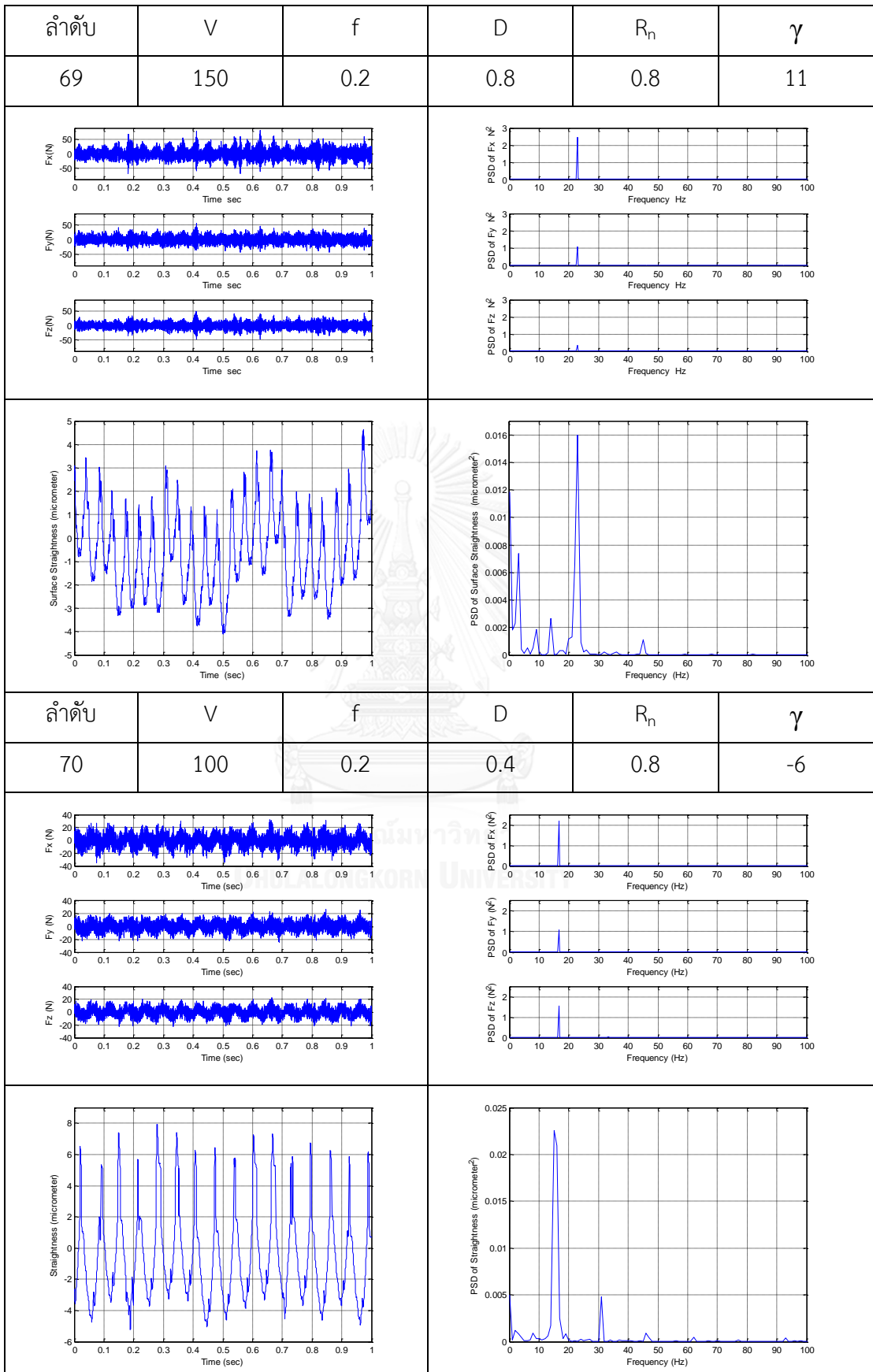


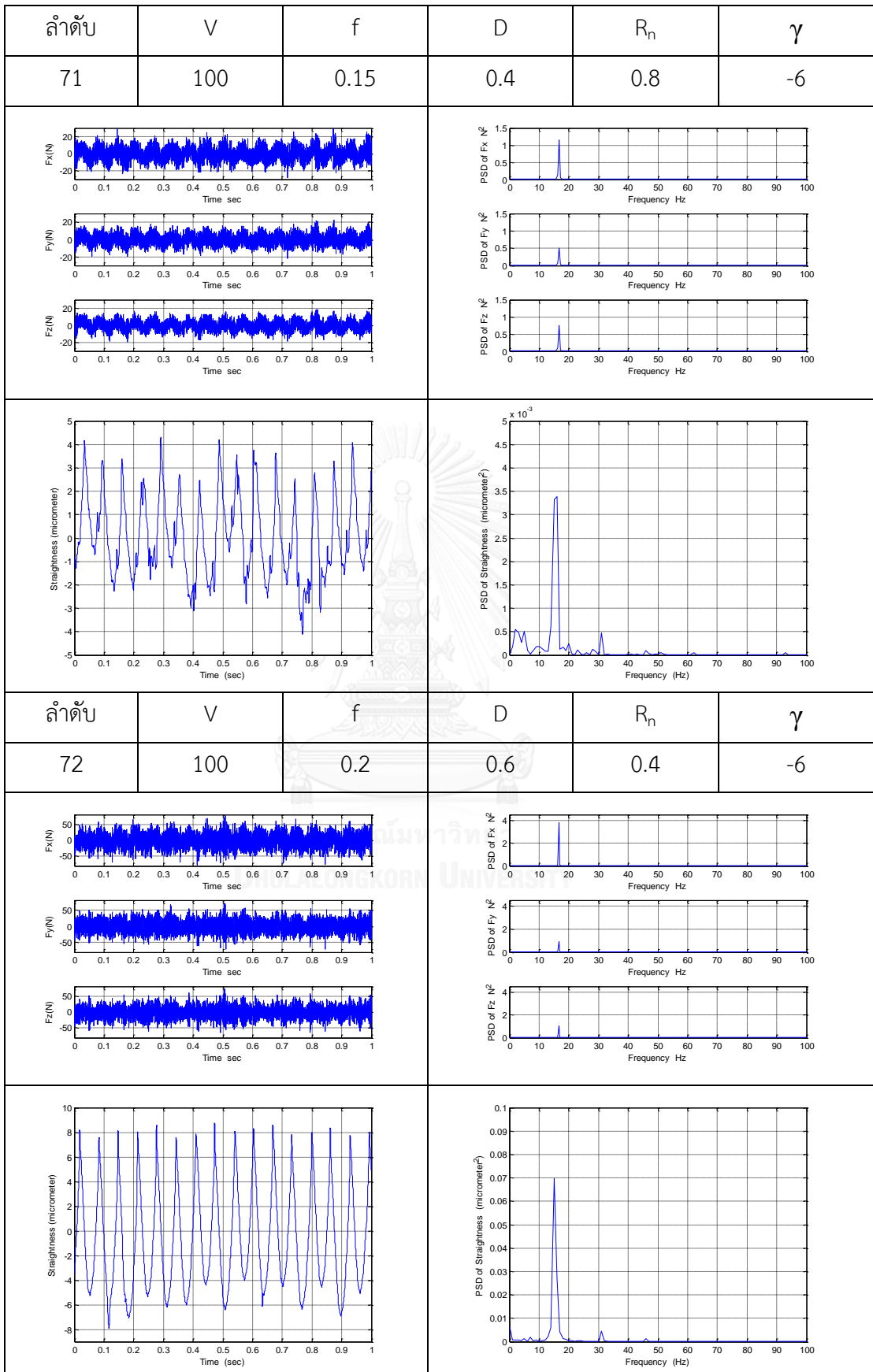


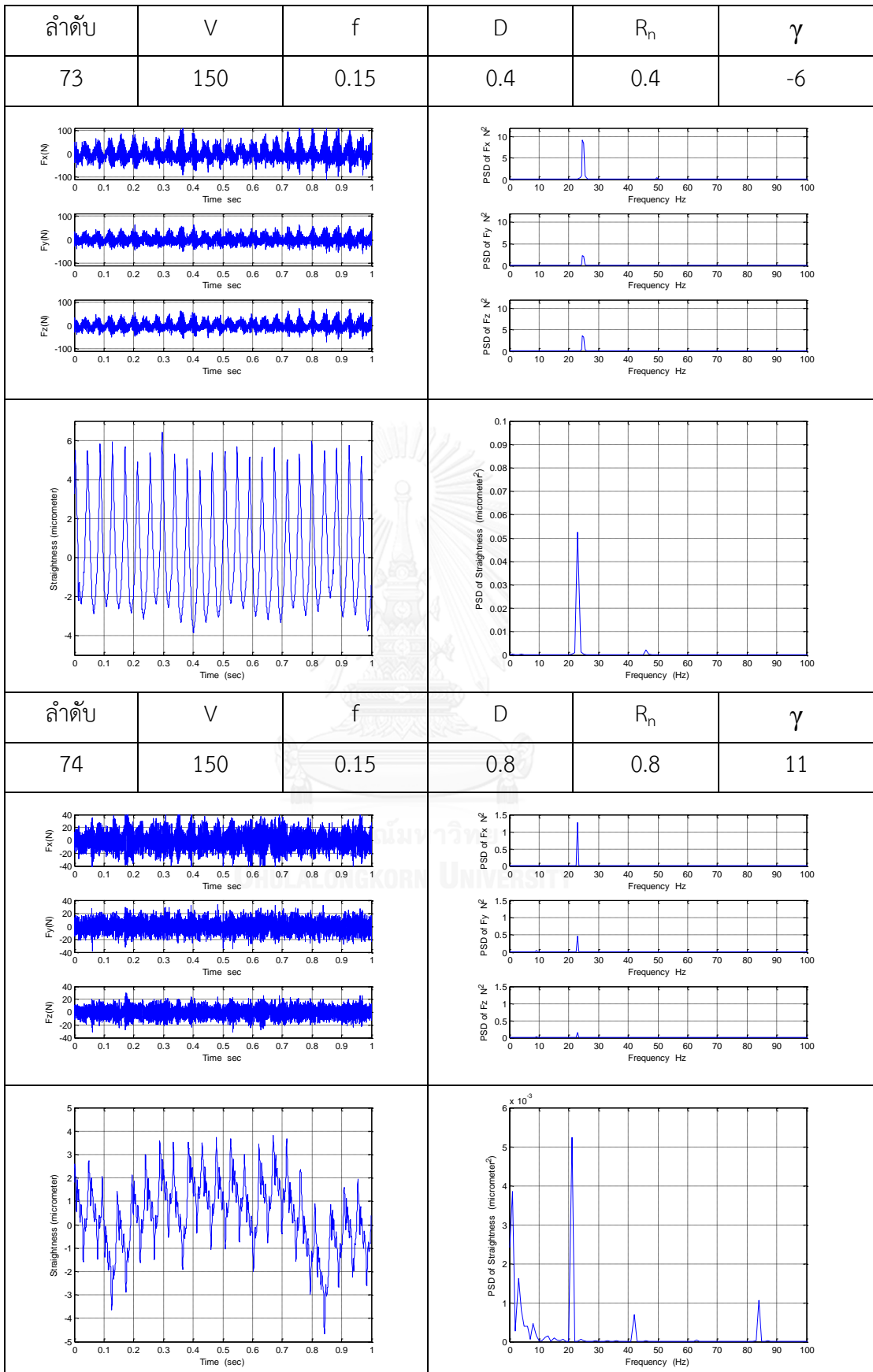


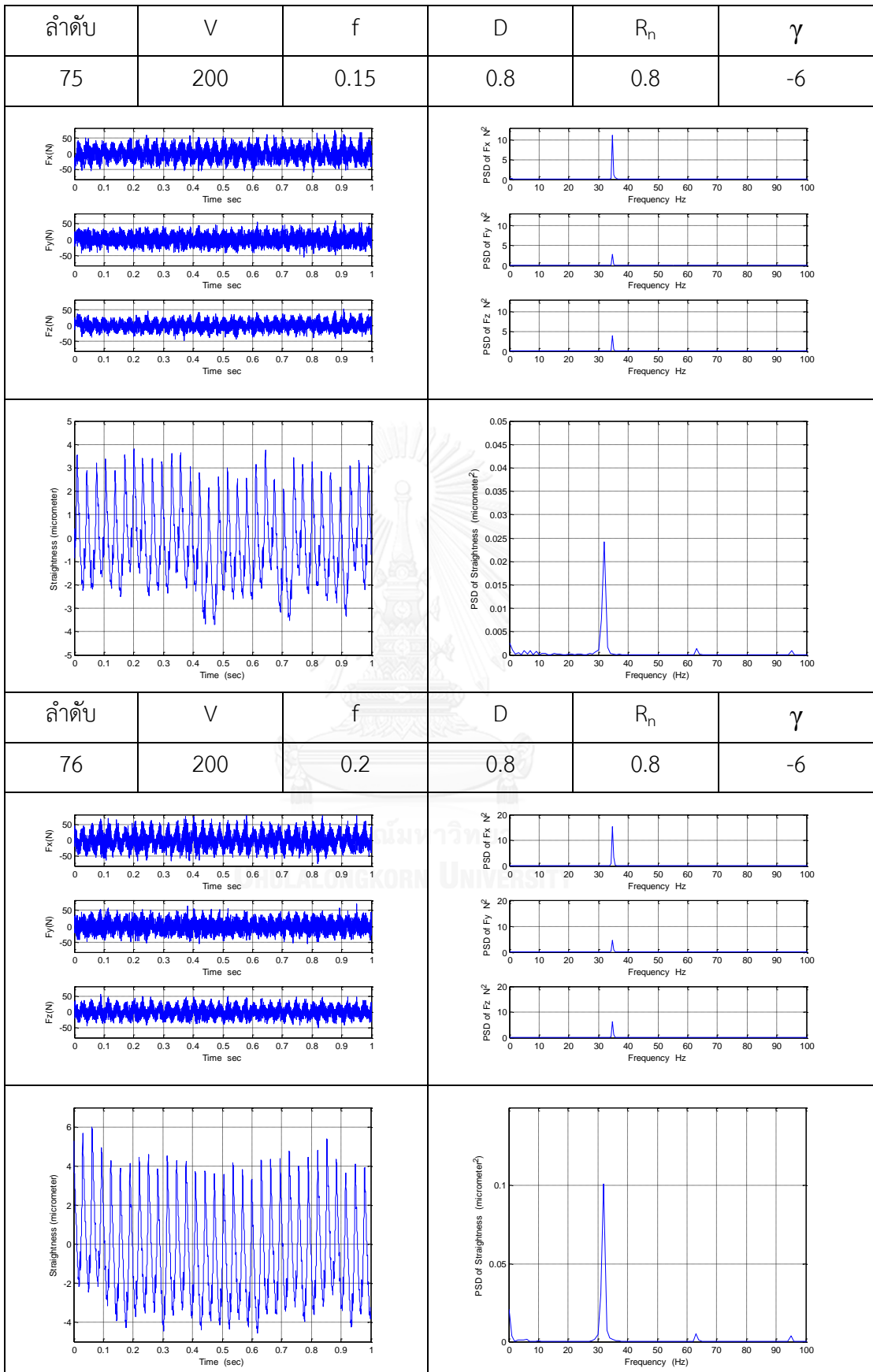


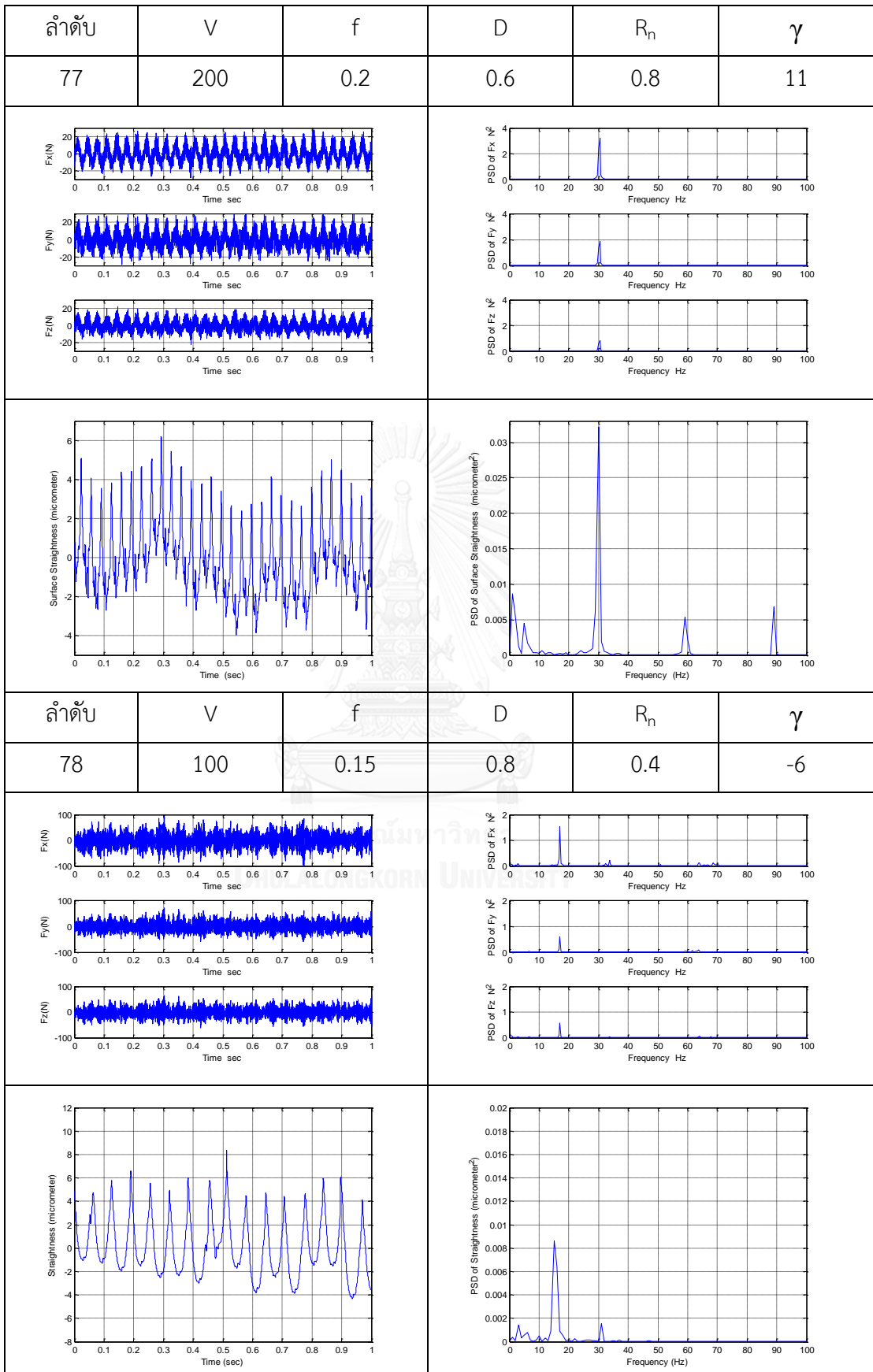


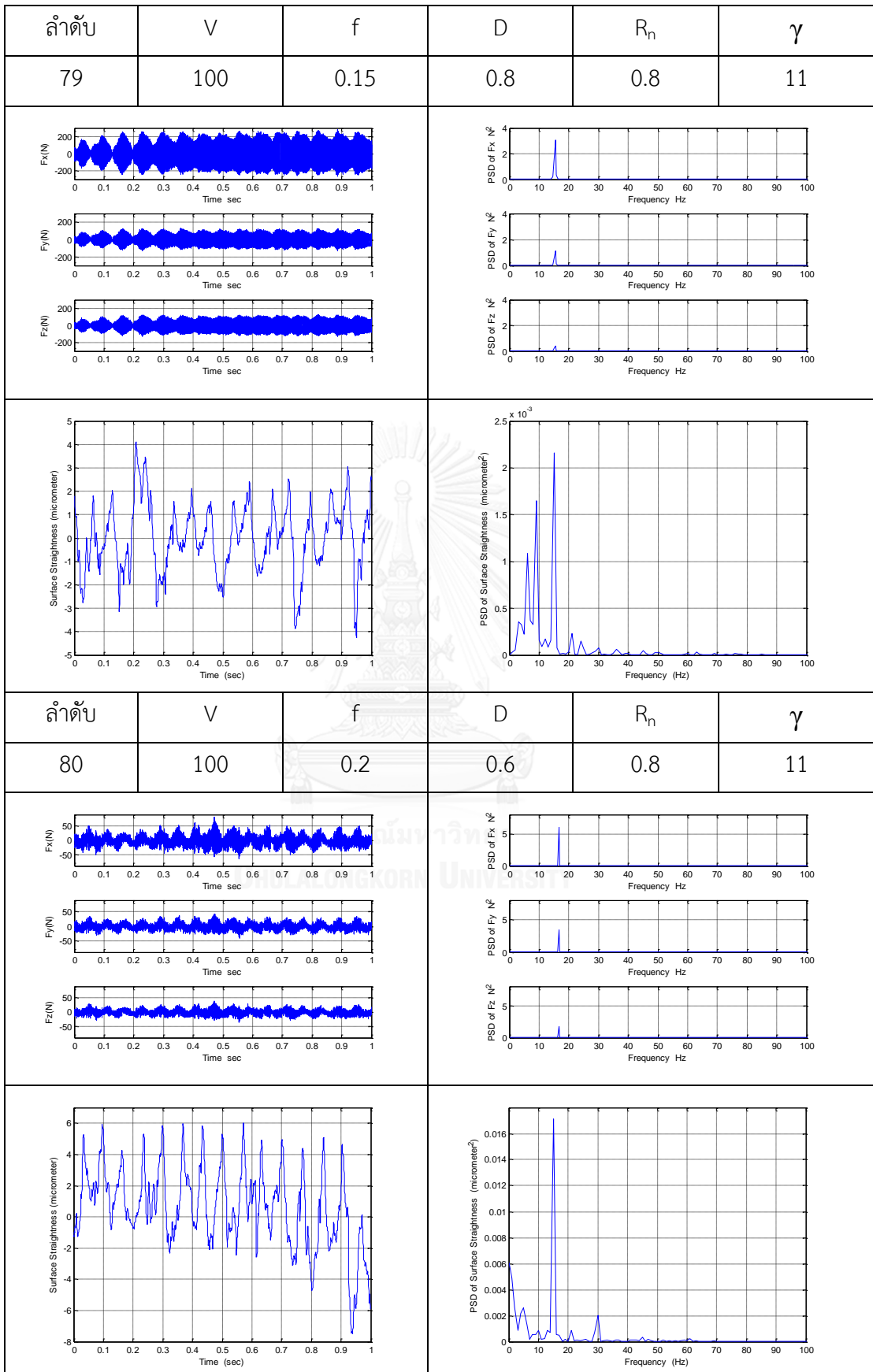


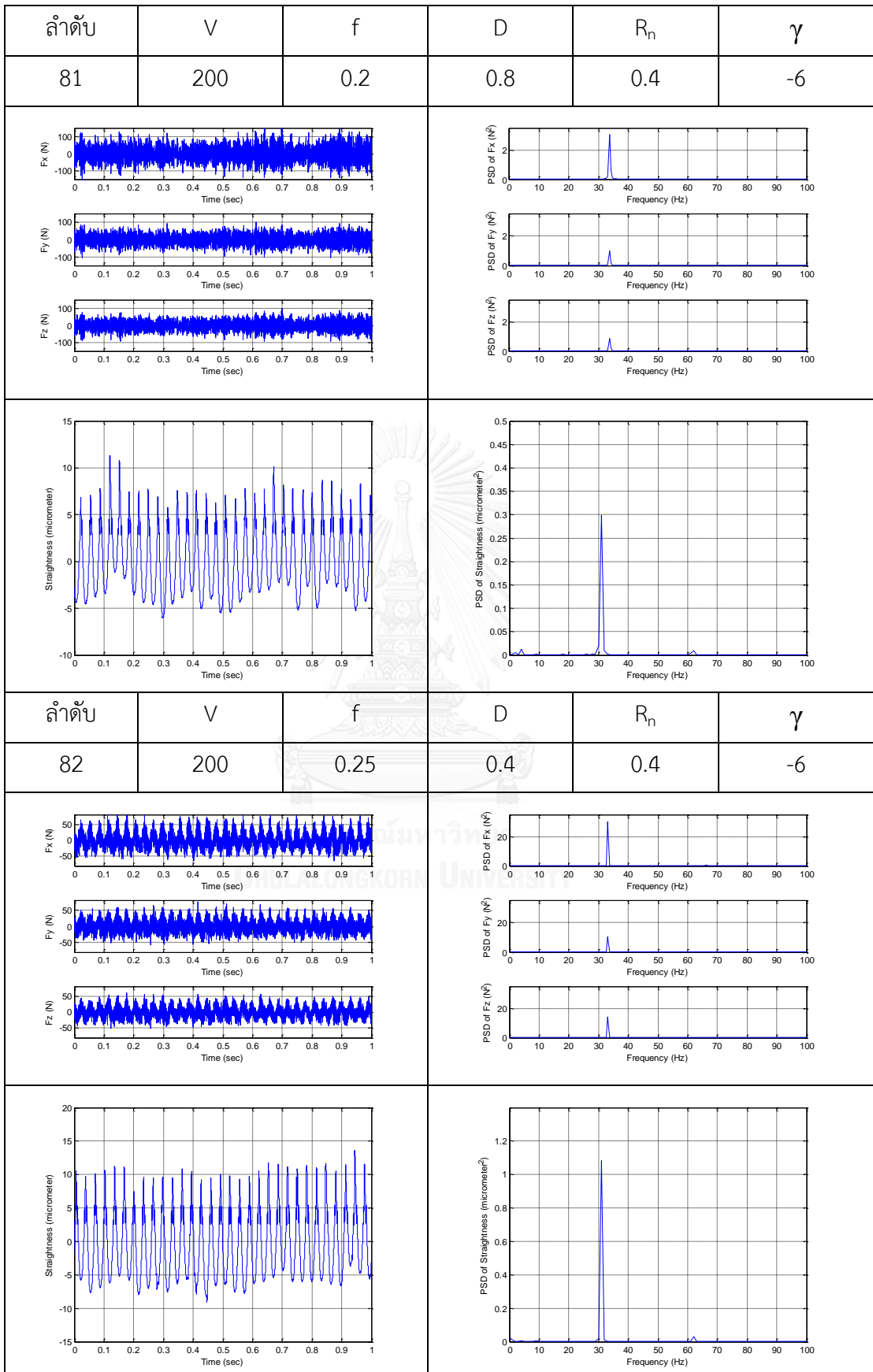


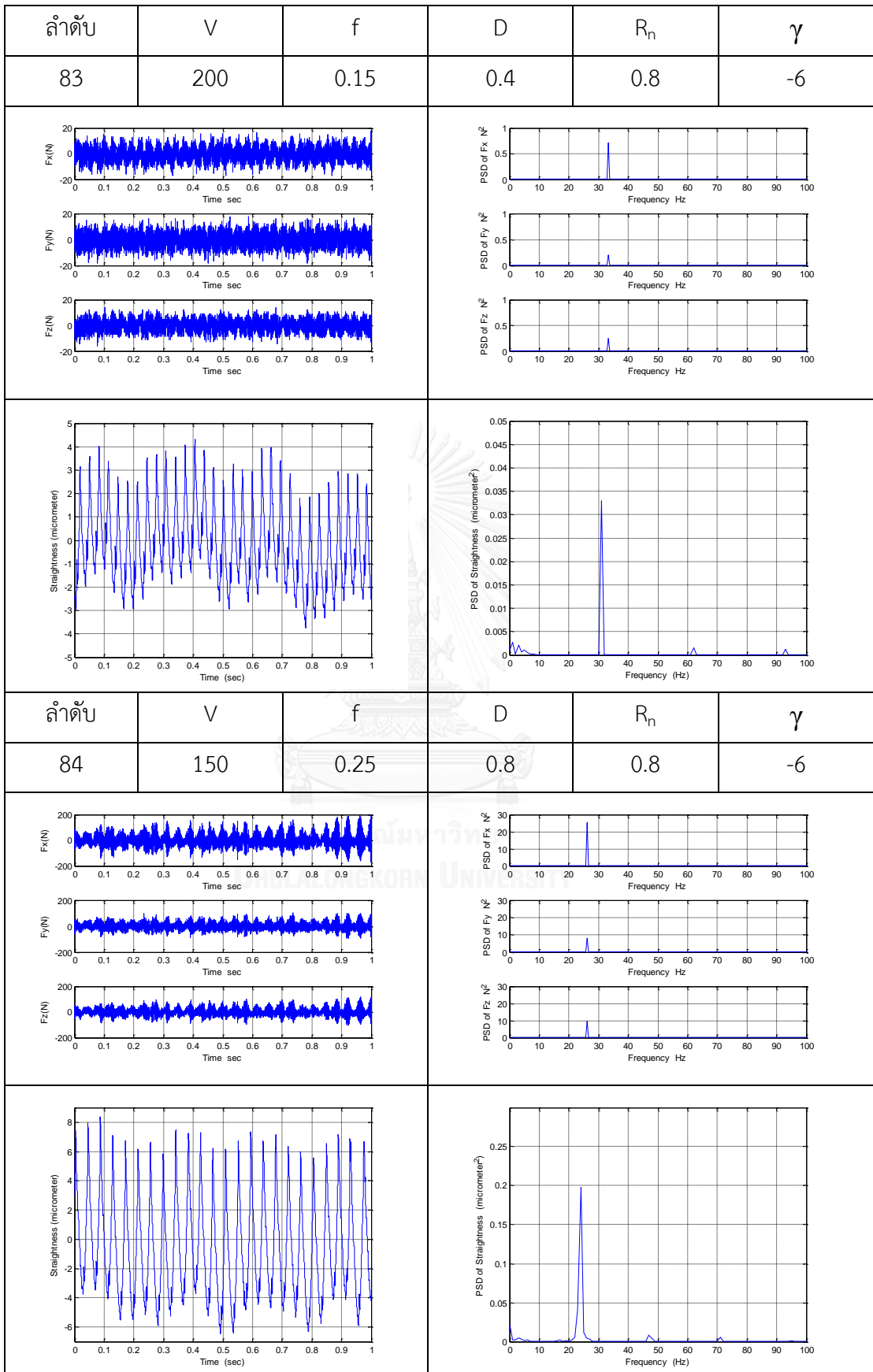


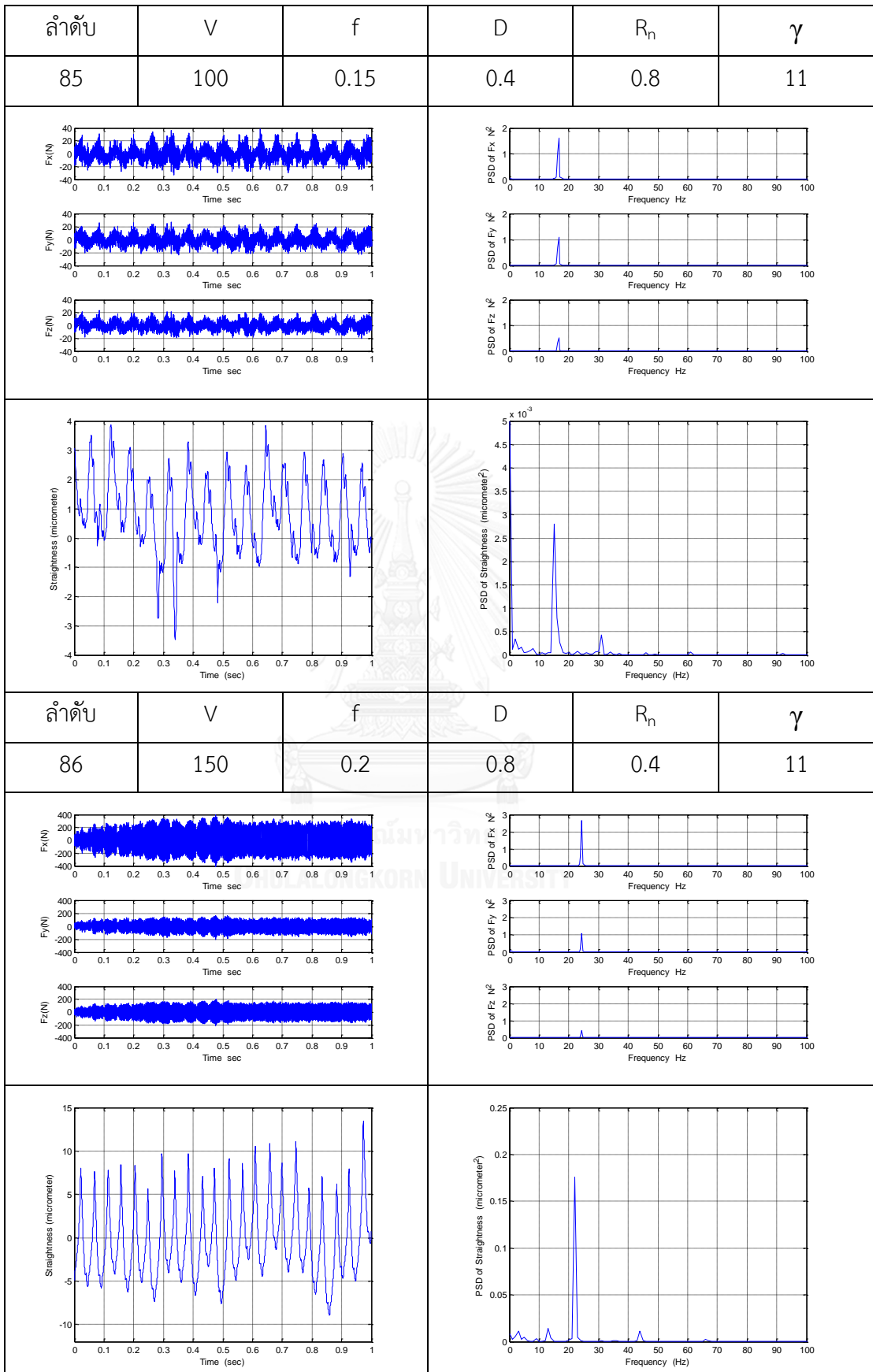


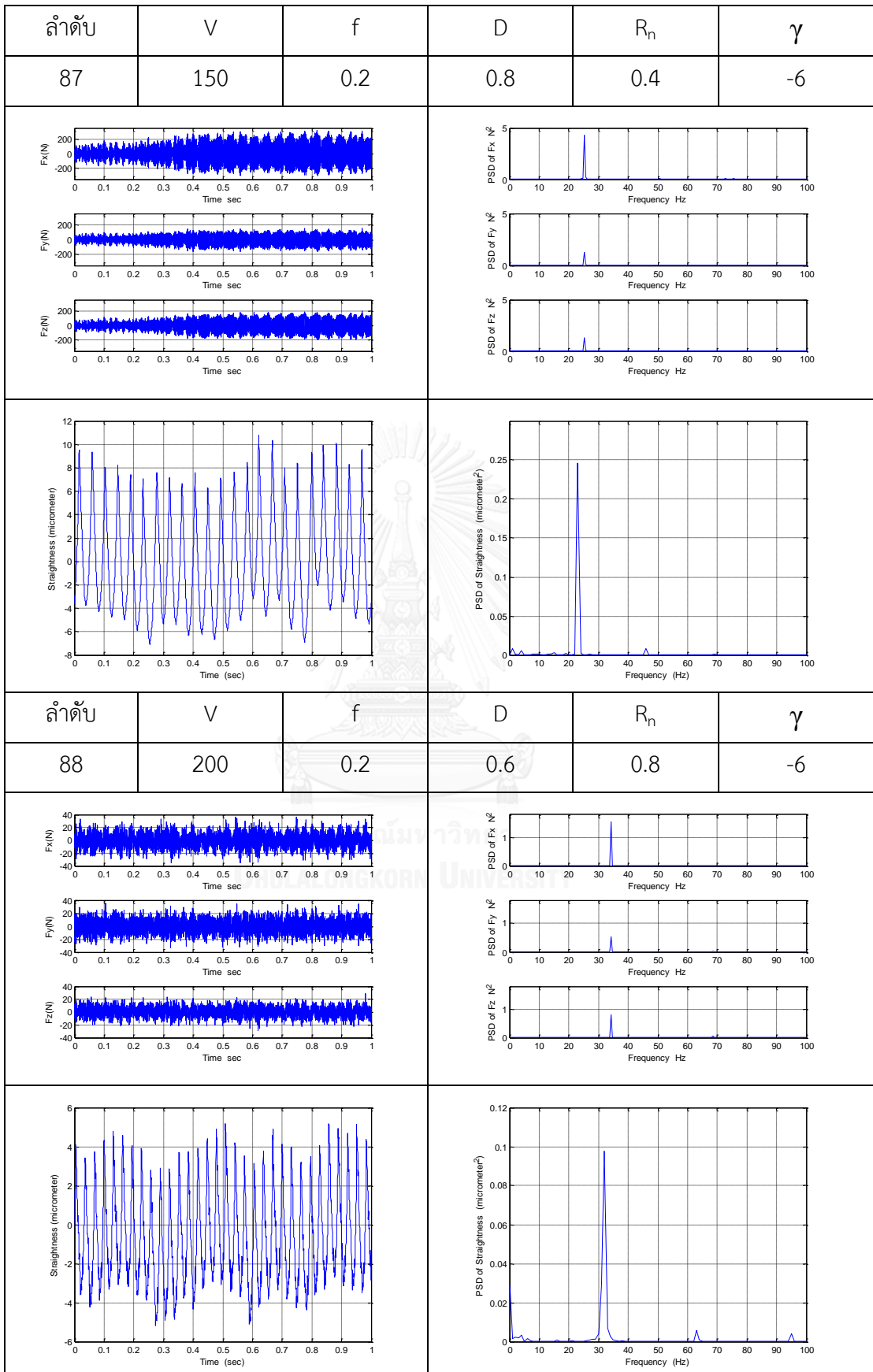


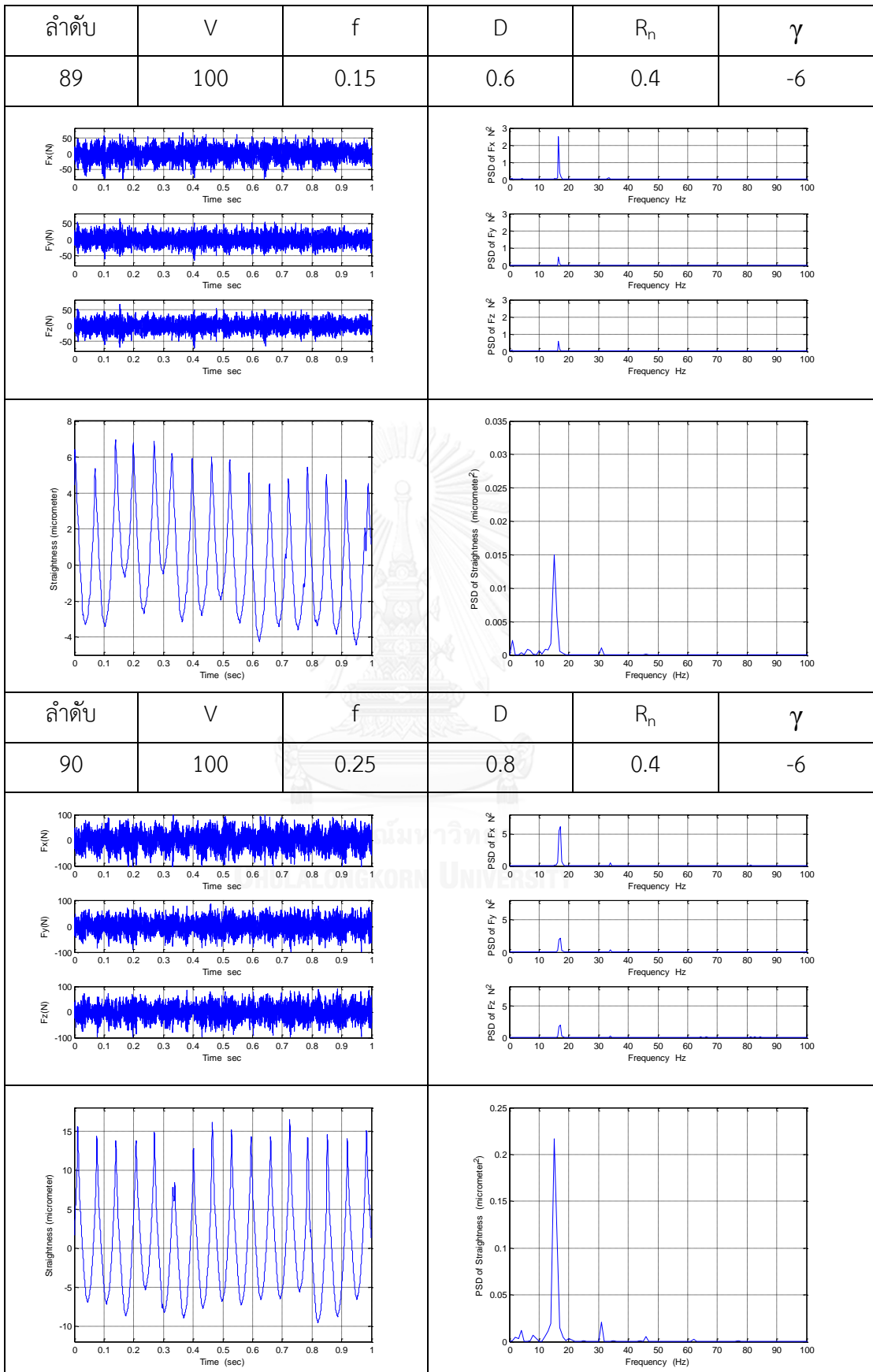


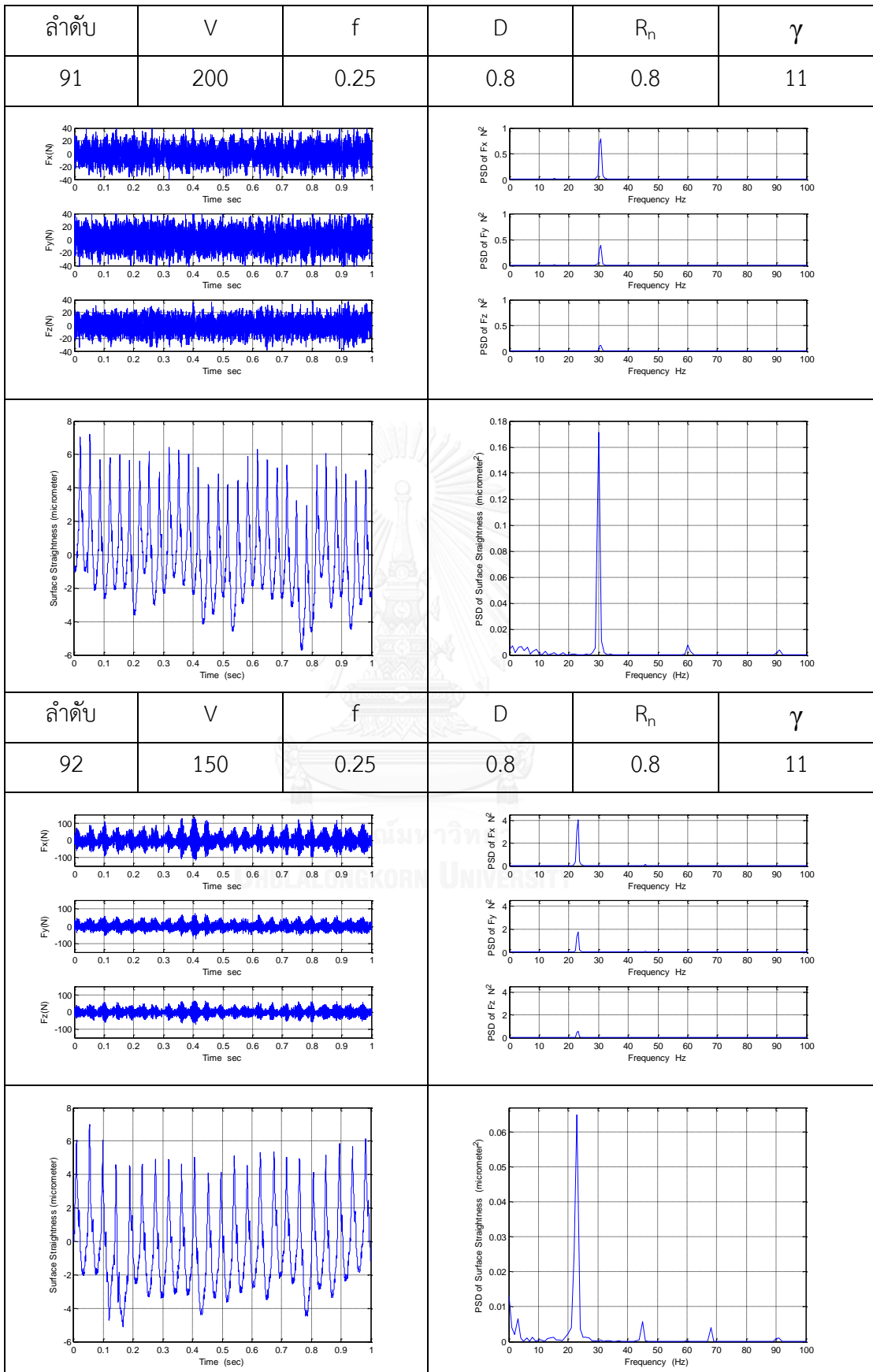


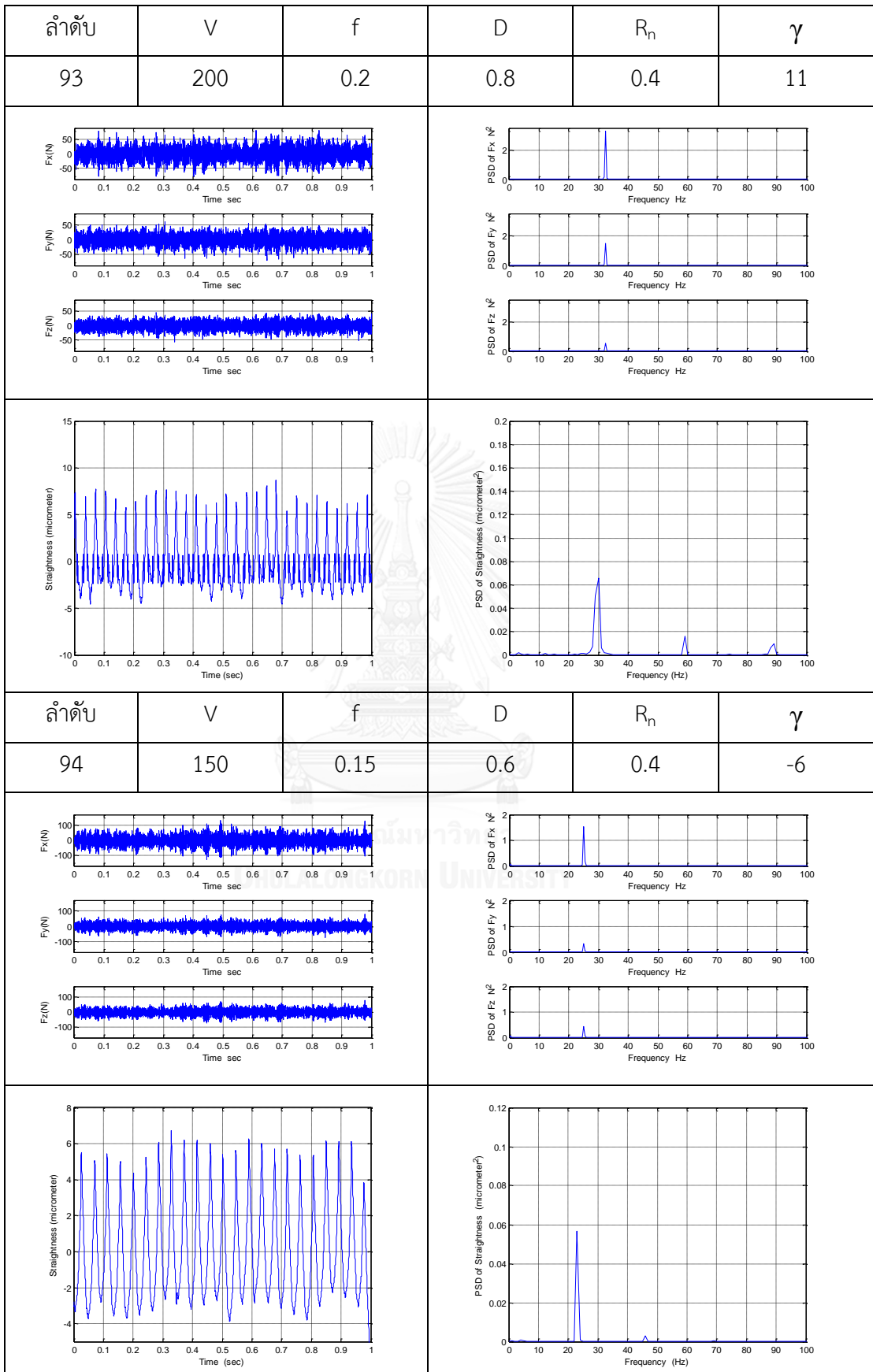


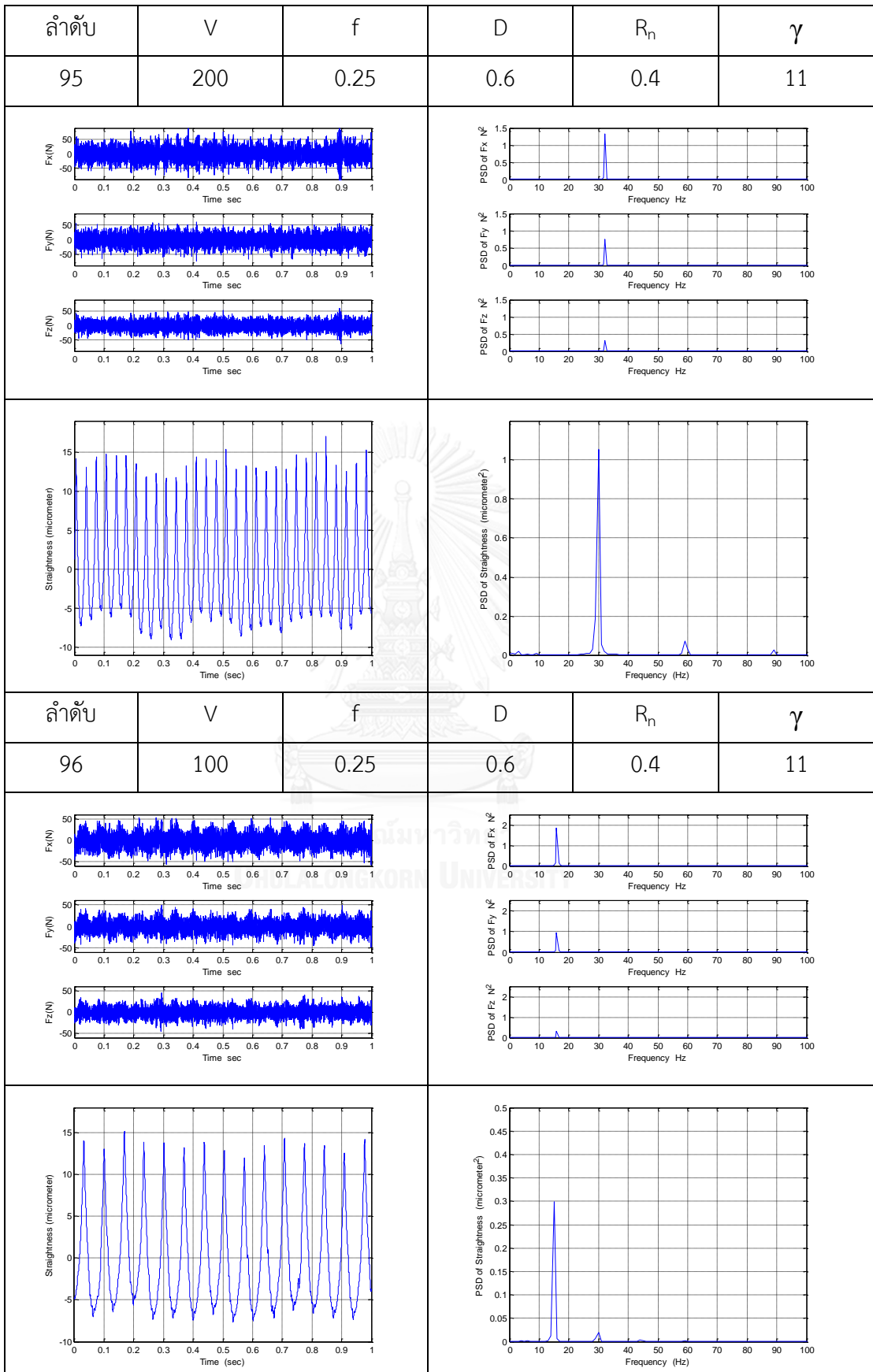


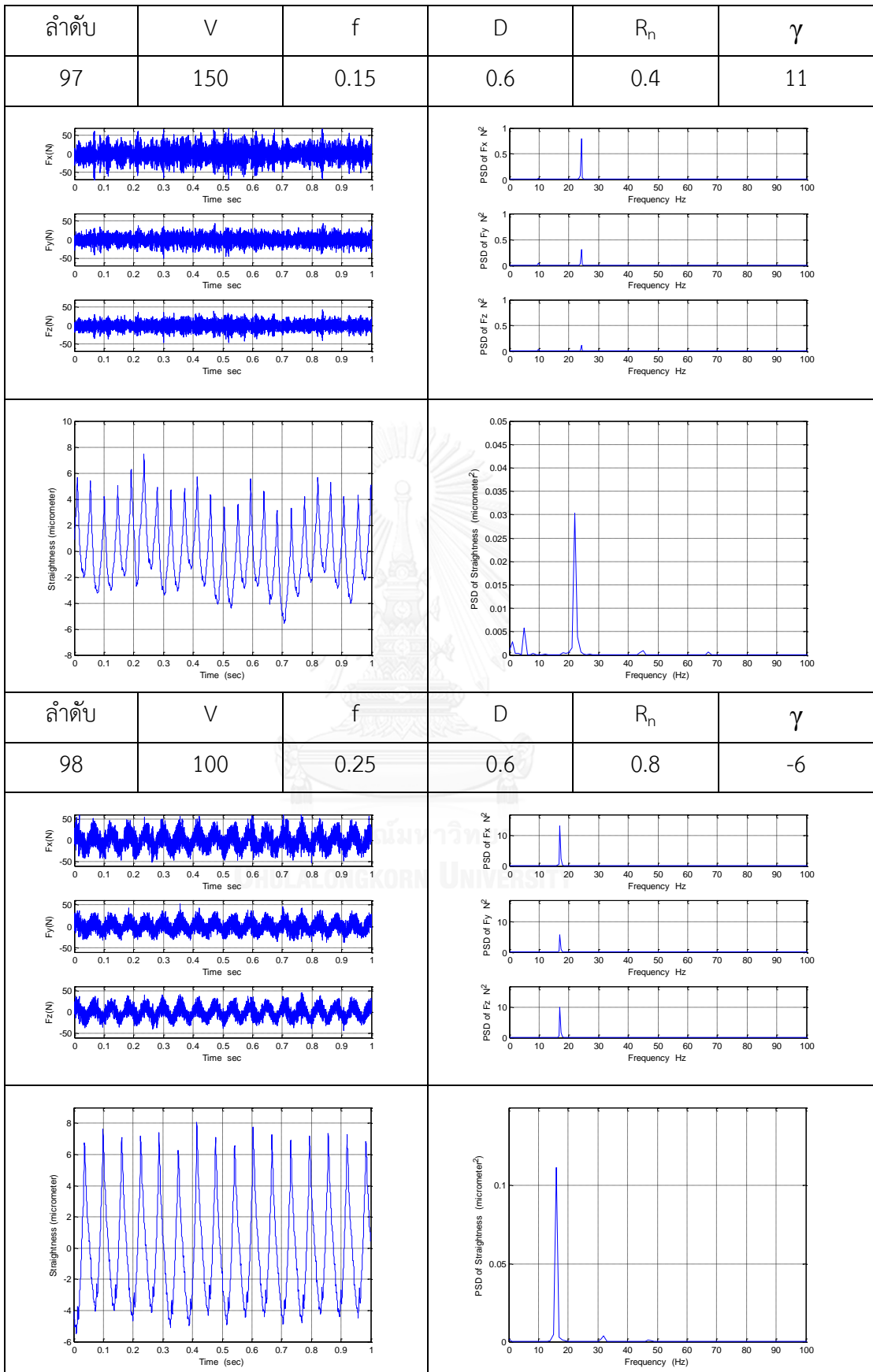


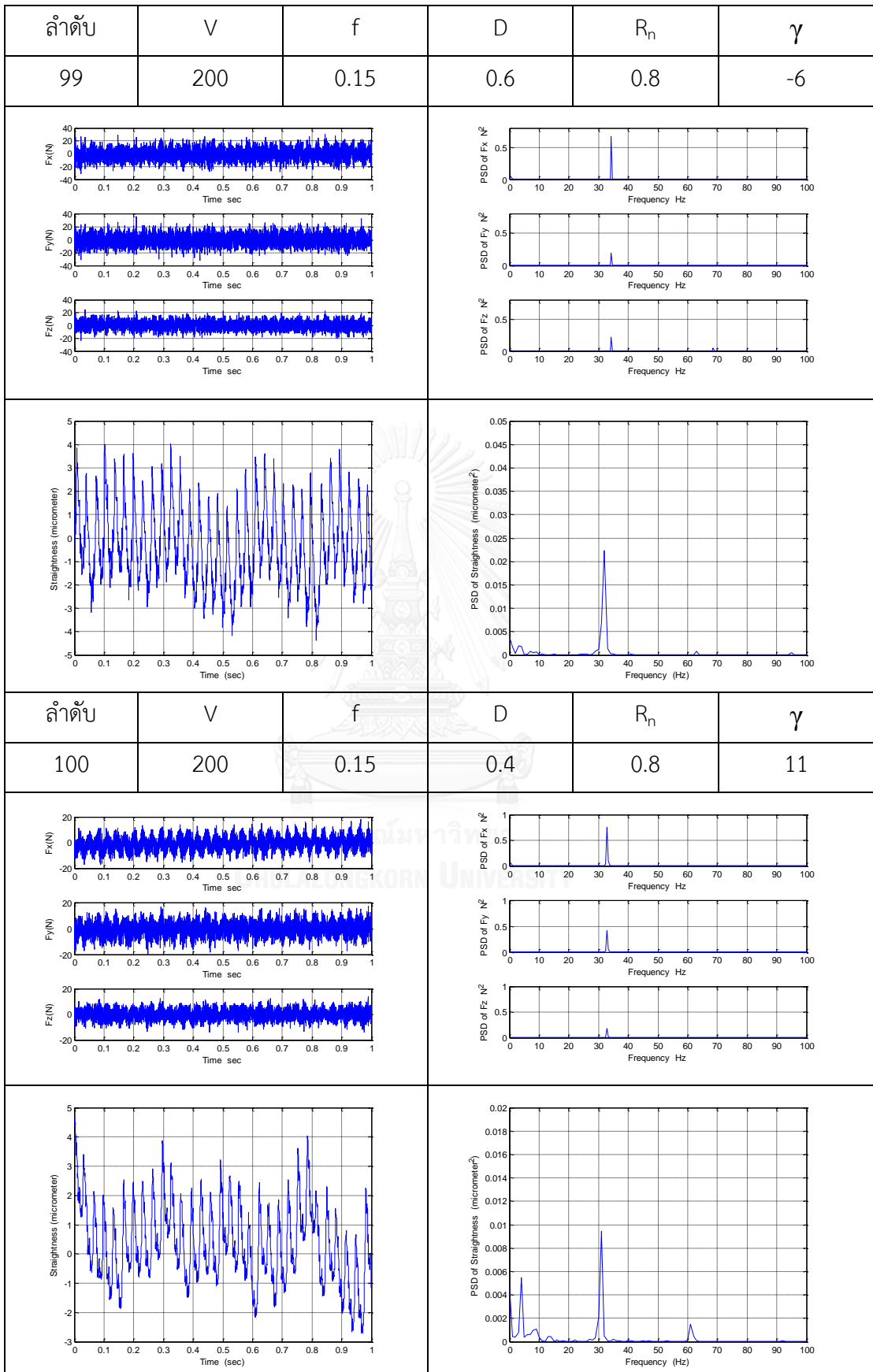


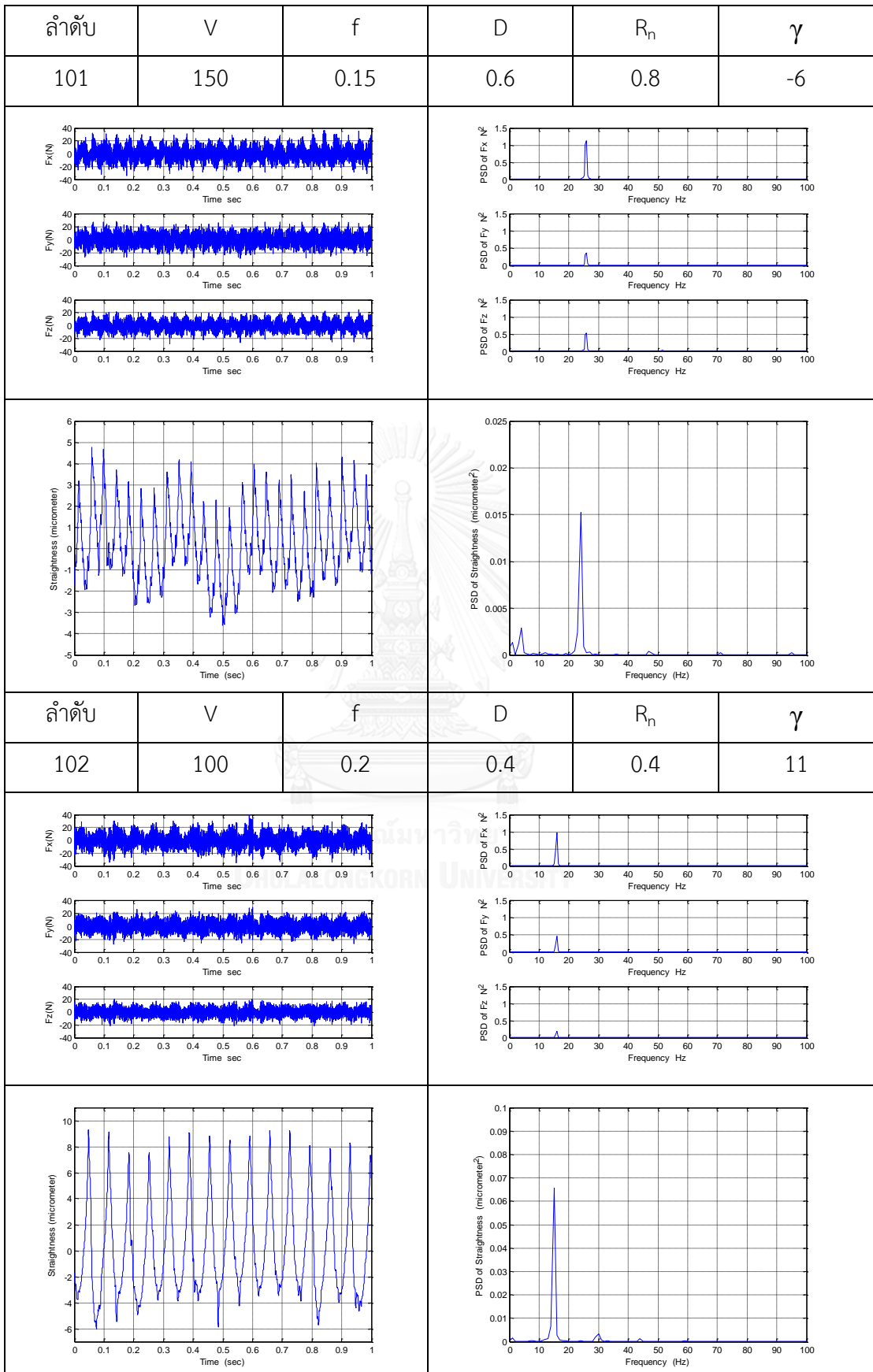


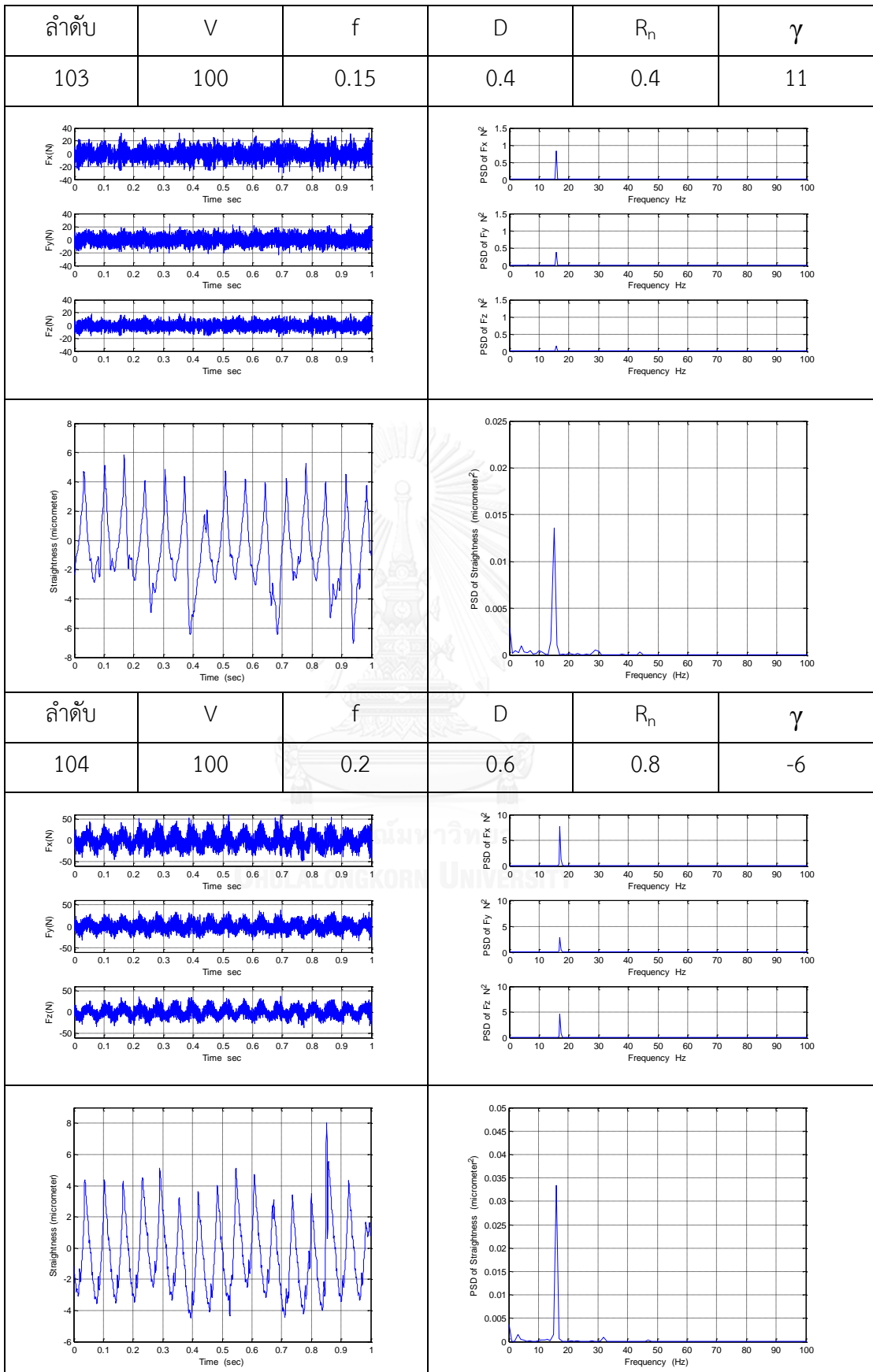


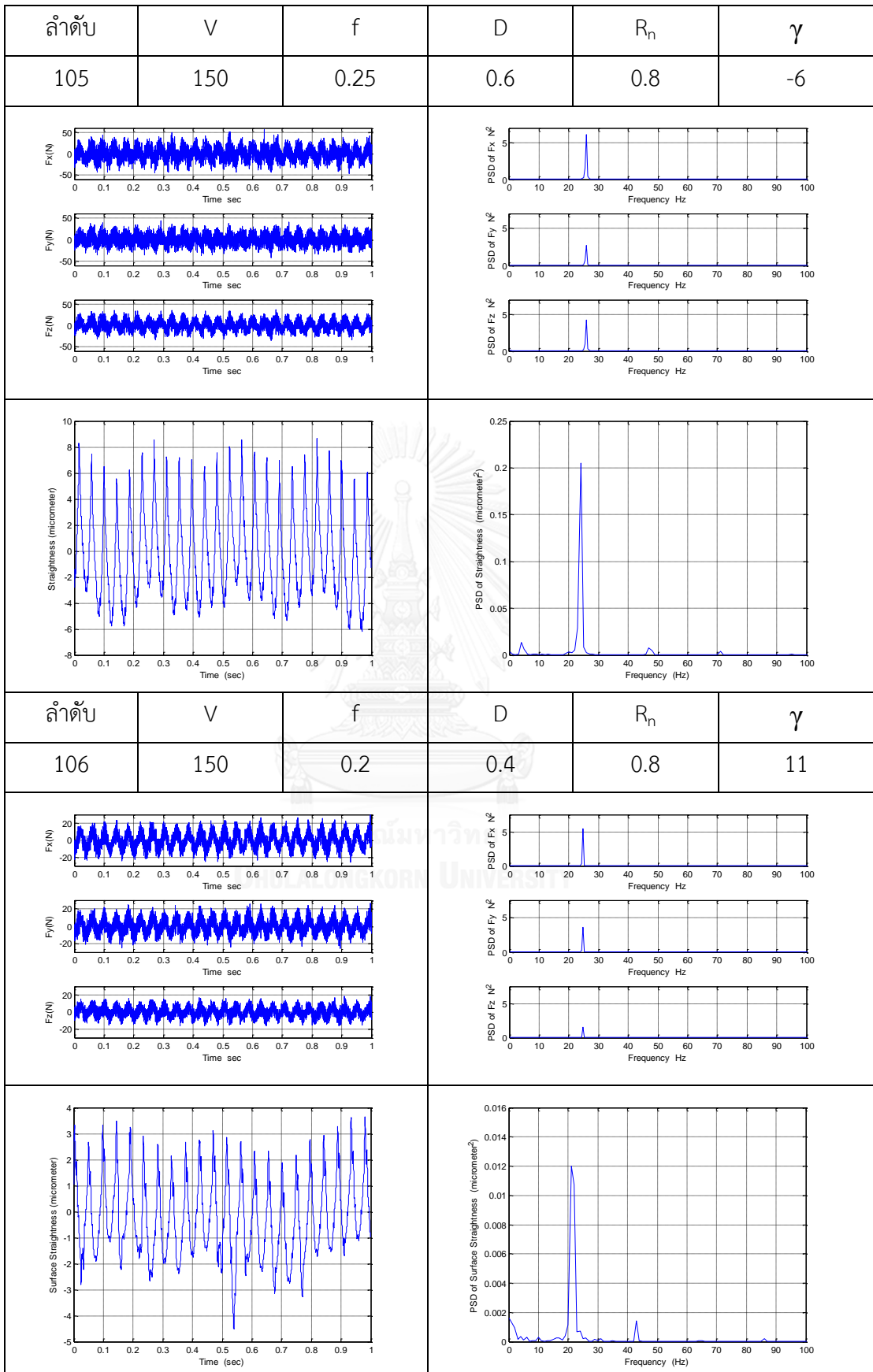


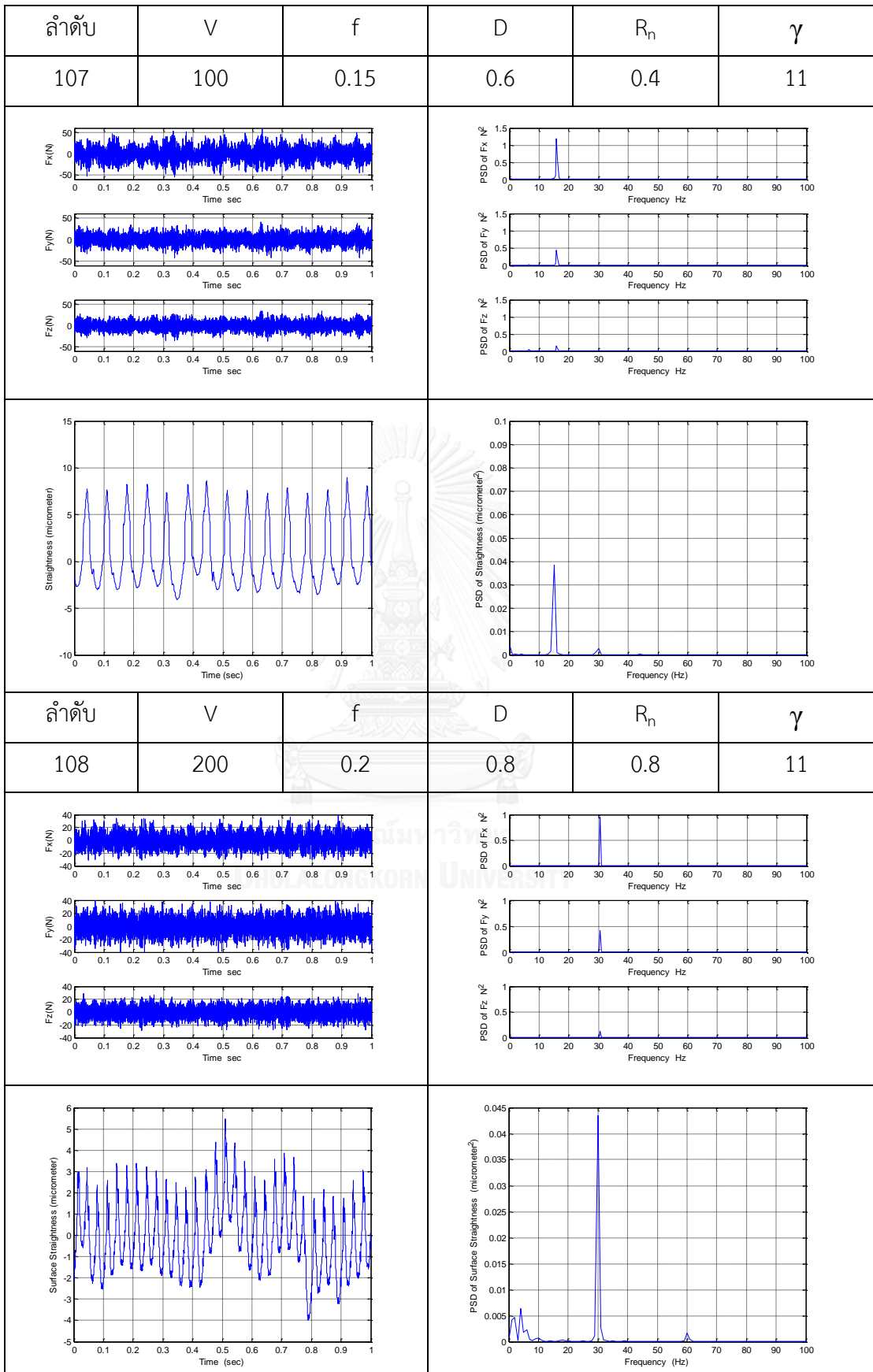


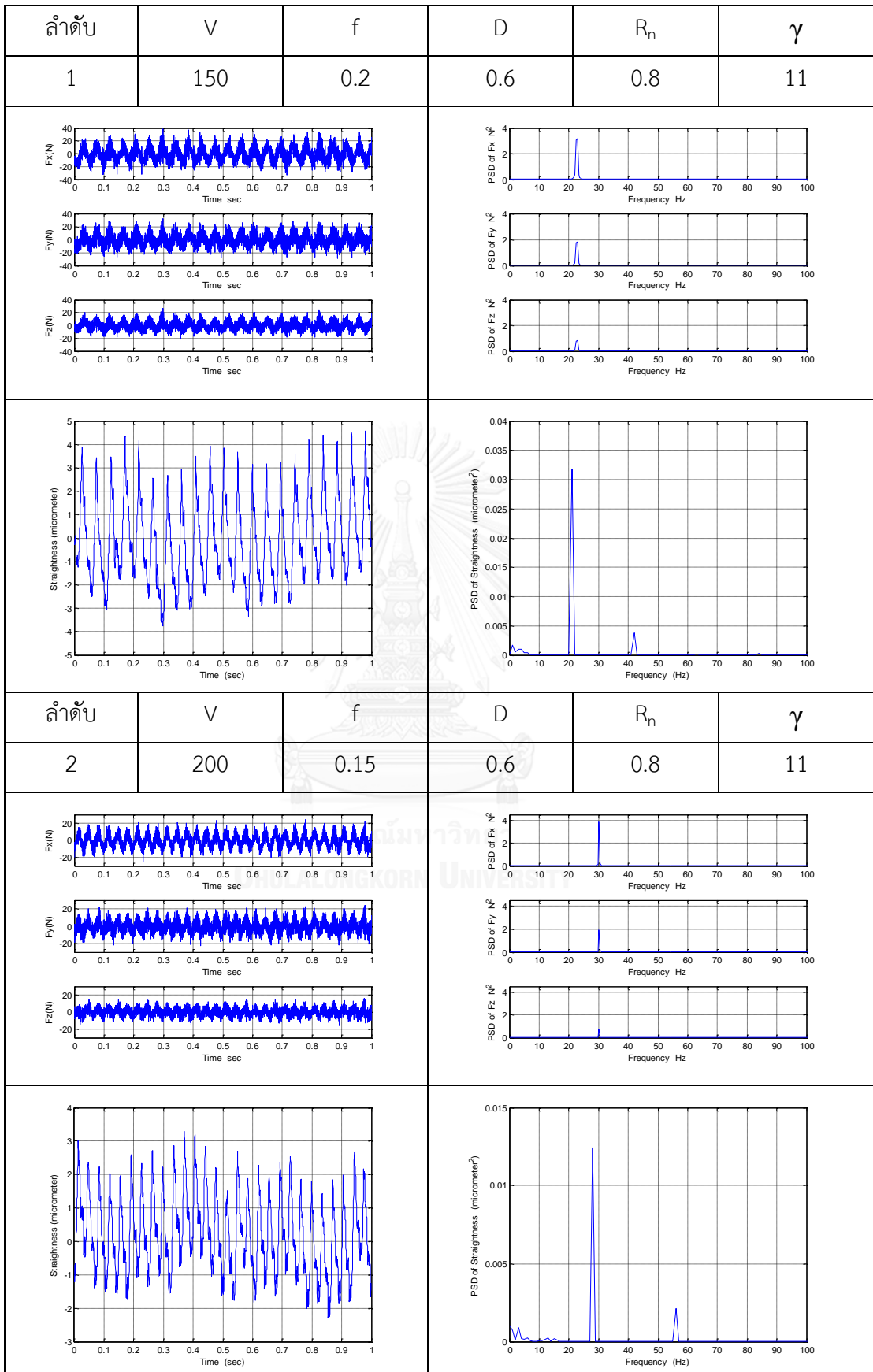


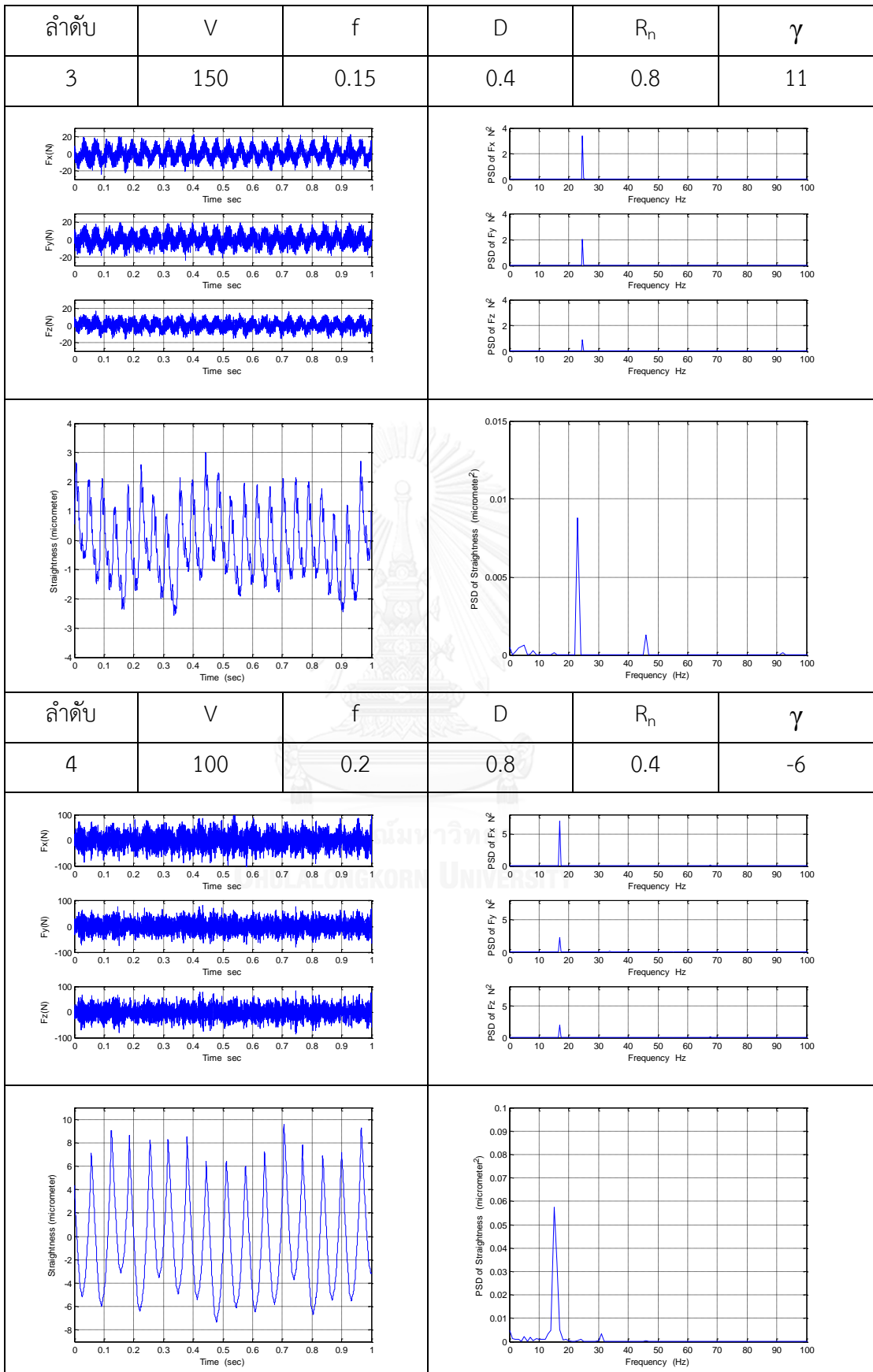


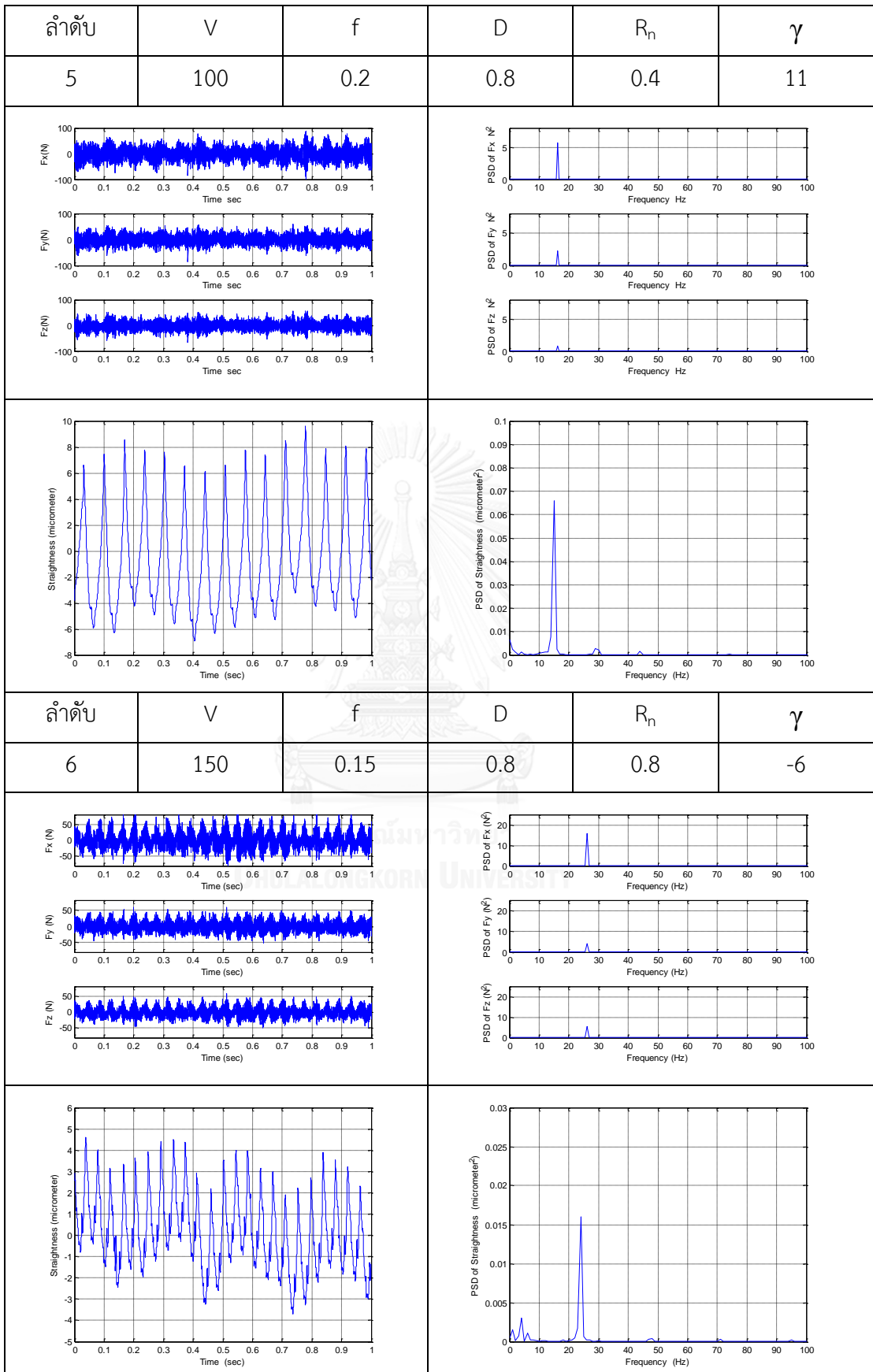


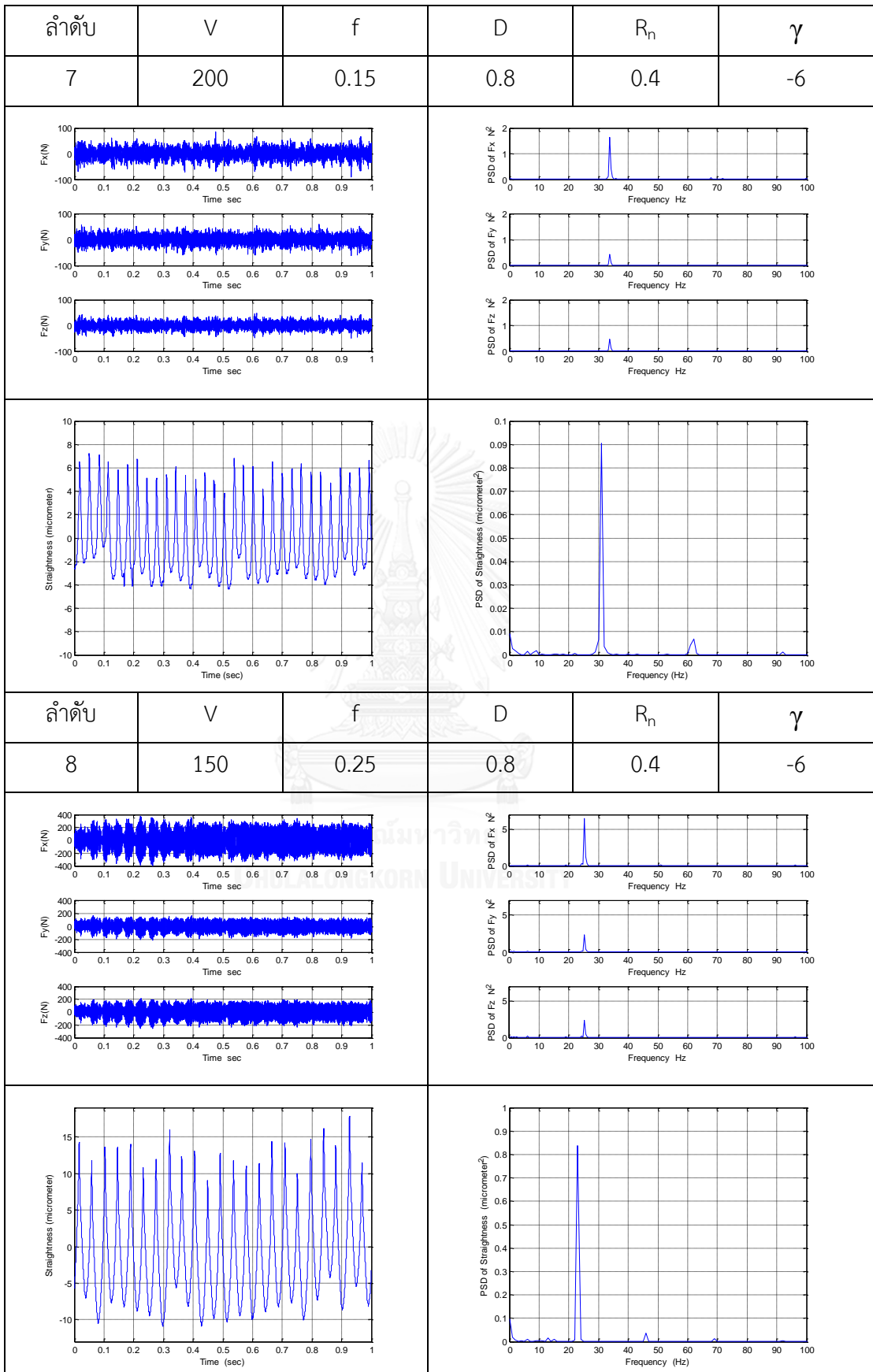


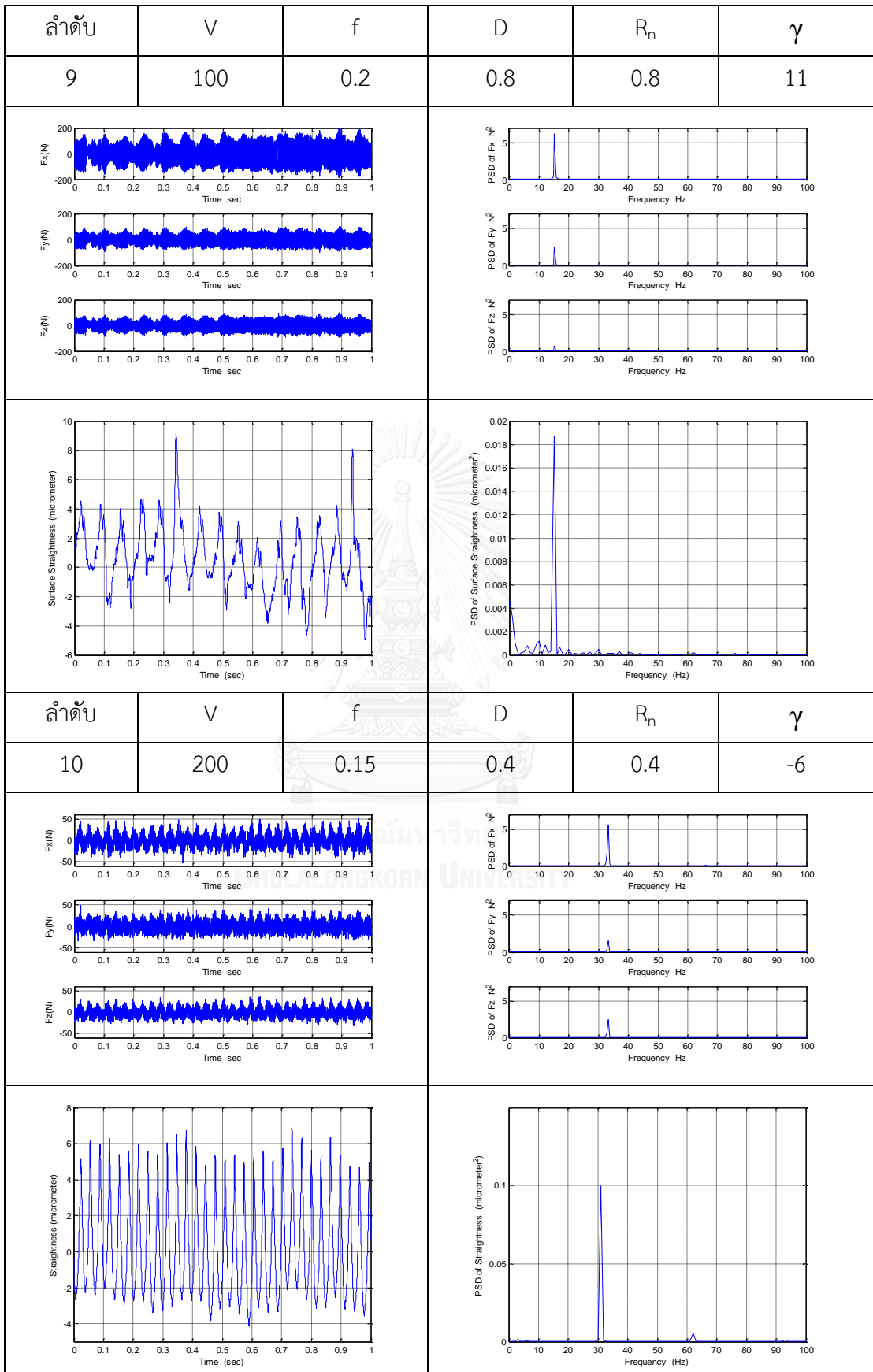


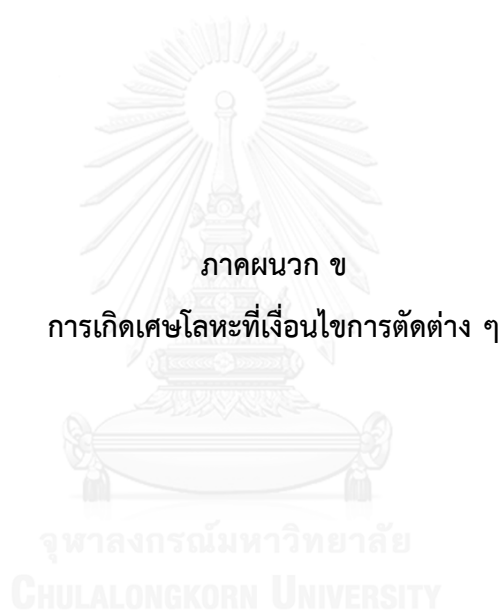











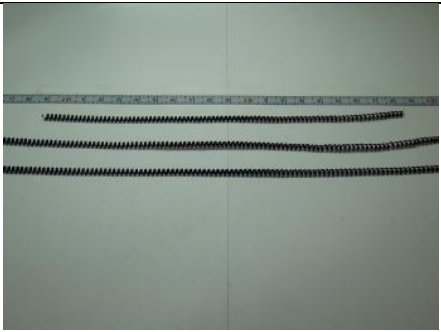













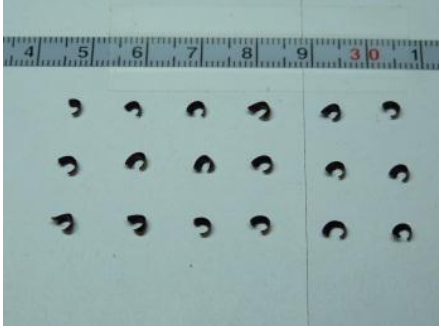
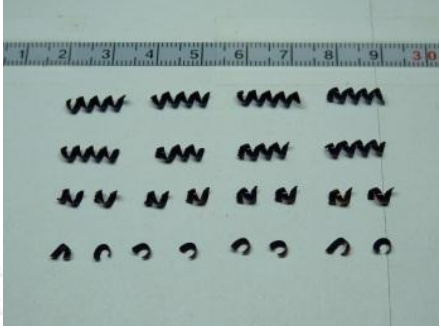


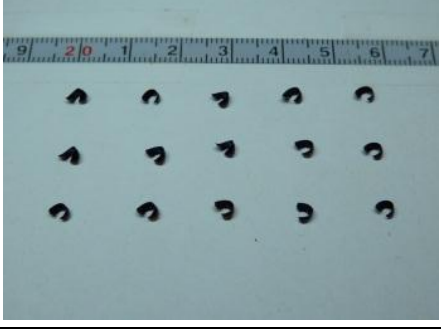



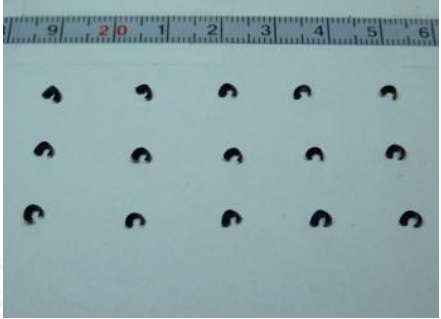



ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
1	150	0.2	0.6	0.8	11	
2	200	0.15	0.6	0.8	11	
3	150	0.15	0.4	0.8	11	
4	100	0.2	0.8	0.4	-6	
5	100	0.2	0.8	0.4	11	






ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
6	150	0.15	0.8	0.8	-6	
7	200	0.15	0.8	0.4	-6	
8	150	0.25	0.8	0.4	-6	
9	100	0.2	0.8	0.8	11	
10	200	0.15	0.4	0.4	-6	



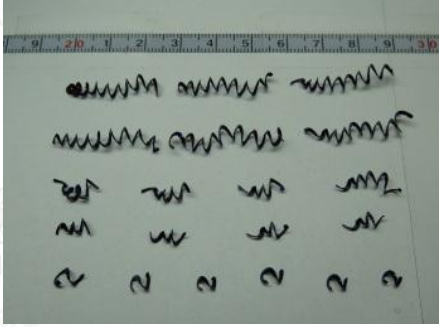


ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
11	200	0.25	0.4	0.8	-6	
12	150	0.2	0.6	0.8	-6	
13	150	0.15	0.8	0.4	11	
14	150	0.2	0.4	0.8	-6	
15	200	0.15	0.6	0.4	11	

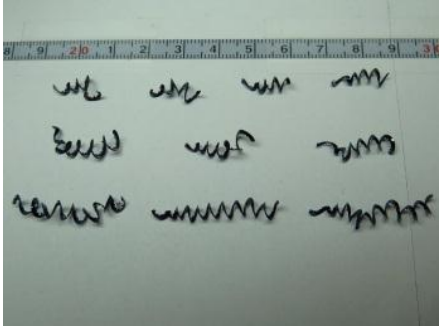


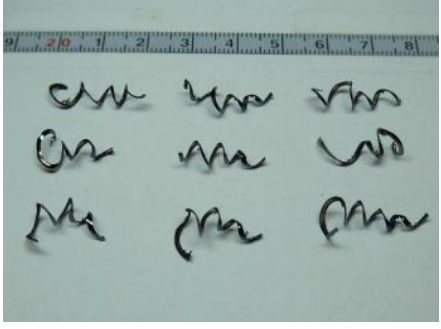

ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
16	100	0.2	0.8	0.8	-6	
17	100	0.25	0.4	0.8	11	
18	150	0.15	0.4	0.4	11	
19	200	0.2	0.4	0.4	-6	
20	100	0.25	0.8	0.8	11	

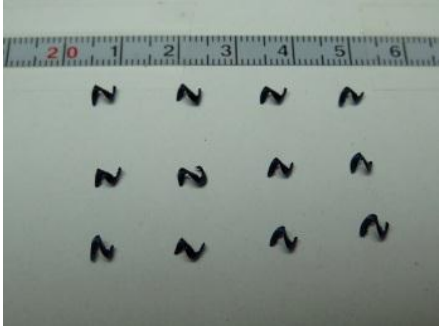
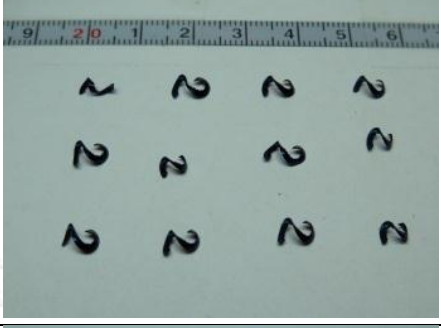

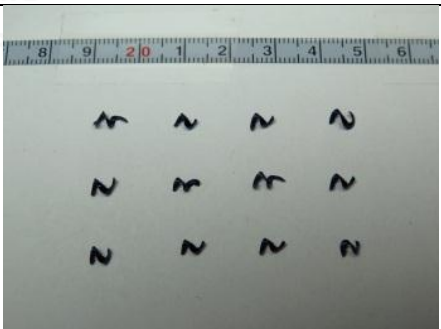
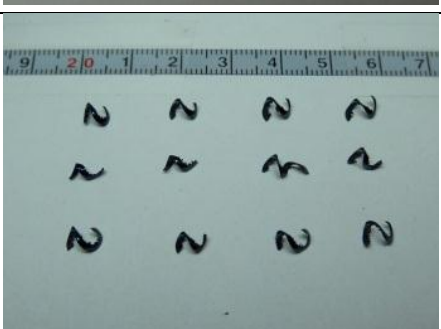
ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
21	150	0.25	0.6	0.4	-6	
22	200	0.2	0.4	0.4	11	
23	200	0.25	0.8	0.4	11	
24	150	0.25	0.4	0.4	11	
25	100	0.25	0.6	0.4	-6	

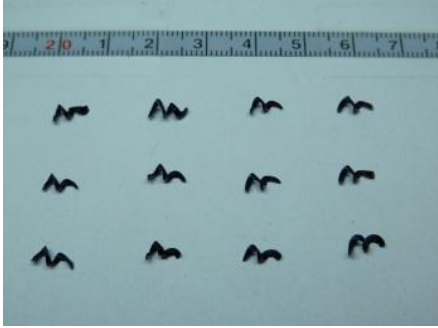
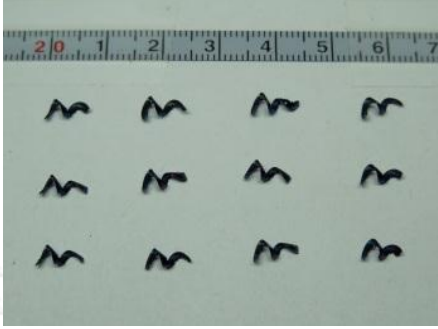

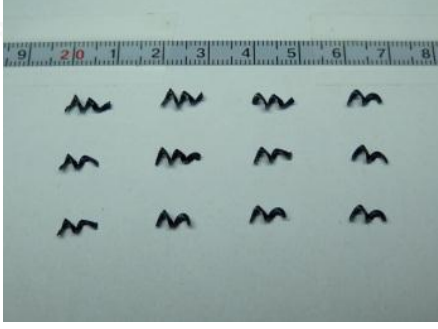

ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
26	150	0.2	0.8	0.8	-6	
27	100	0.2	0.4	0.4	-6	
28	200	0.25	0.4	0.8	11	
29	150	0.2	0.4	0.4	11	
30	200	0.15	0.6	0.4	-6	






ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
31	100	0.15	0.8	0.8	-6	
32	200	0.25	0.6	0.8	-6	
33	100	0.15	0.6	0.8	-6	
34	150	0.2	0.4	0.4	-6	
35	150	0.25	0.4	0.4	-6	






ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
36	200	0.2	0.6	0.4	-6	
37	200	0.15	0.8	0.8	11	
38	200	0.25	0.4	0.4	11	
39	100	0.25	0.6	0.8	11	
40	150	0.15	0.8	0.4	-6	






ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
41	200	0.25	0.8	0.4	-6	
42	150	0.25	0.4	0.8	-6	
43	100	0.25	0.4	0.4	-6	
44	150	0.2	0.6	0.4	-6	
45	200	0.25	0.6	0.8	11	






ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
46	200	0.2	0.6	0.4	11	
47	100	0.25	0.4	0.8	-6	
48	100	0.25	0.8	0.4	11	
49	150	0.25	0.6	0.4	11	
50	200	0.2	0.4	0.8	11	






ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
51	150	0.15	0.6	0.8	11	
52	100	0.15	0.8	0.4	11	
53	200	0.25	0.8	0.8	-6	
54	150	0.15	0.4	0.8	-6	
55	150	0.25	0.8	0.4	11	






ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
56	150	0.2	0.6	0.4	11	
57	200	0.15	0.8	0.4	11	
58	150	0.25	0.6	0.8	11	
59	150	0.25	0.4	0.8	11	
60	200	0.2	0.4	0.8	-6	


ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
61	100	0.25	0.8	0.8	-6	
62	200	0.15	0.4	0.4	11	
63	200	0.25	0.6	0.4	-6	
64	100	0.25	0.4	0.4	11	
65	100	0.15	0.4	0.4	-6	






ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
66	100	0.2	0.4	0.8	11	
67	100	0.2	0.6	0.4	11	
68	100	0.15	0.6	0.8	11	
69	150	0.2	0.8	0.8	11	
70	100	0.2	0.4	0.8	-6	


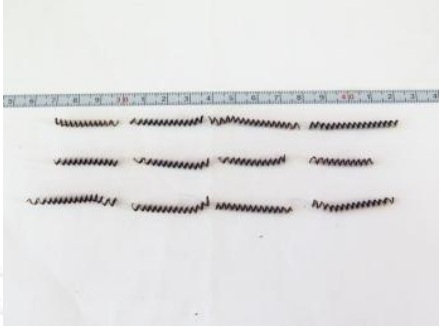



ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
71	100	0.15	0.4	0.8	-6	
72	100	0.2	0.6	0.4	-6	
73	150	0.15	0.4	0.4	-6	
74	150	0.15	0.8	0.8	11	
75	200	0.15	0.8	0.8	-6	






ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
76	200	0.2	0.8	0.8	-6	
77	200	0.2	0.6	0.8	11	
78	100	0.15	0.8	0.4	-6	
79	100	0.15	0.8	0.8	11	
80	100	0.2	0.6	0.8	11	




ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
81	200	0.2	0.8	0.4	-6	
82	200	0.25	0.4	0.4	-6	
83	200	0.15	0.4	0.8	-6	
84	150	0.25	0.8	0.8	-6	
85	100	0.15	0.4	0.8	11	

ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
86	150	0.2	0.8	0.4	11	
87	150	0.2	0.8	0.4	-6	
88	200	0.2	0.6	0.8	-6	
89	100	0.15	0.6	0.4	-6	
90	100	0.25	0.8	0.4	-6	

ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
91	200	0.25	0.8	0.8	11	
92	150	0.25	0.8	0.8	11	
93	200	0.2	0.8	0.4	11	
94	150	0.15	0.6	0.4	-6	
95	200	0.25	0.6	0.4	11	

ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
96	100	0.25	0.6	0.4	11	
97	150	0.15	0.6	0.4	11	
98	100	0.25	0.6	0.8	-6	
99	200	0.15	0.6	0.8	-6	
100	200	0.15	0.4	0.8	11	

ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
101	150	0.15	0.6	0.8	-6	
102	100	0.2	0.4	0.4	11	
103	100	0.15	0.4	0.4	11	
104	100	0.2	0.6	0.8	-6	
105	150	0.25	0.6	0.8	-6	

ลำดับ	V	f	D	R_n	γ	เศษโลหะ
106	150	0.2	0.4	0.8	11	
107	100	0.15	0.6	0.4	11	
108	200	0.2	0.8	0.8	11	

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธารารัตน์ ชาญสูงเนิน เกิดเมื่อวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนแก่นนครวิทยาลัย จังหวัดขอนแก่น ต่อมาเข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2552 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2554

