

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชุกของโรคผิวหนังกับแรงตึงในกระบวนการเจริญ



นางสาววิชา ธรรมสิงห์

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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY OF RELATION BETWEEN SURFACE ROUGHNESS AND CUTTING FORCE IN
GRINDING PROCESS

Miss Vichaya Thammasing



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

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชุกของโรคผิวหนังกับ
แรงตักในกระบวนการเจริญเติบโต

โดย

นางสาววิชญา ธรรมสิงห์

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์สมชาย พวงเพิกคิก)

วิชา ธรรมสิ่ง : การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับแรงตัดในกระบวนการเจียรระไน (STUDY OF RELATION BETWEEN SURFACE ROUGHNESS AND CUTTING FORCE IN GRINDING PROCESS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก: รศ. ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ, หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานที่เกิดขึ้นขณะเจียรระไนกับแรงตัด สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน S50C ด้วยหินเจียรระไน ชนิดอะลูมิเนียมออกไซด์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร หนา 1.6 เซนติเมตร โดยการใช้อัตราส่วนแรงตัดในการพิจารณาความสัมพันธ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้สมการเอ็กซ์โปเนนเชียล 4 ตัวแปร สำหรับการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว ประกอบด้วย ความเร็วรอบ 3,300 และ 6,600 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนตัด 55, 44, 33 และ 22 มิลลิเมตรต่อนาที, ความลึกตัด 0.005, 0.01 และ 0.015 มิลลิเมตร และอัตราส่วนแรงตัดสถิติที่เกิดขึ้นในขณะตัด

อัตราส่วนแรงตัดที่ถูกนำมาใช้ในการพยากรณ์เนื่องจากขนาดแรงตัดอาจเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขการตัด ดังนั้นการใช้อัตราส่วนแรงตัดจะทำให้สามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้ไม่ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป ผลจากการทดลองพบว่าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนแรงตัดสูงขึ้น จึงสามารถนำค่าอัตราส่วนแรงตัดมาใช้ในการทำนายความเรียบผิวได้ การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการยืนยันผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดใหม่เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถพยากรณ์ค่าได้อย่างแม่นยำโดยค่าความแม่นยำของการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยเท่ากับ 95.66% และความขรุขระผิวสูงสุดเท่ากับ 94.32%

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5470373321 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: GRINDING / SURFACE ROUGHNESS / CUTTING FORCE RATIO

VICHAYA THAMMASING: STUDY OF RELATION BETWEEN SURFACE ROUGHNESS AND CUTTING FORCE IN GRINDING PROCESS. ADVISOR: ASSOC. PROF. DR.SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, pp.

The objective of this research is to study the relation between surface roughness and cutting force in grinding process of the carbon steel (S50C) by using an alumina dioxide grinding wheel with the diameter of 1.8 cm and the thickness of 1.6 cm. The cutting force ratio is utilized to monitor the surface roughness. The exponential equation is employed to represent the surface roughness models with four parameters which are the spindle speed of 3,300 and 6,600 rev/min, the feed rates of 55, 44, 33 and 22 mm/min, the depths of cut of 0.005, 0.01 and 0.015 mm and the cutting force ratio.

The cutting force depends on the cutting conditions. Therefore, the cutting force ratio is proposed to predict the surface roughness regardless of the cutting conditions. The experimentally obtained results showed that surface roughness tends to decrease while the cutting force ratio increases. Thus, the cutting force ratio is employed to predict the surface roughness. The multiple regression analysis is utilized to develop the surface roughness models at 95% confident level. The new cutting tests have been conducted to verify the developed in-process surface roughness models and the results have run satisfaction. Finally, it is proved that the models can be used to predict the in-process surface roughness with the highly acceptable prediction accuracy of 95.66% for the average surface roughness Ra, and 94.32% for the surface roughness Rz.

Department: Industrial Engineering

Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้โอกาส คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้แนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานวิจัยจนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดต่างๆ พร้อมทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณนายชาญณรงค์ รุ่งเรืองและนายจักรพันธ์ เมืองวัฒน์ ที่ได้แนะนำวิธีการใช้อุปกรณ์และจัดทำเครื่องมือช่วยที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงช่วยแก้ไขแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดลองจนทำให้งานวิจัยสำเร็จตามเป้าหมาย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว, เพื่อนๆทุกคนและหัวหน้าทุกคนสำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจซึ่งเป็นส่วนช่วยทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จลงได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 เครื่องจักรกลอัจฉริยะและเทคโนโลยีเซนเซอร์	2
1.2 ระบบการผลิตอัจฉริยะ	3
1.3 ลักษณะของกระบวนการเจียระไนในปัจจุบัน	3
1.4 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	4
1.5 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	6
1.6 ขอบเขตการวิจัย	6
1.7 ผลที่ได้รับ.....	6
1.8 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	6
1.9 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	8
2.1.1 การเจียระไน (Grinding)	8
2.1.2 หินเจียระไน (Grinding Wheel).....	8
2.1.2.1 วัสดุขัดสี (Abrasive material).....	8
2.1.2.2 ขนาดเกรน (Grain size).....	9

2.1.2.3	วัสดุยึดเหนี่ยว (Bonding materials)	9
2.1.2.4	โครงสร้างของหินเจียรระไน (Wheel structure).....	9
2.1.2.5	เกรดของหินเจียรระไน (Wheel grade).....	10
2.1.3	กระบวนการเจียรระไน	10
2.1.4	ความเรียบผิวชิ้นงาน.....	11
2.1.5	พลังงาน.....	12
2.1.6	การเกิดเศษโลหะขณะเจียรระไน	12
2.1.7	อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงาน.....	13
2.1.8	การสึกหรอของหินเจียรระไน.....	13
2.1.9	ผิวชิ้นงาน (Surfaces).....	14
2.1.10	ลักษณะของผิวชิ้นงาน (Characteristics of surfaces)	15
2.1.11	พื้นผิวชิ้นงาน (Surface texture).....	16
2.1.12	ความขรุขระผิวและความเรียบผิวชิ้นงาน (Surface roughness and surface finish).....	17
2.1.13	การวัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน.....	17
2.1.14	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน.....	18
2.1.15	การวิเคราะห์ความถดถอย (Multiple Regression).....	19
2.1.15.1	รูปแบบของสมการความถดถอยเชิงพหุคูณ	19
2.1.16	สมมติฐานหรือเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ.....	19
2.1.17	การวิเคราะห์ผล.....	19
2.1.17.1	การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน	19
2.1.18	การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R ²)....	20
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	25
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	25
3.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการเจียระไน.....	25
3.1.2 การกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	25
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	30
3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล	33
3.5 การพัฒนาสมการทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัด.....	34
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	37
4.1 ผลการทดลอง.....	37
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราส่วนแรงตัด	39
4.3 การวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราการป้อนตัด และเงื่อนไขการเจียระไนอื่นๆบนเครื่องเจียระไนราบ.....	40
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราการป้อนตัด	41
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความเร็วรอบ	44
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความลึกตัด	48
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความอัตราส่วนแรงตัดและความเร็วรอบ	52
4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความอัตราส่วนแรงตัดและอัตราการป้อนตัด.....	53
4.3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความอัตราส่วนแรงตัดและความลึกตัด.....	53
4.3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความเร็วรอบ.....	54
4.3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราการป้อนตัด.....	55
4.3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความลึกตัด.....	55

4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	56
4.4.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ.....	56
4.4.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล.....	57
4.4.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน.....	59
4.5 สมการทำนายความชุกชุมผิวชิ้นงาน	60
4.5.1 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย.....	60
4.5.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ละตัว.....	62
4.5.3 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ	64
4.6 การทดสอบความแม่นยำของสมการ	65
4.7 การวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดสถิติด้วยการแปลงเวฟเล็ต	68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	77
5.1 สรุปผลการวิจัย	77
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	78
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย.....	79
5.4 ข้อเสนอแนะ	79
.....	81
รายการอ้างอิง	81
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์ความชุกชุมผิวชิ้นงาน	84
โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์ความชุกชุมผิว	85
ภาคผนวก ข โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดขณะตัด.....	86
โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตขณะตัด.....	87

ภาคผนวก ค การวิเคราะห์แรงตัดและความขรุขระผิวในโดเมนความถี่ด้วย FFT สำหรับเงื่อนไขการตัดต่างๆ.....	89
การวิเคราะห์การเจียรระไนสำหรับการทดสอบสมการ.....	114
ภาคผนวก ง ผิวโลหะที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ.....	126
ภาพชิ้นงานที่เงื่อนไขการตัดที่ 1-24.....	127
ภาคผนวก จ โปรแกรมและตัวอย่างการแปลงสัญญาณแบบเวฟเล็ตแบบคอเบชีส์.....	132
โปรแกรมการแปลงสัญญาณเวฟเล็ต แบบคอเบชีส์.....	133
ตัวอย่างการแปลงสัญญาณแรงตัดด้วยเวฟเล็ต.....	144
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	152

สารบัญภาพ

	หน้า
บทที่ 1	
รูปที่ 1. 1 แรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเจียรระไน	5
บทที่ 2	
รูปที่ 2. 1 เกรน วัสดุยึดเหนี่ยว และช่องว่าง [14]	9
รูปที่ 2. 2 ลักษณะการเข้าตัดผิวชิ้นงาน [14].....	11
รูปที่ 2. 3 เกรนที่กระทำกับผิวชิ้นงานในแต่ละแบบ [14]	12
รูปที่ 2. 4 การเกิดเศษโลหะ [6]	13
รูปที่ 2. 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรการสึกหรอของหินเจียรระไนกับปริมาตรการ ขจัดเนื้อวัสดุ [14].....	14
รูปที่ 2. 6 ลักษณะผิวชิ้นงาน [14].....	15
รูปที่ 2. 7 ลักษณะพื้นผิวชิ้นงาน [14].....	16
รูปที่ 2. 8 การวัดค่าความขรุขระผิว [15]	17
รูปที่ 2. 9 ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (Average surface roughness: Ra) [16]	18
รูปที่ 2. 10 ค่าความขรุขระผิวสูงสุด (Maximum height: Ry) [16].....	18
รูปที่ 2. 11 ความขรุขระผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด (Ten spot average surface roughness: Rz) [16].....	18
บทที่ 3	
รูปที่ 3. 1 ชิ้นงานที่ใช้ในการเจียรระไน.....	26
รูปที่ 3. 2 หินเจียรระไนชนิดอะลูมิเนียมออกไซด์	27
รูปที่ 3. 3 เครื่องเจียรระไน.....	27
รูปที่ 3. 4 เซนเซอร์วัดแรงหรือไดนามิเตอร์	28
รูปที่ 3. 5 ชาร์จแอมพลิฟายเออร์.....	28
รูปที่ 3. 6 ออสซิลโลสโคป	29

รูปที่ 3. 7 เครื่องวัดความขรุขระผิว	29
รูปที่ 3. 8 การติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง สำหรับดำเนินการทดลอง.....	30
รูปที่ 3. 9 ทิศทางของแรงตัดทั้ง 3 แรง คือ F_x , F_y และ F_z [5]	31
รูปที่ 3. 10 สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเจียรระโน	34
บทที่ 4	
รูปที่ 4. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราส่วนแรงตัด (F_y/F_z).....	40
รูปที่ 4. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราการป้อนตัด 55, 44, 33 และ 22 มิลลิเมตร/วินาที ความลึกตัด 0.005 มิลลิเมตร	41
รูปที่ 4. 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราการป้อนตัด 55, 44, 33 และ 22 มิลลิเมตร/วินาที ความลึกตัด 0.01 มิลลิเมตร	42
รูปที่ 4. 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราการป้อนตัด 55, 44, 33 และ 22 มิลลิเมตร/วินาที ความลึกตัด 0.015 มิลลิเมตร	43
รูปที่ 4. 5 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราการป้อนตัด.....	44
รูปที่ 4. 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความเร็วรอบ 3300 และ 6600 รอบ/นาาที ความลึกตัด 0.005 มิลลิเมตร.....	45
รูปที่ 4. 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความเร็วรอบ 3300 และ 6600 รอบ/นาาที ความลึกตัด 0.01 มิลลิเมตร.....	46
รูปที่ 4. 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความเร็วรอบ 3300 และ 6600 รอบ/นาาที ความลึกตัด 0.015 มิลลิเมตร.....	47
รูปที่ 4. 9 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความเร็วรอบ	47
รูปที่ 4. 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความลึกตัด 0.005, 0.01 และ 0.015 มิลลิเมตรอัตราการป้อนตัด 55 มิลลิเมตร/วินาที.....	48
รูปที่ 4. 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความลึกตัด 0.005, 0.01 และ 0.015 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 44 มิลลิเมตร/วินาที	49
รูปที่ 4. 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความลึกตัด 0.005, 0.01 และ 0.015 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 33 มิลลิเมตร/วินาที	50

รูปที่ 4. 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความลึกตัด 0.005, 0.01 และ 0.015 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 22 มิลลิเมตร/วินาที	51
รูปที่ 4. 14 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความลึกตัด	52
รูปที่ 4. 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับความเร็วรอบ	52
รูปที่ 4. 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับอัตราการป้อนตัด	53
รูปที่ 4. 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับความลึกตัด	53
รูปที่ 4. 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความเร็วรอบ	54
รูปที่ 4. 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราการป้อนตัด	55
รูปที่ 4. 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความลึกตัด	55
รูปที่ 4. 21 Normal Probability Plot ของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)	56
รูปที่ 4. 22 Normal Probability Plot ของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)	57
รูปที่ 4. 23 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)	58
รูปที่ 4. 24 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)	58
รูปที่ 4. 25 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระเฉลี่ย (Ra)	59
รูปที่ 4. 26 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)	59
รูปที่ 4. 27 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)	67
รูปที่ 4. 28 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)	67
รูปที่ 4. 29 เวฟเล็ทที่ถูกละเลยและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า a และ b ต่างๆ กัน [20]	69
รูปที่ 4. 30 ลักษณะเวฟเล็ทที่แฟมิลีต่างๆ [20]	70
รูปที่ 4. 31 สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น ที่ความเร็วตัด 44 มิลลิเมตร/นาที อัตราป้อนตัด 3300 รอบ/นาที ความลึกตัด 0.015 มิลลิเมตร	70
รูปที่ 4. 32 การวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน	71
รูปที่ 4. 33 ความขรุขระผิวชิ้นงานที่โดเมนเวลา	72
รูปที่ 4. 34 ความขรุขระผิวชิ้นงานที่โดเมนความถี่	73

รูปที่ 4. 35 สัญญาณแรงตัดในโดเมนเวลาด้วยการแปลงเวฟเล็ทแบบดอเบซีส์ 74

รูปที่ 4. 36 สัญญาณแรงตัดในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ทแบบดอเบซีส์..... 75



สารบัญตาราง

	หน้า
บทที่ 2	
ตารางที่ 2. 1 งานวิจัยความเรียบผิวชิ้นงานจากการเจียรระไนที่ผ่านมา	20
บทที่ 3	
ตารางที่ 3. 1 ตารางแสดงเงื่อนไขการเจียรระไน	26
ตารางที่ 3. 2 เงื่อนไขการทดลอง	32
บทที่ 4	
ตารางที่ 4. 1 ผลการทดลองในแต่ละเงื่อนไขการเจียรระไน.....	38
ตารางที่ 4. 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย Ra.....	61
ตารางที่ 4. 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย Rz.....	62
ตารางที่ 4. 4 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ละตัวสำหรับ Ra.....	63
ตารางที่ 4. 5 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ละตัว สำหรับ Rz	63
ตารางที่ 4. 6 เงื่อนไขการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการ	65
ตารางที่ 4. 7 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำ.....	66

บทที่ 1

บทนำ

เนื่องจากปัจจุบัน อุตสาหกรรมการผลิตมีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาไปอย่างไม่หยุดยั้ง เนื่องมาจากการแข่งขันที่สูงขึ้น ซึ่งมีการประเมินว่าเศรษฐกิจไทยมีศักยภาพที่จะขยายตัวได้ 4.7-5.2% ในปี 2013 [1] โดยหนึ่งในสามปัจจัยหลักที่มีผลต่อการขยายตัวของเศรษฐกิจไทย คือ ประสิทธิภาพการผลิตในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นอุตสาหกรรมจึงมีความสำคัญมากในการส่งเสริมเศรษฐกิจ ซึ่งก่อให้เกิดการแข่งขันระหว่างการผลิตกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีที่สิ้นสุดของมนุษยชาติ หรืออาจกล่าวได้ว่า “อุตสาหกรรมกำลังเผชิญความท้าทายหลักทั่วโลก” คำกล่าวของ มิสเตอร์คริสท็อฟ มิลเลอร์ กรรมการผู้จัดการ EMO Hannover จากสมาคมผู้ผลิตเครื่องมือกลแห่งประเทศเยอรมนี แสดงให้เห็นว่า โลกเรามีการขยายตัวของโครงสร้างพื้นฐานท่ามกลางเศรษฐกิจยุคโลกาภิวัตน์ มนุษย์ต้องการมาตรฐานชีวิตที่สูงขึ้น ก่อให้เกิดความต้องการผลิตภัณฑ์สมัยใหม่ที่มีคุณภาพสูง ดังนั้น ระบบการผลิตในอนาคตต้องมียุคที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว คล่องแคล่ว อัจฉริยะ ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง ตอบสนองความต้องการเฉพาะด้าน และตระหนักในด้านสิ่งแวดล้อม ระบบการผลิตที่สามารถตอบสนองต่อลักษณะต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว คือ ระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing Systems: IMS) ซึ่งมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง ระบบการผลิตอัจฉริยะสามารถที่จะควบคุมและตรวจสอบตัวเองได้ เพื่อที่จะสร้างผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมานั้นจะเป็นคำตอบของอุตสาหกรรมการผลิตอัจฉริยะ ที่สามารถตอบสนองความท้าทายของการผลิตระดับโลกได้

กระบวนการเจียรไนเป็นกรรมวิธีในการปรับหรือแต่งผิวชิ้นงานให้มีความเรียบหรือความขรุขระผิวน้อยที่สุด โดยชิ้นงานนั้น จะต้องผ่านการกลึง กัด ไส หรือปาดหน้ามาแล้ว ซึ่งการเจียรไนนับเป็นศาสตร์และศิลป์อันประณีต เพราะมีเรื่องของเศรษฐศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้อง ทั้งในด้านคุณภาพ ซึ่งส่งผลต่อราคา และยังต้องใช้ความละเอียด รอบคอบ ในการเจียรไน เป็นต้น การเจียรไนนับเป็นวิธีที่ใช้กันแพร่หลาย และมีจุดประสงค์เดียวกัน คือ ต้องการความเรียบผิวที่ดีที่สุดหรือความขรุขระผิวน้อยที่สุด เช่น การเจียรไนเพชร พลอย แร่ หรือเหล็ก เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของสิ่งเหล่านี้ หรือเพื่อการใช้งานอย่างเหมาะสม

ในกระบวนการเจียรไนในปัจจุบันนั้น มีความพยายามที่จะทำให้ผิวที่ได้จากการเจียรไนมีความเรียบ ซึ่งจะทำให้ผิวนั้นมีคุณภาพสูง แต่เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความเรียบผิว ซึ่งได้แก่ แรงตัด อัตราการป้อนตัด ขนาดผงขัด (ขนาดเกรน) ความเร็วของชิ้นงาน ความลึกในการตัด และอาจรวมถึงการแต่งผิวหินเจียรไนก่อนจะทำการเจียรนั้น มีความสัมพันธ์กันอย่างมาก ดังนั้นจึงควรมีการ

หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เหล่านี้ เพื่อช่วยให้เกิดความเรียบผิวที่ดีที่สุดจากกระบวนการเจียรไน

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2], [3], [4] พบว่ามีการศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในการเจียรไนผิวชิ้นงานที่ส่งผลต่อผิวสำเร็จ โดยพบว่าในระหว่างการเจียรไนนั่น แรงตัดหลัก (Main force: F_y) และแรงในแนวรัศมี (Radial force: F_z) จะเพิ่มขึ้นนับจากเมื่อมีการสัมผัสระหว่างขอบของคมตัดกับชิ้นงาน โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ F_y กับ F_z เป็นค่าที่สะท้อนลักษณะการเจียรไนของหินเจียรไน ดังนั้นปัจจัยนี้จึงมีความสำคัญแก่การนำมาวิเคราะห์ในกระบวนการเจียรไน นอกจากนี้ยังพบว่าแรงตัดในกระบวนการเจียรไนมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับความลึกตัด เมื่อแรงตัดมากขึ้น ความลึกตัดก็มากขึ้นด้วยเช่นกัน [2] ดังนั้นจะเห็นว่าแรงตัดส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์มากมายที่มีผลต่อความเรียบผิว โดยทั่วไปแล้ว หากแรงตัด ความลึกตัดและอัตราเร็วตัดเพิ่มขึ้น จะทำให้ความเรียบผิวลดลง เพราะแรงตัดจะส่งผลให้เครื่องเจียรไนเกิดการสั่น ซึ่งการสั่นนี้จะส่งผลให้ผิวชิ้นงานเกิดความขรุขระที่สูงขึ้นได้ [3] นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่ออัตราส่วนแรงตัดต่อความเรียบผิวจะลดลง ซึ่งแสดงว่า เมื่อแรงในแนวรัศมี (Radial Force: F_z) เพิ่มขึ้นมากกว่าแรงตัดหลัก (Main Force: F_y) ความเรียบผิวจะลดลงหรือกล่าวได้ว่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมากขึ้น [4] ดังนั้นแรงตัดจึงเป็นตัวแปรที่น่าสนใจในการถูกนำมาใช้ในการทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการทำนายแรงตัดที่มีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการเจียรไนด้วยเครื่องเจียรไนราบ เพื่อเป็นการปรับปรุงผิวชิ้นงานให้ดีขึ้น และลดโอกาสในการเกิดความเสียหายต่อผิวชิ้นงาน โดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัด อัตราการป้อนตัด ความเร็วรอบ และความลึกในการตัด เพื่อหาสมการทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน

1.1 เครื่องจักรกลอัจฉริยะและเทคโนโลยีเซนเซอร์

เครื่องจักรกลอัจฉริยะถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการต่อระบบการผลิตอัจฉริยะ ซึ่งเครื่องจักรกลอัจฉริยะจะสามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง และมีระบบตรวจติดตามภายในตัวเอง และยังสามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรชนิดอื่นๆได้ เนื่องจากการมีระบบตรวจติดตามภายในตัวเองของเครื่องจักรกลอัจฉริยะ ดังนั้นเครื่องจักรกลอัจฉริยะจะสามารถเปลี่ยนแปลงข้อมูลได้ด้วยตัวเอง ซึ่งจะมีการควบคุมด้วยระบบตัวเลข

จุดประสงค์เพื่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการผลิต เครื่องจักรกลอัจฉริยะจะมีการลดเวลาที่ไม่ได้ผลิตในกระบวนการผลิตลง นอกจากนี้แล้ว ยังมีการนำเซนเซอร์เข้ามาใช้เพื่อพัฒนาเครื่องจักรกลอัจฉริยะ เนื่องจากการใช้เซนเซอร์ เป็นการตรวจติดตามการผลิต และสามารถพัฒนาระบบการผลิตได้ โดยการลดโอกาสในการเกิดของเสียขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้้นำเซนเซอร์วัดแรงหรือไดนามิเตอร์

มาใช้วัดแรงในการเจียรระไนที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงาน และเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป

1.2 ระบบการผลิตอัจฉริยะ

ระบบการผลิตอัจฉริยะ เป็นระบบที่มีความคล่องตัวสูง สามารถตรวจสอบหรือตรวจติดตาม ภายในตัวเองได้ ดังนั้น จึงเป็นระบบที่มีความอัจฉริยะ สามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งการจะ พัฒนาระบบการผลิตแบบอัจฉริยะนี้ ก็ต้องอาศัยโครงข่ายการเชื่อมต่อกันของเครื่องจักรกลอัจฉริยะ ดังนั้นระบบการผลิตอัจฉริยะจึงสามารถรองรับการผลิตที่มีความหลากหลายได้ ลดของเสียที่จะ เกิดขึ้นได้ และยังมีการตรวจสอบระบบได้อย่างทันทั่วทั้งที่ด้วย เนื่องจากเซนเซอร์ที่ใช้ในระบบการผลิต อัจฉริยะสามารถทำการตรวจติดตามการผลิตได้ในระหว่างกระบวนการผลิต ดังนั้นเซนเซอร์จะ สามารถส่งข้อมูลได้ว่าเกิดข้อผิดพลาดในการผลิตขึ้นหรือไม่ ซึ่งเป็นผลให้การผลิตสามารถที่จะหยุด หรือดำเนินต่อไปได้ นอกจากนี้แล้วระบบการผลิตอัจฉริยะยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีการ ตรวจสอบระบบการผลิตตลอดเวลา จึงเป็นการลดของเสียที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมอีกด้วย

1.3 ลักษณะของกระบวนการเจียรระไนในปัจจุบัน

เนื่องจากในปัจจุบันนี้มีการแข่งขันทางด้านธุรกิจมากขึ้น ความเจริญทางด้านเทคโนโลยีสูงขึ้น อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการผลิตสินค้าจึงมีการแข่งขันกันทางด้านคุณภาพมากขึ้น ซึ่งกระบวนการ เจียรระไนเป็นกระบวนการที่มีเป้าหมายเพื่อให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบมากที่สุด และเป็นกระบวนการที่ ใช้กันมาก ไม่ว่าจะเป็นการเจียรระไนอัญมณี เหล็ก หรือแร่ธาตุอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบต่างๆ ที่จำเป็นต้องเจียรระไนแล้วให้ผิวที่เรียบที่สุด เช่น เกียร์ เพลา เป็นต้น

การเจียรระไนส่วนใหญ่ที่เห็นได้ชัดในปัจจุบันจะใช้งานด้านอัญมณี เพชร เพื่อปรับผิว โดย ต้องอาศัยความชำนาญ และความละเอียดอย่างมากที่สุด จึงจะได้รูปทรงหรือความเรียบผิวตามที่ ต้องการ เช่นเดียวกันกับงานในอุตสาหกรรมเหล็ก หากต้องการความเรียบผิวมากที่สุด นอกจากจะ อาศัยความชำนาญแล้ว ยังมีความจำเป็นต้องอาศัยความแม่นยำ หรือความสามารถในการทำนาย ความเรียบผิวที่ต้องการ เพื่อลดเวลา หากเกิดของเสียขึ้น

อุตสาหกรรมรถยนต์ก็เป็นหนึ่งในผู้ใช้หลักในด้านการใช้ชิ้นส่วนประกอบพื้นฐาน ซึ่งวิธีการ แก้ปัญหาสำหรับการเจียรระไนมาจากกระบวนการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์หรือชิ้นส่วนที่มีการ เชื่อมต่อกัน ตัวอย่างเช่น การเจียรระไนเพลาข้อเหวี่ยง (Crankshaft) และเพลาลูกเบี้ยว (Camshaft) เพราะอุตสาหกรรมรถยนต์เป็นหนึ่งในตัวขับเคลื่อนหลักสำหรับการพัฒนาการเจียรระไน โดยลักษณะ ของผิวชิ้นงานที่เป็นผลมาจากกระบวนการของเครื่องจักรและกระบวนการเจียรระไนได้ถูกยอมรับว่ามี ผลอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะของชิ้นงาน อายุการใช้งาน และความน่าเชื่อถือในตัวชิ้นงานนั้น ทั้ง

ความเค้นและอุณหภูมิที่สูงระหว่างกระบวนการเจียรไน ทำให้เกิดช่วงการเปลี่ยนแปลงของวัสดุของชิ้นงานที่บริเวณผิวหน้า โดยมีการเปลี่ยนแปลงเชิงกล เช่น การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก การเปลี่ยนแปลงความแข็ง การแตก และการเกิดความเค้นตกค้าง เป็นต้น [5]

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เหล็กกล้าคาร์บอนชนิด S50C เนื่องจากเหล็กชนิดนี้สามารถทนต่อแรงเสียดสีและแรงยึดพับได้ดี ชุบแข็งได้ง่าย มีความแข็งแรงสูง ใช้ประโยชน์โดยเป็นวัสดุในการทำชิ้นส่วนพื้นฐาน หรือโครงสร้างของแม่พิมพ์และงานทั่วไป เช่น ใช้ในงานเชื่อมทำเหล็กดัด งานฝาท่อ หรือทำแหวนบรลยนต์ เป็นต้น

จะเห็นว่าเหล็กชนิด S50C ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างมากมาย ซึ่งในกระบวนการผลิตนั้น กระบวนการเจียรไนจะเป็นกระบวนการขั้นสุดท้าย ซึ่งหมายความว่า เหล็กต้องผ่านกระบวนการอื่น ๆ มาก่อน เช่น กระบวนการตัด การปาดผิวหน้า เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้ได้ราคาที่ดีที่สุด กระบวนการเจียรไนจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับความเรียบผิวชิ้นงานอย่างมาก ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวชิ้นงานนั้นมีมากมาย ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวชิ้นงานในกระบวนการเจียรไนจึงมีความสำคัญในการยกระดับคุณภาพผิวของชิ้นงาน

1.4 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในกระบวนการผลิตนั้น หากมีความจำเป็นในการใช้เครื่องจักรให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด จะต้องทำการตัดชิ้นงานด้วยอัตราการป้อนตัด ความเร็วรอบ ความลึกตัดที่สูง เพื่อลดเวลาในการผลิตให้น้อยลงมากที่สุด แต่ในกรณีของการเจียรไนนั้น เมื่ออัตราการป้อนตัดสูงขึ้น ค่าความขรุขระผิวจะสูง และหากความเร็วชิ้นงานในการเข้าตัดมีความเร็วสูง จะส่งผลให้ค่าความเรียบผิวสูงขึ้นด้วย ซึ่งปัจจัยที่กล่าวมานั้นจะส่งผลต่อความเรียบผิวชิ้นงาน ซึ่งคุณภาพของผิวชิ้นงานจะมีผลกระทบต่ออัตราการผลิต และต้นทุนได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบ หรือพยากรณ์ทิศทางการดำเนินงานสำเร็จที่จะออกมา ก่อนทำการเจียรไน เพื่อที่จะลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

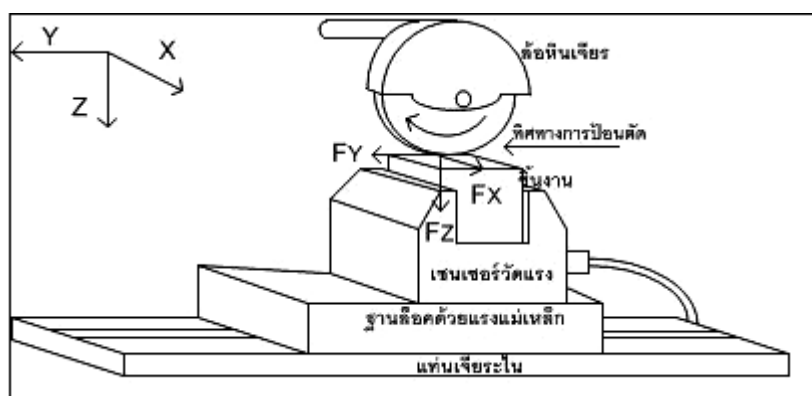
จากงานวิจัยที่ผ่านมา [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13] พบว่าการวิจัยเกี่ยวกับความเรียบผิวชิ้นงานในกระบวนการเจียรไนมีน้อยมาก ในด้านการทำนายความเรียบผิวชิ้นงาน และยังไม่มียานวิจัยใดที่มีการนำอัตราส่วนแรงตัดมาใช้ในการทำนายความเรียบผิวชิ้นงาน ซึ่งกระบวนการเจียรไนนั้น มีปัจจัยที่ควบคุมได้ ซึ่งก็คือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด เป็นต้น ส่วนปัจจัยที่เกิดขึ้นในกระบวนการ คือ การสั่นสะเทือน อุณหภูมิ แรงตัด ซึ่งทั้งปัจจัยทั้ง 2 ประเภทยานั้นได้ส่งผลต่อความขรุขระผิว ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ความขรุขระผิว สามารถกำจัดอิทธิพลที่เกิดจากปัจจัยที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ โดยการนำอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นมาใช้ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวกับแรงตัดที่ใช้ในกระบวนการเจียรไน โดยความ

ขรุขระผิวชิ้นงานสูง แสดงว่าความเรียบผิวชิ้นงานต่ำหรือผิวไม่เรียบ ส่วนความขรุขระผิวชิ้นงานต่ำ แสดงว่าความเรียบผิวชิ้นงานสูงหรือผิวเรียบ

ความสัมพันธ์ของปัจจัยในกระบวนการเจียระไนที่งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อนำมาใช้ในการศึกษา เพื่อสร้างสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานคือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดและความขรุขระผิวชิ้นงาน เนื่องจากแรงตัดในการเจียระไนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพในการเจียระไน เพราะแรงตัดมีผลต่อการเกิดเศษโลหะ การสึกหรบของหินเจียระไน และความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเจียระไน [13] ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานด้วยดังนี้

1. หากแรงตัดที่ใช้มีค่าสูง และเกรนมีขนาดเล็ก จะทำให้หินเจียระไนมีพื้นที่สัมผัสกับผิวชิ้นงานมาก จะทำให้อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานมีค่าสูง เกิดความเค้นตกค้าง (Residual stress) จะทำให้ผิวโลหะเกิดการแตกหักหรือเกิดความเสียหายได้
2. เมื่อใช้แรงตัดสูงขณะทำการเจียระไน จะทำให้หินเจียระไนมีการสึกหรบมาก ซึ่งจะส่งผลให้ผิวชิ้นงานที่มีความเรียบผิวต่ำ
3. ขณะทำการเจียระไน เมื่อใช้แรงตัดสูง ผิวชิ้นงานจะมีแรงต้านสูง ซึ่งจะส่งผลให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะการเจียระไนสูง และทำให้ผิวชิ้นงานที่มีความเรียบผิวต่ำ [14]

จากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดแนวความคิดว่าแรงตัดสามารถนำมาช่วยทำนายค่าความขรุขระผิวได้ โดยงานวิจัยนี้จะใช้อัตราส่วนแรงตัดในทิศความเร็วตัด (Cutting force in the spindle speed direction: F_y) กับแรงตัดในทิศรัศมี (Cutting force in the radial wheel direction: F_z) เนื่องจากการใช้ความสัมพันธ์ของแรงทั้งสองแรงนี้ สามารถจัดอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนไปได้



รูปที่ 1. 1 แรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเจียระไน

รูปที่ 1 แสดงแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเจียรระโน โดยแรงตัด F_x (Cutting force in the feed direction) คือแรงที่เกิดขึ้นในทิศการป้อนตัด แรงตัด F_y (Cutting force in the spindle speed direction) คือแรงตัดที่เกิดขึ้นในทิศความเร็วรอบ และแรงตัด F_z (Cutting force in the radial wheel direction) คือ แรงตัดที่เกิดขึ้นในทิศรัศมีตั้งฉากกับชิ้นงาน

1.5 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานที่เกิดขึ้นในขณะเจียรระโนกับแรงตัดภายใต้เงื่อนไขการเจียรระโนบนเครื่องเจียรระโนราบ

1.6 ขอบเขตการวิจัย

1. กระบวนการเจียรระโนเป็นการเจียรระโนราบ (Horizontal grinding process)
2. ทำการทดลองบนเครื่องเจียรระโนราบ
3. วัสดุทดสอบในการเจียรระโนคือ เหล็กกล้าคาร์บอน S50C กว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร สูง 42 มิลลิเมตร
4. หินเจียรระโนที่ใช้คือ อะลูมิเนียมออกไซด์แบบ A (Regular Aluminium Oxide) ขนาดเกรน 80 เส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร หน้า 1.6 เซนติเมตร
5. ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง มีดังนี้
ค่าความเร็วรอบการหมุนของหินเจียรระโน 2 (จำนวน 2 หินเจียรระโน) ระดับ คือ 3,300 รอบ/นาที และ 6,600 รอบ/นาที
อัตราการป้อนตัด 55, 44, 33, 22 มิลลิเมตร /วินาที
ค่าความลึกในการตัด 0.005, 0.01, 0.015 มิลลิเมตร
6. เซนเซอร์วัดแรง (3-Component Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9121
7. เครื่องวัดความขรุขระผิว (Stylus type roughness)

1.7 ผลที่ได้รับ

ผลการความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะเจียรระโน และเงื่อนไขในการเจียรระโนอื่นๆบนเครื่องเจียรระโนราบ

1.8 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. ทราบถึงอิทธิพลของเงื่อนไขการเจียรระโนและแรงตัดที่เกิดขึ้นที่มีต่อคุณภาพผิวชิ้นงาน

2. เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการตรวจติดตามความชรุขระผิวชิ้นงานในขณะตัด
3. เพิ่มประสิทธิภาพเครื่องเจียระไนเพื่อรองรับเครื่องจักรกลอัจฉริยะสำหรับระบบการผลิตอัจฉริยะในอนาคต

1.9 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาขั้นตอนการใช้เครื่องเจียระไนราบ เครื่องขยายสัญญาณ และเครื่องวัดความชรุขระผิวชิ้นงานตลอดจนวิธีการเก็บสัญญาณข้อมูลต่างๆ
2. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของเงื่อนไขการเจียรต่างๆที่มีผลต่อความชรุขระผิวชิ้นงาน
3. กำหนดระดับของปัจจัยและออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบแฟคทอเรียล
4. ทำการทดลองตามเงื่อนไขต่างๆที่กำหนด โดยระหว่างการทดลองได้มีการแต่งผิวหินเจียระไนทุกเงื่อนไขการทดลอง พร้อมทั้งเก็บสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นด้วยไดนาโมมิเตอร์
5. ทำการวัดค่าความชรุขระผิวชิ้นงานที่เกิดจากเงื่อนไขการเจียระไน
6. หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดและความชรุขระผิวชิ้นงานที่เงื่อนไขการเจียระไนต่างๆ
7. ทำการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการความชรุขระผิวชิ้นงานที่ได้เทียบกับค่า ความชรุขระผิวชิ้นงานจริง
8. สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงานวิจัย
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การเจียรระไน (Grinding)

การเจียรระไนเป็นกระบวนการขจัดเนื้อวัสดุออกด้วยวัสดุขัดสี ซึ่งประกอบด้วยล้อยินเจียรระไน ซึ่งหมุนด้วยความเร็วสูงมาก ล้อยินเจียรระไนจะมีลักษณะกลมเหมือนแผ่นเสียง และมีความแม่นยำสูง ด้วยความเร็วการหมุนสูง

การเจียรระไนจะคล้ายกับกระบวนการกัด (Milling) การตัดจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของหินเจียรระไน เหมือนกับกระบวนการกัดผิวนอก (Peripheral Milling) และการกัดผิวหน้า (Face Milling) การเจียรระไนผิวนอก (Peripheral Grinding) เป็นการเจียรระไนที่ไม่ละเอียดเท่ากับการเจียรระไนผิวหน้า (Face Grinding) ล้อยินเจียรระไนประกอบด้วยคมตัดหรือวัสดุขัดสีมากมาย และชิ้นงานจะสัมผัสกับคมตัดเพื่อให้เกิดการขจัดเนื้อวัสดุออก นอกจากนี้แล้วการเจียรระไนและการกัดยังมีความแตกต่างกันคือ คมตัดในล้อยินเจียรระไนจะมีขนาดเล็กและมีจำนวนมากกว่าคมตัดในการกัด และการเจียรระไนจะเป็นการลับคมตัดไปในตัว [14]

2.1.2 หินเจียรระไน (Grinding Wheel)

หินเจียรระไนประกอบด้วยอนุภาคขัดสี (Abrasive particle) และวัสดุยึดเหนี่ยว (Bonding material) วัสดุยึดเหนี่ยวจะยึดอนุภาคให้อยู่กับที่และก่อให้เกิดรูปร่างและโครงสร้างของหินเจียรระไนขึ้นมา ส่วนประกอบสองอย่างนี้และวิธีการประสานกันทำให้เกิดพารามิเตอร์ของล้อยินเจียรระไน 5 พารามิเตอร์ คือ

2.1.2.1 วัสดุขัดสี (Abrasive material)

วัสดุขัดสีที่ต่างกันจะเหมาะกับการเจียรระไนวัสดุที่แตกต่างกัน คุณสมบัติทั่วไปของวัสดุขัดสีที่ใช้ในล้อยินเจียรระไนรวมไปถึงความแข็ง ความทนต่อการเสียดสี ความเหนียว และความสามารถในการแตกหัก ซึ่งความแข็ง ความทนต่อการเสียดสี และความเหนียวเป็นคุณสมบัติที่ดีของวัสดุที่ใช้ในการตัด ความสามารถในการแตกหักหมายถึงความสามารถของวัสดุขัดสีในการแตกเมื่อขอบของเกรนได้ทื่อไป ดังนั้นจะเกิดคมตัดใหม่ขึ้นมา

ปัจจุบันนี้วัสดุขัดสีที่มีความสำคัญมากในเชิงพาณิชย์คือ อะลูมิเนียมออกไซด์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ คิวบิกโบรอนไนไตรด์ และเพชร

2.1.2.2 ขนาดเกรน (Grain size)

ขนาดเกรนของวัสดุขัดสีมีความสำคัญต่อผิวและอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก ขนาดเม็ดขัด (Grit) เล็กจะได้ผิวงานที่ตีกว่า ขณะที่เกรนใหญ่จะทำให้อัตราการขจัดเนื้อวัสดุมาก ดังนั้นการเลือกขนาดเม็ดขัดขึ้นอยู่กับขอบเขตความแข็งของชิ้นงาน ชิ้นงานที่แข็งต้องใช้เกรนขนาดเล็กเพื่อการตัดที่มีประสิทธิภาพ ขณะที่ชิ้นงานที่มีความอ่อนต้องใช้เม็ดขัดขนาดใหญ่

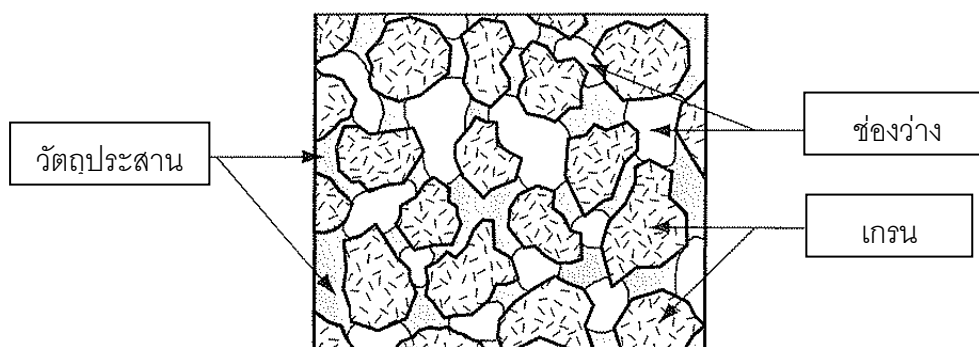
2.1.2.3 วัสดุยึดเหนี่ยว (Bonding materials)

วัสดุยึดเหนี่ยวจะยึดอนุภาคให้อยู่กับที่และก่อให้เกิดรูปร่างและโครงสร้างของหินเจียรระไนขึ้นมา คุณสมบัติที่ดีของวัสดุยึดเหนี่ยวคือ ความแข็งแรง ความเหนียว ความแข็งและความทนต่อความร้อน วัสดุยึดเหนี่ยวจะต้องต้านทานแรงสู่ศูนย์กลาง และอุณหภูมิสูงของหินเจียรระไน ด้านการเกิดเศษโลหะและยึดเกรนไว้อย่างแน่นเพื่อให้การตัดเป็นไปอย่างสมบูรณ์ เมื่อเกรนหลุดออกไปจะเกิดคมตัดใหม่ขึ้นมา

2.1.2.4 โครงสร้างของหินเจียรระไน (Wheel structure)

โครงสร้างของหินเจียรระไนบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างของเกรนในหินเจียรระไน (Air gaps, pores) ดังรูปที่ 2.1 อัตราส่วนโดยปริมาตรของเกรน วัสดุยึดเหนี่ยว และช่องว่างสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1

$$P_g + P_b + P_p = 1 \quad (1)$$



รูปที่ 2.1 เกรน วัสดุยึดเหนี่ยว และช่องว่าง [14]

โดย P_g = อัตราส่วนของเกรนในปริมาตรทั้งหมดของหินเจียรระไน

P_b = อัตราส่วนของวัสดุยึดเหนี่ยวในปริมาตรทั้งหมดของหินเจียรระไน

P_p = อัตราส่วนของช่องว่างในปริมาตรทั้งหมดของหินเจียรระไน

2.1.2.5 เกรดของหินเจียรไน (Wheel grade)

บ่งบอกถึงความแข็งแรงของวัสดุยึดเหนี่ยวที่ยึดเกรนไว้ขณะการตัด เกรดแบ่งออกเป็นช่วง ตั้งแต่ ความแข็งต่ำ (Soft) ไปจนถึงความแข็งสูง (Hard) โดยเกรดความแข็งต่ำจะบอกว่าเสียเกรนจากหินเจียรไนง่าย ส่วนความแข็งสูงจะบอกถึงว่าหินเจียรไนจะยังคงรักษาเกรนไว้ได้ หินเจียรไนที่มีความแข็งต่ำจะใช้สำหรับเจียรชิ้นงานที่มีความแข็งสูงและมีอัตราการกำจัดวัสดุต่ำ หินเจียรไนที่มีความแข็งสูงจะใช้สำหรับเจียรชิ้นงานที่มีความแข็งต่ำและมีอัตราการกำจัดวัสดุสูง

2.1.3 กระบวนการเจียรไน

ในกระบวนการเจียรไนจะใช้ความเร็วสูงมากและเศษวัสดุที่หลุดออกมาจากการเจียรไนจะเล็กมาก รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเจียรไน ความเร็วในการตัดถูกกำหนดให้เป็นความเร็วในการหมุนของหินเจียรไน ซึ่งคือ

$$v = \pi DN \quad (2)$$

โดยที่ v คือ ความเร็วผิวหน้าของหินเจียรไน (เมตร/นาที)

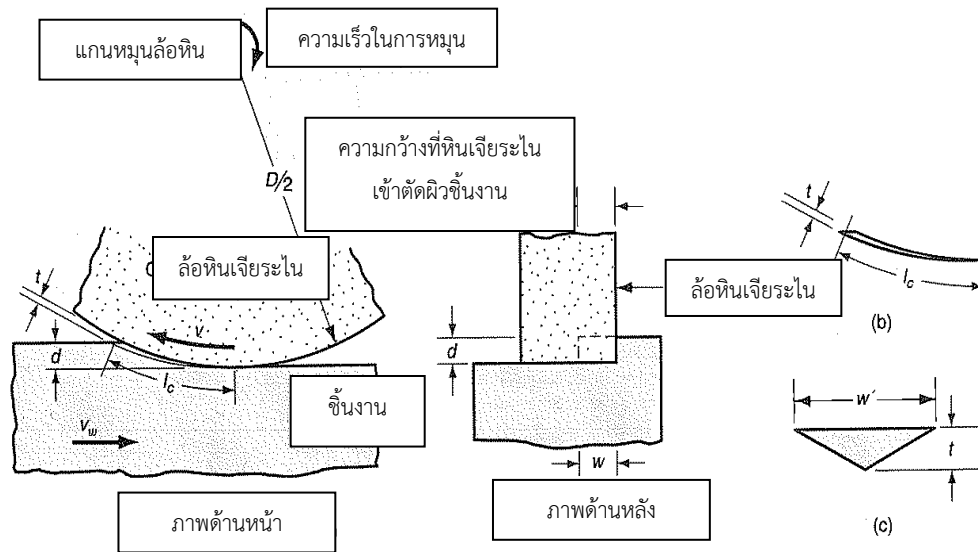
N คือ ความเร็วของแกนหมุน (รอบ/นาที)

D คือ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของหินเจียรไน (เมตร)

ความลึกตัด d คือความหนาในการเจียรไน ซึ่งหินเจียรไนได้เจียรไนผิวชิ้นงานจากระดับผิวเดิมของชิ้นงาน ในกระบวนการนี้หินเจียรไนจะเคลื่อนผ่านผิวชิ้นงานเป็นรอบๆ ซึ่งเรียกว่า ความกว้างที่หินเจียรไนตัดผิวชิ้นงาน (cross feed) ใช้เป็นตัวกำหนดความกว้างของเส้นทางการเจียรไน w ตามรูปที่ 2.2(a) ความกว้างนี้คูณด้วยความลึกตัด d จะได้พื้นที่ในการตัด ในกระบวนการเจียรไนชิ้นงานเคลื่อนที่ผ่านหินเจียรไนด้วยความเร็วคงที่ v_w ดังนั้นจะได้อัตราการกำจัดเนื้อวัสดุคือ

$$R_{MR} = v_w w d \quad (3)$$

เกรนบนหินเจียรไนจะเข้าตัดเศษโลหะ (Chip) ดังรูปที่ 2.2(b) และถูกสมมติว่าพื้นที่เศษโลหะเป็นรูปสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 2.2(c) โดยมีความสูง t และความกว้าง w'



รูปที่ 2. 2 ลักษณะการเข้าตัดผิวชิ้นงาน [14]

ในกระบวนการเจียรระโน เราสนใจความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดกับพารามิเตอร์ของหินเจียรระโนซึ่งมีผลต่อความเรียบผิวชิ้นงาน แรงและพลังงาน อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงาน และการสึกหรอของหินเจียรระโน

2.1.4 ความเรียบผิวชิ้นงาน

ความเรียบผิวชิ้นงานมีผลเนื่องมาจากขนาดของเศษโลหะที่เกิดขึ้นขณะการเจียรระโน ปัจจัยที่สังเกตได้ชัดเจนที่มีผลต่อขนาดของเศษโลหะคือขนาดของเกรน ยิ่งเกรนมีขนาดเล็กก็จะทำให้ได้ผิวชิ้นงานที่เรียบขึ้น

จำนวนเม็ดตัด (Grit) ต่อตารางนิ้วบนผิวรอบนอกของหินเจียรระโน ถูกแทนด้วย C ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับขนาดของเม็ดตัด C มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของหิน โครงสร้างที่มีความหนาแน่น หมายถึงการมีจำนวนเม็ดตัดมากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ n_c คือจำนวนของเศษโลหะที่เกิดขึ้น

$$n_c = vwc \quad (4)$$

โดยที่ v คือ ความเร็วของหินเจียรระโน (มิลลิเมตร/นาที, นิ้ว/นาที)

w คือ ความกว้างในการตัด (มิลลิเมตร, นิ้ว)

c คือ จำนวนเม็ดตัดต่อตารางนิ้ว (กริท/ตารางนิ้ว)

2.1.5 พลังงาน

พลังงานจำเพาะในการเจียรระโน

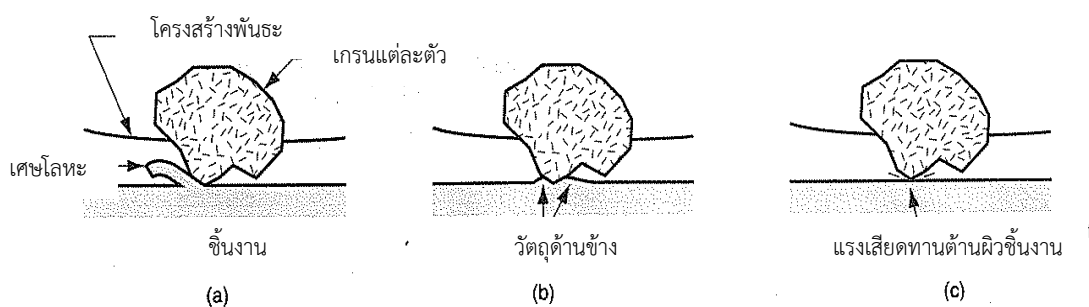
พลังงานจำเพาะในการเจียรระโนจะมากกว่าการใช้เครื่องจักรอื่นๆ ซึ่งมีหลายเหตุผลดังนี้

- 1) เศษโลหะมีขนาดเล็กกว่าการใช้เครื่องจักรอื่นๆ ซึ่งทำให้เกิดการใช้พลังงานสูงกว่าการใช้เครื่องจักรอื่นๆ ประมาณ 10 เท่าเพื่อขจัดเศษโลหะนั้น
- 2) เกรนบางส่วนไม่ได้สัมผัสกับผิวชิ้นงาน เนื่องจากการเจียรเป็นการสุมตำแหน่งของเกรน ซึ่งการกระทำของเกรนมี 3 แบบ คือ

2.1) การตัด (Cutting) คือ การที่เม็ดขัดมีตำแหน่งตรงกับผิวหน้าชิ้นงาน ในระยะที่ไกลพอที่จะเข้าไปในผิวหน้าชิ้นงาน แล้วทำให้เกิดเศษโลหะหลุดออกมาได้ ดังรูปที่ 2.3(a)

2.2) การไถ (Plowing) คือ เม็ดขัดมีตำแหน่งตรงกับผิวหน้าชิ้นงาน แต่ไม่ไกลพอที่จะทำให้เกิดการตัดได้ ทำให้ผิวชิ้นงานเสียรูป แต่ไม่มีการหลุดของเศษโลหะ ดังรูปที่ 2.3(b)

2.3) การเสียดสี (Rubbing or friction) คือ การที่เม็ดขัดสัมผัสกับผิวชิ้นงานขณะที่เกิดการถู แต่มีเพียงแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน โดยไม่มีการหลุดของเศษโลหะ ดังรูปที่ 2.3(c) [14]

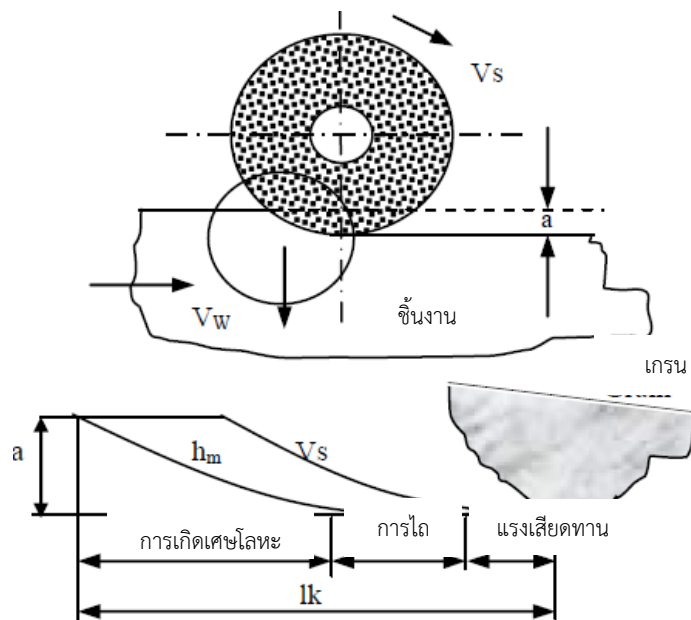


รูปที่ 2. 3 เกรนที่กระทำกับผิวชิ้นงานในแต่ละแบบ [14]

2.1.6 การเกิดเศษโลหะขณะเจียรระโน

การเกิดเศษโลหะขณะเจียรระโนแบ่งได้เป็น 3 สถานะ คือ การเสียดสีหรือเสียดทาน (Rubbing or friction) การไถ (Plowing) และการตัด (Cutting) ในการตัดช่วงแรกเข้าตัดชิ้นงาน หินเจียรระโนจะเสียดสีบนผิวหน้าชิ้นงานมากกว่าเกิดการตัด เนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) ของระบบ ซึ่งเรียกว่าเกิดสถานะเสียดทาน (Friction stage) และเมื่อความยืดหยุ่นถึงขีดจำกัดแล้ว จะกลายเป็นสถานะพลาสติกระหว่างชิ้นงานและเม็ดขัดหรือเกรน สถานะนี้

เรียกว่าการไถ และเมื่อเกิดการไถไปเรื่อยๆ จนกระทั่งผิวชั้นงานไม่สามารถทนต่อความเค้นที่ผิวได้ จะเกิดเศษโลหะขึ้นมา การเกิดเศษโลหะนี้จัดว่าเป็นการตัด [6] ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2. 4 การเกิดเศษโลหะ [6]

2.1.7 อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงาน

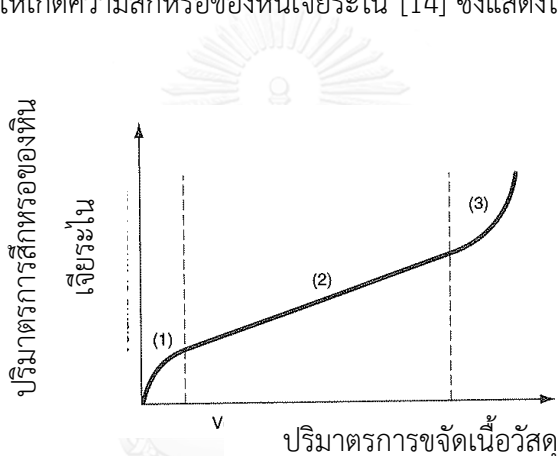
ในการเจียรระไนจะมีอุณหภูมิสูงและแรงเสียดทานสูงมาก ซึ่งจะไม่เหมือนกับการใช้เครื่องจักรอื่นๆ ซึ่งความร้อนจะเกิดขึ้นและเสียไปกับเศษโลหะ พลังงานส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในการเจียรระไนจะอยู่ที่ผิวหน้า ทำให้อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานสูง ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อผิวชิ้นงานหลายแบบดังนี้

1. ผิวชิ้นงานมีรอยไหม้และแตก รอยไหม้แสดงถึงความเสียหายของโลหะภายใต้ผิว ส่วนรอยแตกที่เกิดขึ้นจะแตกในแนวตั้งฉากกับความเร็วของหินเจียรระไน ความเสียหายสองแบบนี้เป็นความเสียหายที่รุนแรงต่อผิวชิ้นงาน
2. ผิวชิ้นงานจะอ่อนตัว ในการเจียรระไนส่วนใหญ่จะทำให้ผิวแข็งแรงขึ้น แต่อุณหภูมิที่สูงในการเจียรจะทำให้ผิวชิ้นงานอ่อนตัวลง
3. เกิดความเค้นตกค้างบนผิวชิ้นงาน ซึ่งเป็นการลดความแข็งแรงต่อการล้าตัว [14]

2.1.8 การสึกหรอของหินเจียรระไน

มี 3 ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการสึกหรอของหินเจียรระไน

1. การแตกของเกรนเกิดขึ้นเมื่อมีเกรนบางส่วนแตก และหลุดออกมา แต่เกรนส่วนใหญ่ยังคงอยู่ที่หินเจียรระไน โดยขอบตรงส่วนที่เกรนแตกและหลุดออกไปจะกลายเป็นคมตัดใหม่ขึ้นมา ซึ่งแนวโน้มในการแตกหัก เรียกว่า ความสามารถในการแตกหัก (Friability) ถ้าค่าความสามารถในการแตกหักมีค่าสูง แสดงว่า เกรนมีความพร้อมที่จะแตกหักได้เนื่องมาจากแรงตัดบนเกรน
 2. ความคมของเกรนลดลง ซึ่งรวมถึงความถี่ของเกรน ทำให้เกิดรอยแบนและมนบนคมตัด ซึ่งจะก่อให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุขัดสีกับผิวชิ้นงานในอุณหภูมิที่สูงมาก
 3. การหลุดของเกรน เกิดเมื่อเกรนถูกดึงออกจากวัตถุยึดเหนี่ยว การหลุดของเกรนนี้จะขึ้นอยู่กับเกรดของหินเจียรระไน โดยปกติแล้วการหลุดของเกรนจะเกิดขึ้นเมื่อ เกรนมีความถี่
- โดยทั้ง 3 ปัจจัยนี้ก่อให้เกิดความรู้สึกหยาบของหินเจียรระไน [14] ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2. 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสกัดหรือของหินเจียรระไนกับปริมาณการขัดเนื้อวัสดุ [14]

จากรูปที่ 2.5 กราฟถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เกรนยังมีความคมอยู่ และการสึกหรอมีผลจากการแตกหักของเกรน ส่วนที่ 2 อัตราการสึกหรอคงที่ โดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างความรู้สึกหยาบของหินเจียรระไนกับปริมาณเนื้อวัสดุที่ถูกขัดออก ซึ่งในส่วนนี้เรียกว่าเป็น การแตกของเกรน ในส่วนที่ 3 กราฟเป็นเส้นโค้ง เกรนที่อ่อนแล้วและปริมาณของการไถและการเสียดสีมีมากขึ้น

2.1.9 ผิวชิ้นงาน (Surfaces)

ผิวชิ้นงาน คือสิ่งที่เราสัมผัสเมื่อเราถือสิ่งของ นักออกแบบได้กำหนดส่วนของมิติ ว่าเป็นผิวหลายๆผิวที่มีความสัมพันธ์กัน ผิวชิ้นงานในอุดมคติ (Nominal surface) เป็นผิวที่มีลักษณะสมบูรณ์

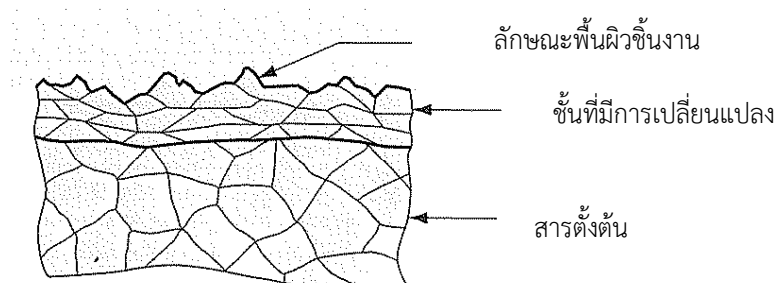
เช่น วงกลม สี่เหลี่ยม เป็นต้น ผิวชิ้นงานจริงเป็นผิวที่เกิดจากการกระบวนการผลิต ซึ่งในกระบวนการผลิตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากมายในด้านลักษณะของผิวชิ้นงาน

ผิวชิ้นงานเป็นสิ่งที่มีความสำคัญทั้งด้านเทคโนโลยีและเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีเหตุผลแตกต่างกันไปตามวิธีการใช้ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ต่างๆ

1. เหตุผลด้านความงามหรือสุนทรียศาสตร์ (Aesthetic reason) ผิวชิ้นงานที่เรียบและไม่มียรอยขีดข่วนหรือรอยต่างพร้อย จะทำให้ลูกค้าประทับใจ
2. ลักษณะผิวชิ้นงานส่งผลต่อความปลอดภัยในด้านการใช้งาน
3. ความเสียดทานและการสึกหรอขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวชิ้นงาน
4. ผิวชิ้นงานส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและกลไก เช่น ผิวที่มีมลทินสามารถก่อให้เกิดความเครียดของวัตถุได้
5. การประกอบส่วนประกอบที่ได้รับผลจากผิวชิ้นงาน เช่น ความแข็งแรงของข้อต่อจะเพิ่มขึ้นเมื่อผิวมีความขรุขระเล็กน้อย
6. ผิวชิ้นงานที่เรียบจะก่อให้เกิดการส่งผ่านไฟฟ้าที่ดี [14]

2.1.10 ลักษณะของผิวชิ้นงาน (Characteristics of surfaces)

การศึกษาอย่างละเอียดในส่วนของผิวชิ้นงานจะกล่าวถึงความผิดปกติและความไม่สมบูรณ์ ลักษณะผิวชิ้นงานโดยทั่วไปจะอธิบายได้ด้วยภาพพื้นที่หน้าตัดของโลหะ ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งโครงสร้างสารตั้งต้นจะขึ้นอยู่กับกระบวนการก่อนหน้าของโลหะ เช่น โครงสร้างสารตั้งต้นของโลหะมีผลกระทบจากส่วนประกอบทางเคมี กระบวนการหล่อดั้งเดิมที่ใช้กับโลหะ และกระบวนการที่ทำให้เกิดการผิดรูปต่างๆและความร้อนจากการหล่อ

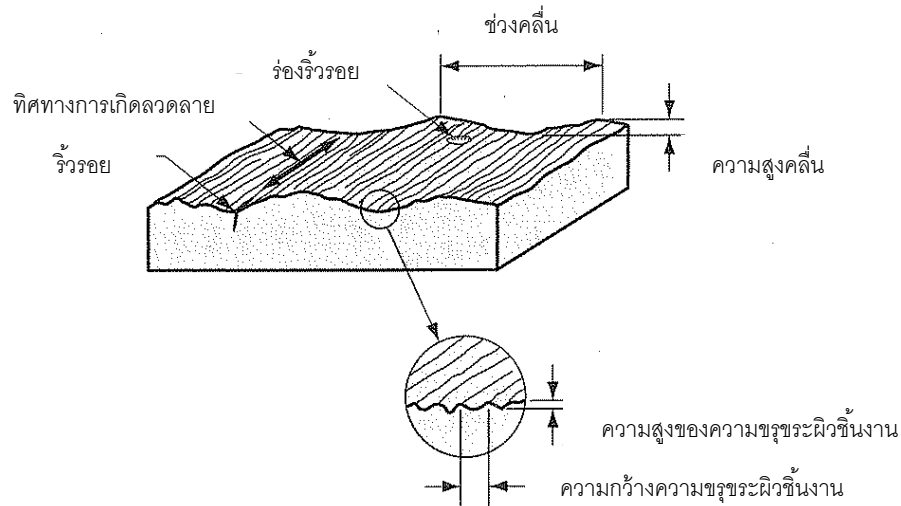


รูปที่ 2. 6 ลักษณะผิวชิ้นงาน [14]

ส่วนด้านใต้ต่อจากผิวคือ ชั้นของโลหะ ซึ่งมีโครงสร้างต่างจากสารตั้งต้น ซึ่งถูกเรียกว่า ชั้นที่มีการเปลี่ยนแปลง (Altered layer) ผลของ Altered layer อาจจะมีผลมาจากการชุบผิวแข็ง (Hardening) การให้ความร้อน (Heating) การบำบัดทางเคมี (Chemical treatment) หรือแม้แต่พลังงานไฟฟ้า โลหะในชั้นนี้ได้รับผลกระทบจากการใช้พลังงาน และโครงสร้างระดับอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลง

2.1.11 พื้นผิวชิ้นงาน (Surface texture)

พื้นผิวประกอบด้วย การเบี่ยงเบนแบบซ้ำไปซ้ำมา จากผิวจากผิวในอุดมคติของวัตถุ ซึ่งพื้นผิวมี 4 ลักษณะ คือ ความขรุขระ (roughness) การเกิดคลื่น (waviness) การเกิดลวดลาย (Lay) และการเกิดริ้วรอย (Flaw) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2. 7 ลักษณะพื้นผิวชิ้นงาน [14]

1. ความขรุขระ (roughness) คือ การเกิดช่องว่างเล็กๆขึ้น ซึ่งต่างจากผิวในอุดมคติ โดยเกิดขึ้นจากลักษณะของวัสดุและกระบวนการผลิต
2. การเกิดคลื่น (waviness) คือ การเกิดช่องว่างขนาดใหญ่ขึ้นบนผิว ซึ่งเกิดจากการหักเหของชิ้นงาน การสั่น ความร้อน และปัจจัยอื่นๆ ความขรุขระเกิดขึ้นมากที่สุดในแบบของการเกิดคลื่น
3. การเกิดลวดลาย (Lay) เป็นรูปแบบที่เด่นของพื้นผิว ซึ่งเกิดจากเครื่องมือตัด รูปที่ 2.7 ลักษณะริ้วรอยบนพื้นผิวที่เกิดขึ้นได้

4. การเกิดริ้วรอย (Flaw) เป็นสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นบนผิวในบางโอกาส ซึ่งรวมทั้ง การแตกหัก รอยขีดข่วน และมลทิน [14]

2.1.12 ความขรุขระผิวและความเรียบผิวชิ้นงาน (Surface roughness and surface finish)

ความขรุขระผิวชิ้นงาน คือลักษณะผิวที่วัดได้ ส่วนความเรียบของผิว แสดงถึงความเรียบและคุณภาพทั่วไปของผิว โดยทั่วไปความขรุขระผิวถูกใช้แทนกับความเรียบผิวชิ้นงาน

วิธีการวัดพื้นผิวชิ้นงานโดยทั่วไป คือการวัดความขรุขระผิวที่สามารถถูกกำหนดค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ยแทนตั้งวัดจากผิวที่สมบูรณ์ที่สุด โดยใช้วิธีการเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ (Arithmetic Average: AA) ซึ่งค่าความขรุขระเฉลี่ยคือ

$$R_a = \int_0^{L_m} \frac{|y|}{L_m} dx \quad (5)$$

โดยที่ R_a คือ ค่าความขรุขระเฉลี่ย

y คือ ค่าเบี่ยงเบนแทนตั้งจากผิวที่สมบูรณ์ที่สุด

L_m คือ ระยะทางที่เบี่ยงเบนไป

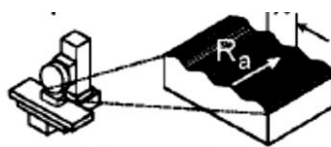
หรืออาจใช้สมการ

$$R_a = \sum_{i=1}^n \frac{|y_i|}{n} \quad (6)$$

โดยที่ n คือ จำนวนค่าเบี่ยงเบน

2.1.13 การวัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน

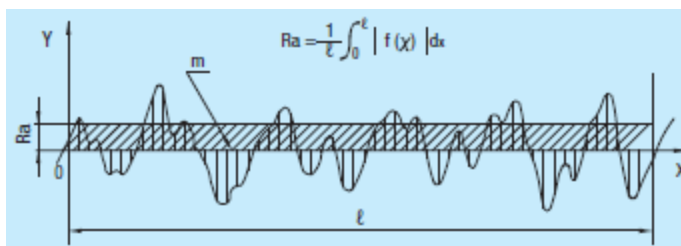
การวัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสำหรับการเจียรระโน เป็นการวัดในแนวตั้งฉากกับทิศทางในการเจียรระโน ซึ่งพบว่าค่าความขรุขระผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความไม่สมดุลของน้ำหนักรินเจียรระโนเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.8 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความขรุขระผิวของชิ้นงานเมื่ออยู่ในเงื่อนไขความไม่สมดุลที่ต่างกัน



รูปที่ 2. 8 การวัดค่าความขรุขระผิว [15]

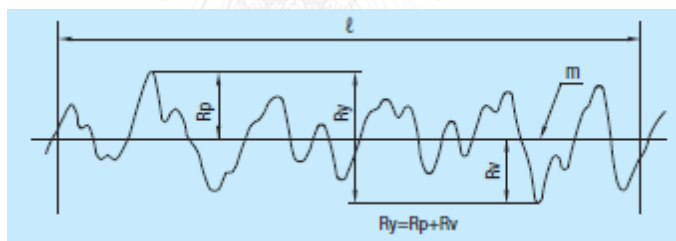
2.1.14 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน

ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Average surface roughness: Ra) คือ ค่าเฉลี่ยวัดจากกราฟความขรุขระผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง ค่าแกน x คือ ค่าเฉลี่ย ค่าแกน y คือ ค่าความขรุขระผิว ดังสมการรูปที่ 2.9 โดยมีหน่วยการวัดคือ ไมโครเมตร (μm)



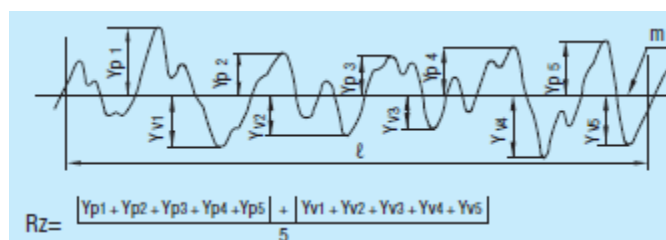
รูปที่ 2. 9 ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (Average surface roughness: Ra) [16]

ความขรุขระผิวสูงสุด (Maximum height: Ry) คือ ค่าที่วัดจากกราฟความขรุขระผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง เป็นระยะที่เกิดจากระยะกราฟสูงสุดและต่ำสุด ดังสมการรูปที่ 2.10 โดยมีหน่วยการวัดคือ ไมโครเมตร (μm)



รูปที่ 2. 10 ค่าความขรุขระผิวสูงสุด (Maximum height: Ry) [16]

ความขรุขระผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด (Ten spot average surface roughness: Rz) คือ ค่าที่วัดจากกราฟความขรุขระผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง โดยคำนวณจากค่าความสูงของยอดกราฟบน 5 จุด และยอดกราฟล่าง 5 จุดแล้วมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ย ดังสมการรูปที่ 2.11 โดยมีหน่วยการวัดคือ ไมโครเมตร (μm)



รูปที่ 2. 11 ความขรุขระผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด (Ten spot average surface roughness: Rz) [16]

2.1.15 การวิเคราะห์ความถดถอย (Multiple Regression)

2.1.15.1 รูปแบบของสมการความถดถอยเชิงพหุคูณ

การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นที่ทำหน้าที่พยากรณ์ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป กับตัวแปรตาม 1 ตัว ในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณนั้นจะต้องหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation Coefficient) เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามว่ามีลักษณะความสัมพันธ์กันเช่นใด สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ จะต้องหาสมการถดถอยเพื่อใช้ในการพยากรณ์ของตัวแปรตาม (Y) และหาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน รวมทั้งหาค่าสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation) เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่เป็นไปได้สูงสุดระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม รูปแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณที่มีตัวแปรถดถอย k ตัว มีรูปแบบดังสมการที่ 7

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + e \quad (7)$$

พารามิเตอร์ $\beta_j, j = 0, 1, \dots, k$ ถูกเรียกว่าสัมประสิทธิ์การถดถอย แบบจำลองนี้แสดงระนาบแบบระนาบเกิน (Hyperplane) ที่มีมิติ k ของตัวแปรถดถอย พารามิเตอร์ β_j แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ y ต่อหนึ่งหน่วยของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ x_j เมื่อตัวแปรอิสระที่เหลือ $x_i (i \neq j)$ มีค่าคงตัว [17], [18]

2.1.16 สมมติฐานหรือเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ

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

2.1.17 การวิเคราะห์ผล

2.1.17.1 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

การสรุปผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่งคือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ค่า α หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด โดย P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value จะแสดงถึงค่าที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถข้อสรุปผลการทดลองที่

ระดับนัยสำคัญอื่นๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0

โดยปกติแล้วค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 ถูกปฏิเสธ ดังนั้นเราอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็น α ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ เมื่อรู้ค่า P-Value แล้วผู้ทดลองก็จะสามารถทราบว่าคุณสมบัติมีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน [19]

2.1.18 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2)

การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบด้วยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอยหรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนเท่าใด ค่า R^2 ยิ่งมาก สมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจมีความไวในการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป จึงนิยมใช้ค่าที่ทำการปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) แทน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2. 1 งานวิจัยความเรียบผิวชิ้นงานจากการเจียรระไนที่ผ่านมา

1. งานวิจัย	Mathematical Modeling of Surface Roughness in Surface Grinding Operation [6]
เงื่อนไขการตัด	อัตราการป้อนตัด, ความเร็วชิ้นงาน
รายละเอียด	ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจากการเจียรระไนเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology: RSM) และใช้ ANOVA ตรวจสอบความถูกต้องของสมการ ซึ่งสมการทำนายค่าความขรุขระผิวที่ถูกพัฒนาขึ้นมาี้แสดงให้เห็นว่า อัตราการป้อนตัด (Feed rate) และความเร็วชิ้นงาน (Work speed) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความขรุขระผิว โดยค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะต่ำเมื่อใช้อัตราการป้อนตัดและความเร็วชิ้นงานต่ำ
ข้อจำกัด	แบบจำลองที่ได้มาไม่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดอื่นๆ

	เช่น ความลึกตัด หรือขนาดเกรนได้ เพราะสมการที่ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนตัด และความเร็วชิ้นงานเท่านั้น
2. งานวิจัย	Workpiece Surface Roughness Prediction in Grinding Process for Different Disc Dressing Conditions [7]
เงื่อนไขการตัด	อัตราเร็วหัวเพชรต่ออัตราเร็วหินเจียรไน, ความลึกตัดในการแต่งหินเจียรไน, อัตราการป้อนตัดของหัวเพชร
รายละเอียด	ได้ออกแบบโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมแบบฟีดฟอร์เวิร์ดหรือ Feed forward back propagation neural network (FFBP-NN) เพื่อวัดค่าความขรุขระผิวในกระบวนการเจียรไน เมื่อหินเจียรไนถูกแต่งโดยหัวเพชร (Diamond disc dresser) ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากโมเดลคือ ค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยพบว่าความขรุขระผิวชิ้นงานเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดต่อผิวชิ้นงานในกระบวนการเจียรไน ผิวชิ้นงานได้รับอิทธิพลมาจากผิวของหินเจียรไน และหินเจียรไนควรได้รับการแต่ง ก่อนที่ผิวจะเสื่อมสภาพจากเดิมหรือที่อ เพื่อที่จะได้ผิวหินเจียรไนที่ดีที่สุด
ข้อจำกัด	งานวิจัยนี้เน้นในเรื่องความขรุขระผิวชิ้นงานที่ได้รับอิทธิพลมาจากลักษณะผิวของหินเจียรไนเท่านั้น ไม่ได้พิจารณาเงื่อนไขการตัดอื่นๆของชิ้นงาน
3. งานวิจัย	An Investigation into the Influences of Grain Size and Grinding Parameters on Surface Roughness and Grinding Forces when Grinding [8]
เงื่อนไขการตัด	ขนาดเกรนของหินเจียรไน และความลึกตัด
รายละเอียด	ได้ทดสอบผลจากขนาดเกรนบนหินเจียรไน และพารามิเตอร์การเจียรไน (ขนาดเกรนของหินเจียรไน และความลึกในการตัด) ที่มีผลต่อความขรุขระผิว ผลที่ได้คือ เมื่อขนาดเกรนเล็กลงหรือปริมาณเกรนมากขึ้น ค่าความขรุขระผิวจะน้อยลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อขนาดเกรนใหญ่ขึ้นหรือปริมาณเกรนน้อยลง ค่าความขรุขระผิวจะมากขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขนาดเกรนมีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน ขณะที่ความลึกในการตัดมีผลน้อยมากต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน

ข้อจำกัด	ผลที่ได้จากการทดลองไม่สามารถนำมาทำนายค่าความขรุขระผิวได้ เมื่อเงื่อนไขอื่นๆในการเจียรระโนเปลี่ยนไป
4. งานวิจัย	Use of Surface Roughness Measurements to Improve the Estimation of the Heat Partition in Grinding [9]
เงื่อนไขการตัด	ความลึกตัด, อัตราการป้อนตัด และความเร็วหินเจียรระโน
รายละเอียด	การจำลองนี้เป็นการจำลองที่ใช้คำนวณความร้อนที่เกิดขึ้นขณะการเจียรระโน แล้วเข้าไปสู่ผิวชิ้นงาน หากความร้อนมากเกินไปอาจทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายได้ ซึ่งส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน ผลที่ได้คือ ค่าความขรุขระผิวจะเพิ่มขึ้น อุณหภูมิจะลดลง เมื่ออัตราการป้อนตัดในการแต่งหินเจียรระโนเพิ่มขึ้น และมีความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของหินเจียรระโน ความขรุขระผิว และอุณหภูมิชิ้นงาน ซึ่งได้สมการคือ $r_0 = \frac{k}{R_a}$
ข้อจำกัด	งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อคำนวณความร้อนแล้วส่งผลกระทบต่อผิวชิ้นงาน ไม่ได้พิจารณาลักษณะผิวชิ้นงานโดยตรง
5. งานวิจัย	A new model for grinding force prediction and analysis [10]
เงื่อนไขการตัด	ความเร็วของหินเจียรระโน ความเร็วของฐานวางชิ้นงาน และความลึกตัด
รายละเอียด	สร้างแบบจำลองการหาค่าแรงในการเจียรระโน แรงตัดหลัก (Main force: F_y) และแรงในแนวรัศมี (Radial force: F_z) โดยได้คำนึงถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วย ผลการทดลองคือ เมื่อแรงทั้งสองแกนคือแรงตัดหลัก (Main force: F_y) และแรงในแนวรัศมี (Radial force: F_z) มีค่ามากขึ้น ความเร็วของชิ้นงานและ ความลึกตัดก็จะมากขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อแรงดังกล่าวน้อยลง ความเร็วของหินเจียรระโนจะมากขึ้น และยังพบว่า หากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากขึ้น ความเร็วหินเจียรระโนจะมากขึ้นด้วย
ข้อจำกัด	แบบจำลองที่ได้มาเป็นเพียงแค่การทำนายค่าแรงตัด ซึ่งไม่สามารถบ่งบอกถึงสภาพผิวชิ้นงานได้
6. งานวิจัย	The simulation of grinding wheels and ground surface

	roughness based on virtual reality technology [11]
เงื่อนไขการตัด	ความลึกตัด, อัตราการป้อนตัด และความเร็วรอบ
รายละเอียด	ได้ศึกษาความเป็นไปได้และวิธีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเสมือนจริง (Virtual reality technology) และจำลองเอกลักษณ์ของวัสดุขึ้นมาในสิ่งแวดล้อมเสมือนจริง โดยใช้ในการศึกษาหินเจียรไนและความขรุขระผิวชิ้นงาน ในการจำลองจะใช้โปรแกรม Visual C++ programming language และในการจำลองหินเจียรไนและผิวชิ้นงาน 3 มิติ ด้วย OpenGL tool ในการทดลองจะพบว่าการใช้โปรแกรม Visual C++ programming language และในการจำลองหินเจียรไนและผิวชิ้นงาน 3 มิติ ด้วย OpenGL tool สามารถทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานได้
ข้อจำกัด	แบบจำลองนี้เป็นการทดลองในโปรแกรม เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้จริงแล้ว หากมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยอื่นในการการตัดที่อยู่เหนือการควบคุม อาจเกิดความผิดพลาดได้
7. งานวิจัย	Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear, Wear [12]
เงื่อนไขการตัด	จำนวนเกรน การเคลื่อนที่ของหินเจียรไนและชิ้นงาน
รายละเอียด	ได้ตรวจสอบการเตรียมผิวชิ้นงานที่ได้รับอิทธิพลจากพารามิเตอร์ที่ก่อให้เกิดความขรุขระและความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ความขรุขระและแรงเสียดทานและการสึกหรอของเครื่องมือ ผลที่ได้คือความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความขรุขระผิวชิ้นงานกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
ข้อจำกัด	งานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของแรงเสียดทานที่พื้นผิวที่มีความขรุขระต่างๆกัน แต่ไม่สามารถนำมาใช้ทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานได้
8. งานวิจัย	Modeling and experimental study of grinding forces in surface grinding [13]
เงื่อนไขการตัด	ความเร็วหินเจียรไน ความเร็วชิ้นงาน และความลึกตัด
รายละเอียด	พัฒนาสมการทำนายแรงตัดในกระบวนการเจียรไน โดยได้ทำการศึกษา

	<p>ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในกระบวนการเจียรไนแบบ 2 มิติ ซึ่งประกอบด้วยแรงตัดหลัก (Main force: F_y) และแรงในแนวรัศมี (Radial force: F_z) โดยทั้ง 2 แรงแนั้นประกอบด้วยแรงในการเกิดเศษโลหะ และแรงในการเคลื่อนที่ ผลที่ได้คือความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ทั้งสองกับความเร็วขึ้นงาน</p>
<p>ข้อจำกัด</p>	<p>แบบจำลองแรงตัดที่ได้มาไม่สามารถบ่งบอกถึงสภาพผิวขึ้นงานได้</p>



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) [18] และทำนำข้อมูลจากการทดลอง เพื่อนำมาสร้างสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการโดยการใช้อัตราส่วนแรงตัดในการเจียรระไนเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S50C ด้วยหินเจียรระไนชนิดอะลูมิเนียมออกไซด์แบบ A (Regular Aluminium Oxide) จำนวนเม็ดขัดคือ 80 เส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร หนา 1.6 เซนติเมตร

3.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการเจียรระไน

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [6], [7], [8], [10], [13] มีการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานในกระบวนการเจียรระไน ซึ่งพบว่ามีปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวชิ้นงานดังนี้ ความเร็วรอบ อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และแรงตัด ดังนั้นปัจจัยเหล่านี้จะถูกพิจารณาเพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ที่มีต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน และใช้พัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานโดยประยุกต์ใช้แรงตัดสถิตในการเจียรระไนเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S50C ด้วยหินเจียรระไนชนิดอะลูมิเนียมออกไซด์แบบ A (Regular Aluminium Oxide) ขนาดเกรน 80 เส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร หนา 1.6 เซนติเมตร

3.1.2 การกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

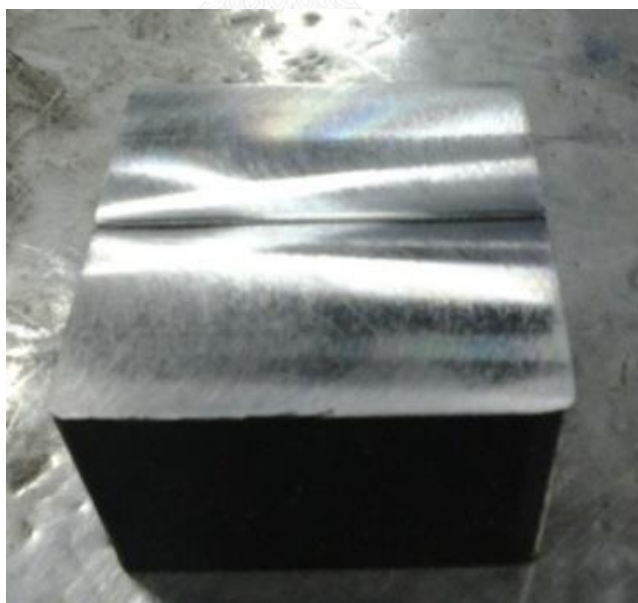
ในกระบวนการเจียรระไนนั้น เงื่อนไขการตัดที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวชิ้นงานได้แก่ ความเร็วรอบ, ความลึกในการตัด, และอัตราการป้อนตัด โดยเงื่อนไขทั้ง 3 อย่างนี้มีผลต่อแรงตัดที่เกิดขึ้นขณะกระบวนการเจียรระไน โดยค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 นั้นมีดังนี้

ตารางที่ 3. 1 ตารางแสดงเงื่อนไขการเจียรระไน

ชิ้นงาน	เหล็กกล้าคาร์บอน S50C กว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร สูง 42 มิลลิเมตร
ล้อยินเจียรระไน	อะลูมิเนียมออกไซด์แบบ A (Regular Aluminium Oxide) ขนาดเกรน 80 เส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร หนา 1.6 เซนติเมตร
ความเร็วรอบของหินเจียรระไน V (รอบ/นาที)	3,300 และ 6,600
อัตราการป้อนตัด F (มิลลิเมตร/วินาที)	55, 44, 33, 22
ความลึกกัด D (มิลลิเมตร)	0.005, 0.01, 0.015

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ชิ้นงานที่ใช้ในการเจียรระไน เหล็กกล้าคาร์บอน S50C ขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร สูง 45 มิลลิเมตร



รูปที่ 3. 1 ชิ้นงานที่ใช้ในการเจียรระไน

2. หินเจียรระไนที่ใช้ในการทดลอง ชนิดอะลูมิเนียมออกไซด์ แบบ A (Regular Aluminium Oxide)
ขนาดเกรนคือ 80 เส้นผ่านศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร หนา 1.6 เซนติเมตร



รูปที่ 3. 2 หินเจียรระไนชนิดอะลูมิเนียมออกไซด์

3. เครื่องเจียรระไนใช้ในการทดลองการเจียรระไนชิ้นงาน



รูปที่ 3. 3 เครื่องเจียรระไน

4. เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจติดตามการเสียดทาน คือเซนเซอร์วัดแรง (3-Component Dynamometer) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 9257B



รูปที่ 3. 4 เซนเซอร์วัดแรงหรือไดนามอมิเตอร์

5. ชาร์จแอมพลิฟายเออร์ (Charge Amplifier) ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 5070A



รูปที่ 3. 5 ชาร์จแอมพลิฟายเออร์

6. ออสซิลโลสโคป(Oscilloscope) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL750 ใช้สำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตักที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเจียรระโน



รูปที่ 3. 6 ออสซิลโลสโคป

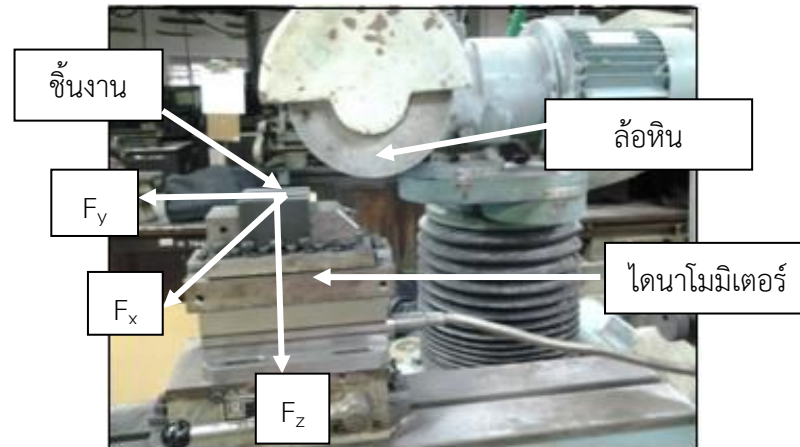
7. เครื่องวัดความขรุขระผิว (Stylus type roughness) ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-400 ใช้วัดค่าความขรุขระผิวของชิ้นงาน



รูปที่ 3. 7 เครื่องวัดความขรุขระผิว

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

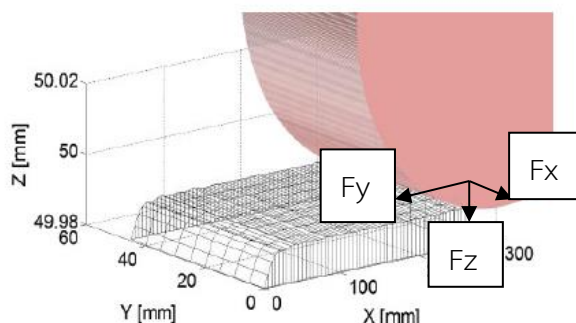
1. เตรียมชิ้นงานขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร สูง 42 มิลลิเมตร ยึดด้วยปากจับบนเซนเซอร์วัดแรงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3. 8 การติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง สำหรับดำเนินการทดลอง

2. ทำการเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดแรงเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป โดยปรับตั้งค่าเครื่องออสซิลโลสโคป โดยค่ากรองความถี่สัญญาณต่ำ (Low-pass filter) ที่ 5,000 เฮิร์ต และอัตราการเก็บข้อมูลที่ 10,000 ค่าต่อวินาที
3. เริ่มทำการเจียระไนชิ้นงานแบบ down-cutting โดยใช้อัตราป้อนตัดและความเร็วค่าหนึ่งที่ตั้ง จากนั้นทำการแปรค่าความลึกตัด แล้วทำการเก็บข้อมูลแรงตัดสถิตที่เกิดขึ้น ซึ่งระหว่างการเปลี่ยนเงื่อนไขในการเจียระไนทุกครั้ง ต้องมีการแต่งผิวหินเจียระไนทุกครั้งเพื่อให้ผิวหินเจียระไนมีความคมอยู่เสมอ แต่ในการแต่งหินเจียระไนนั้นจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของหินเจียระไนลดลง ซึ่งส่งผลต่อความเร็วตัด แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดค่าความเร็วรอบไว้ และใช้สมมติฐานที่ว่าความเร็วรอบคงที่ทุกครั้ง ในการพิจารณาความสัมพันธ์ในสมการความขรุขระผิวชิ้นงาน
4. ทำการคำนวณแรงตัดทั้ง 3 แกน จากการบันทึกค่าแรง โดยการคูณค่าที่เก็บได้จากการทดลองด้วยค่าตอบสนอง (Sensitivity) 200 นิวตัน/โวลต์ จากนั้นทำการหาค่าแรงตัดสถิต ซึ่งแรงตัดหาได้จากการนำแรงตัดพลวัตเฉลี่ยมาลบแรงตัดศูนย์เฉลี่ย สำหรับงานวิจัยนี้ แรงตัดที่เกิดขึ้นในแนวแกน X เรียกว่าแรงในทิศการป้อนตัด (Cutting force in the feed direction) ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย F_x แรงตัดที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y เรียกว่าแรงตัดในทิศความเร็วรอบ (Cutting force in the spindle speed direction) ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย F_y และแรงตัดที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z เรียกว่าแรงตัดใน

แนวรัศมีตั้งฉากกับชิ้นงาน (Cutting force in the radial wheel direction) ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย F_z ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3. 9 ทิศทางของแรงตัดทั้ง 3 แรง คือ F_x , F_y และ F_z [5]

5. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3 และข้อ 4 โดยใช้ค่าความลึกและค่าความเร็วตัดคงที่ค่าหนึ่ง แต่เปลี่ยนค่าความเร็วรอบของหินเจียรไน
6. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3 และข้อ 4 โดยใช้ค่าความลึกและค่าความเร็วรอบของหินเจียรไนคงที่ค่าหนึ่ง แต่เปลี่ยนค่าความเร็วตัด
7. นำชิ้นงานที่ได้มาวัดค่าความขรุขระผิวด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิว โดยวัดในแนวแนวตั้งฉากกับอัตราการป้อน [15]
8. บันทึกค่าความขรุขระผิวที่วัดได้ โดยพารามิเตอร์ในการวัดค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน คือ ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) และค่าความขรุขระผิวสูงสุด (R_z)
9. นำอัตราส่วนแรงตัดในทิศความเร็วรอบ F_y (Cutting force in the spindle speed direction) และแรงตัดในทิศรัศมีตั้งฉากกับชิ้นงาน F_z (Cutting force in the radial wheel direction) มาใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวของชิ้นงาน โดยการพล็อตกราฟระหว่าง F_y/F_z กับ R_a และพล็อตกราฟระหว่าง F_y/F_z กับ R_z
10. นำข้อมูลพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความขรุขระผิว อันได้แก่ ความเร็วตัด ความเร็วรอบและความลึกตัด และค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) กับค่าความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) มาสร้างสมการทำนายค่าความขรุขระผิว

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดลอง

Run Order	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/วินาที)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
1	55	3300	0.005
2	55	3300	0.01
3	55	3300	0.015
4	44	3300	0.005
5	44	3300	0.01
6	44	3300	0.015
7	33	3300	0.005
8	33	3300	0.01
9	33	3300	0.015
10	22	3300	0.005
11	22	3300	0.01
12	22	3300	0.015
13	55	6600	0.005
14	55	6600	0.01
15	55	6600	0.015
16	44	6600	0.005
17	44	6600	0.01
18	44	6600	0.015
19	33	6600	0.005
20	33	6600	0.01
21	33	6600	0.015
22	22	6600	0.005
23	22	6600	0.01
24	22	6600	0.015

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

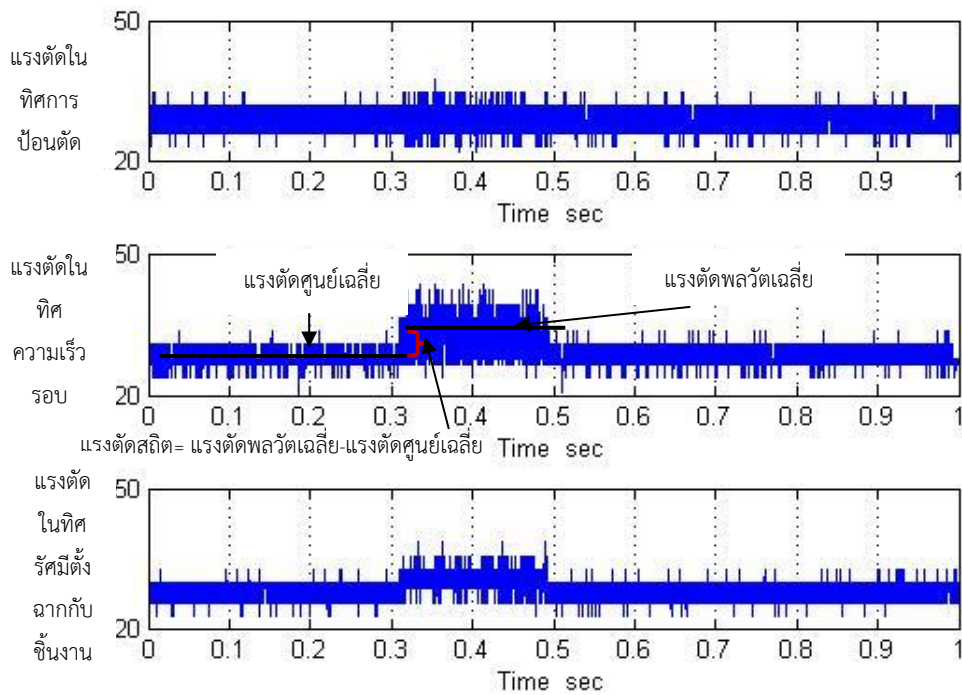
แรงตัดที่เกิดจากการตัดในเบื้องต้นจะอยู่ในรูปของสัญญาณแรงตัดซึ่งเป็นแบบอนาล็อกดังรูปที่ 3.10 ดังนั้นในการเก็บค่าของแรงตัดเพื่อใช้ในการพัฒนาสมการแบบจำลองจะต้องทำให้อยู่ในรูปแบบของดิจิทัล โดยการสุ่มข้อมูลจากสัญญาณแรงตัด ซึ่งจากการปรับตั้งค่า Sampling rate เท่ากับ 10 Ks/s และทำการเก็บข้อมูลสำหรับแรงตัดมา 1 วินาที ดังนั้นสัญญาณแรงตัดจะถูกสุ่มเก็บข้อมูลมาทั้งสิ้นจำนวน 10,000 และค่าความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) เท่ากับ 5,000 Hz ค่าในแรงตัดแต่แกน ซึ่งประกอบด้วยแรงตัดในทิศการป้อนตัด (Cutting force in the feed direction: F_x) แรงตัดในทิศความเร็วรอบ (Cutting force in the spindle speed direction: F_y) และแรงตัดในแนวรัศมีตั้งฉากกับชิ้นงาน (Cutting force in the radial wheel direction: F_z) อย่างไรก็ตามแรงตัดที่เก็บมาได้นั้นยังอยู่ในหน่วยของโวลต์ (V) จะต้องทำการแปลงให้เป็นหน่วยของนิวตัน (N) โดยมีสูตรการแปลงดังนี้

$$\text{แรงตัดในทิศการป้อนตัด (} F_x \text{ (นิวตัน))} = V_x \text{ (โวลต์)} \times 200 \text{ (นิวตัน/โวลต์)}$$

$$\text{แรงตัดในทิศความเร็วรอบ (} F_y \text{ (นิวตัน))} = V_y \text{ (โวลต์)} \times 200 \text{ (นิวตัน/โวลต์)}$$

$$\text{แรงตัดในแนวรัศมีตั้งฉากกับชิ้นงาน (} F_z \text{ (นิวตัน))} = V_z \text{ (โวลต์)} \times 200 \text{ (นิวตัน/โวลต์)}$$

จากรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าในการทดลองจะมีแรงตัดศูนย์เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง โดยแรงตัดศูนย์นี้เป็นแรงที่เกิดขึ้น เนื่องมาจากการมีสัญญาณรบกวน (noise) เพราะยังไม่มี การตัดจริงเกิดขึ้น เมื่อมีการตัดจริงเกิดขึ้นจะเกิดแรงตัดพลวัต (Dynamic force) ซึ่งในแรงตัดนี้จะมีการรวมแรงตัดศูนย์เข้าไปด้วย ดังนั้นแรงตัดสถิต (Static force) จะสามารถหาได้จากการหาค่าเฉลี่ยของแรงตัดพลวัตรวมค่าเฉลี่ยแรงตัดศูนย์



รูปที่ 3. 10 สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเจียรระโน

3.5 การพัฒนาสมการทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัด

จากทฤษฎีการทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน สมการจะอยู่ในรูปฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล โดยพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการพัฒนาสมการประกอบด้วย อัตราป้อนตัด ความเร็วรอบ และความลึกตัด

สมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานขณะตัด จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดสถิต และเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ดังนี้

$$R_a = C_1(V)^{a_1} \cdot (F)^{a_2} \cdot (D)^{a_3} \cdot (F_y/F_z)^{a_4} \quad (3.4.1)$$

$$R_z = C_2(V)^{a_5} \cdot (F)^{a_6} \cdot (D)^{a_7} \cdot (F_y/F_z)^{a_8} \quad (3.4.2)$$

โดย R_a และ R_z คือ ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยและค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยสูงสุด ในหน่วยไมโครเมตร V คือ ความเร็วตัดชิ้นงานในหน่วยรอบ/นาที F คือ ความเร็วรอบในหน่วยมิลลิเมตร/วินาที D คือ ความลึกตัดในหน่วยมิลลิเมตร F_y/F_z คือ อัตราส่วนแรงตัดในทิศความเร็วรอบกับแรงตัดในแนวรัศมี $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, C_1$ และ C_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการ

จากสมการ 3.4-1 และ 3.4-2 จะถูกแปลงจะนำเสนอในรูปแบบสมการถดถอยพหุคูณด้วยการใช้การแปลงลอการิทึม ดังนี้

$$\ln R_a = \ln C_1 + a_1 \ln V + a_2 \ln F + a_3 \ln D + a_4 \ln\left(\frac{F_y}{F_z}\right) \quad (3.4.3)$$

$$\ln R_z = \ln C_2 + a_5 \ln V + a_6 \ln F + a_7 \ln D + a_8 \ln\left(\frac{F_y}{F_z}\right) \quad (3.4.4)$$

จากสมการถดถอย 3.4-3 และ 3.4-4 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 \quad (3.4.5)$$

$$y_2 = \beta_5 + \beta_6 x_1 + \beta_7 x_2 + \beta_8 x_3 + \beta_9 x_4 \quad (3.4.6)$$

โดยที่ y_1 และ y_2 แทนค่า $\ln R_a$ และ $\ln R_z$ ตัวแปร x_1, x_2, x_3 และ x_4 แทนด้วยค่า $\ln V, \ln F, \ln D$ และ $\ln\left(\frac{F_y}{F_z}\right)$ ตามลำดับ ค่า β_0 และ β_5 คือ จุดตัดแกน y ของสมการ y_1 และ y_2 เมื่อพารามิเตอร์ x_1 ถึง x_4 เท่ากับ 0 โดยที่ค่า $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8$ และ β_9 คือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยซึ่งได้มาจากการใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณ โดยใช้การประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method)

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.6.1 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาหาค่าเฉลี่ยแรงตัดพลวัตรและค่าเฉลี่ยแรงตัดศูนย์ เพื่อนำทั้ง 2 แรงแมลาบกัน เพื่อให้ได้ค่าแรงตัดสถิตทั้ง 3 แนวแรง

3.6.2 นำอัตราส่วนระหว่างแรงตัดในทิศความเร็วรอบ (F_y) กับแรงตัดในทิศรัศมีตั้งฉากกับชิ้นงาน (R_z) มาพิจารณาความสัมพันธ์ต่อค่าความขรุขระผิวที่ได้จากเครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน

3.6.3 พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทั้ง 3 กับค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) และค่าความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) จากนั้นสร้างสมการทำนายค่าความเรียบผิวชิ้นงาน

3.6.4 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยพหุคูณ

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

3.6.4.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality)

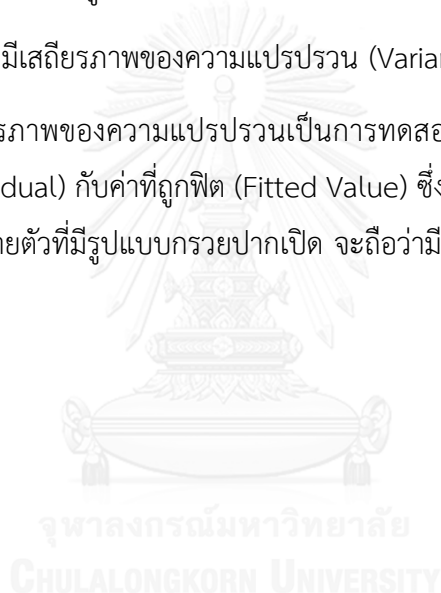
ในการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normal distribution assumption) นั้นจะพิจารณาการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ของตัวแปรผลตอบว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยนำค่าคลาดเคลื่อนมาสร้าง Normal Probability Plot และพิจารณาการกระจายตัว โดยการกระจายตัวควรเป็นตามแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงถือว่าเป็นการกระจายตัวแบบปกติ

3.6.4.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independent)

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

3.6.4.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance stability)

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



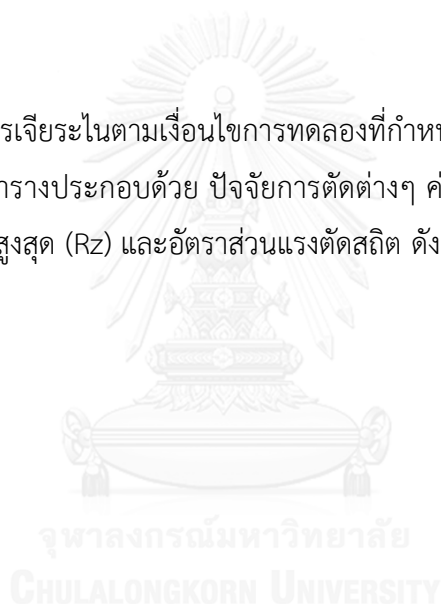
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาความสัมพันธ์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน ซึ่งในงานวิจัยได้นำอัตราส่วนแรงดัดหลัก F_y กับแรงดัดในแนวรัศมี F_z มาใช้เพื่อทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน นอกจากนี้ยังมีเงื่อนไขอื่น ๆ ที่มีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน ซึ่งได้แก่ อัตราการป้อนตัด ความเร็วรอบ และความลึกตัด โดยที่ตัวแปรเหล่านี้กำหนดเป็นตัวแปรอิสระ (Independent Variable) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ถูกกำหนดขึ้นในการทำวิจัย เพื่อหาความสัมพันธ์กับความขรุขระผิวชิ้นงาน และอัตราส่วนแรงดัดที่เป็นตัวแปรตอบสนองดังที่กล่าวข้างต้น

4.1 ผลการทดลอง

ทำการทดลองการเจียรระโนตามเงื่อนไขการทดลองที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.2 และบันทึกผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งตารางประกอบด้วย ปัจจัยการตัดต่างๆ ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) และอัตราส่วนแรงดัดสถิต ดังแสดงในตารางที่ 4.1



ตารางที่ 4. 1 ผลการทดลองในแต่ละเงื่อนไขการเจาะระโน

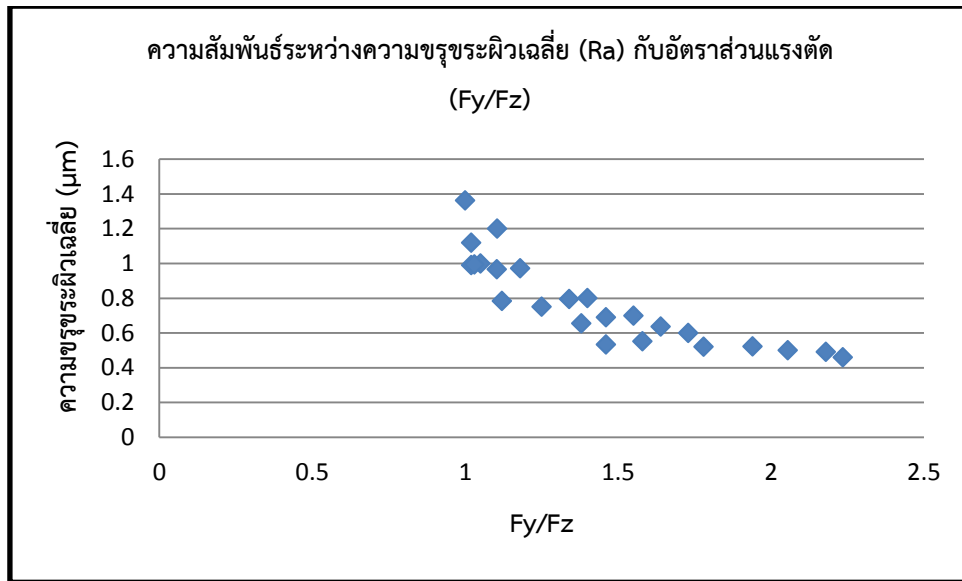
Run Order	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/วินาที)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงตัด (Fy/Fz)	ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)	ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)
1	55	3300	0.005	1.9	2.741	0.46
2	55	3300	0.01	1.8	2.851	0.5
3	55	3300	0.015	1.46	3.86	0.69
4	44	3300	0.005	1.98	2.594	0.49
5	44	3300	0.01	1.6	3.114	0.52
6	44	3300	0.015	1.55	3.8	0.699
7	33	3300	0.005	1.74	2.905	0.523
8	33	3300	0.01	1.38	3.55	0.655
9	33	3300	0.015	1.45	4.25	0.8
10	22	3300	0.005	1.64	3.5	0.637
11	22	3300	0.01	1.103	5.244	0.966
12	22	3300	0.015	1.05	5.282	0.999
13	55	6600	0.005	1.56	3.263	0.543
14	55	6600	0.01	1.12	4.2	0.764
15	55	6600	0.015	1.18	5.199	0.971
16	44	6600	0.005	1.58	3.349	0.552
17	44	6600	0.01	1.34	4.22	0.795
18	44	6600	0.015	1.02	6.356	0.99
19	33	6600	0.005	1.73	3.531	0.6
20	33	6600	0.01	1.03	5.686	0.994
21	33	6600	0.015	1.07	6.697	1.119
22	22	6600	0.005	1.25	3.998	0.75
23	22	6600	0.01	1.11	6.189	1.2
24	22	6600	0.015	1	7.68	1.362

จากตารางที่ 4.1 จากผลการทดลองลำดับที่ 22-24 ซึ่งเป็นผลการทดลองที่มีเงื่อนไขเดียวกัน เพียงแต่เปลี่ยนค่าความลึกตัดให้มากขึ้น จะพบว่าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานที่วัดออกมาจะมีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเป็นเงื่อนไขที่ใช้ความเร็วรอบสูง เมื่อตัดที่ความลึกมากๆ การสั่นจะเกิดได้ง่ายขึ้น ผิวชิ้นงานที่ออกมาจึงมีค่าความขรุขระสูงขึ้นอย่างชัดเจน

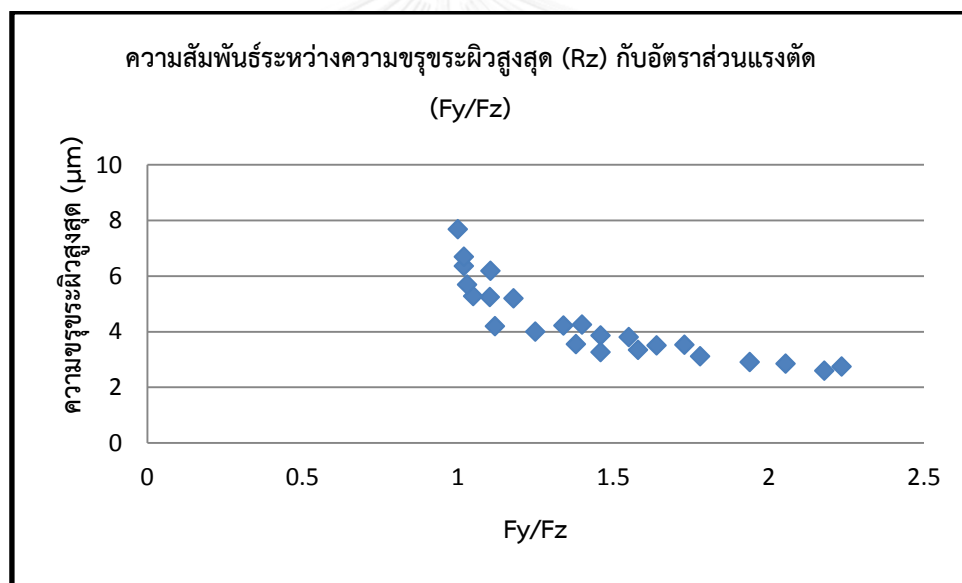
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราส่วนแรงตัด

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราส่วนแรงตัด (F_y/F_z) จะพบว่าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนแรงตัดสูงขึ้น ไม่ว่าจะเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนไป สามารถอธิบายได้ว่าแรงตัดในทิศความเร็วรอบ (F_y) มีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานมากกว่าแรงตัดในแนวรัศมีตั้งฉากกับชิ้นงาน (F_z) และแรงตัดในทิศการป้อนตัด (F_x) เนื่องจากแรงตัด (F_y) เป็นแรงตัดที่เกิดขึ้นในทิศเดียวกันกับทิศความเร็วรอบของหินเจียรไน ส่วนแรงในทิศรัศมีตั้งฉากกับชิ้นงาน (F_z) เป็นแรงที่กดลงบนผิวหน้าชิ้นงานโดยตรงในทิศตั้งฉาก ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อผิวชิ้นงานเช่นกัน แต่จะน้อยกว่าแรงตัดในทิศความเร็วรอบ (F_y) ส่วนแรงตัดในทิศการป้อนตัด (F_x) เป็นแรงตัดที่เกิดขึ้นในทิศเดียวกับอัตราการป้อนตัด แต่มีอิทธิพลต่อผิวชิ้นงานน้อยที่สุด ดังนั้นแรงตัด F_y และ F_z จึงถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการการทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน และพบว่าการใช้อัตราส่วนของแรงตัด (F_y/F_z) นี้ สามารถกำจัดอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนไปได้ ดังพบได้ดังในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [3], [4] ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดจึงส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวอย่างมาก

จากรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) จะพบว่าเมื่ออัตราส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้น ค่าความขรุขระผิวจะลดลงอย่างมาก และจะเห็นว่าความสัมพันธ์ทั้ง 2 รูปมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราส่วนแรงตัด (F_y/F_z) ในการพัฒนาสมการทำนายค่าความขรุขระผิว



(ก) ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)



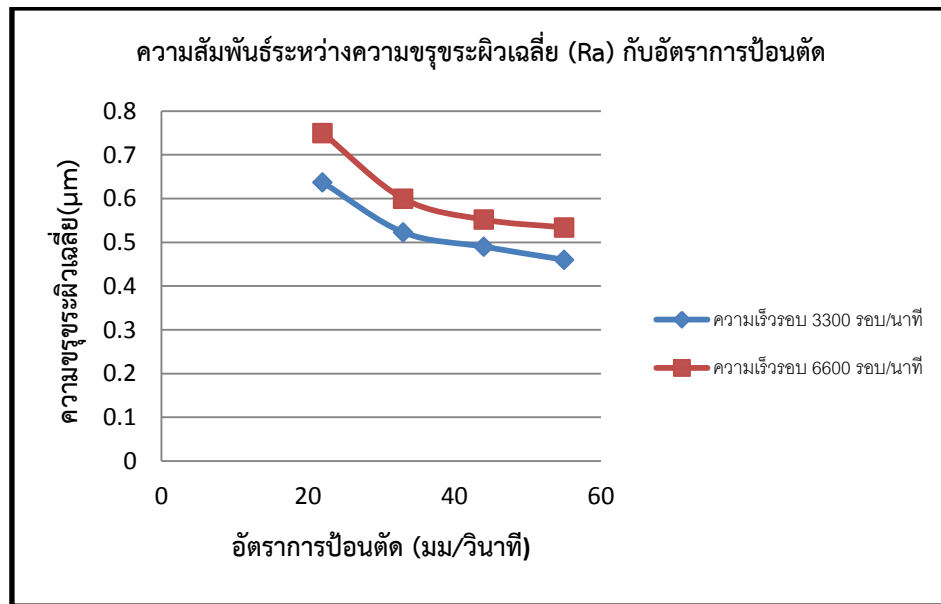
(ข) ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราส่วนแรงตัด (Fy/Fz)

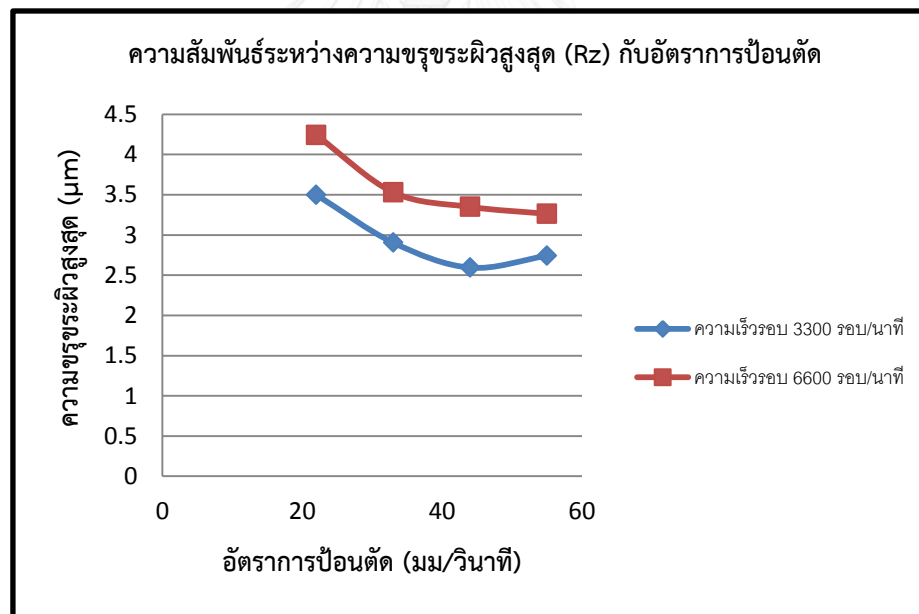
4.3 การวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราการป้อนตัด และเงื่อนไขการเจียรระโนอื่นๆบนเครื่องเจียรระโนราบ

จากผลการทดลองจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองหรือค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน กับเงื่อนไขการตัดต่างๆ ดังนี้

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราการป้อนตัด

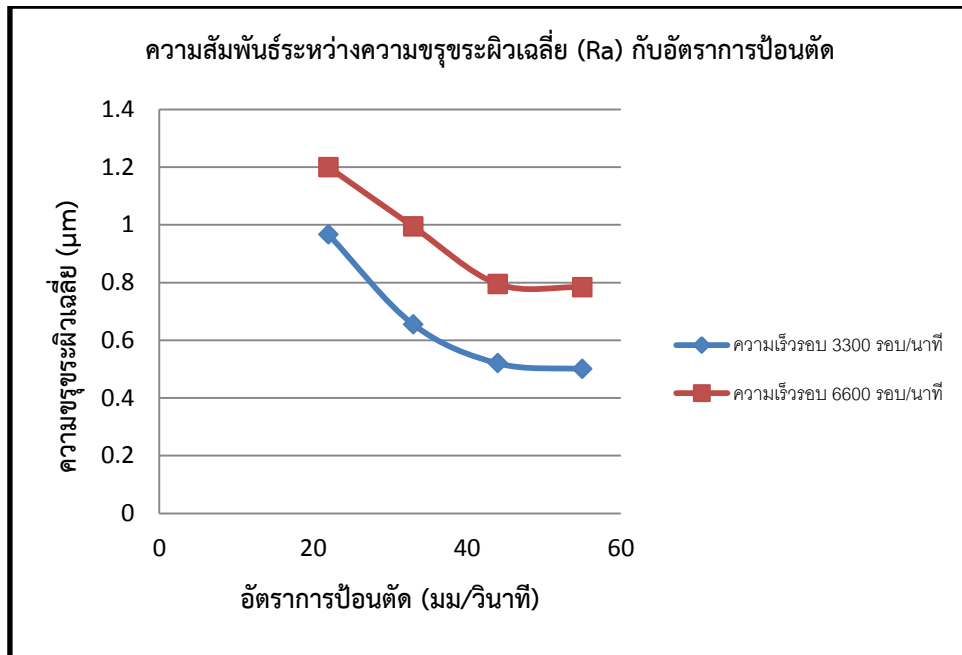


(ก) ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)

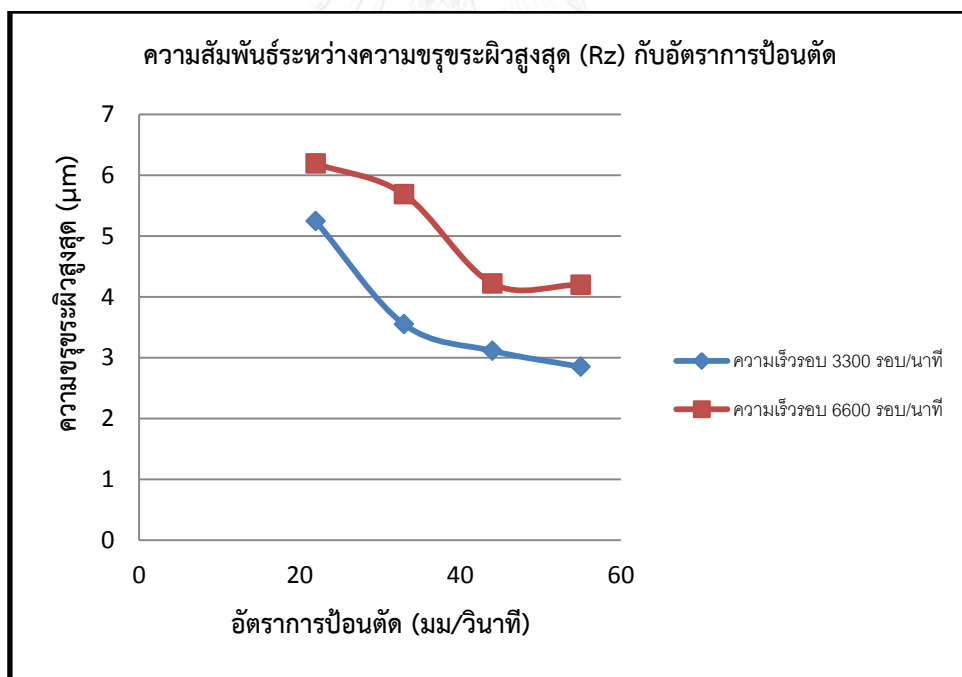


(ข) ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราการป้อนตัด 55, 44, 33 และ 22 มิลลิเมตร/วินาที ความลึกกัด 0.005 มิลลิเมตร

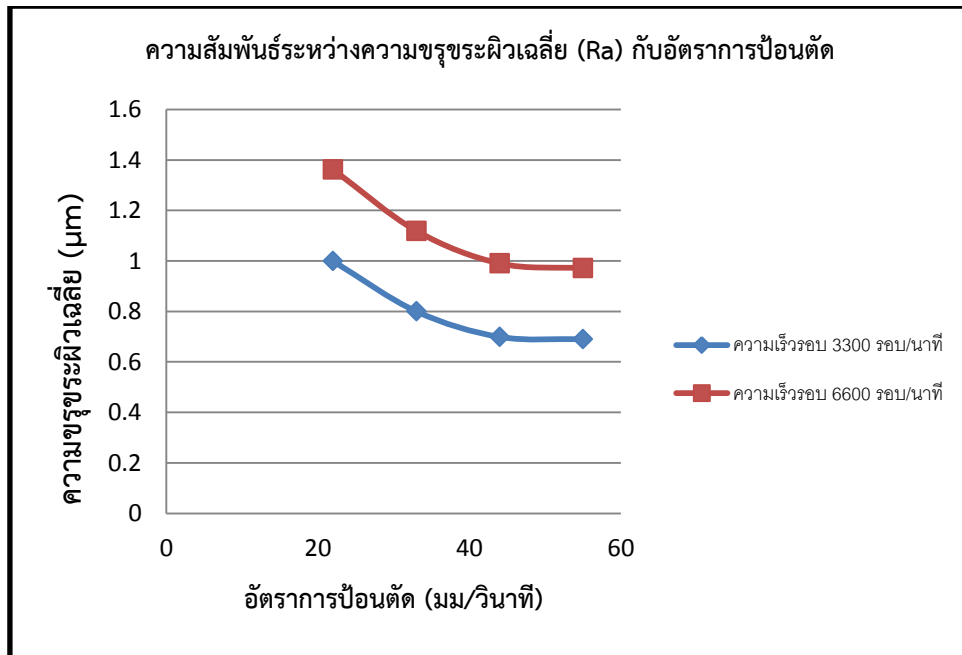


(ก) ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)

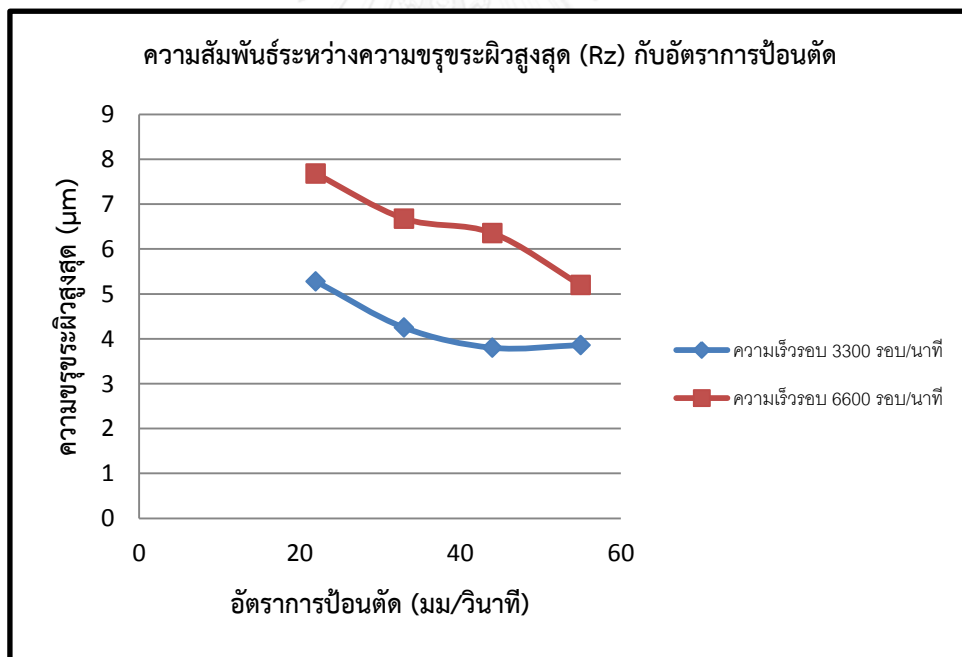


(ข) ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4. 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราการป้อนตัด 55, 44, 33 และ 22 มิลลิเมตร/วินาที ความลึกกัด 0.01 มิลลิเมตร



(ก) ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)



(ข) ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

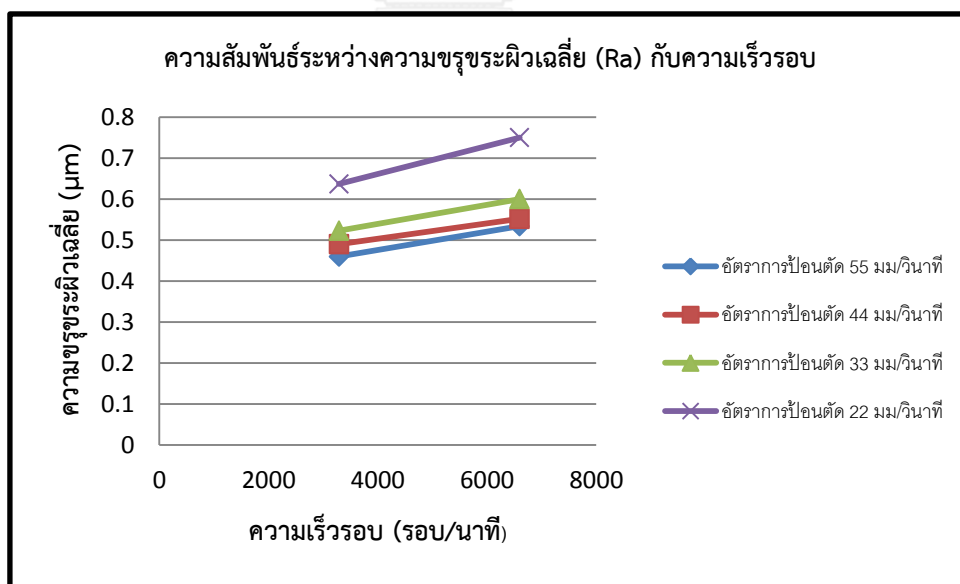
รูปที่ 4. 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราการป้อนตัด 55, 44, 33 และ 22 มิลลิเมตร/วินาที ความลึกกัด 0.015 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราการป้อนตัดที่เงื่อนไขต่างๆ จะพบว่าค่าทั้งสองมีทิศทางไปในทางตรงข้ามกัน กล่าวคือเมื่ออัตราการป้อนตัดมากขึ้น ความขรุขระผิวชิ้นงานจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการป้อนตัดที่มากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิสะสมที่ผิวชิ้นงานมาก ทำให้ผิวชิ้นงานเกิดความอ่อนตัว แรงตัดที่เกิดขึ้นจึงน้อย ดังนั้นผิวที่ได้จึงมีความขรุขระน้อย ผิวชิ้นงานจึงมีคุณภาพดี และเมื่อใช้ความเร็วรอบต่ำกว่าจะให้ความขรุขระผิวน้อยกว่าเช่นกัน เนื่องจากเกิดการสั่นสะเทือนน้อยกว่าที่ความเร็วรอบสูง

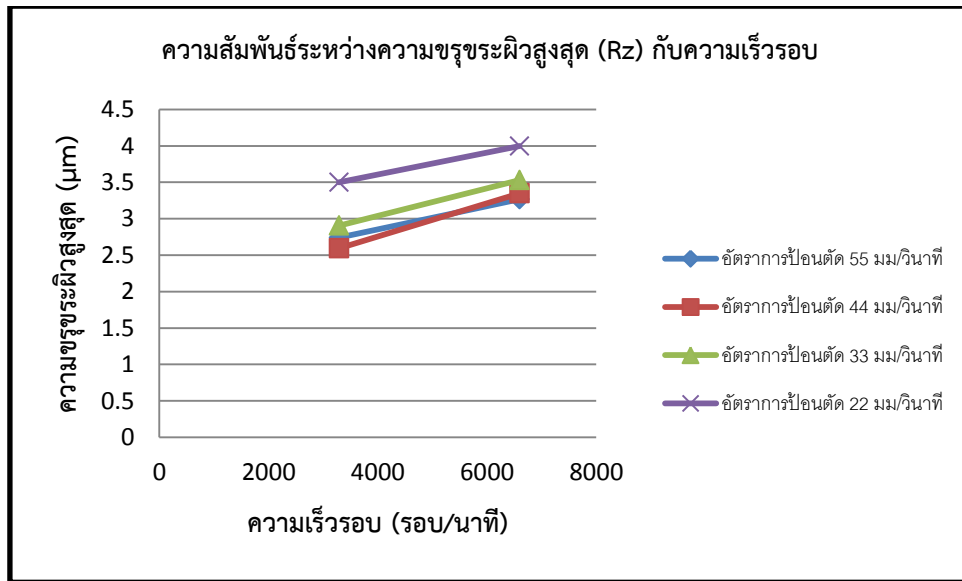


รูปที่ 4.5 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและอัตราการป้อนตัด

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความเร็วรอบ

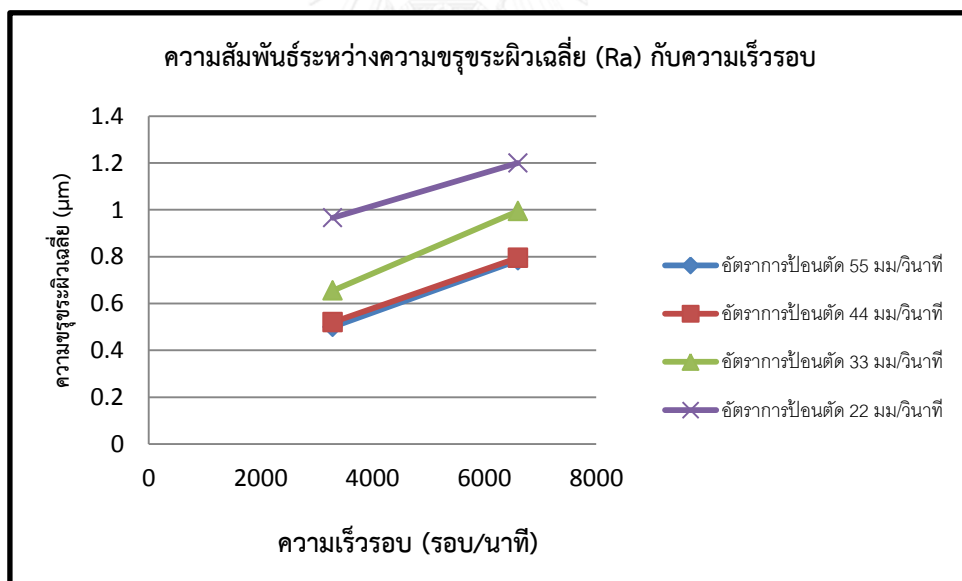


(ก) ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)

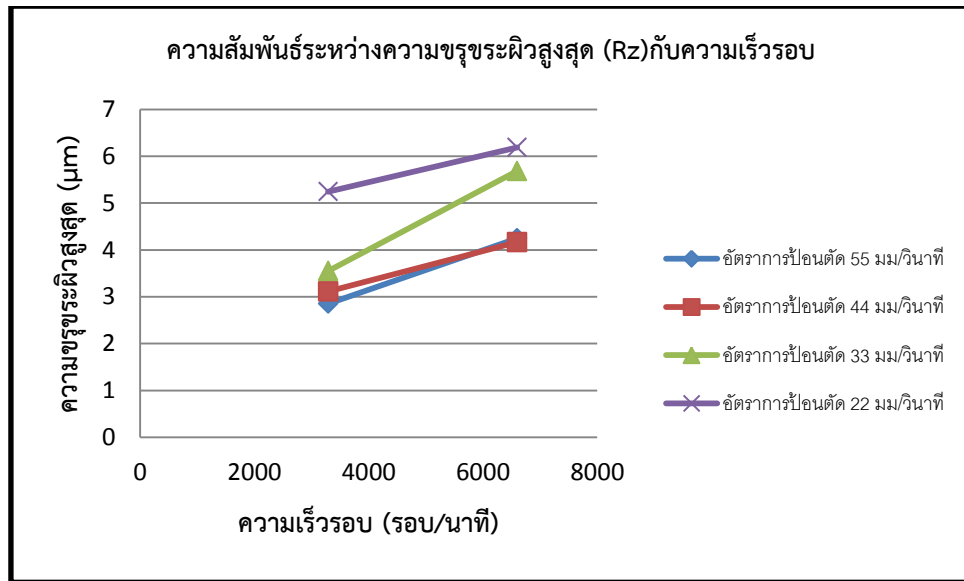


(ข) ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4. 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความเร็วรอบ 3300 และ 6600 รอบ/นาที ความลึกกัดตัด 0.005 มิลลิเมตร

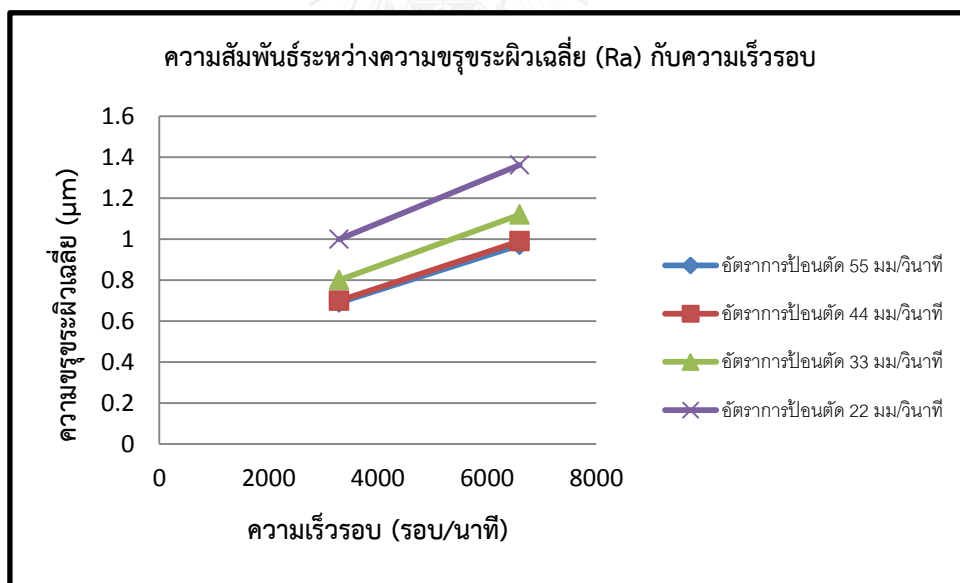


(ก) ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)

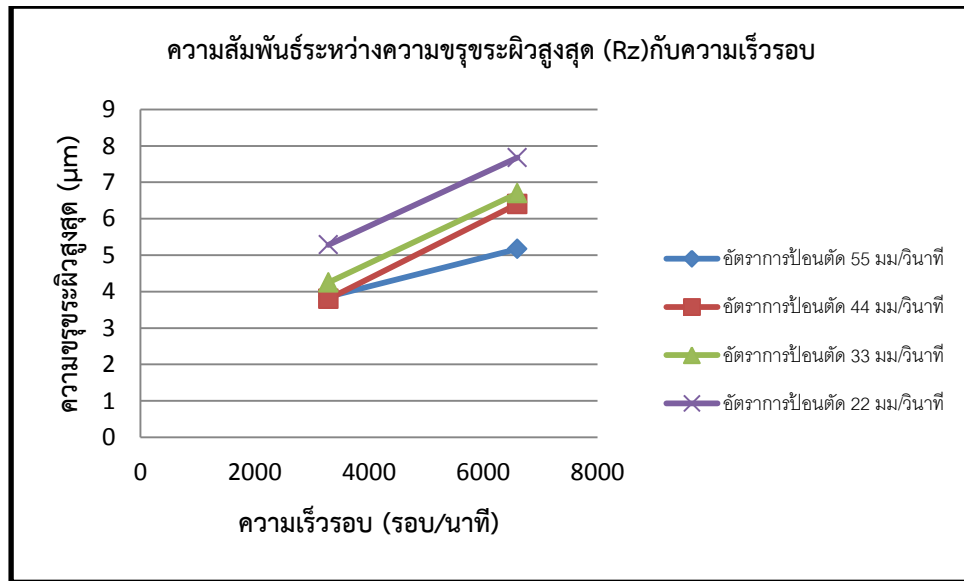


(ข) ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4. 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความเร็วรอบ 3300 และ 6600 รอบ/นาที ความลึกกัดตัด 0.01 มิลลิเมตร



(ก) ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)



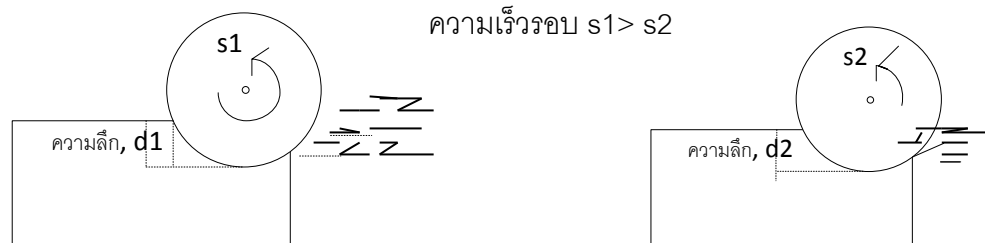
(ข) ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4. 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความเร็วรอบ 3300 และ 6600 รอบ/นาที ความลึกตัด 0.015 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความเร็วรอบที่เงื่อนไขการเจียระไนต่างๆกันไป โดยพบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ค่าความขรุขระผิวจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบเป็นการเพิ่มแรงสั่นสะเทือนให้เกิดมากขึ้นด้วย ดังนั้นผิวชิ้นงานที่ได้จึงมีความขรุขระสูงขึ้น ในขณะที่เมื่ออัตราการป้อนตัดคงที่ แต่เมื่ออัตราป้อนตัดสูงขึ้นจะทำให้เกิดค่าความขรุขระผิวชิ้นงานน้อยกว่า เนื่องจากอุณหภูมิมากขึ้น ผิวชิ้นงานอ่อนนุ่มมากขึ้น จึงเกิดแรงตัดน้อยลง ความขรุขระผิวชิ้นงานจึงน้อยลง

ความลึกตัด $d_1 = d_2$

ความเร็วรอบ $s_1 > s_2$

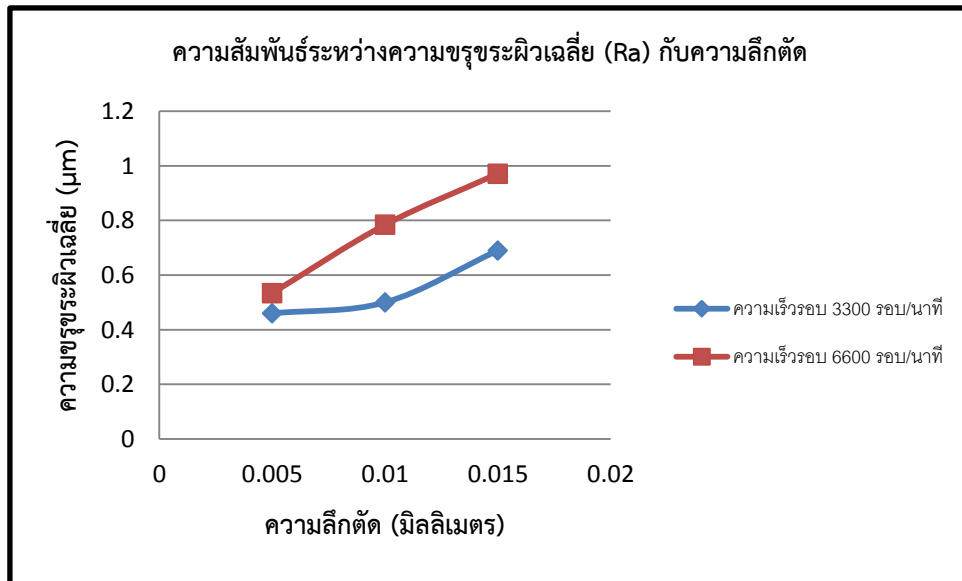


(ก) ความเร็วรอบสูง

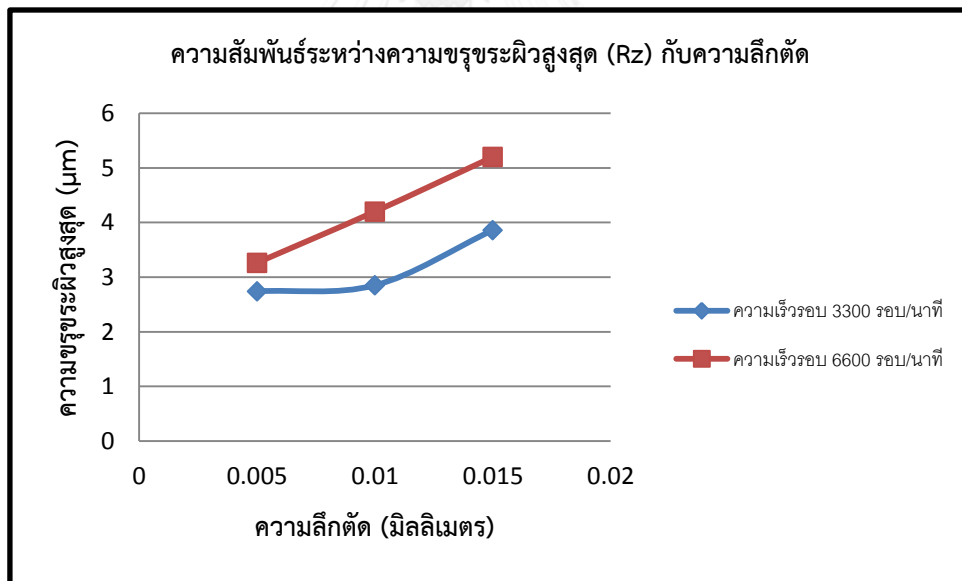
(ข) ความเร็วรอบต่ำ

รูปที่ 4. 9 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความเร็วรอบ

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความลึกตัด

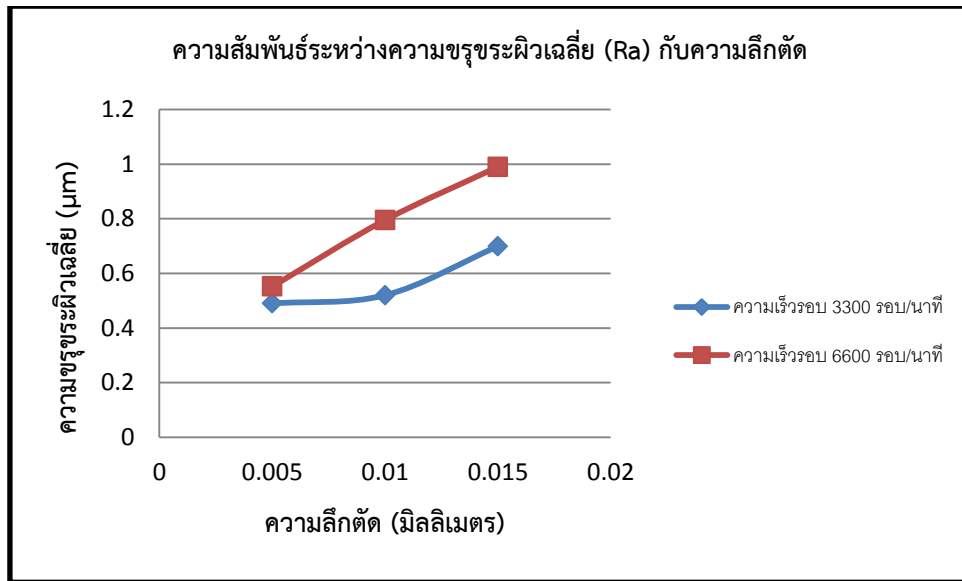


(ก) ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)

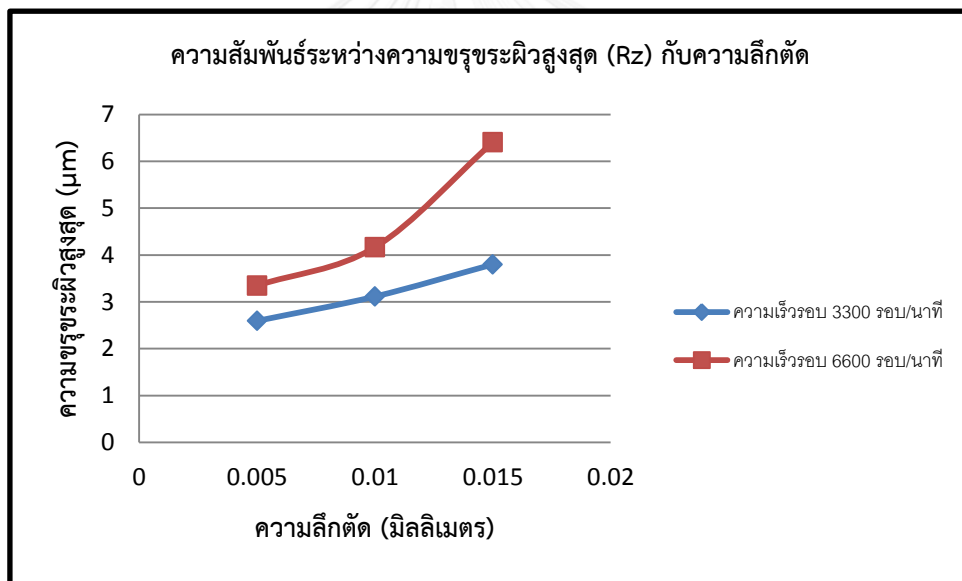


(ข) ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4. 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความลึกตัด 0.005, 0.01 และ 0.015 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 55 มิลลิเมตร/วินาที

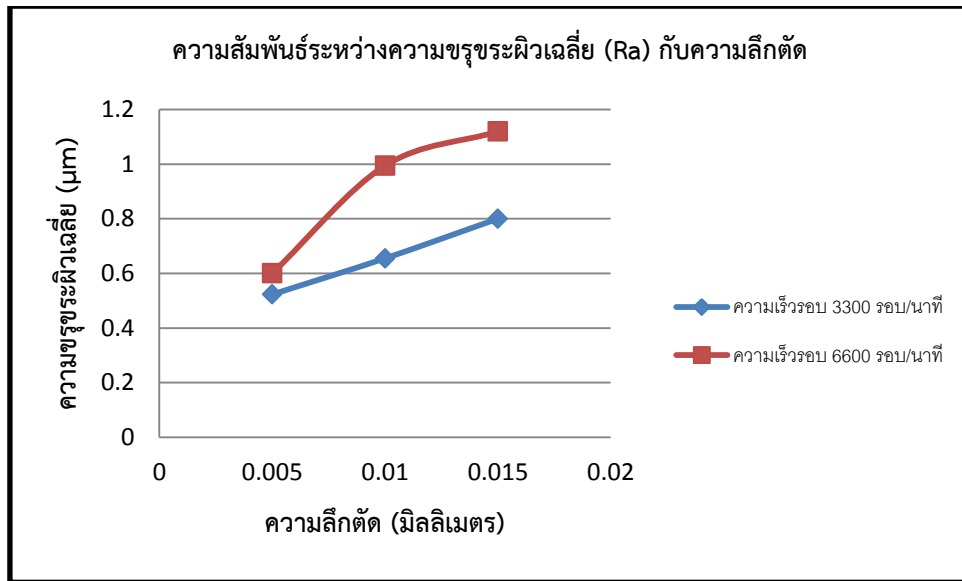


(ก) ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)

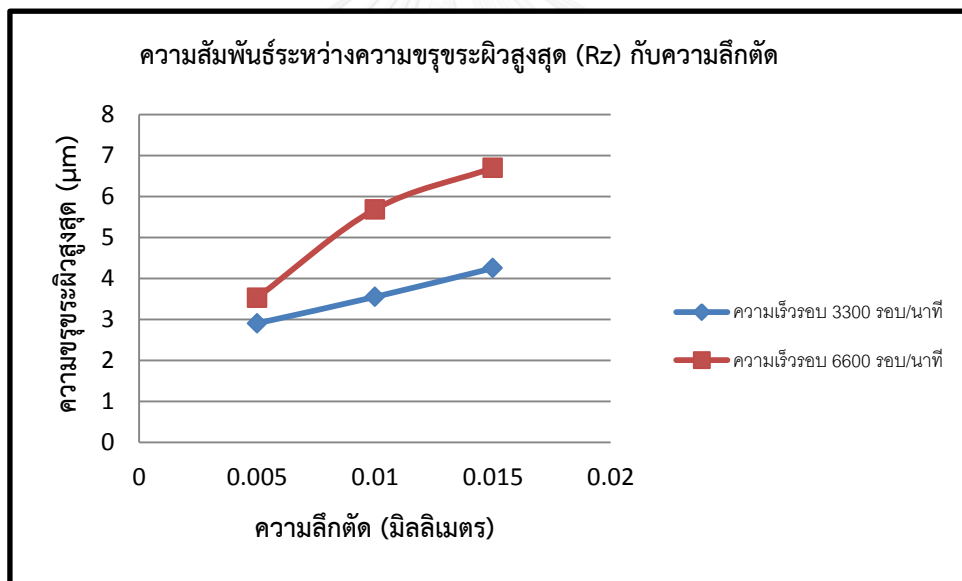


(ข) ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4. 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความลึกตัด 0.005, 0.01 และ 0.015 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 44 มิลลิเมตร/วินาที

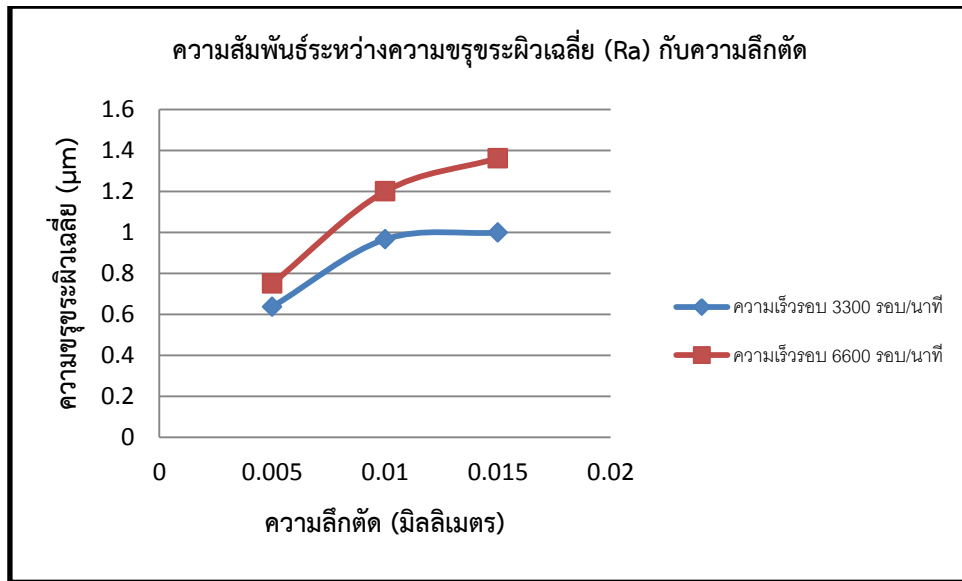


(ก) ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)

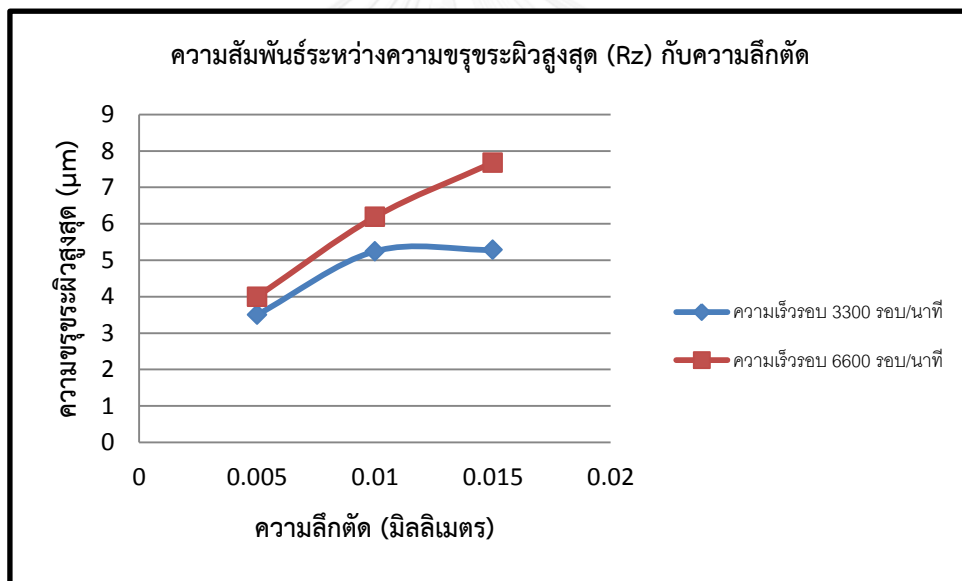


(ข) ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4. 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความลึกตัด 0.005, 0.01 และ 0.015 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 33 มิลลิเมตร/วินาที



(ก) ความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)

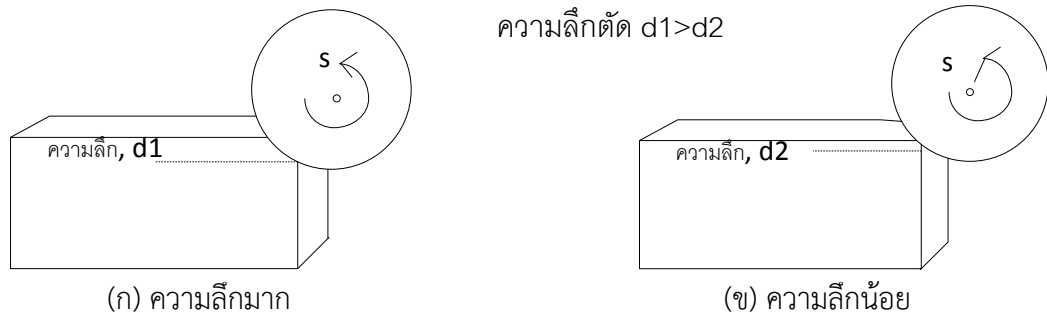


(ข) ความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

รูปที่ 4. 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความลึกตัด 0.005, 0.01 และ 0.015 มิลลิเมตร อัตราการป้อนตัด 22 มิลลิเมตร/วินาที

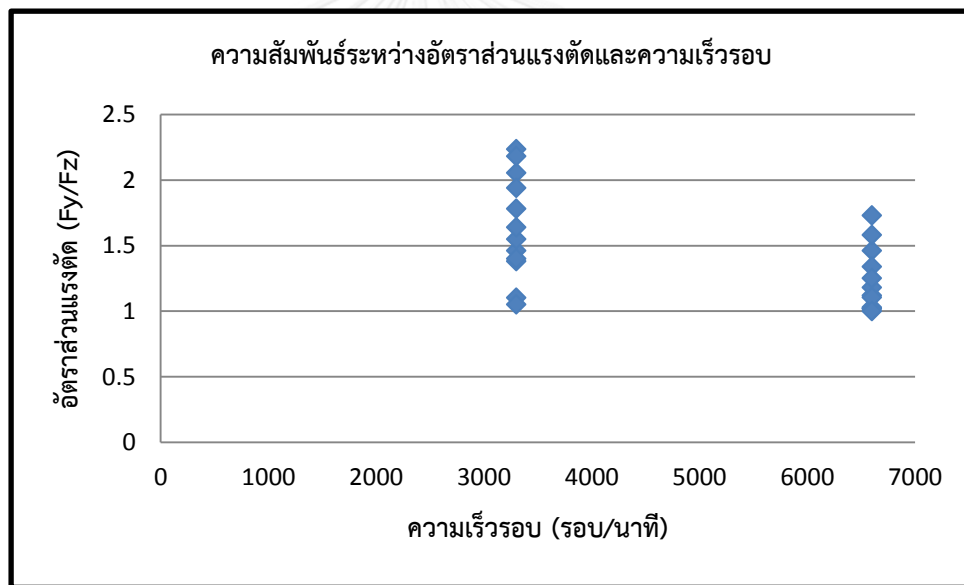
จากรูปที่ 4.10 ถึง 4.13 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความลึกตัดที่เงื่อนไขการเจียรระโนต่างๆกันไป โดยพบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อความลึกตัดเพิ่มขึ้น ค่าความขรุขระผิวจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อใช้ความลึกตัดที่มีค่า

สูง จะทำให้แรงตัดสูงขึ้นและโอกาสการเกิดแรงสั่นสะเทือนในขณะตัดมากขึ้น ทำให้ผิวชิ้นงานที่ได้จึงเกิดความขรุขระสูง



รูปที่ 4. 14 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานและความลึกตัด

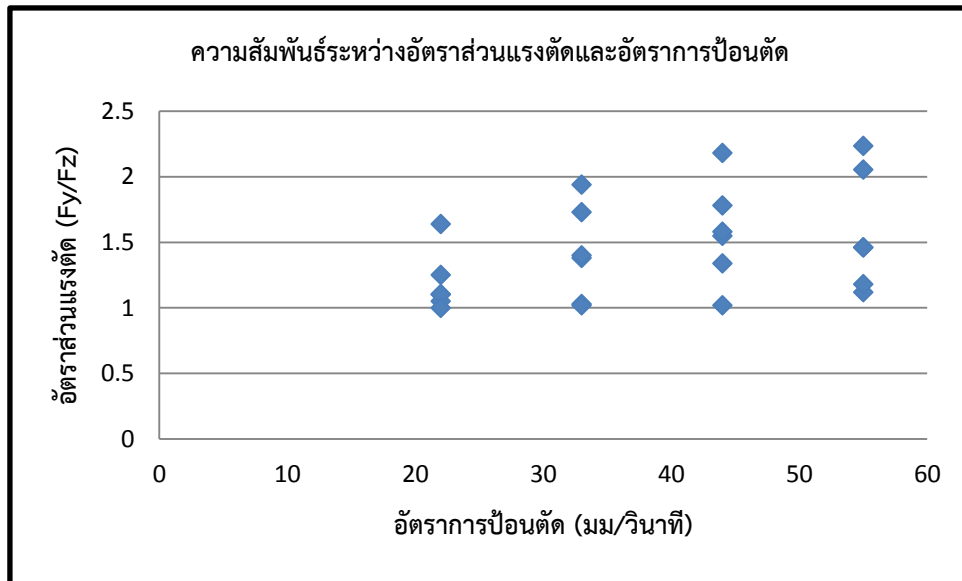
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความอัตราส่วนแรงตัดและความเร็วรอบ



รูปที่ 4. 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับความเร็วรอบ

จากกราฟรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น อัตราส่วนแรงตัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบมากขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานสูงขึ้น ผิวชิ้นงานมีความอ่อนตัวมากขึ้น แรงตัด F_y จึงมีแนวโน้มลดลง

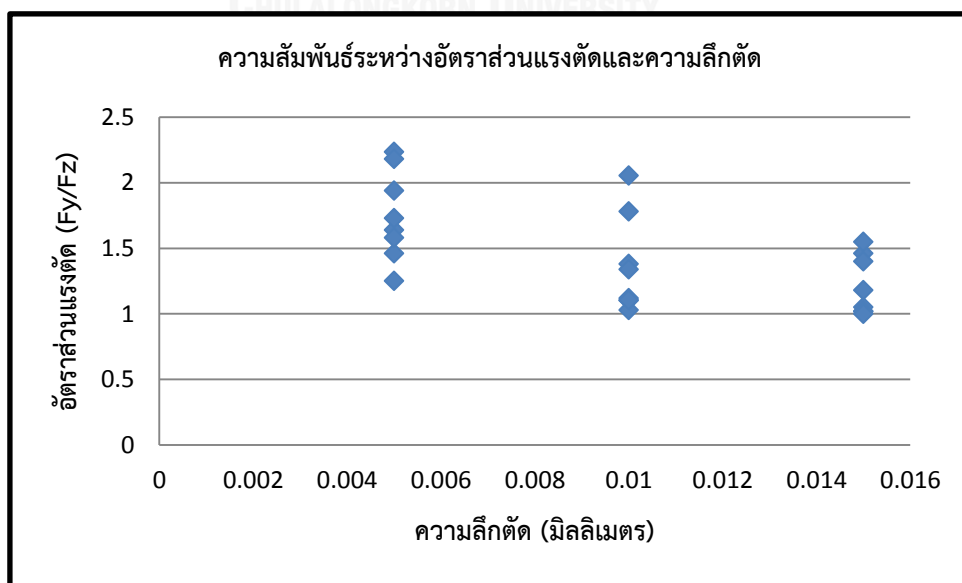
4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความอัตราส่วนแรงตัดและอัตราการป้อนตัด



รูปที่ 4. 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับอัตราการป้อนตัด

จากกราฟรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนแรงตัดมีค่ามากขึ้นด้วย ซึ่งตรงตามทฤษฎีที่ว่า เมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้แรงตัดในทิศการป้อนตัดเพิ่มสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้อัตราการป้อนตัดอาจส่งผลให้เกิดการสั่นของชิ้นงานและหินเจียรระโน ดังนั้นจึงเกิดความเค้นสูง แรงตัด F_y และ F_z จึงสูงขึ้นมาก

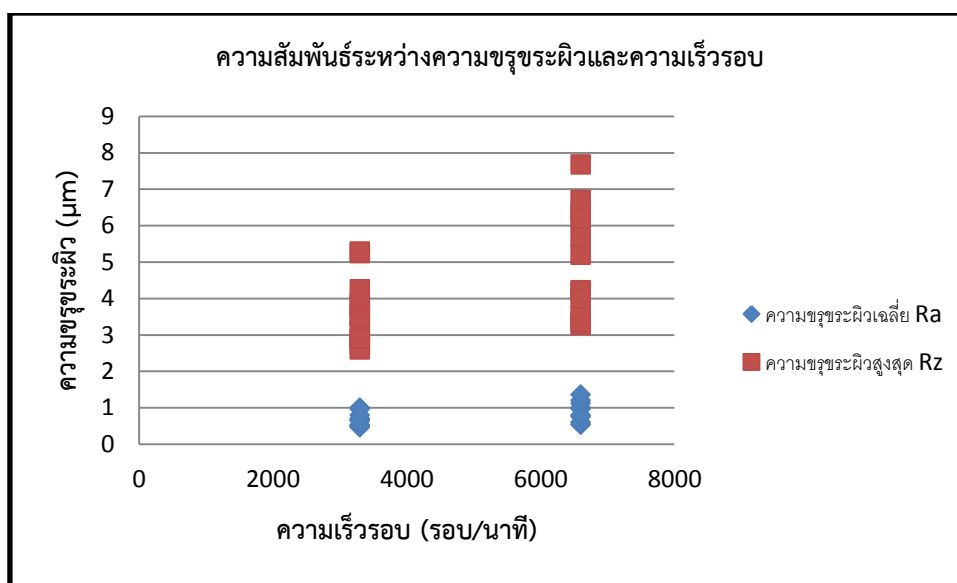
4.3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความอัตราส่วนแรงตัดและความลึกตัด



รูปที่ 4. 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงตัดกับความลึกตัด

จากกราฟรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความลึกตัดมากขึ้น อัตราส่วนแรงตัดจะลดลง ซึ่งเข้าใจได้ว่าการเจียรระไนที่ความลึกสูงๆนั้น ต้องใช้แรงอย่างมาก ทั้งแรงตัด F_y และแรงตัด F_z ดังนั้นทั้ง 2 แรงจึงมีค่าสูงขึ้น แต่แรงในแนวรัศมีจะมีค่าสูงขึ้นมากกว่าแรงในทิศการป้อนตัด เนื่องจากแรงตัด F_z เป็นแรงกดตั้งฉากกับชิ้นงาน ซึ่งมีทิศที่เดียวกับความลึกตัดที่มากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้อัตราส่วนแรงตัดลดลง

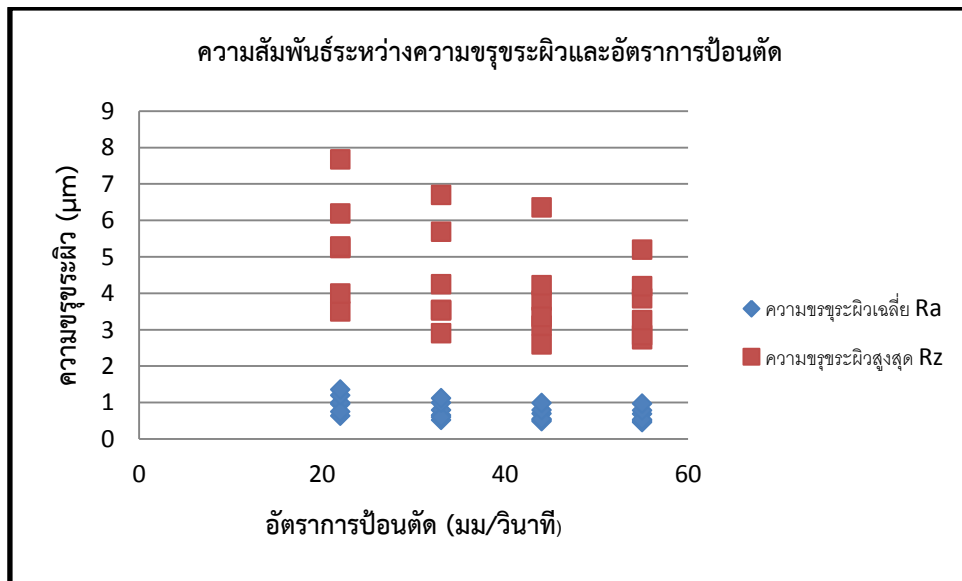
4.3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความเร็วรอบ



รูปที่ 4. 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความเร็วรอบ

จากรูปที่ 4.18 จะพบว่าเมื่อความเร็วรอบมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งหากดูเปรียบเทียบกับกับกราฟรูปที่ 4.15 แล้ว ทำให้เข้าใจได้ว่าเป็นการเชื่อมโยงผลกล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนแรงตัดลดลง ความขรุขระผิวชิ้นงานจะสูงขึ้น

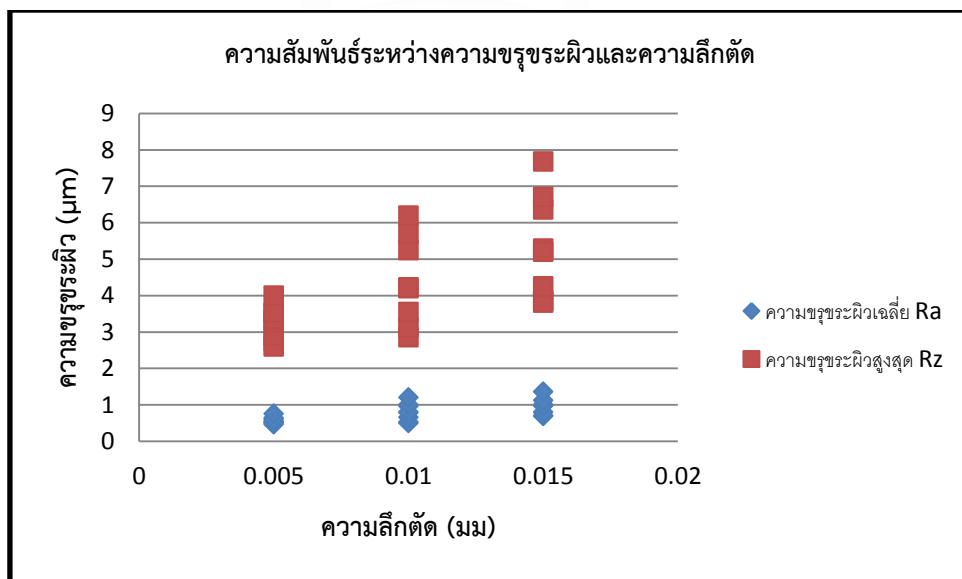
4.3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราการป้อนตัด



รูปที่ 4. 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราการป้อนตัด

จากรูปที่ 4.19 จะพบว่าเมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มขึ้น ความขรุขระผิวชิ้นงานลดลง ซึ่งหากเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.16 แล้วจะพบว่าทั้งสองกราฟมีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกัน กล่าวคือ สรุบได้ว่าเมื่ออัตราส่วนแรงตัดสูงขึ้น ความขรุขระผิวชิ้นงานจะลดลง

4.3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความลึกตัด



รูปที่ 4. 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับความลึกตัด

จากรูปที่ 4.20 จะพบว่าเมื่อความลึกตัดเพิ่มขึ้น ความขรุขระผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้น ซึ่งหากเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.17 แล้ว ทำให้เข้าใจได้ว่ากราฟทั้ง 2 มีความเชื่อมโยงกัน กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนแรงตัดลดลง ความขรุขระผิวชิ้นงานจะสูงขึ้น

4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

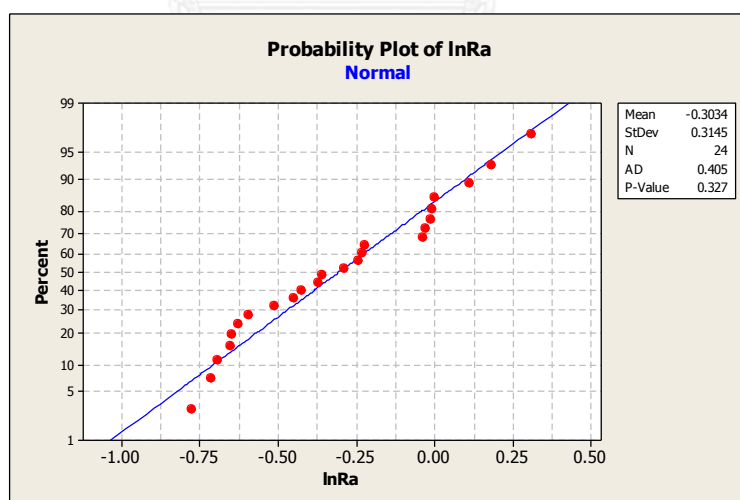
การวิเคราะห์ผลการทดลองของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) และความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (R_z) โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ซึ่งจะต้องทำการทดสอบข้อมูล โดยมีสมมติฐานว่าค่าคลาดเคลื่อนมีความผิดพลาดแบบสุ่ม เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวน (σ^2) มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่า โดยทำการทดสอบดังนี้

4.4.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

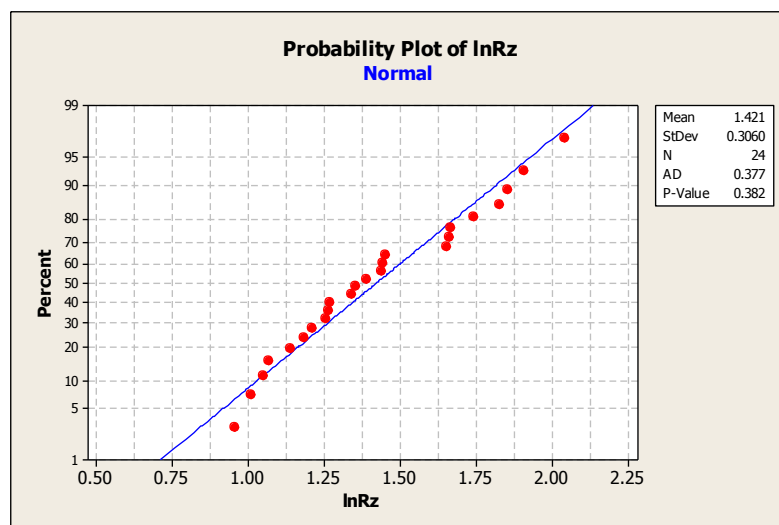
การตรวจสอบสมมติฐานของความปกติสามารถทำได้โดยการการสร้าง Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน (Residual) โดยมีสมมติฐานการทดสอบดังนี้

H_0 : ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

H_a : ข้อมูลไม่ได้มีการกระจายตัวแบบปกติ



รูปที่ 4. 21 Normal Probability Plot ของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a)

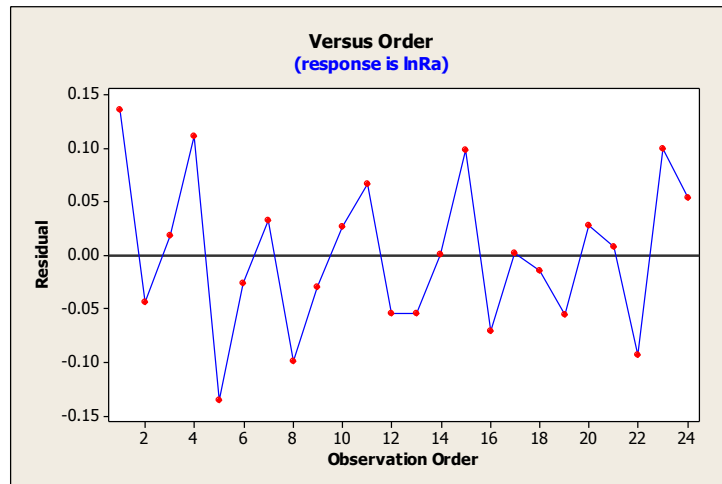


รูปที่ 4. 22 Normal Probability Plot ของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

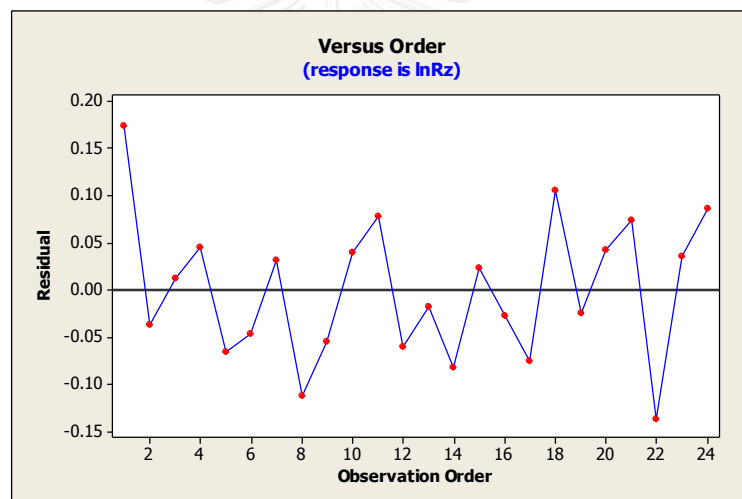
การทดสอบการกระจายแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ของความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และ 4.22 จากการวิเคราะห์พบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มที่เป็นแนวเส้นตรง โดยมีค่า P-value = 0.327 และ 0.382 ตามลำดับ ซึ่งกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5 % ($\alpha=0.05$) ดังนั้นเมื่อ P-Value > α จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ทำให้สรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ

4.4.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนว่ามีความเป็นอิสระไม่ขึ้นกับเวลา ซึ่งบางครั้งอาจเกิดขึ้นได้ เพราะในการทำการทดลองนั้น เมื่อเวลาผ่านไปทักษะของผู้ทำการทดลองอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบโดยนำค่าคลาดเคลื่อนพล็อตกับเวลาหรือครั้งที่ทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24



รูปที่ 4. 23 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)

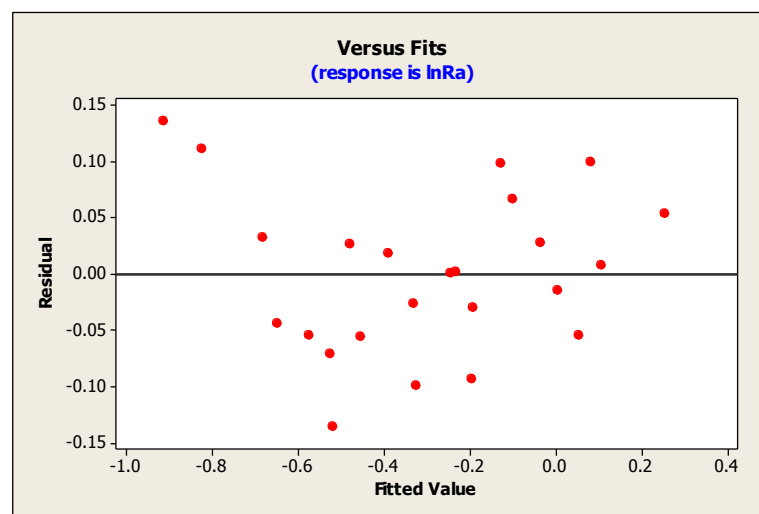


รูปที่ 4. 24 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

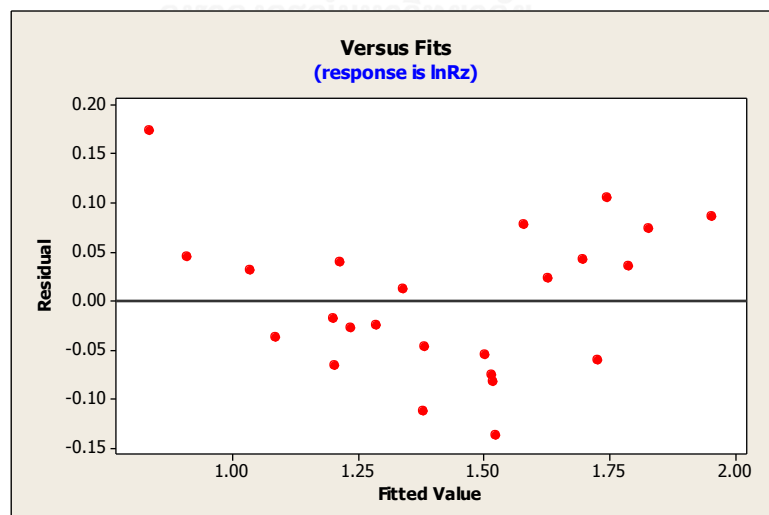
จากรูป 4.23 และ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับการเก็บข้อมูลของความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra) และความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) ตามลำดับ โดยพบว่าลักษณะของค่าคลาดเคลื่อนจากทั้งสองรูปไม่มีแนวโน้มไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง หรือเป็นวัฏจักร และมีการกระจายตัวอยู่รอบแกน x อย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีความเป็นอิสระ

4.4.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนเป็นการตรวจสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยจะทำการทดสอบว่าค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ หรือไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระใดๆ รวมถึงค่าของคำตอบที่ถูกระบุ (Predicted Response) คือค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน การทดสอบทำได้โดยพล็อตค่าคลาดเคลื่อน (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26



รูปที่ 4. 25 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระเฉลี่ย (Ra)



รูปที่ 4. 26 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

จากรูป 4.25 และ 4.26 แสดงการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความขรุขระผิวชิ้นงาน (Ra) และความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) ตามลำดับ พบว่าค่าคลาดเคลื่อนของทั้งสองรูปมีการกระจายตัวอยู่รอบแกน x อย่างสม่ำเสมอ และเป็นการกระจายตัวแบบไม่แน่นอน และไม่มีการออกห่างจากแกน x อย่างผิดปกติ ซึ่งหมายถึงความแปรปรวนของชุดข้อมูลมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง

4.5 สมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงาน

จากผลการทดลองที่ได้ในตาราง 4.1 แสดงเงื่อนไขการเจียรระไนที่สามารถนำมาพัฒนาสมการทำนายความขรุขระผิว โดยเมื่อนำเงื่อนไขการเจียรระไนต่างๆ ได้แก่ อัตราการป้อนตัด ความเร็วรอบ ความลึกตัด และอัตราส่วนแรงตัดสถิต โดยจากผลการทดลองจะพบว่าอัตราส่วนแรงตัด F_y/F_z มีการแปรผันกับความขรุขระผิวชิ้นงานแบบไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นสมการที่ใช้ในการพยากรณ์ความขรุขระผิวชิ้นงานจึงควรเป็นลักษณะเอกซ์โปเนนเชียลฟังก์ชันประกอบไปด้วยเงื่อนไขการตัดดังกล่าว โดยนำมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple linear regression analysis) และใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอย ได้สมการทำนายความขรุขระผิว ดังนี้

$$Ra = e^{0.415} \cdot V^{0.266} \cdot F^{-0.352} \cdot D^{0.335} \cdot (F_y/F_z)^{-0.364} \quad (4.5.1)$$

$$Rz = e^{1.52} \cdot V^{0.302} \cdot F^{-0.289} \cdot D^{0.316} \cdot (F_y/F_z)^{-0.367} \quad (4.5.2)$$

จากสมการแบบเอกซ์โปเนนเชียล (4.5.1) และ (4.5.2) สามารถแปลงให้อยู่ในรูปสมการถดถอยพหุคูณด้วยการใช้การแปลงลอการิทึมดังนี้

$$\ln Ra = 0.415 + 0.266 \ln V - 0.352 \ln F + 0.335 \ln D - 0.364 \ln (F_y/F_z) \quad (4.5.3)$$

$$\ln Rz = 1.52 + 0.302 \ln V - 0.289 \ln F + 0.316 \ln D - 0.367 \ln (F_y/F_z) \quad (4.5.4)$$

จากนั้นทำการทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย
2. การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว

4.5.1 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย

การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย คือการทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง หรือค่าความขรุขระผิวชิ้นงาน และตัวแปรอิสระ ที่ประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัดหรือไม่ แสดงขั้นตอนดังนี้

1) เมื่อตัวแปรตอบสนองคือความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (Ra) มีสมมติฐาน ดังนี้

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

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

ซึ่งสามารถตรวจสอบความมีนัยสำคัญได้จากตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้ผล ดังนี้

ตารางที่ 4. 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย Ra

Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	2.15980	0.53995	89.35	0.000
Residual Error	19	0.11482	0.00604		
Total	23	2.27462			

Source	DF	Seq SS
lnV	1	0.48522
lnF	1	0.60555
lnD	1	1.03874
ln(Fy/Fz)	1	0.03029

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

2) เมื่อตัวแปรตอบสนองคือความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) มีสมมติฐาน ดังนี้

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

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

ซึ่งสามารถตรวจสอบความมีนัยสำคัญได้จากตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงการวิเคราะห์ ANOVA ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4. 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย Rz

Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	2.02566	0.50642	74.82	0.000
Residual Error	19	0.12860	0.00677		
Total	23	2.15427			

Source	DF	Seq SS
lnV	1	0.57887
lnF	1	0.45665
lnD	1	0.95921
ln(Fy/Fz)	1	0.03094

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

4.5.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ละตัว

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

1) เมื่อตัวแปรตอบสนองคือความชรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a) มีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0: \beta_j = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0$$

ซึ่งสามารถตรวจสอบความมีนัยสำคัญได้จากตารางที่ 4.4 ซึ่งทำการคำนวณด้วยโปรแกรม ให้ผลดังนี้

ตารางที่ 4. 4 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัวสำหรับ Ra

The regression equation is
 $\ln Ra = 0.415 + 0.266 \ln V - 0.352 \ln F + 0.335 \ln D - 0.364 \ln(Fy/Fz)$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.4153	0.4804	0.86	0.398
lnV	0.26551	0.07923	3.35	0.003
lnF	-0.35169	0.06816	-5.16	0.000
lnD	0.33531	0.06526	5.14	0.000
ln(Fy/Fz)	-0.3635	0.1624	-2.24	0.037

S = 0.0777389 R-Sq = 95.0% R-Sq(adj) = 93.9%

จากตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว พบว่าตัวแปรที่อยู่ในสมการ ได้แก่ lnV, lnF, lnD และ ln(Fy/Fz) โดยค่า P-value มีค่าน้อยกว่า α ซึ่งกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5 % ($\alpha = 0.05$) ดังนั้นจึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปได้ว่า ตัวแปรดังกล่าวควรมีอยู่ในสมการถดถอย และสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าความขรุขระผิวได้อย่างมีนัยสำคัญ

2) เมื่อตัวแปรตอบสนองคือความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) มีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0: \beta_j = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0$$

ซึ่งสามารถตรวจสอบความมีนัยสำคัญได้จากตารางที่ 4.5 ซึ่งทำการคำนวณด้วยโปรแกรม ให้ผลดังนี้

ตารางที่ 4. 5 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว สำหรับ Rz

The regression equation is
 $\ln Rz = 1.52 + 0.302 \ln V - 0.289 \ln F + 0.316 \ln D - 0.367 \ln(Fy/Fz)$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.5200	0.5084	2.99	0.008
lnV	0.30181	0.08385	3.60	0.002
lnF	-0.28947	0.07214	-4.01	0.001
lnD	0.31608	0.06906	4.58	0.000
ln(Fy/Fz)	-0.3674	0.1718	-2.14	0.046

S = 0.0822715 R-Sq = 94.0% R-Sq(adj) = 92.8%

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว พบว่าตัวแปรที่อยู่ในสมการ ได้แก่ $\ln V$, $\ln f$, $\ln D$ และ $\ln(Fy/Fz)$ โดยค่า P-value มีค่าน้อยกว่า α ซึ่งกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5 % ($\alpha = 0.05$) ดังนั้นจึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปได้ว่า ตัวแปรดังกล่าวควรมีอยู่ในสมการถดถอย และสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าความขรุขระผิวได้อย่างมีนัยสำคัญ

จากตารางที่ 4.4 และ 4.5 พบว่า $\ln V$, $\ln f$, $\ln D$ และ $\ln(Fy/Fz)$ สามารถใช้อธิบายตัวแปร y ได้ทั้งในสมการความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) และความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) โดยพบว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละปัจจัยมีค่าและเครื่องหมายที่แตกต่างกัน กล่าวคือค่าสัมประสิทธิ์สามารถบ่งบอกได้ทั้งขนาดและทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นๆที่มีต่อความขรุขระผิวชิ้นงาน โดยหากปัจจัยมีสัมประสิทธิ์ที่เป็นเครื่องหมายบวก จะหมายถึงปัจจัยนั้นมีความสัมพันธ์ต่อความขรุขระผิวในลักษณะแปรผันตรงต่อกัน ในทางตรงกันข้ามถ้าปัจจัยมีสัมประสิทธิ์ที่เป็นเครื่องหมายลบ จะหมายถึงปัจจัยนั้นลักษณะแปรผกผันกับความขรุขระผิวชิ้นงาน

จากสมการจะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของอัตราการป้อนตัดมีค่าเป็นลบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มมากขึ้น ค่าความขรุขระผิวมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราการป้อนตัดสูงจะส่งผลให้อุณหภูมิตัดสูง วัสดุชิ้นงานอ่อนนุ่มลง ดังนั้นจึงใช้แรงในการตัดน้อยลง ส่งผลให้ความขรุขระผิวชิ้นงานมีค่าน้อย ทำให้ได้คุณภาพผิวการตัดที่ดี

นอกจากนี้ยังพบว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของความเร็รรอบมีค่าเป็นบวก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความเร็รรอบเพิ่มมากขึ้น ค่าความขรุขระผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มความเร็รรอบทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนมากขึ้น ผิวชิ้นงานจึงเกิดความขรุขระสูงขึ้น

ขณะที่อัตราส่วนแรงตัดสถิต พบว่าค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์มีค่าสูงที่สุดในสมการ โดยมีเครื่องหมายเป็นลบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออัตราส่วนแรงตัดสถิตมีค่ามากขึ้น ค่าความขรุขระผิวจะลดลง นั่นคือผิวหน้าชิ้นงานจะมีคุณภาพมากขึ้น โดยที่ค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์มีค่าสูงที่สุด บอกลึกว่าอัตราส่วนแรงตัดสถิตเป็นปัจจัยที่ส่งผลและสามารถอธิบายความขรุขระผิวชิ้นงานได้มากที่สุด

ส่วนปัจจัยความลึกตัดที่มีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก หมายถึงเมื่อเพิ่มความลึกตัดมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าความลึกตัดที่เพิ่มขึ้น จะเป็นการเพิ่มพื้นที่การตัด ซึ่งทำให้เกิดการสั่นสะเทือนมากขึ้น มีผลทำให้ความขรุขระผิวชิ้นงานสูงขึ้น

4.5.3 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

1) เมื่อตัวแปรตอบสนองคือความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย (R_a)

จากการวิเคราะห์การถดถอย ตามที่แสดงในตาราง 7 พบว่า สมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย มีค่า R^2 และ R^2_{adj} เท่ากับ 95% และ 93.9% ตามลำดับ นั้นหมายถึงตัวแปรอิสระสามารถอธิบายตัวแปรตอบสนอง หรือความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ยได้เป็นอย่างดี

2) เมื่อตัวแปรตอบสนองคือความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz)

จากการวิเคราะห์การถดถอย ตามที่แสดงในตาราง 8 พบว่า สมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานเฉลี่ย มีค่า R^2 และ R^2_{adj} เท่ากับ 94% และ 92.8% ตามลำดับ นั้นหมายถึงตัวแปรอิสระสามารถอธิบายตัวแปรตอบสนอง หรือความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุดได้เป็นอย่างดี

4.6 การทดสอบความแม่นยำของสมการ

สมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ จะต้องมีการทดสอบความแม่นยำ โดยคาดหวังว่าสมการสามารถใช้ทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานสำหรับงานเจียรระโนได้ดีสำหรับเงื่อนไขการตัดอื่นๆ โดยเงื่อนไขการตัดใหม่เพื่อใช้ทดสอบความแม่นยำ

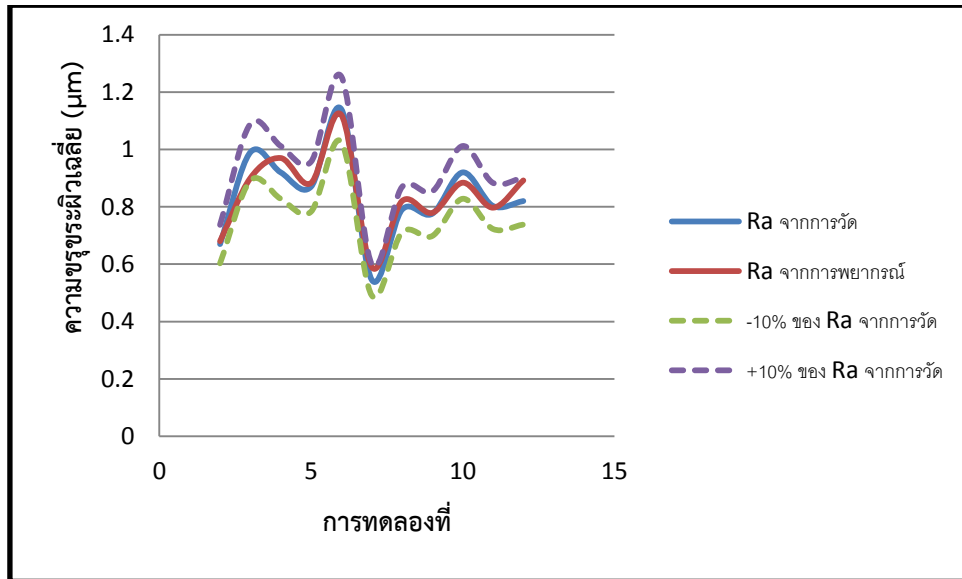
ตารางที่ 4. 6 เงื่อนไขการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการ

Run Order	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/วินาที)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
1	22	6600	0.01
2	55	3300	0.015
3	22	3300	0.01
4	22	3300	0.02
5	33	3300	0.02
6	33	6600	0.015
7	44	3300	0.01
8	33	3300	0.015
9	44	3300	0.02
10	55	6600	0.015
11	44	6600	0.01
12	55	3300	0.02

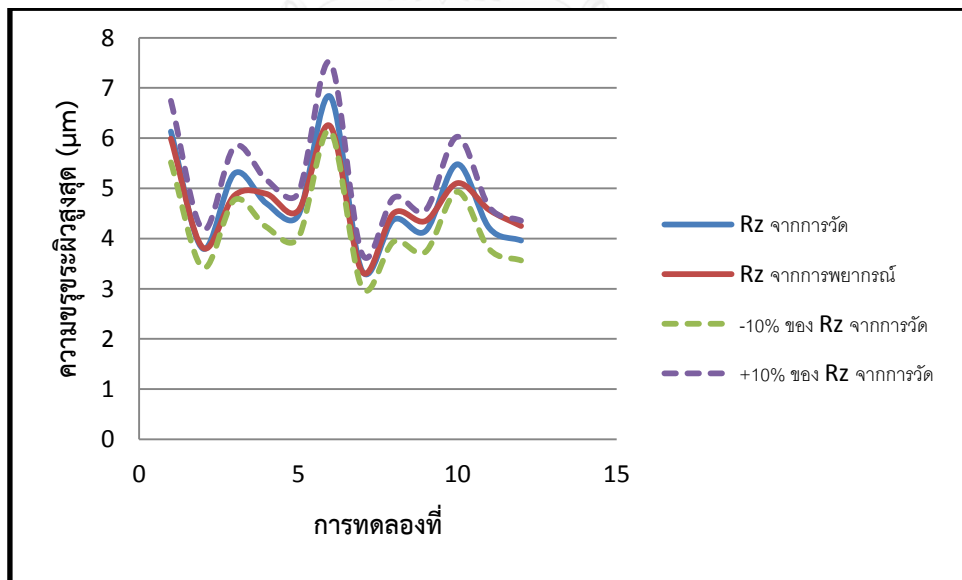
ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำ

Run Order	อัตราการป้อนคัต (มิลลิเมตร/วินาที)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความลึกคัต (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนแรงคัต (Fy/Fz)	ค่า Rz จาก การวัด	ค่า Ra จาก การวัด	ค่า Rz จาก สมการ	ค่า Ra จาก สมการ
1	22	6600	0.01	1.11	6.13	1.188	5.99	1.09
2	55	3300	0.015	1.52	3.8	0.67	3.82	0.68
3	22	3300	0.01	1.15	5.3	0.99	4.86	0.9
4	22	3300	0.02	1.23	4.7	0.92	4.89	0.97
5	33	3300	0.02	1.33	4.46	0.87	4.556	0.883
6	33	6600	0.015	1.08	6.83	1.14	6.242	1.12
7	44	3300	0.01	1.82	3.363	0.546	3.34	0.59
8	33	3300	0.015	1.5	4.377	0.79	4.507	0.82
9	44	3300	0.02	1.35	4.15	0.776	4.35	0.779
10	55	6600	0.015	1.22	5.48	0.92	5.104	0.884
11	44	6600	0.01	1.44	4.21	0.803	4.57	0.797
12	55	3300	0.02	1.32	3.96	0.82	4.25	0.892

จากตารางที่ 4.7 สังเกตได้ว่าค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการวัดจริงด้วยเครื่องวัดความขรุขระผิว กับค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการทำนายความขรุขระผิวตามสมการที่ 4.5.1 และ 4.5.2 ที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ จะเห็นว่าค่าความขรุขระผิวชิ้นงานทั้งแบบเฉลี่ย (Ra) และค่าความขรุขระผิวชิ้นงานสูงสุด (Rz) ที่ได้จากการวัดจริง และจากการคำนวณด้วยสมการ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถแสดงด้วยรูปที่ 4.27 และ 4.28 ที่แสดงถึงความแม่นยำของสมการด้วยเงื่อนไขการตัดต่างๆ



รูปที่ 4. 27 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra)



รูปที่ 4. 28 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (Rz)

การคำนวณความแม่นยำของสมการ สามารถทำได้ผ่านการคำนวณค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน ตามสมการที่ 4.6.1 ดังนี้

$$\text{ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \left(\frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|f_t - a_t|}{a_t} \right) \quad (4.6.1)$$

ค่าความแม่นยำของสมการพยากรณ์

$$= 100 - \left(\frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|f_t - a_t|}{a_t} \right) \quad (4.6.2)$$

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

ซึ่งจากการคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) และ สมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) พบว่า มีค่าเท่ากับ 4.34% และ 5.68% ตามลำดับ นั่นคือ มีสมการทำนายความขรุขระผิวเฉลี่ย (R_a) และสมการทำนายความขรุขระผิวสูงสุด (R_z) มีความแม่นยำ เท่ากับ 95.66% และ 94.32% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าสามารถทำนายความขรุขระผิวได้ในระดับที่สูงขึ้นและเป็นที่ยอมรับได้ ขอบเขต ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าพารามิเตอร์หรือเงื่อนไขการตัดต่างๆ ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และความลึกตัด สามารถใช้อธิบายค่าความขรุขระผิวขึ้นงานได้ เนื่องจากมีแนวโน้มความสัมพันธ์ในลักษณะเช่นเดียวกัน แม้เงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป และการใช้อัตราส่วนแรงตัดเป็นตัวแปรหนึ่งในสมการ นับเป็นพารามิเตอร์ที่ได้กำจัดอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัดแล้วด้วยเช่นกัน

4.7 การวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดสถิตด้วยการแปลงเวฟเล็ต

จากที่กล่าวข้างต้น ค่าแรงที่เกิดขึ้นในขณะตัดไม่สามารถนำมาอธิบายความสัมพันธ์ที่มีต่อความขรุขระผิวขึ้นงานได้ เนื่องจากเมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่แล้วพบว่า ความถี่ที่เกิดขึ้นของแรงตัดจะไม่สอดคล้องกับความถี่ของความขรุขระผิวขึ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27

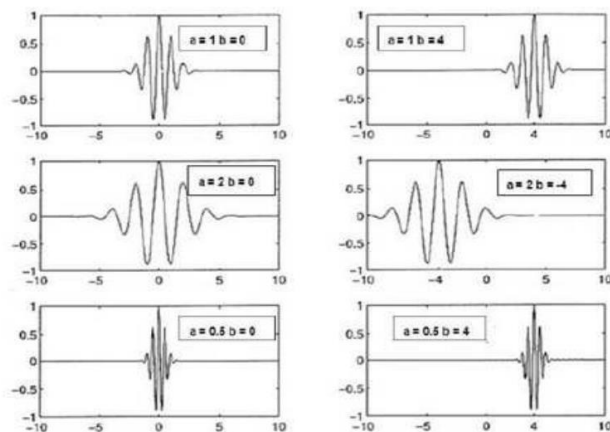
อย่างไรก็ตามการแปลงสัญญาณแรงตัดด้วยการวิเคราะห์เวฟเล็ต ทำให้สามารถใช้แรงตัดสถิตในการอธิบายความขรุขระผิวขึ้นงานได้

การแปลงเวฟเล็ต (Wavelet Transform) และการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) เป็นการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปสู่โดเมนความถี่เช่นเดียวกัน และสามารถแปลงจากโดเมนความถี่ไปเป็นโดเมนเวลาได้ โดยใช้การแปลงกลับ (Inverse Transform) ได้เช่นกัน ซึ่งหลักการของ 2 วิธีจะคล้ายกันคือ ฟังก์ชัน สามารถแทนได้ด้วยผลรวมเชิงเส้นของสัมประสิทธิ์ (Coefficient) และฟังก์ชันพื้นฐาน (Basic function) สำหรับการแปลงฟูเรียร์ ค่าสัมประสิทธิ์ คือ a_1, a_2, \dots และฟังก์ชันพื้นฐาน

คือ $\sin(x)$,... และ $\cos(x)$,... แต่การแปลงเวฟเล็ต ในส่วนฟังก์ชันพื้นฐาน ส่วนใหญ่เรียกว่าฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ (Mother Wavelet Function) เป็น ซึ่งมีคุณสมบัติในการสเกลและเลื่อนตำแหน่งได้

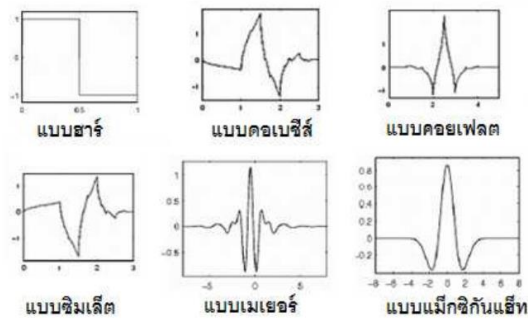
$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

โดยที่ $\psi(t)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่ ซึ่งจะถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งโดยพารามิเตอร์ a และ b ซึ่งการสเกล หมายถึง การหดเข้า (Compressing) หรือขยายออก (Dilation) โดยใช้ " a " แทนการหดหรือการขยาย ซึ่งเป็นการเปลี่ยนความถี่ การเลื่อนตำแหน่ง หมายถึง การเลื่อนตำแหน่งของการเกิดคลื่นบนแกนเวลา โดยแทนด้วยพารามิเตอร์ " b " รูปที่ 4.29 แสดงเวฟเล็ตที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า a และ b ต่างๆ กัน จากสมการ พบว่าจะมีการปรับค่าเพื่อให้สัญญาณที่ได้หลังจากปรับสเกลแล้วมีพลังงานเท่ากับเวฟเล็ตแม่ด้วยการคูณ $\frac{1}{\sqrt{a}}$ [20]



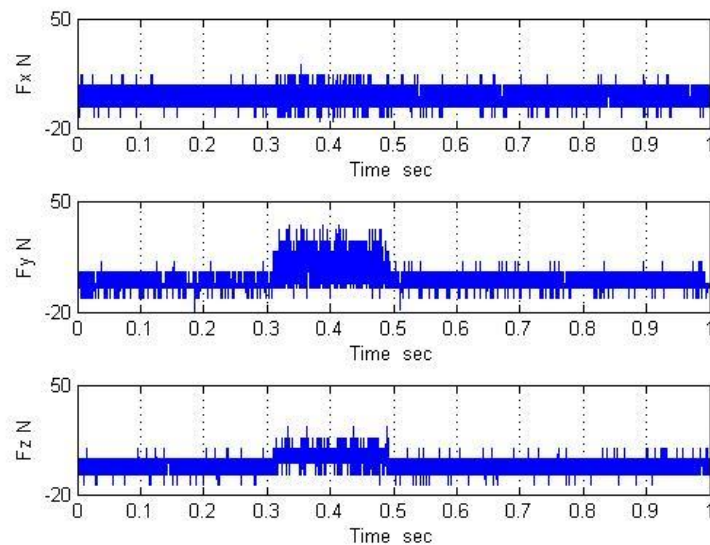
รูปที่ 4. 29 เวฟเล็ตที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่า a และ b ต่างๆ กัน [20]

เมื่อนำข้อมูลสัญญาณใดๆ มาวิเคราะห์ด้วยกระบวนการแปลงเวฟเล็ต จะเปรียบเหมือนการแตกสัญญาณให้ออกมาดังรูปของเวฟเล็ตแม่ ที่การปรับสเกลและตำแหน่งที่แตกต่างกันไป เวฟเล็ตถูกแบ่งออกเป็นหลายลักษณะ ซึ่งเรียกลักษณะต่างๆ ว่า แฟมิลี (Family) โดยมีรูปแบบคลื่นสัญญาณที่แตกต่างกันออกไป เช่น คลื่นเวฟเล็ตแบบฮาร์, แบบเมเยอร์ และแบบดอเบซีส์ เป็นต้น รูปที่ 4.30 แสดงลักษณะเวฟเล็ตที่แฟมิลีต่างๆ



รูปที่ 4. 30 ลักษณะเวฟเล็ทที่แฟมลีต่างๆ [20]

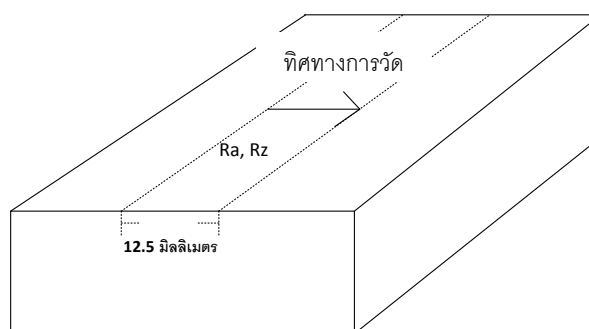
จากลักษณะสัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น มีลักษณะใกล้เคียงกับลักษณะเวฟเล็ทคอปเบชีส์ จึงเลือกใช้ฟังก์ชันแบบคอปเบชีส์ ในการแปลงสัญญาณแรงตัดดังกล่าวในการวิเคราะห์ ตัวอย่างการทดลองวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดสำหรับการเจียรไนด้วยการแปลงเวฟเล็ท ที่ความเร็วตัด 44 เมตร/นาทิจ อัตราป้อนตัด 3300 มิลลิเมตร ความลึกตัด 0.015 มิลลิเมตร



รูปที่ 4. 31 สัญญาณแรงตัดที่เกิดขึ้น ที่ความเร็วตัด 44 มิลลิเมตร/นาทิจ อัตราป้อนตัด 3300 รอบ/นาทิจ ความลึกตัด 0.015 มิลลิเมตร

การวิเคราะห์ข้อมูลในโดเมนเวลาเพื่อหาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวและแรงตัดโดยใช้ระยะทางการตัดในเวลา 1 วินาทีในการอ้างอิงเปรียบเทียบ เนื่องจากอัตราสุมของแรงตัดและความขรุขระผิวไม่เท่ากัน โดยแรงตัดใช้อัตราสุมเท่ากับ 10,000 ข้อมูลต่อวินาที แต่ความขรุขระผิวใช้อัตราสุมเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที ดังนั้นการเปรียบเทียบด้วยระยะทางในการตัด 1 วินาทีจะต้องแปลงจำนวนข้อมูลของค่าความขรุขระผวก่อนเพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลแรงตัดดังนี้

ในการวัดความขรุขระผิวได้ตั้งค่าให้เข็มวัดความขรุขระผิวให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตรใน 1 วินาที โดยเครื่องวัดความขรุขระผิวใช้อัตราสุ่มเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที ดังนั้นสามารถคำนวณจำนวนข้อมูลที่ใช้ในเวลา 1 วินาทีของค่าความขรุขระผิวเพื่อใช้เทียบกับจำนวนข้อมูลของแรงตัดได้ดังนี้



รูปที่ 4. 32 การวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน

โดยวัดในแนวตั้งฉากกับอัตราการป้อนตัด [15] ซึ่งมีทิศทางตามลูกศรดังรูปที่ 4.32 ระยะทางในการวัดความขรุขระผิวชิ้นงานคือ 12.5 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} \text{จำนวนข้อมูล} &= (\text{ระยะทางในการตัด 1 วินาที} / 0.5) \times 400 \\ &= (12.5/0.5) \times 400 \\ &= 10,000 \text{ ข้อมูล} \end{aligned}$$

หลังจากการคำนวณจำนวนข้อมูลของค่าความขรุขระผิว สามารถนำค่าที่คำนวณได้ไปใช้ในการแปลงสัญญาณทั้งสองให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่ได้

จากรูปที่ 4.31 และ 4.32 แสดงถึงสัญญาณคลื่นแรงตัดพลวัต และความขรุขระผิวชิ้นงาน ด้วยระยะทางในการตัด 1 วินาทีที่เท่ากัน จะสังเกตได้ได้ว่าในระยะเวลาอ้างอิงที่เท่ากันความขรุขระผิวชิ้นงานและสัญญาณแรงตัดเกิดจำนวนลูกคลื่นที่ต่างกัน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าทั้งความขรุขระผิวและแรงตัดพลวัตจะมีความถี่ที่ไม่สอดคล้องกัน

ดังนั้นจะพบว่าแรงตัดที่โดเมนความถี่ไม่มีความสัมพันธ์กับพีคของความขรุขระผิวชิ้นงาน (roughness peak) ที่โดเมนความถี่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้แรงตัดสถิตหรือแรงตัดมาพิจารณาในการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงาน

ตัวอย่างการแปลงสัญญาณให้อยู่ในโดเมนความถี่

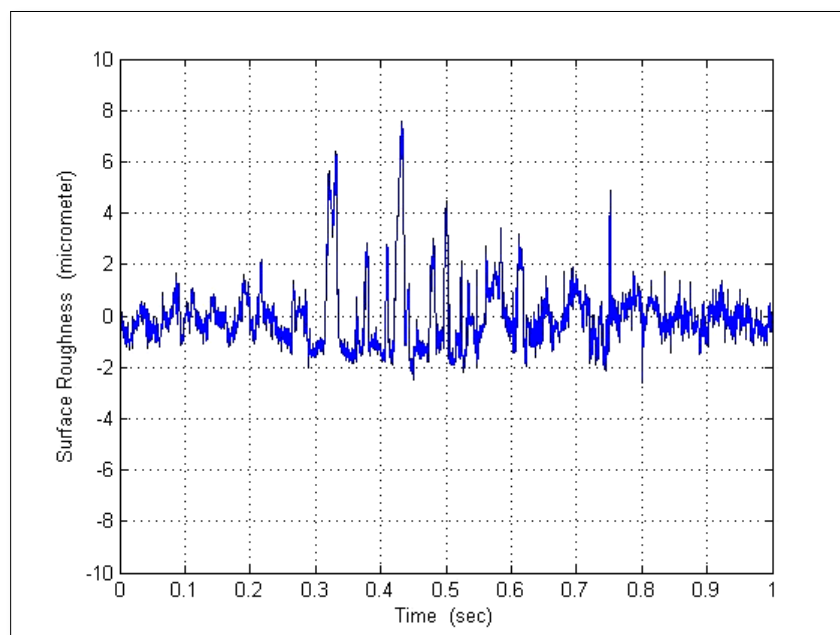
ความถี่ที่เกิดขึ้นคำนวณจาก

$$fq = \frac{v}{60} \quad (4.6.4)$$

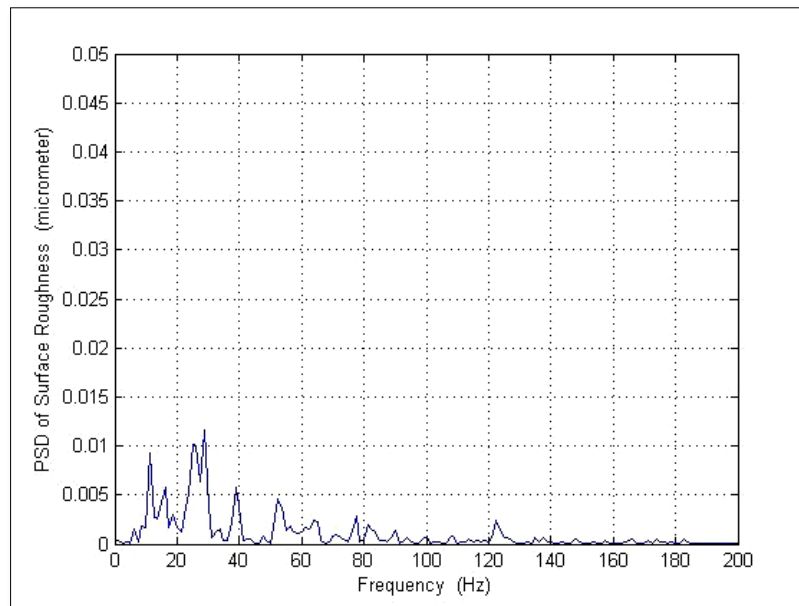
เมื่อ f_q คือ ความถี่ในการตัดในเวลา 1 วินาที (เฮิรตซ์)

v คือ ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)

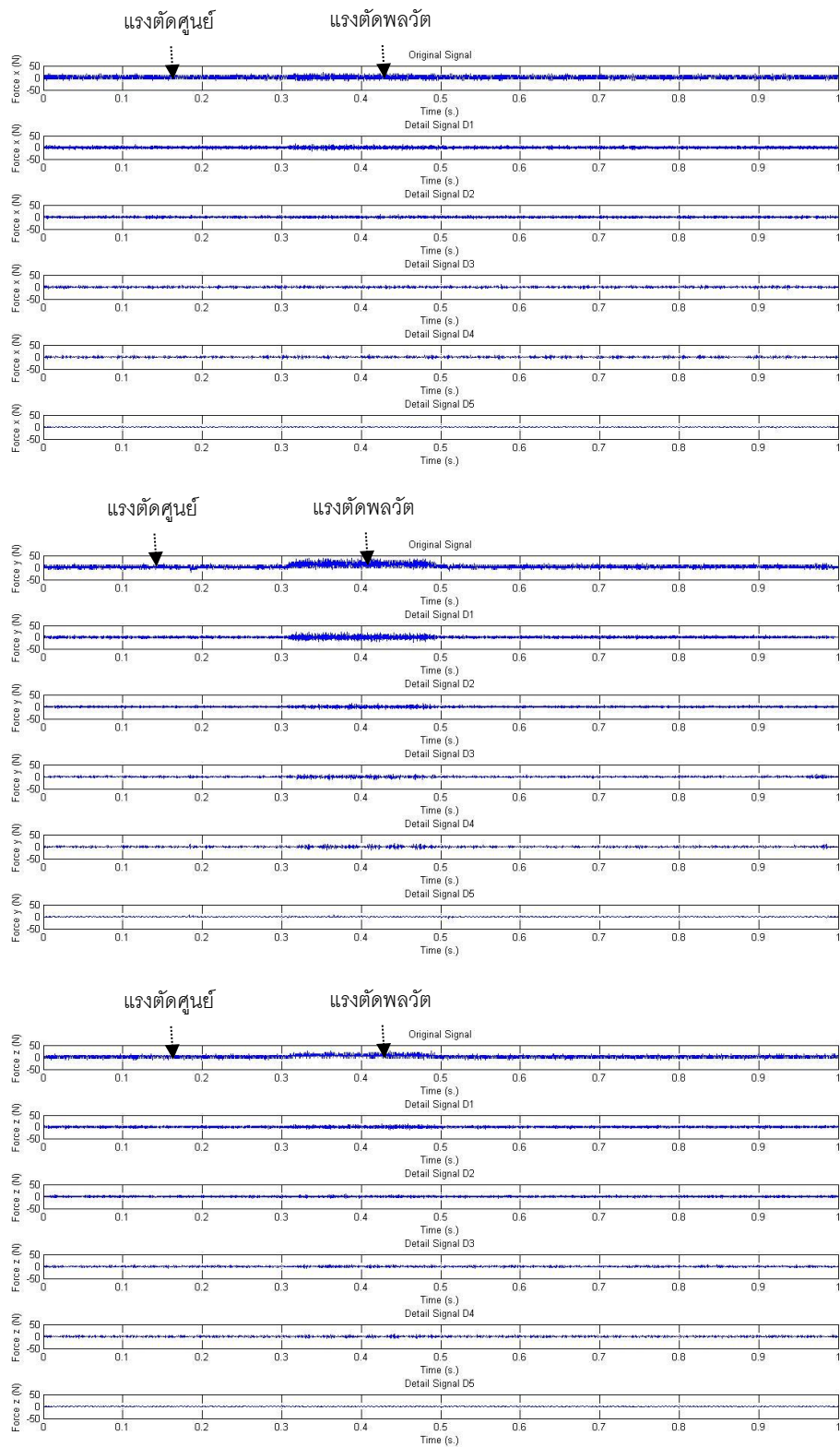
จากการคำนวณตัวอย่างควรได้ความถี่ความเร็วรอบต่ำ คือ $f_q = 3300/60 = 55$ เฮิรตซ์และความถี่ที่เกิดความเร็วรอบสูง คือ $f_q = 6600 /60 = 110$ เฮิรตซ์ตามลำดับ รูปที่ 4.33 และรูปที่ 4.34 แสดงตัวอย่างพาวเวอร์สเปกตรัมและการทดสอบความถี่ของการตัด ซึ่งได้จากการนำข้อมูลจากผลการทดลองมาวิเคราะห์โดยอาศัยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast flourier transform)



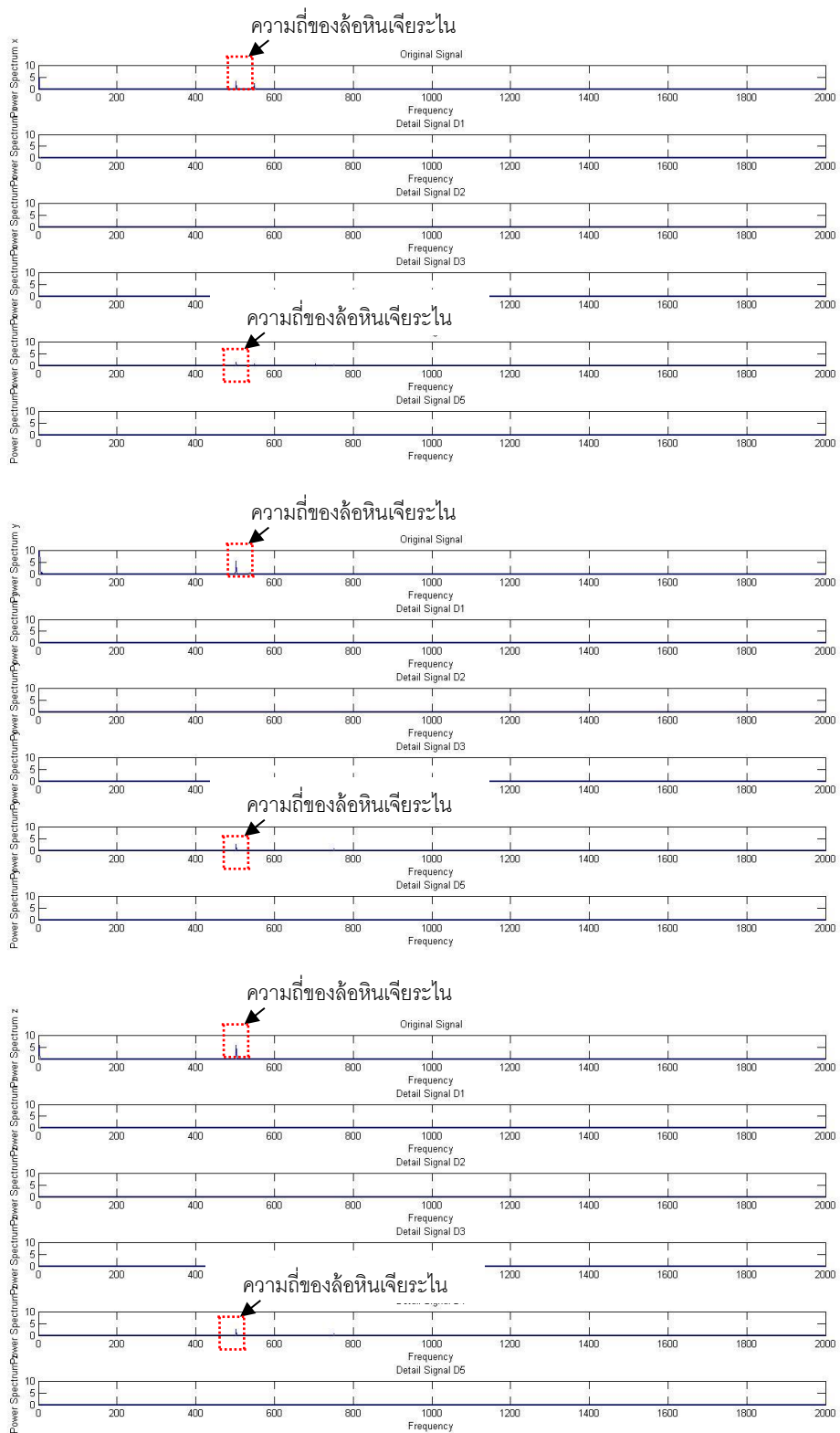
รูปที่ 4. 33 ความขรุขระผิวชิ้นงานที่ใดเมนเวลา



รูปที่ 4. 34 ความขรุขระผิวชิ้นงานที่โดเมนความถี่



รูปที่ 4. 35 สัญญาณแรงตัดในโดเมนเวลาด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบคอเชชีส์



รูปที่ 4. 36 สัญญาณแรงตัดในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ทแบบคอเบซีส

จากตัวอย่างการวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบดอเบชีส์ในโดเมนความถี่จะพบว่าความถี่ที่เกิดขึ้นนั้นมีเพียงความถี่ของล้อยินเจียรไนเท่านั้น จะไม่พบความถี่ของความขรุขระผิวชิ้นงาน เนื่องจากในการเจียรไนนั้น ผิวชิ้นงานมีความเรียบสูง ไม่เกิดรอยรอบๆ ผิวชิ้นงาน จึงไม่พบความถี่เกิดขึ้น ดังนั้นการแปลงสัญญาณแรงตัดในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบดอเบชีส์จึงไม่สามารถนำมาใช้อธิบายลักษณะผิวชิ้นงานงานที่ผ่านกระบวนการเจียรไนได้



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราส่วนของแรงตัด และเงื่อนไขการตัดต่างๆ บนเครื่องเจียรระโนราบ เพื่อนำไปพัฒนาเป็นสมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานในการเจียรระโนด้วยอัตราส่วนแรงตัด สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน S50C ด้วยหินเจียรระโนชนิดอะลูมิเนียมออกไซด์

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองที่ได้พบว่าสามารถนำอัตราส่วนแรงตัด (Force ratio) มาใช้พยากรณ์ค่าความขรุขระผิวชิ้นงานได้ ซึ่งมีข้อดีมากกว่างานวิจัยที่ผ่านมา [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12] และ [13] คือ สมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานที่ถูกพัฒนาขึ้นเป็นฟังก์ชันของเงื่อนไขการตัด ได้แก่ อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด โดยงานวิจัยนี้ได้มีการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เพื่อตรวจวัดแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดชิ้นงาน ซึ่งจะเป็พารามิเตอร์ตัวหนึ่งในการทำนายความขรุขระผิว โดยจะอยู่ในรูปของอัตราส่วนของแรงตัด ได้พิสูจน์ว่าการใช้สัดส่วนแรงตัดดังกล่าวนี้ จะทำให้สามารถทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานได้แม้เงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป โดยแรงตัดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือแรงตัดสถิต (Static cutting force) โดยแรงตัด (F_y) เป็นแรงตัดที่เกิดขึ้นในทิศเดียวกันกับทิศความเร็วรอบของหินเจียรระโน ส่วนแรงในทิศรัศมีตั้งฉากกับชิ้นงาน (F_z) เป็นแรงที่กดลงบนผิวหน้าชิ้นงานโดยตรงในทิศตั้งฉาก ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อผิวชิ้นงานเช่นกัน แต่จะน้อยกว่าแรงตัดในทิศความเร็วรอบ (F_y) จากการทดลองพบว่า เมื่อแรงตัด F_y และ F_z สูงขึ้น โดยแรงตัด F_y จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าแรงตัด F_z จึงทำให้อัตราส่วนแรงตัด (F_y/F_z) มากขึ้น จะทำให้ความขรุขระผิวลดลง ซึ่งพบว่าการนำอัตราส่วนแรงตัดสถิตมาใช้ทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานสามารถใช้ได้ผลที่ดี ในขณะที่แรงตัดพลวัตไม่สามารถนำมาใช้ได้ โดยพิสูจน์ได้จากการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วและการแปลงเวฟเล็ทแบบดอเบซีส์ในโดเมนความถี่ของสัญญาณความขรุขระผิวชิ้นงาน

งานวิจัยที่ผ่านมา [8] ได้ทดลองผลที่เกิดขึ้นต่อผิวชิ้นงาน จากการใช้ล้อหินเจียรระโนที่มีจำนวนเกรนแตกต่างกัน โดยงานวิจัย [8] ได้มีการทดสอบการเจียรระโนชิ้นงานด้วยล้อหินเจียรระโนที่มีจำนวนเกรน 46, 60 และ 80 จากการทดลองจะพบว่าเมื่อจำนวนเกรนมากขึ้น หรือขนาดเกรนละเอียดขึ้น จะให้ค่าความเรียบผิวที่ดีขึ้น โดยพบว่าล้อหินเจียรระโนที่มีจำนวนเกรน 80 ทำให้ผิวชิ้นงานมีค่าความเรียบผิวที่ดีที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ล้อหินเจียรระโนที่มีจำนวนเกรนคือ 80 ซึ่งให้ค่าความเรียบผิวที่ดีสำหรับกระบวนการเจียรระโน

จากผลการทดลองพิสูจน์ว่าอัตราส่วนแรงตัดดังกล่าวนี้ มีความสัมพันธ์กันกับเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนไป โดยความเร็วรอบและความลึกตัดมีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกันกับอัตราส่วนแรงตัด กล่าวคือ เมื่อความเร็วรอบและความลึกตัดมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราการป้อนตัดมากขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนแรงตัดมีค่าลดลง นอกจากนี้เงื่อนไขการตัดซึ่งคือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อน และความลึกตัดที่ต่างกันก็ส่งผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานต่างกัน ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระผิวชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัด และเงื่อนไขการตัดอื่นๆ ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการใช้สมการแบบฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล ทั้งนี้การหาความสัมพันธ์แบบถดถอยพหุคูณถูกนำมาใช้วิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลองความขรุขระผิวชิ้นงานด้วยการใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

จากการทดลองพบว่าจากสมการจะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของอัตราการป้อนตัดมีค่าเป็นลบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มมากขึ้น ค่าความขรุขระผิวมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของความเร็วรอบมีค่าเป็นบวก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มมากขึ้น ค่าความขรุขระผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ขณะที่อัตราส่วนแรงตัดสถิติพบว่าค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์มีค่าสูงที่สุดในสมการ โดยมีเครื่องหมายเป็นลบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออัตราส่วนแรงตัดสถิติมีค่ามากขึ้น ค่าความขรุขระผิวจะลดลง ส่วนปัจจัยความลึกตัดที่มีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก หมายถึงเมื่อเพิ่มความลึกตัดมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนเงื่อนไขตัดใหม่เพื่อทดสอบค่าความแม่นยำของแบบจำลองพบว่าแบบจำลองสามารถใช้พยากรณ์ความขรุขระผิวในระหว่างการตัดชิ้นงานได้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และให้ค่าความแม่นยำของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยเท่ากับ 93.9% และค่าความขรุขระผิวสูงสุดเท่ากับ 92.8% ตามลำดับ

สมการทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานสามารถนำไปใช้จริงได้ เนื่องจากสมการนี้เป็นการทำนายค่าความเรียบผิวชิ้นงานที่จะเกิดขึ้นที่เงื่อนไขต่างๆ ดังนั้นการพยากรณ์นี้สามารถช่วยลดของเสียที่จะเกิดขึ้นในการผลิตเนื่องจากค่าความขรุขระผิวที่ไม่เหมาะสมได้ ซึ่งจะทำให้การผลิตมีประสิทธิผลมากขึ้น

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

1. การใช้อัตราส่วนของแรงตัด สามารถนำมาใช้ทำนายความขรุขระผิวชิ้นงานได้ ถึงแม้เงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป เพราะการใช้อัตราส่วนแรงตัดมาทำนายค่าความขรุขระผิวชิ้นงานเป็นการตัดอิทธิพลของเงื่อนไขการตัดที่เปลี่ยนไปได้

2. จากผลการพยากรณ์ความชุกชุมของผึ้งชันงานในขณะตัดโดยใช้อัตราส่วนแรงตัด พบว่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์เกิดขึ้นอาจเกิดอิทธิพลจากปัจจัยอื่นๆ เช่น การสั่นที่เกิดจากการจับยึดชันงานขณะการเจียรระโน หรือการยึดชันงานที่เครื่องวัดความชุกชุมของผึ้งชันงานอาจไม่แน่น ทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้ เป็นต้น

5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย

1. จากผลการพยากรณ์ความชุกชุมของผึ้งชันงานในขณะตัดโดยใช้อัตราส่วนแรงตัด พบว่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์เกิดขึ้นอาจเกิดอิทธิพลจากปัจจัยอื่นๆ เช่น ความแน่นในการจับยึดชันงานในขณะการเจียรระโน ซึ่งส่งผลต่อการสั่นสะเทือนที่ชันงาน
2. ปัญหาของการติดตั้งเครื่องมือในการทดลองเนื่องจากเซนเซอร์วัดแรงและเครื่องขยายสัญญาณมีผู้ใช้งานหลายงานวิจัยทำให้จำเป็นต้องมีการถอดออกและทำการติดตั้งใหม่ทุกครั้ง ซึ่งอาจส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่ติดตั้งและอาจเกิดความเสียหายจากการสั่นสะเทือนในการขนย้ายอุปกรณ์ทำให้ต้องสูญเสียเวลาในการซ่อมแซมเครื่อง
3. เนื่องจากเครื่องวัดค่าความชุกชุมของผึ้งชันงาน ต้องใช้กับชันงานหลายรูปแบบ ทำให้มีการปรับแทนจับชันงานใหม่เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการวัด ดังนั้นต้องทำการปรับแทนจับ (Calibrate) ทุกครั้งก่อนวัดชันงาน ซึ่งอาจทำให้ตำแหน่งของการวัดในแต่ละครั้งไม่คงที่

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดลองในแต่ละเงื่อนไขของการตัดอื่นให้หลากหลายมากขึ้นเพื่อให้ยืนยันผลการทดลองให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นและควรทดลองเปลี่ยนชันงานเป็นวัสดุอื่นๆ เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนที่ความแข็งอื่นๆ เพื่อจะให้ได้การพยากรณ์ค่าความชุกชุมของผึ้งชันงานที่ครอบคลุมและใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลา ด้านเงินทุน และข้อจำกัดของเครื่องเจียรระโน ทำให้สามารถทำการทดลองได้เพียงเท่านั้น
2. สามารถพัฒนาสมการทำนายความชุกชุมของผึ้งชันงานโดยคำนึงถึงความถี่การสั่นของคมตัดของหินเจียรระโน อัตราส่วนแรงตัด และจำนวนเกรน ร่วมกับความชุกชุมของผึ้งชันงาน เพื่อให้สมการทำนายความชุกชุมของผึ้งชันงานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
3. ควรมีการพัฒนาสมการทำนายค่าความชุกชุมของผึ้งชันงานที่แต่ละเกรดของหินเจียรระโนต่างๆไป เพื่อให้มีความจำเพาะครอบคลุมมากขึ้น เนื่องจากความชุกชุมของผึ้งชันงานก็มีผลต่อความชุกชุมของผึ้งชันงาน

4. ควรมีการควบคุมอุณหภูมิชิ้นงานด้วย เนื่องจากความอ่อนตัวของผิวชิ้นงานเนื่องจากอุณหภูมิชิ้นงานนั้น มีผลต่อความขรุขระผิวที่เกิดขึ้นขณะการเจียระไน
5. ควรมีการตั้งสมมติฐานว่า ค่าความเร็วรอบรองที่หลังการแต่งหินเจียระไน



รายการอ้างอิง

- [1] Scbsme. (2012). แนวโน้มเศรษฐกิจไทยและเศรษฐกิจโลกปี 2013. Available: <http://www.scbsme.com/th/business-knowledge/economic/192/economic-trend-2555>
- [2] N. Zouaghi, Y. Ichida, and N. B. Frej, "Grinding Mode Identification of Silicon Carbide by Using neural network," in *the 3th International conference on Progress of cutting and grinding*, Osaka, Japan, 1996, pp. 342-347.
- [3] Somkiat Tangjitsitcharoen, "Advanced prediction of surface roughness by monitoring of dynamic cutting forces in CNC Turning process," *Applied Mechanics and Material* vol. 239-240 pp. 661-669, 2013.
- [4] Somkiat Tangjitsitcharoen, "In-Process monitoring and prediction of surface roughness in CNC Turning process," *Advanced Materials Research* vol. 199-200 pp. 1928-1966, 2011.
- [5] Marco Leonesioa, Paolo Parentib, Alberto Cassinaria, Giacomo Bianchia, and Michele Monnob, "A Time-Domain Surface Grinding Model for Dynamic Simulation," *Procedia CIRP*, vol. 4, pp. 166-171, 2012.
- [6] Halil Demir, Abdulkadir Gullu, Ibrahim Ciftci, and Ulvi Seker, "An Investigation into the Influences of Grain Size and Grinding Parameters on Surface Roughness and Grinding Forces when Grinding," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 56, pp. 447-454, 2010.
- [7] M.A. Kamely, S.M. Kamil, and C.W. Chong, "Mathematical Modeling of Surface Roughness in Surface Grinding Operation," *International Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 5, pp. 146-149, 2011.
- [8] Hamid Baseri, "Workpiece Surface Roughness Prediction in Grinding Process for Different Disc Dressing Conditions," presented at the 2010 International Conference on Mechanical and Electrical Technology (ICMET 2010), 2010.
- [9] AL-Mokhtar O. Mohamed, Andrew Warkentin, and Robert Bauer, "Use of surface roughness measurements to improve the estimation of the heat

- partition in grinding," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, pp. 566-572, 2011.
- [10] U. S. P. Durgumahanti, V. Singh, and P. V. Rao, "A new model for grinding force prediction and analysis," *International Journal of Machine Tools & Manufacturing* vol. 50, pp. 231-240, 2010.
- [11] Y.D. Gong, B. Wang, and W.S. Wang, "The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technology," *Journal of Materials Processing technology* vol. 129, pp. 123-126, 2002.
- [12] M. Sedlaček, B. Podgornik, and J. Vižintin, "Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear," *Wear*, vol. 266, pp. 482–487, 2009.
- [13] J.Tang, J. Du, and Chen, "Modeling and experimental study of grinding forces in surface grinding," *Journal of material processing technology* vol. 209, pp. 2874-2854, 2009.
- [14] Mikell P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing, 3rd Edition*. USA, 2007.
- [15] I. Inasaki, B. Karpuschewski, and H.-S Lee, "Grinding Chatter-Origin and Suppression.," *CIRP Annals* vol. 50, pp. 515-534, 2001.
- [16] JIS Handbook, "Surface roughness," J. Handbook, Ed., ed: Japanese Standard Association, 1994.
- [17] กัลยา วานิชย์บัญชา, หลักสถิติ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [18] ปารเมศ ชูติมา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [19] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา and พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, ไพบูลย์. การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป, 2545.
- [20] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, "การแปลงเวฟเล็ตและวิธีการสกัดลักษณะเด่นของสัญญาณ," ed. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2550.



ภาคผนวก ก
โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์ความขรุขระผิวชิ้นงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์ความขรุขระผิว

```

clc;
samp=10000;
unsamp=12000-samp;
unsampplus=unsamp+1;
fname='r81';
ext='.txt';
filename=[fname,ext];
load(filename);
eval(['data=',fname,','.ext']);
[N,n]=size(data);
t=1/samp;
tt=(0:t*(N-unsampplus));
f=(0:N-unsampplus)/(N-unsamp)*samp;
freq=f(1:(N-unsamp)/2);
SurfaceRoughness=fft(data(1:samp,2))/(N*2);
absSurfaceRoughness=abs(SurfaceRoughness(1:(N-unsamp)/2));
PabsSurfaceRoughness=absSurfaceRoughness.^2;
figure(1);
plot(freq,PabsSurfaceRoughness);grid;zoom on ;xlabel('Frequency (Hz)');ylabel('PSD of
Surface Roughness (micrometer)');
axis([0 200 0 0.005])
figure(2);
plot(tt,data(1:samp,2));grid;zoom on ;xlabel('Time (sec)');ylabel('Surface Roughness
(micrometer)');
axis([0 1 -10 10])

```



ภาคผนวก ข

โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดขณะตัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โปรแกรมการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว สำหรับวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดพลวัตขณะตัด

```

clear;

samp = 10000;           %Sampling Frequency

fname1 = 'newa86';      % ชื่อ ไฟล์ที่ต้องการเปิด
ext1 = '.txt';          % ชื่อ สกุลไฟล์
filename = [fname1,ext1]; % รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์
load (filename);        % เรียกไฟล์
eval(['data1=',[fname1],',,']); %

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

fname2 = 'Fa100';      % ชื่อ ไฟล์ที่ต้องการเปิด
ext2 = '.txt';          % ชื่อ สกุลไฟล์
filename = [fname2,ext2]; % รวมชื่อไฟล์กับสกุลไฟล์
load (filename);        % เรียกไฟล์
eval(['data2=',[fname2],',,']); %

[N2,n2]=size(data2);    % เก็บค่าขนาดของข้อมูล โดย N เป็นจำนวนแถว และ n เป็น
จำนวนคอลัมน์

t=1/samp;
tt=(0:t:t*(N2-1));      %Using plot graph __ time domain

f=(0:N1-1)/N1*samp;
freq=f(1:N1/2);          %Using plot graph __ frequency domain

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

```

```

absFX=abs(FX(1:N1/2));
PabsFX=absFX.^2;

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

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

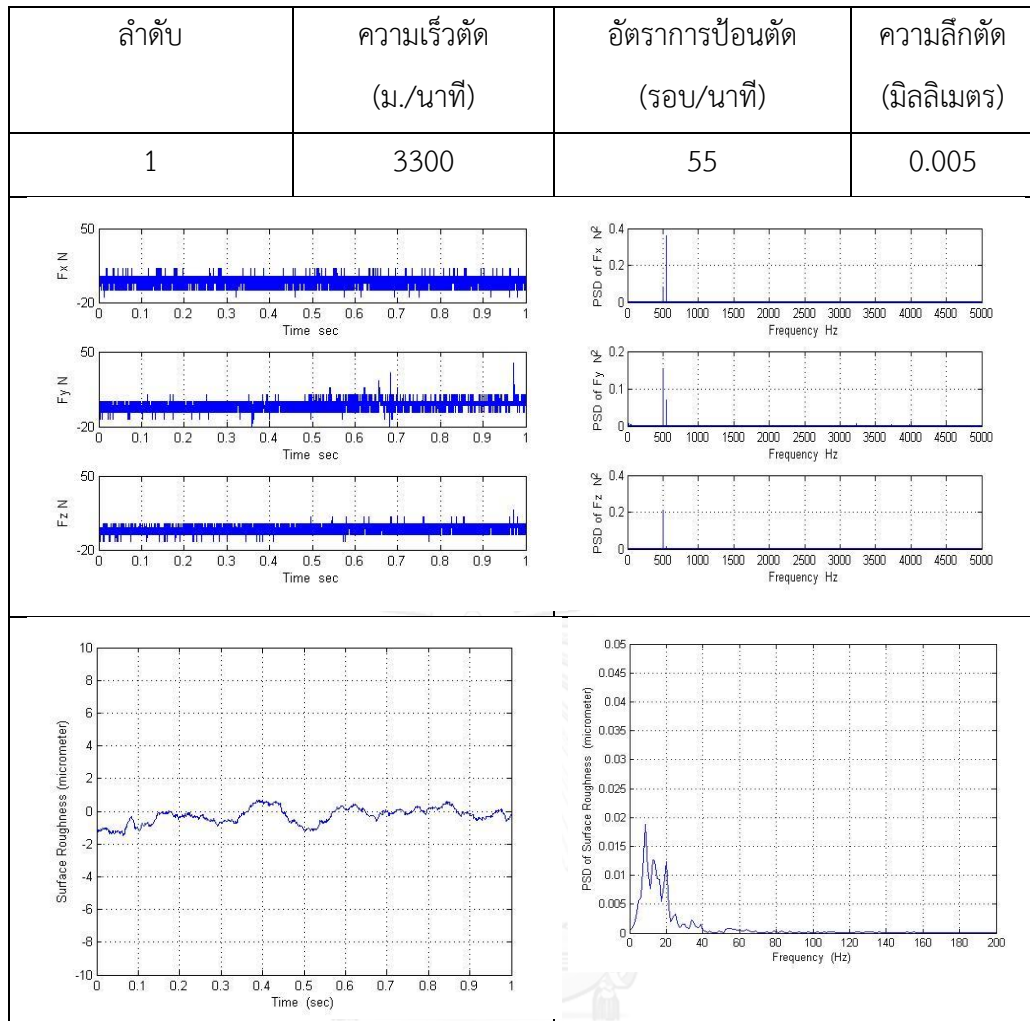
figure(102);
subplot(3,1,1);plot(freq,PabsFX);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Fx
N^2');
subplot(3,1,2);plot(freq,PabsFY);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Fy
N^2');
subplot(3,1,3);plot(freq,PabsFZ);grid;zoom on ;xlabel('Frequency Hz');ylabel('PSD of Fz
N^2');

figure(103);
subplot(3,1,1);plot(tt,data2(:,1));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Fx N');
set(subplot(3,1,1),'YLim',[-100 100],'XLim',[0 0.2]);set(subplot(3,1,1),'YTick',[-100 100]);
%set(subplot(3,1,1),'times','8','italic');
subplot(3,1,2);plot(tt,data2(:,2));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Fy N');
set(subplot(3,1,2),'YLim',[-100 100],'XLim',[0 0.2]);set(subplot(3,1,2),'YTick',[-100 100]);
subplot(3,1,3);plot(tt,data2(:,3));grid;zoom on ;xlabel('Time sec');ylabel('Fz N');
set(subplot(3,1,3),'YLim',[-100 100],'XLim',[0 0.2]);set(subplot(3,1,3),'YTick',[-100 100]);

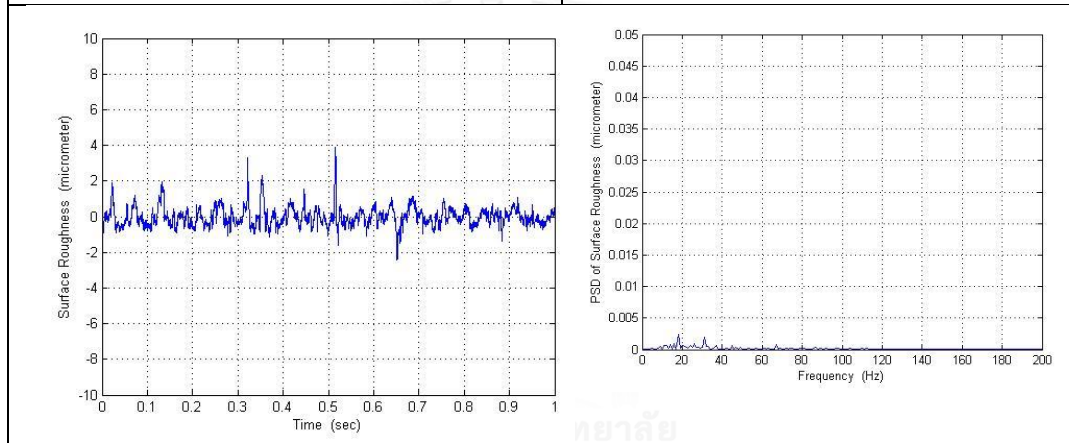
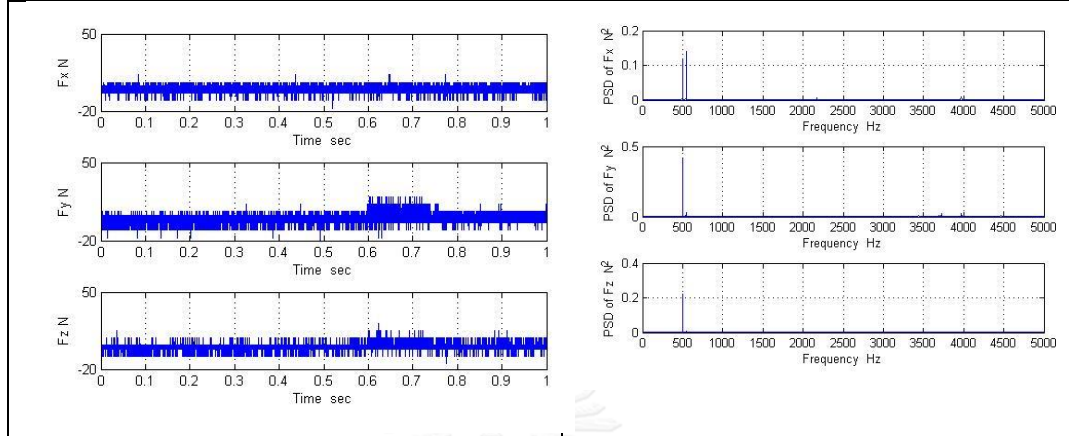
```

ภาคผนวก ค
การวิเคราะห์แรงตัดและความขรุขระผิวในโดเมนความถี่ด้วย FFT สำหรับเงื่อนไขการ
ตัดต่างๆ

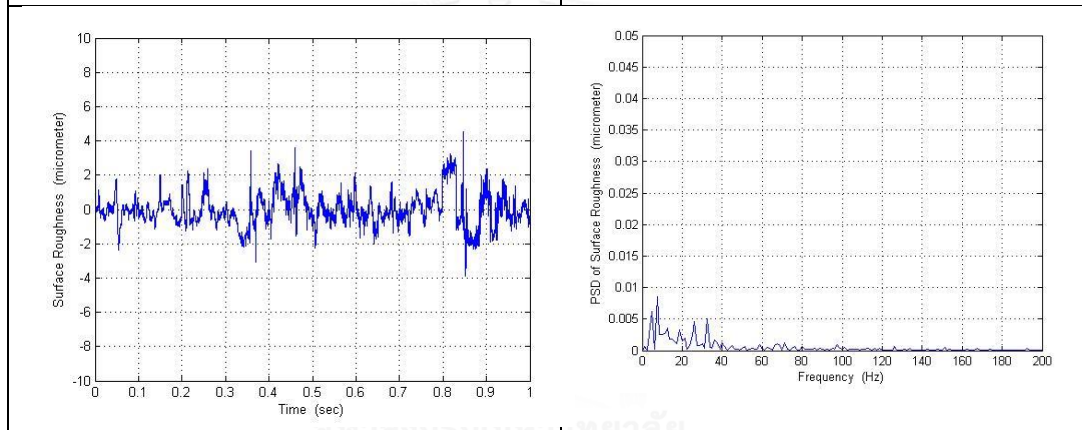
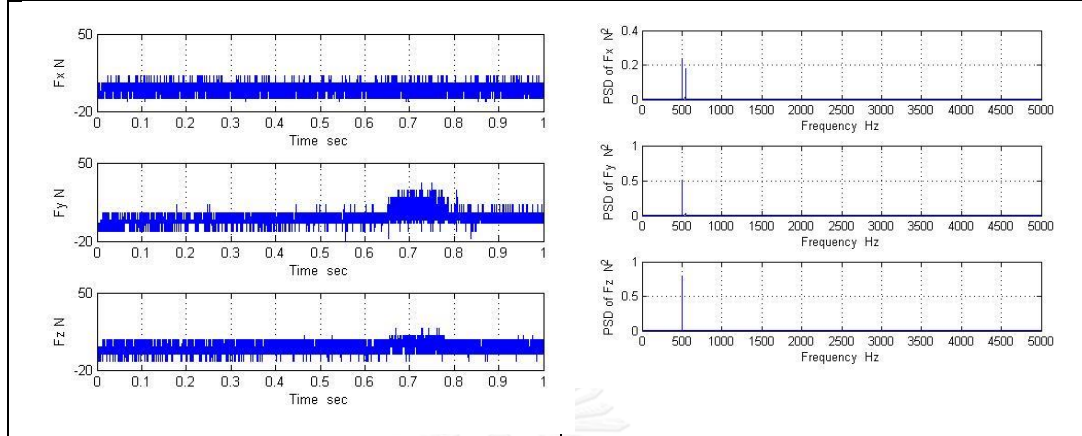
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



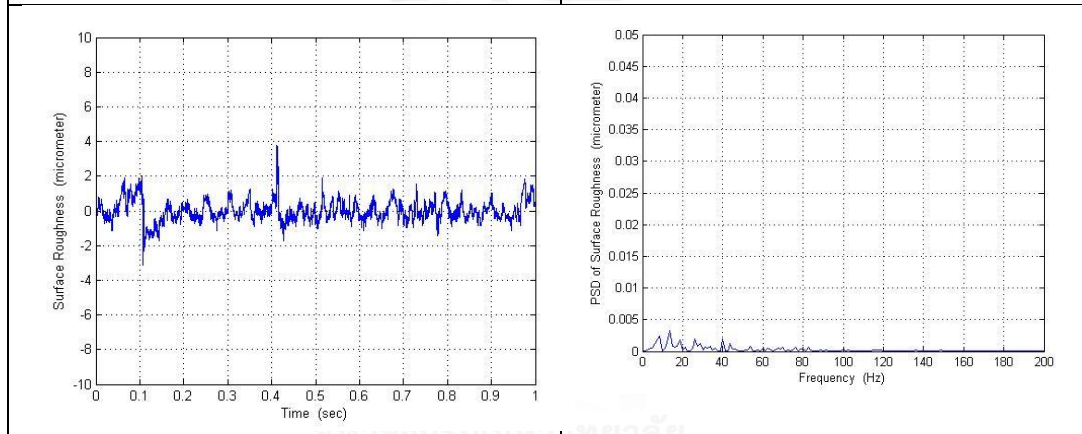
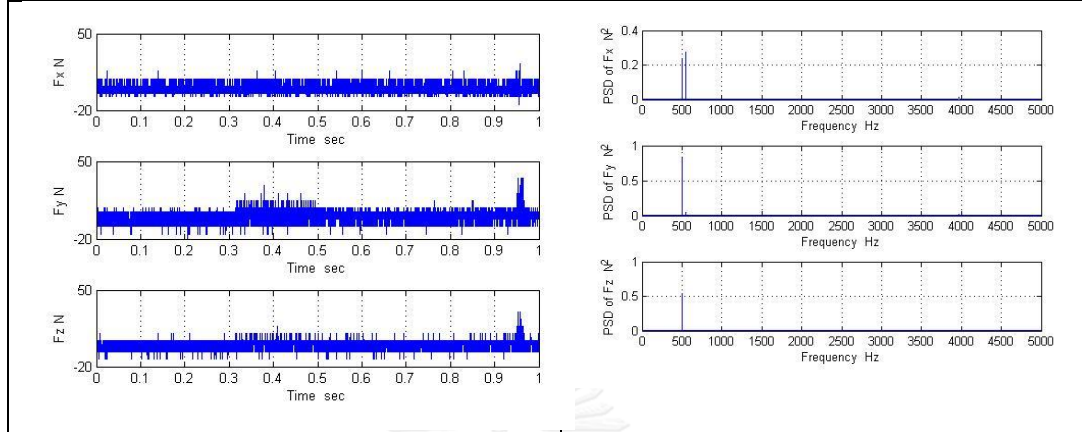
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
2	3300	55	0.01

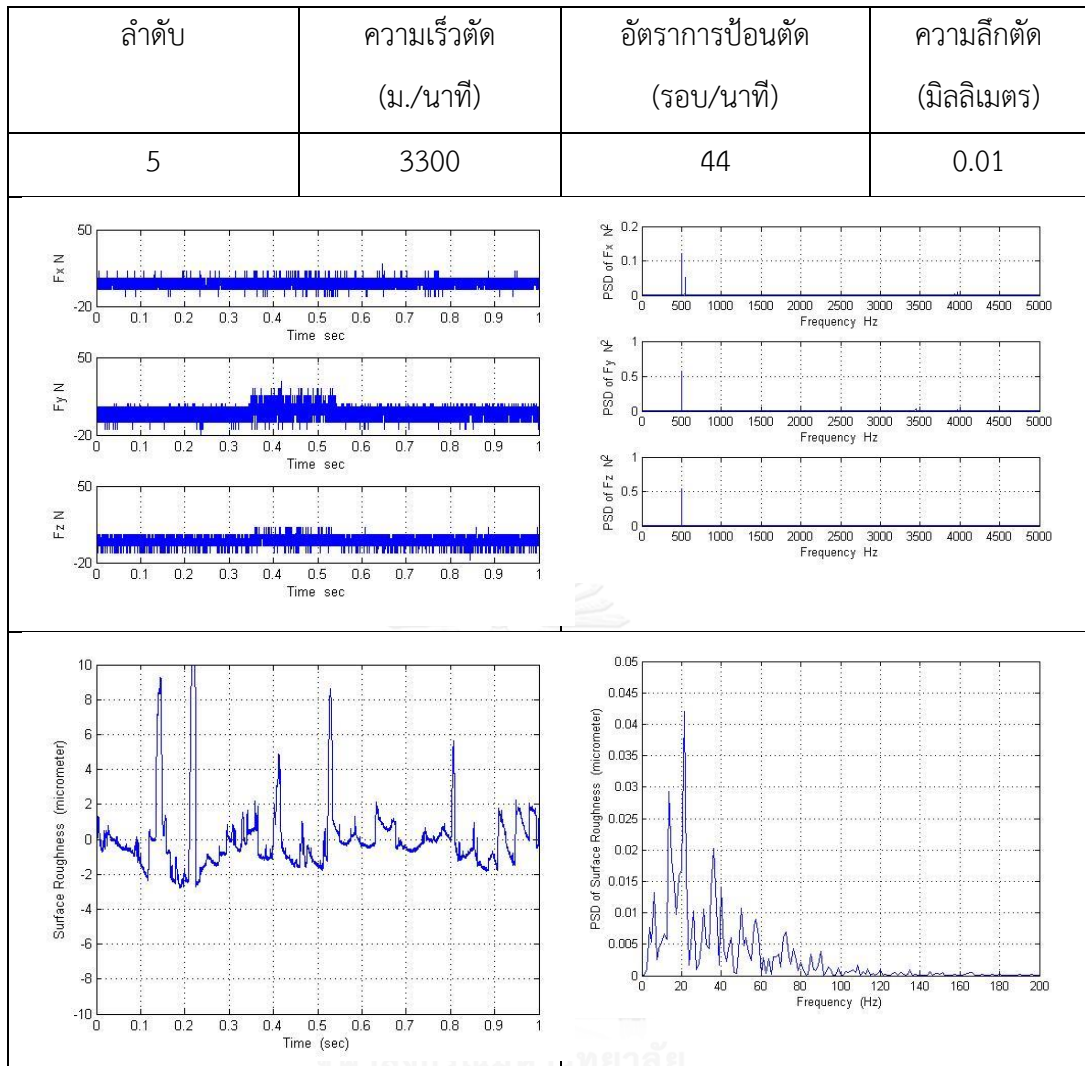


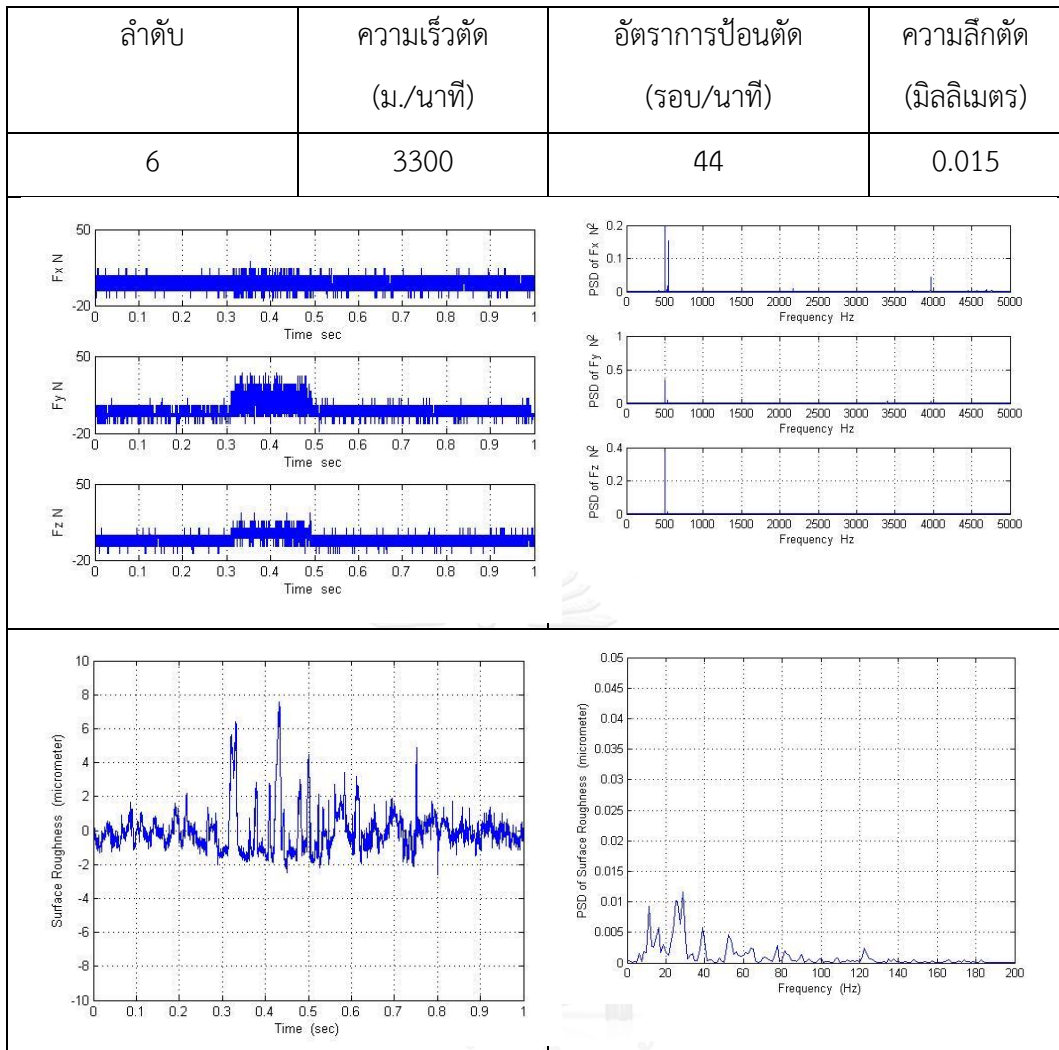
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
3	3300	55	0.015



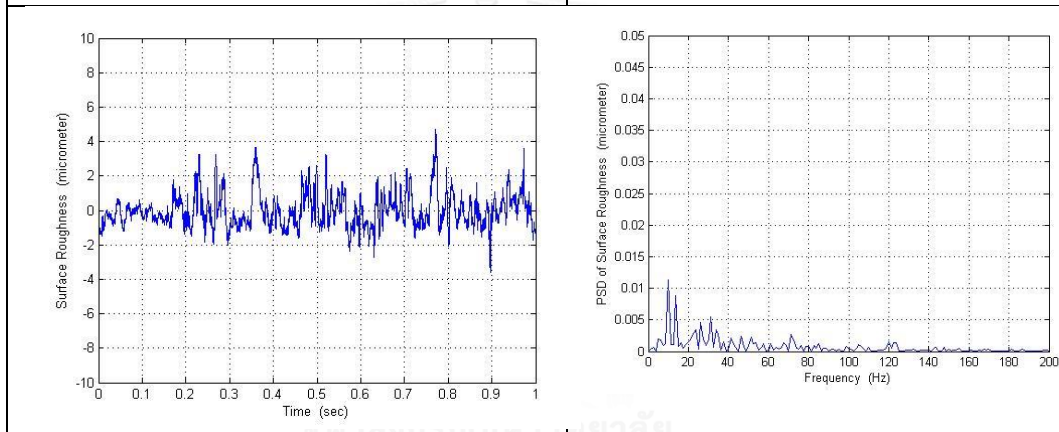
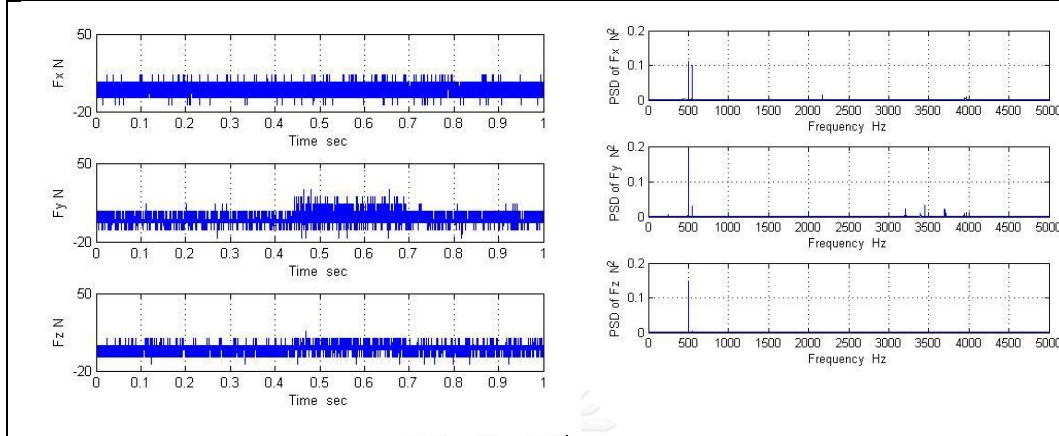
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
4	3300	44	0.005



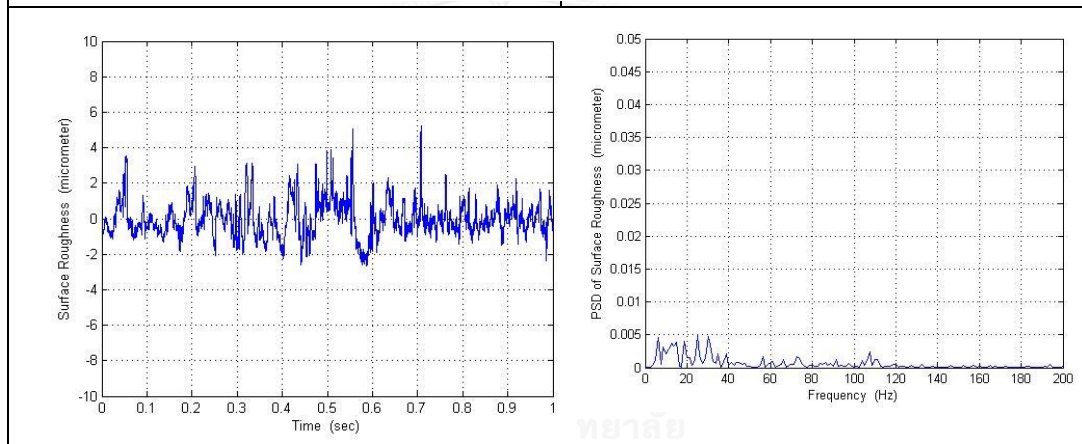
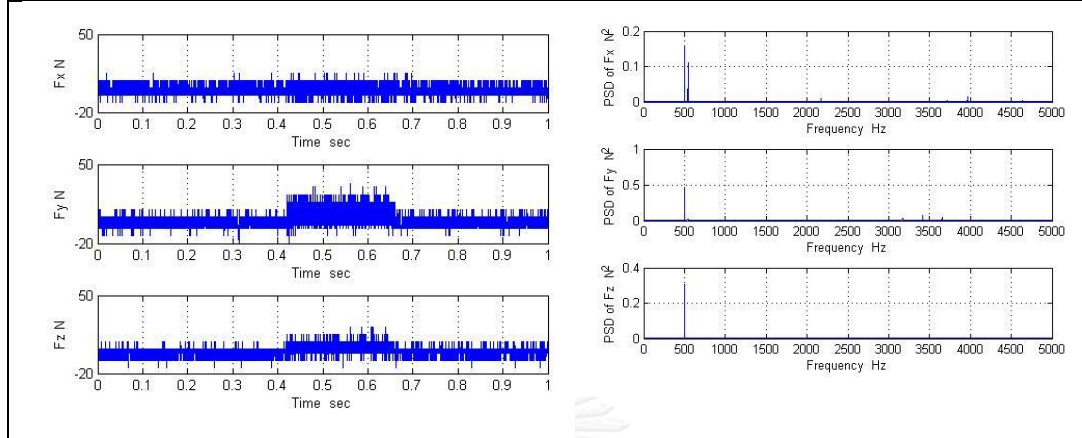




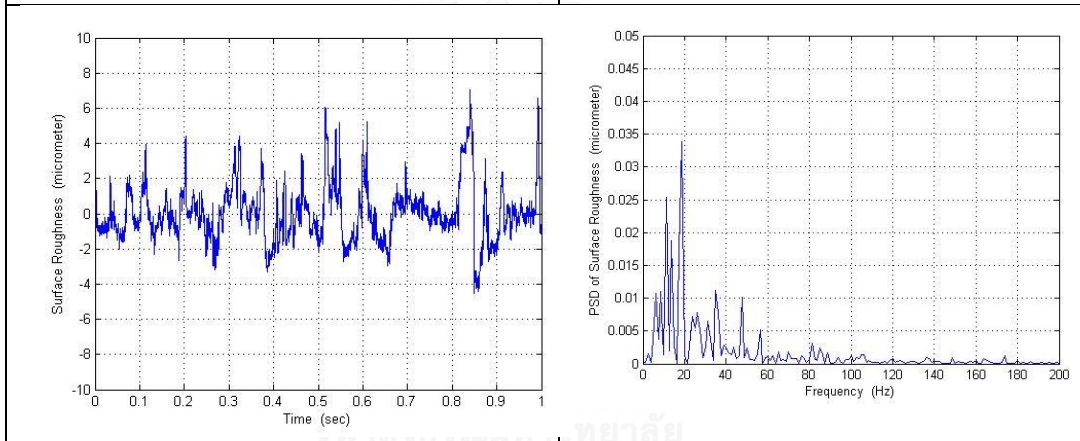
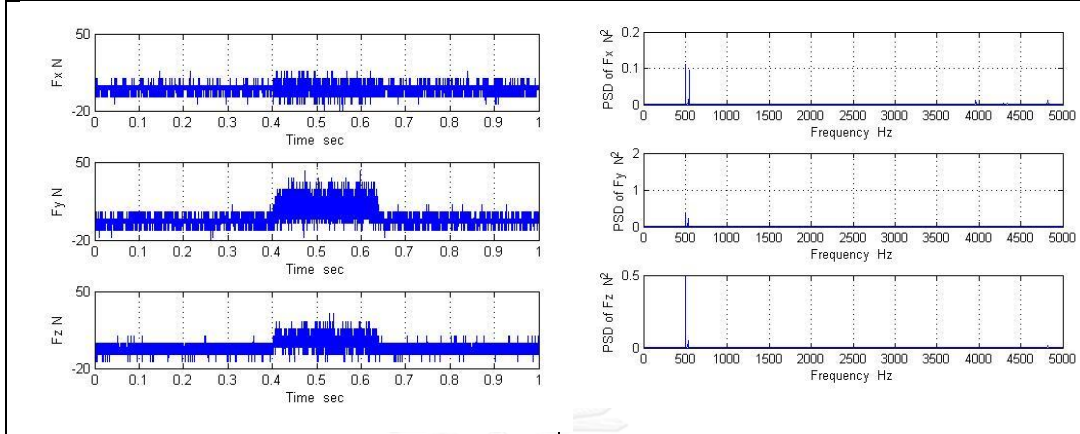
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
7	3300	33	0.005



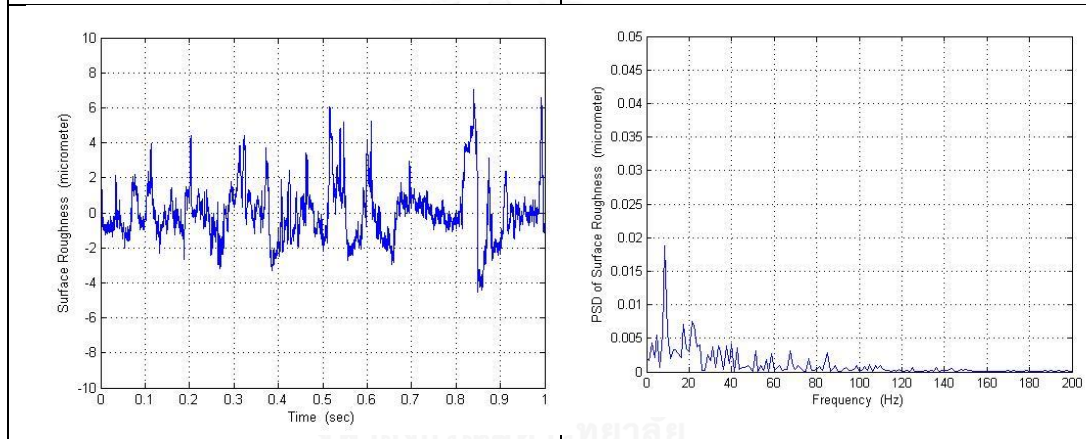
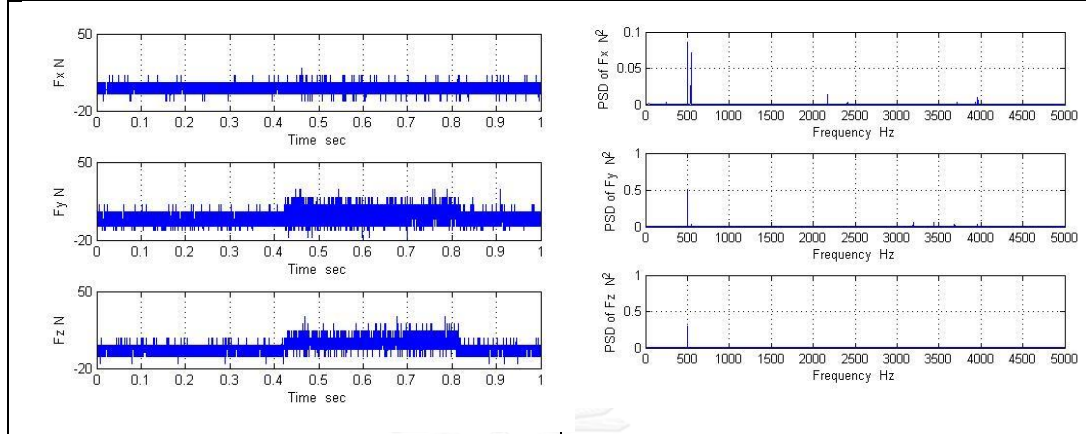
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
8	3300	33	0.01



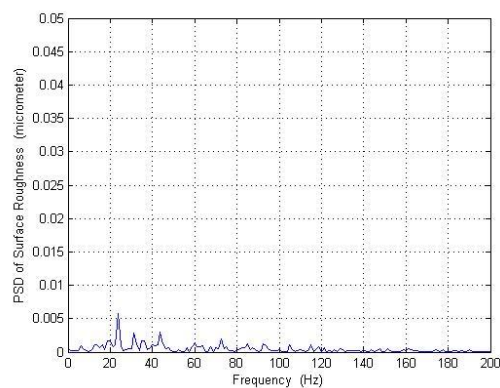
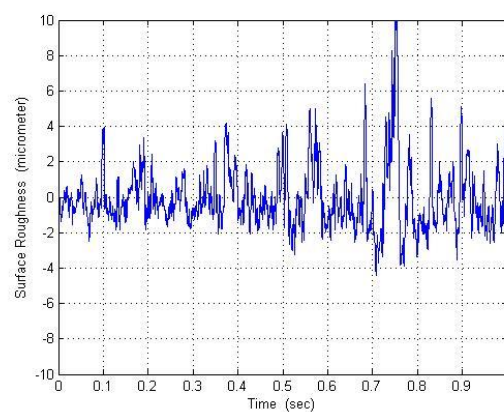
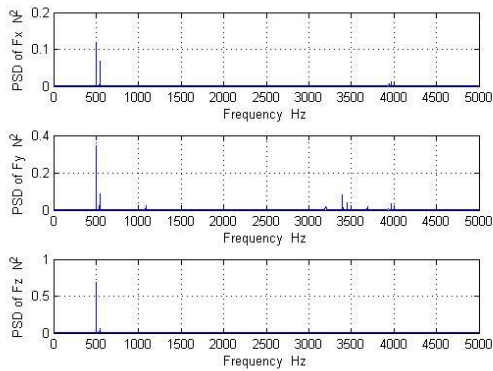
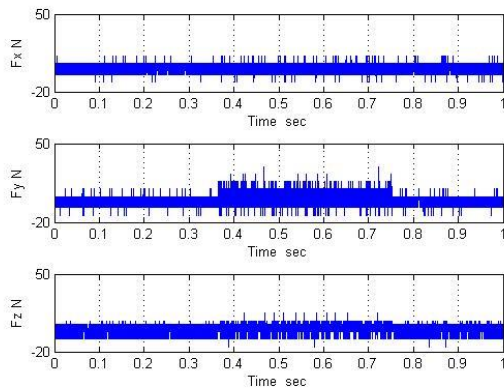
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
9	3300	33	0.015



ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
10	3300	22	0.005

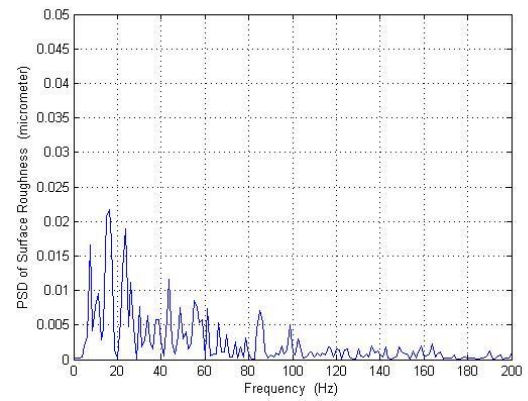
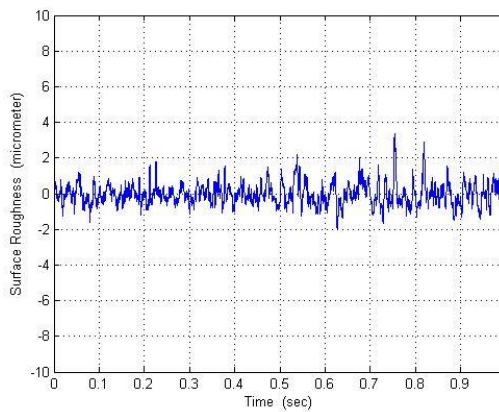
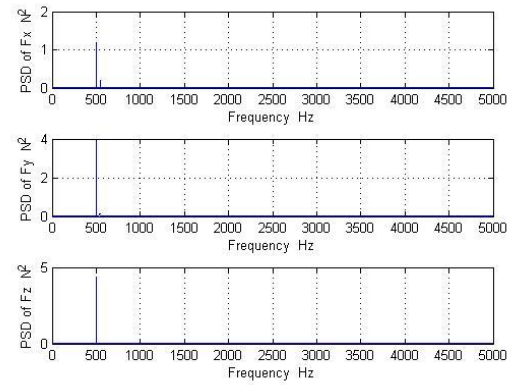
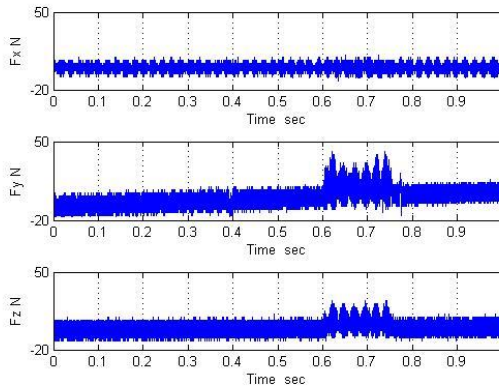


ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
11	3300	22	0.01

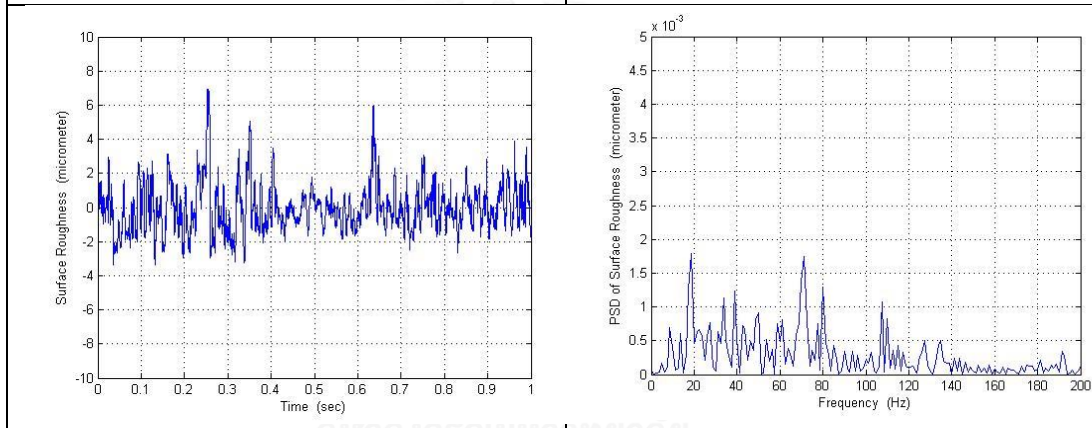
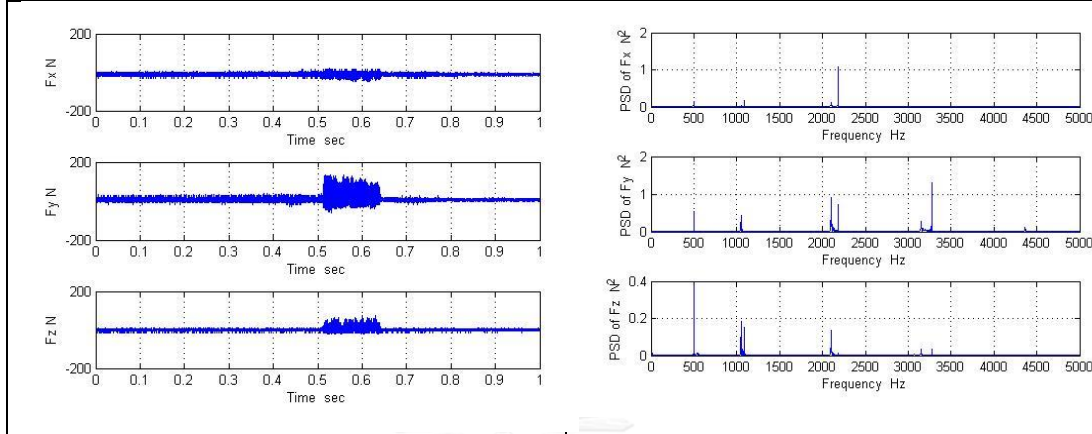


มหาวิทยาลัย

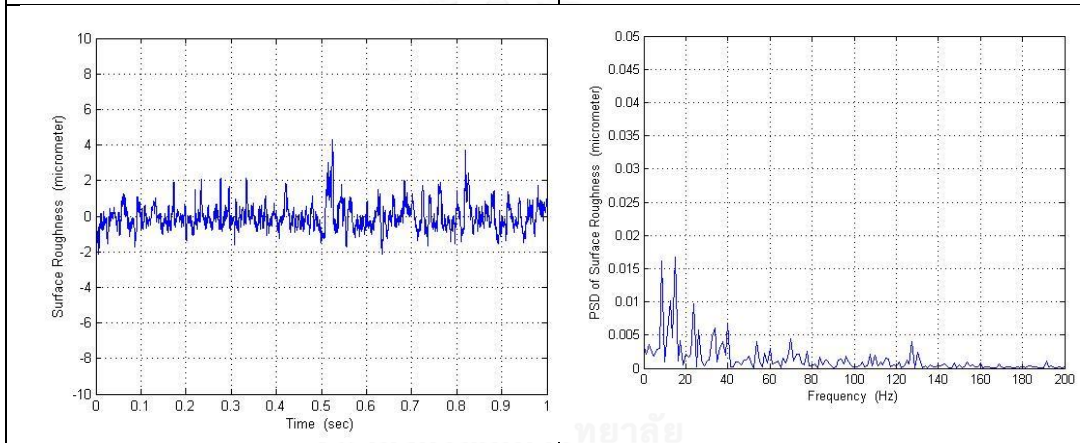
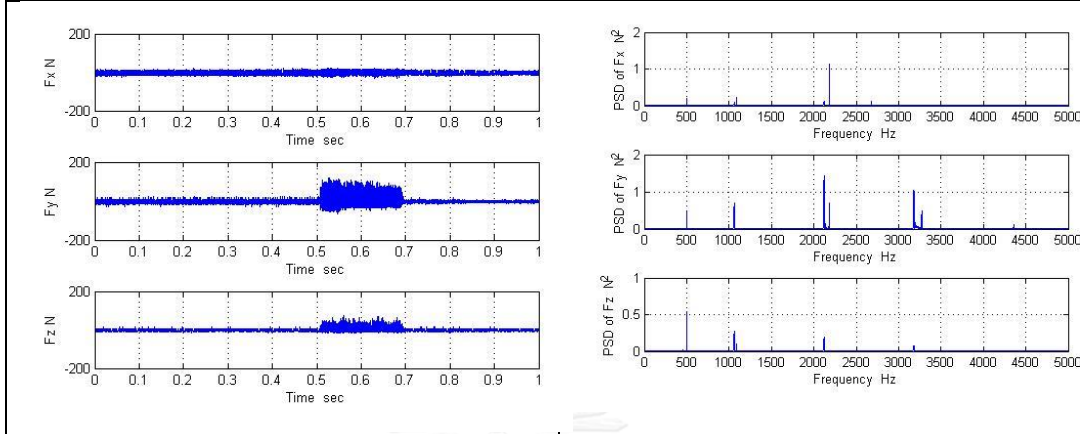
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
12	3300	22	0.015



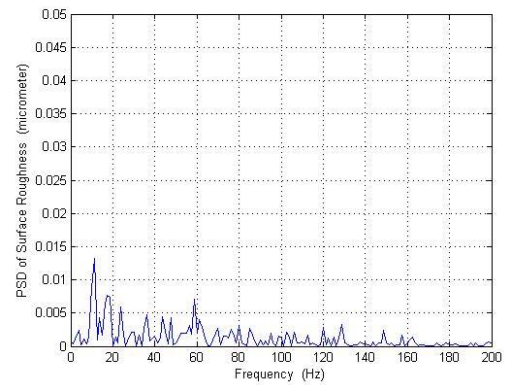
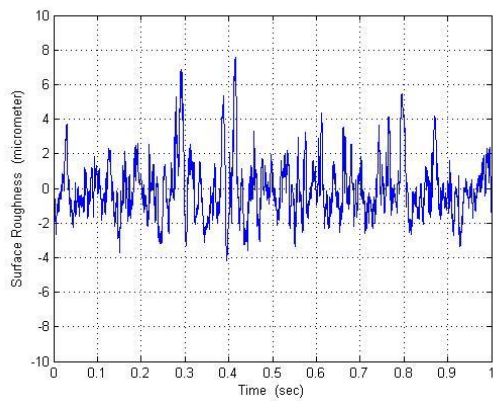
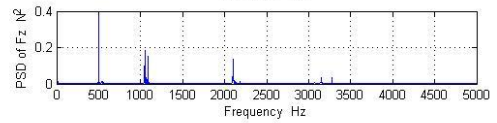
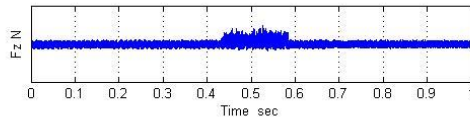
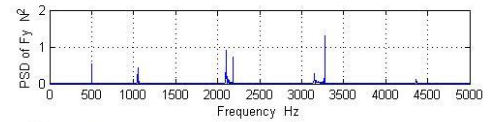
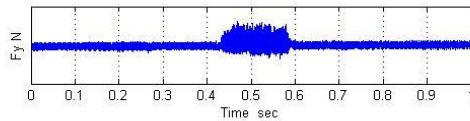
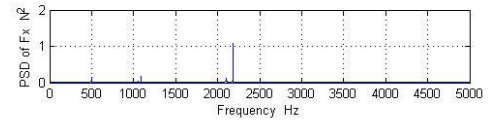
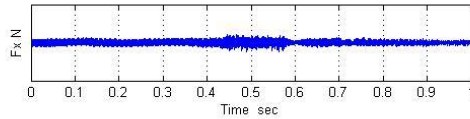
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
13	6600	55	0.005

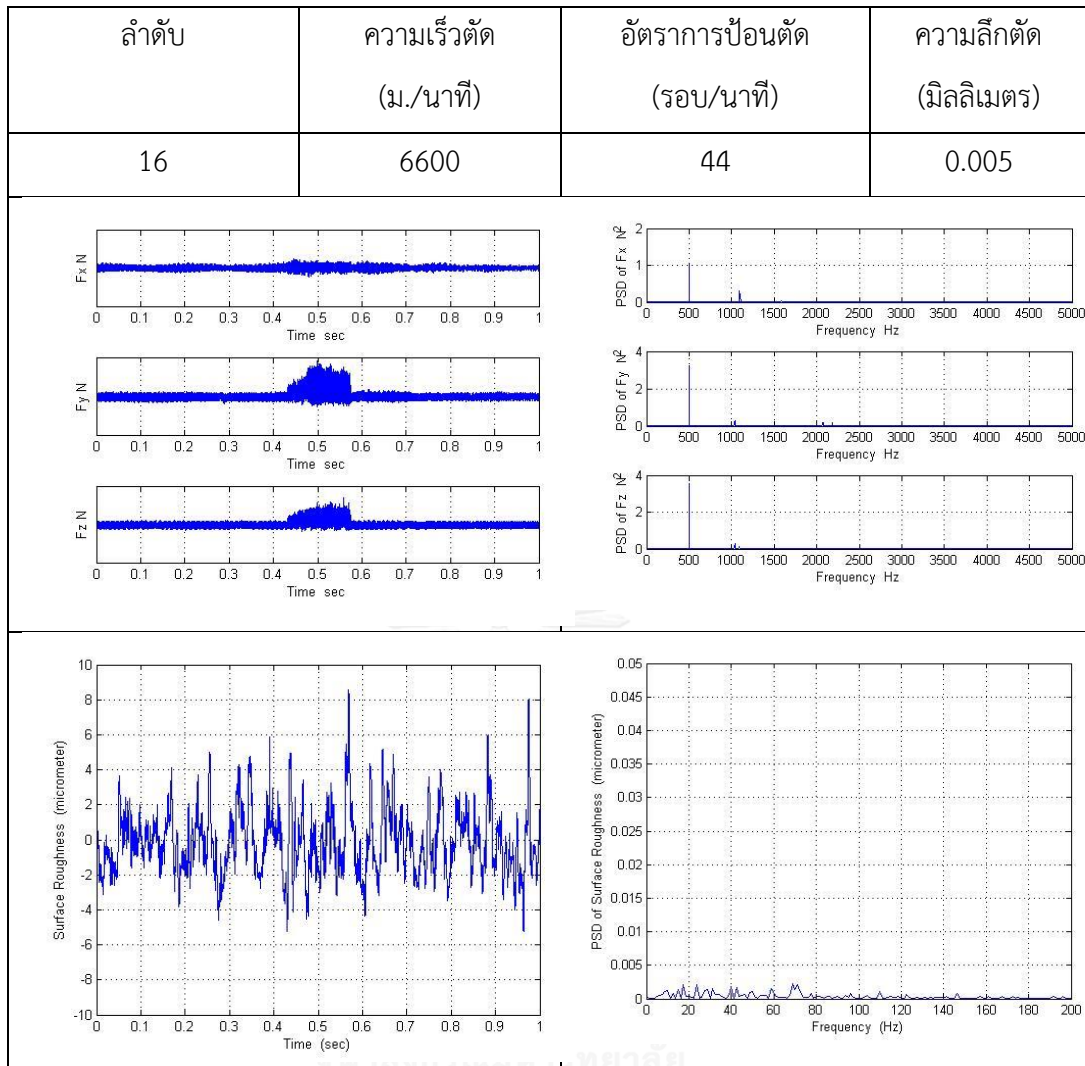


ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
14	6600	55	0.01

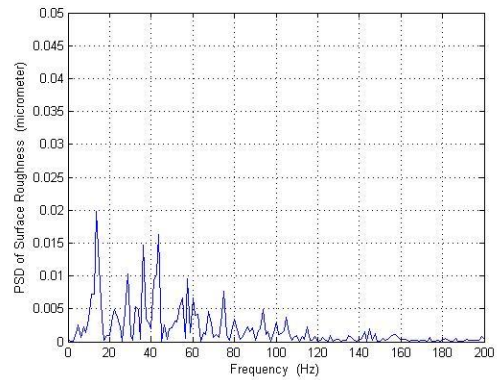
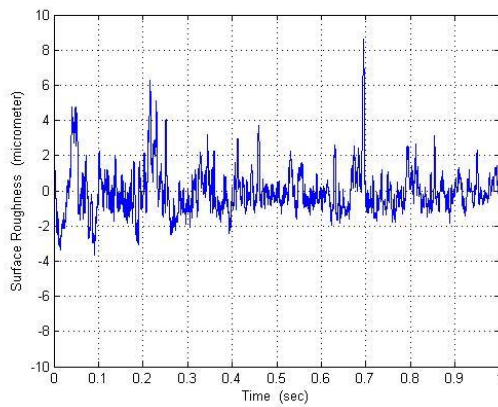
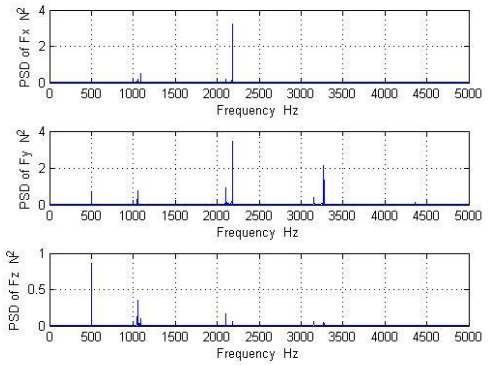
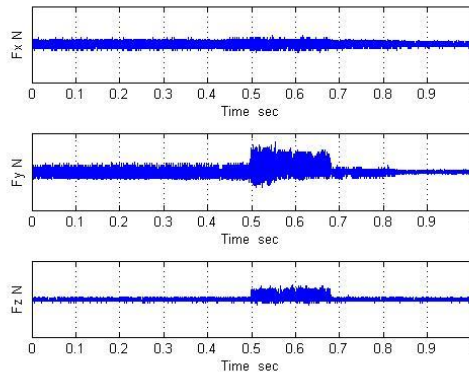


ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
15	6600	55	0.015

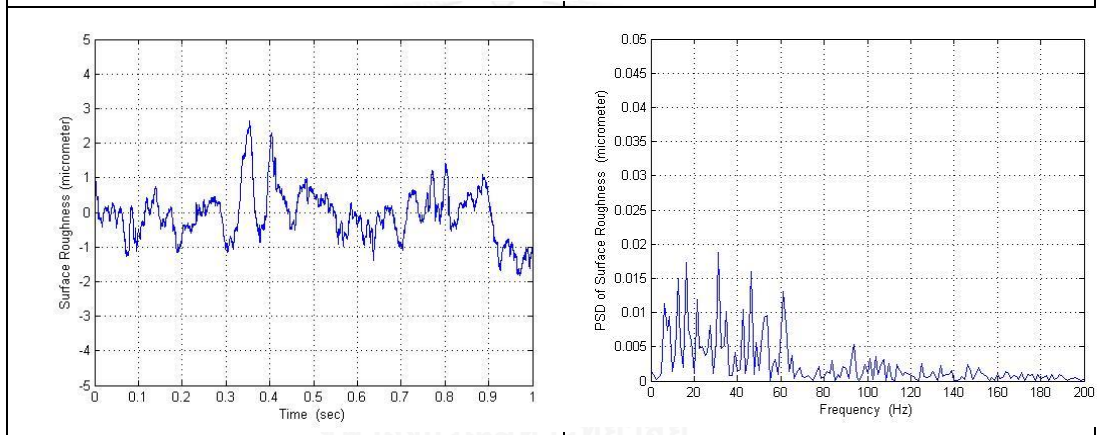
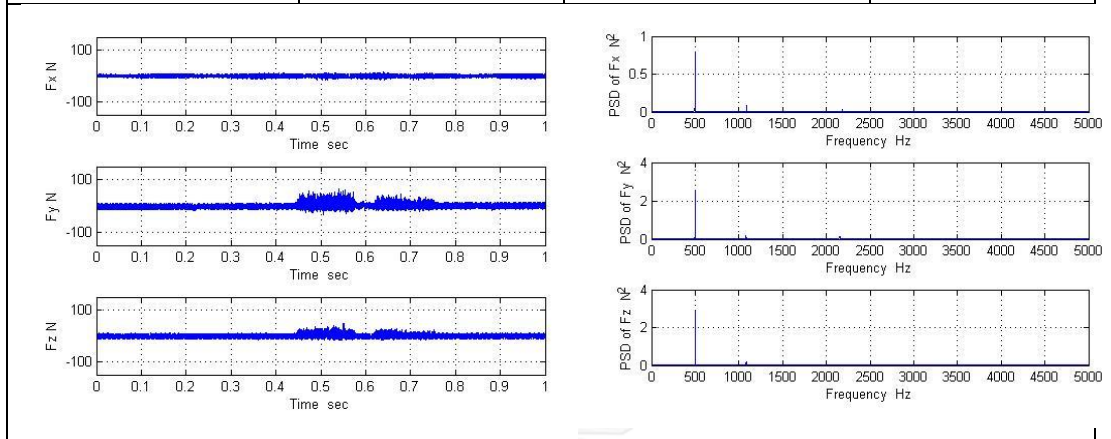




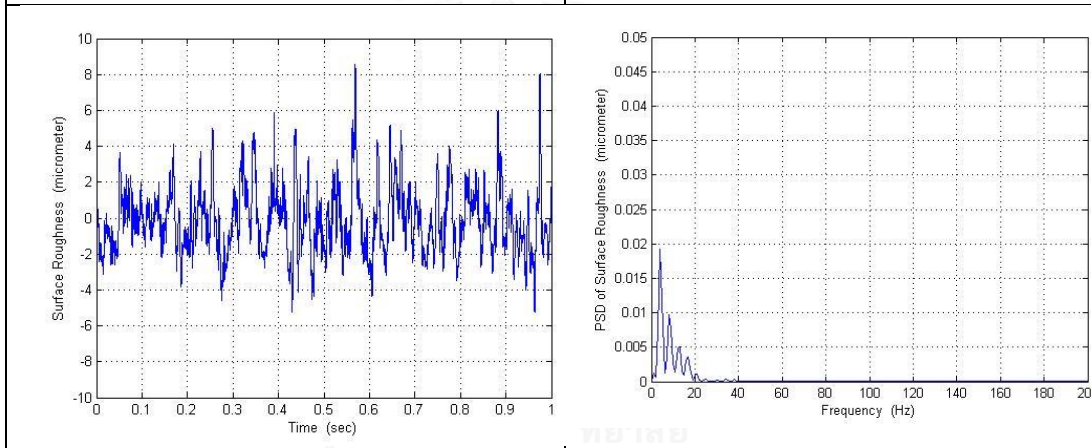
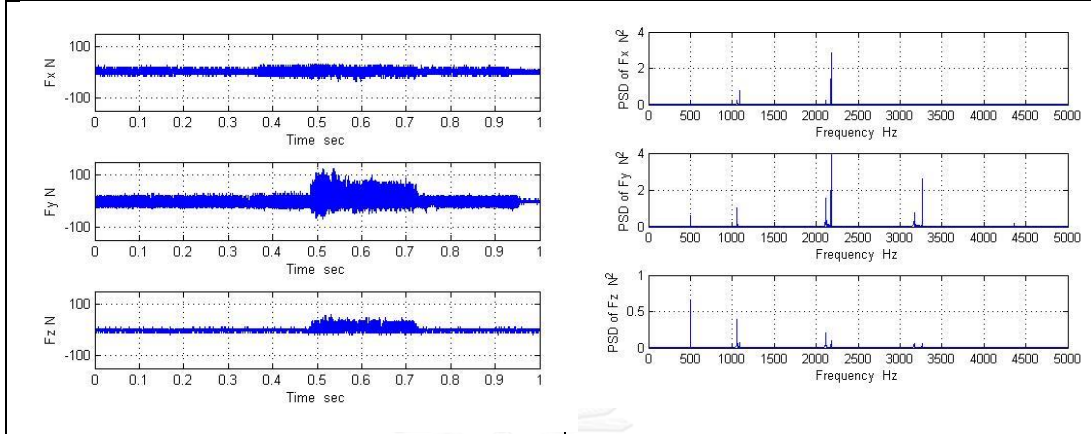
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
17	6600	44	0.01



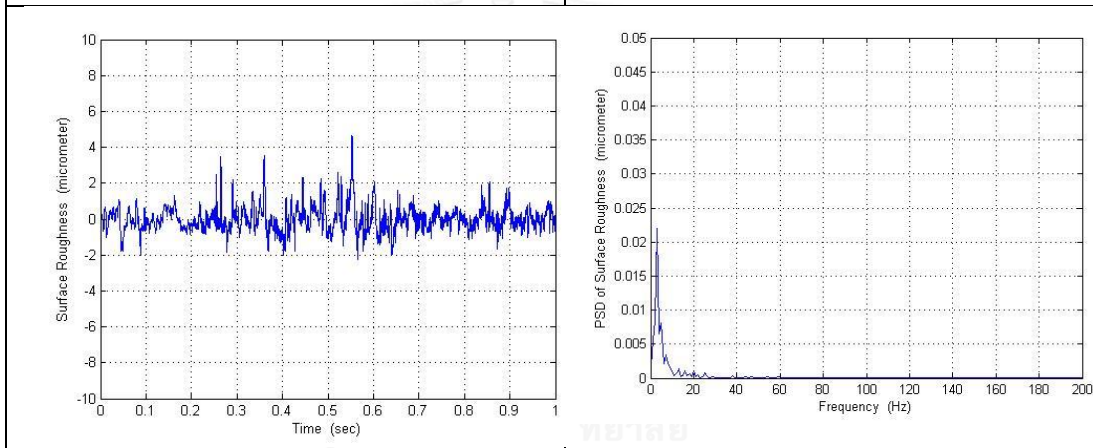
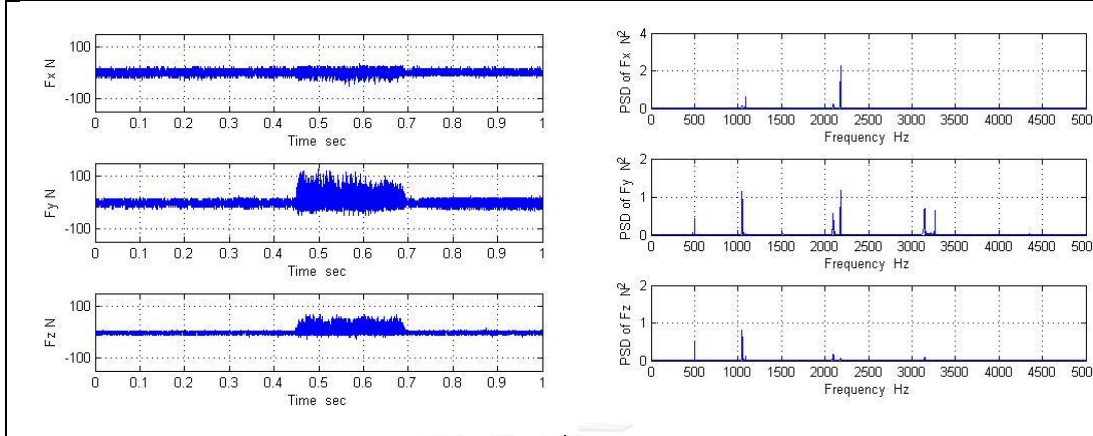
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
18	6600	44	0.015



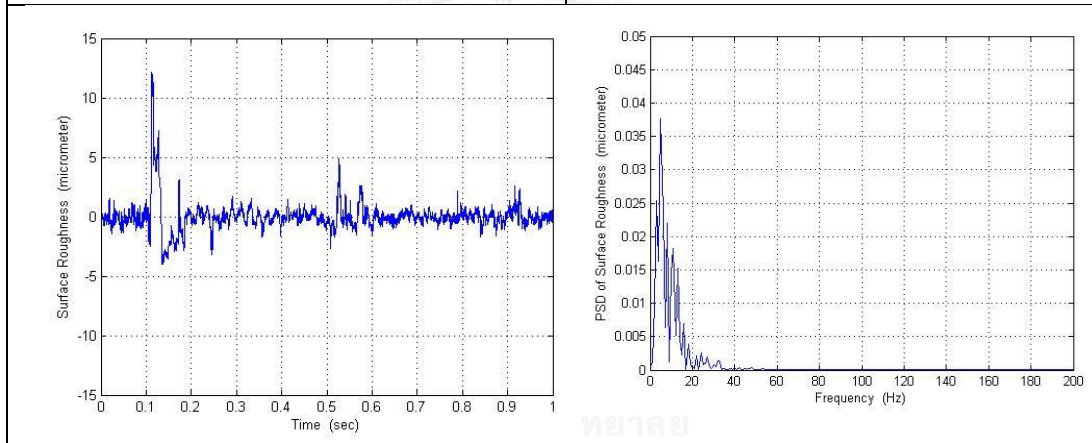
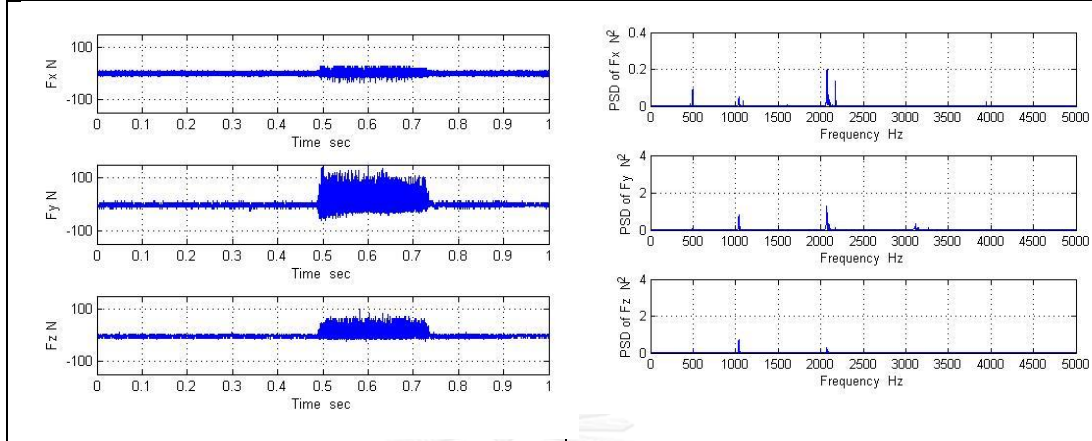
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
19	6600	33	0.005



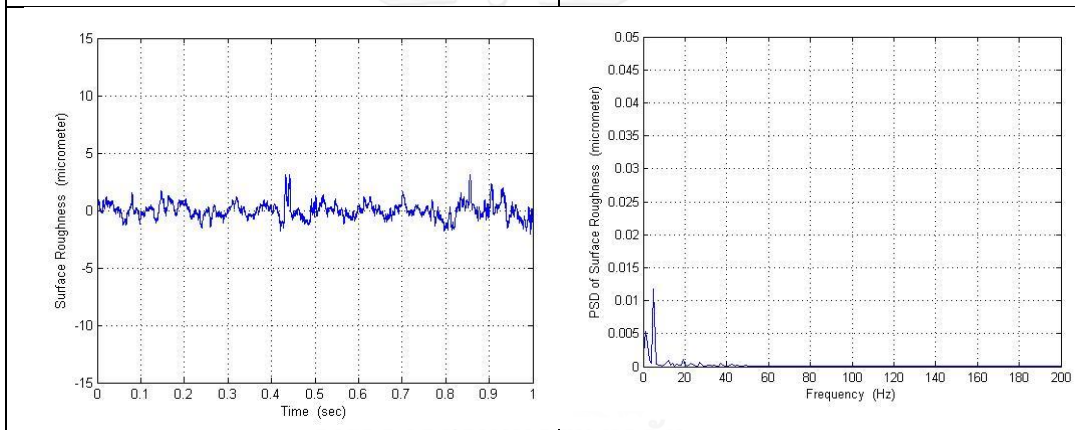
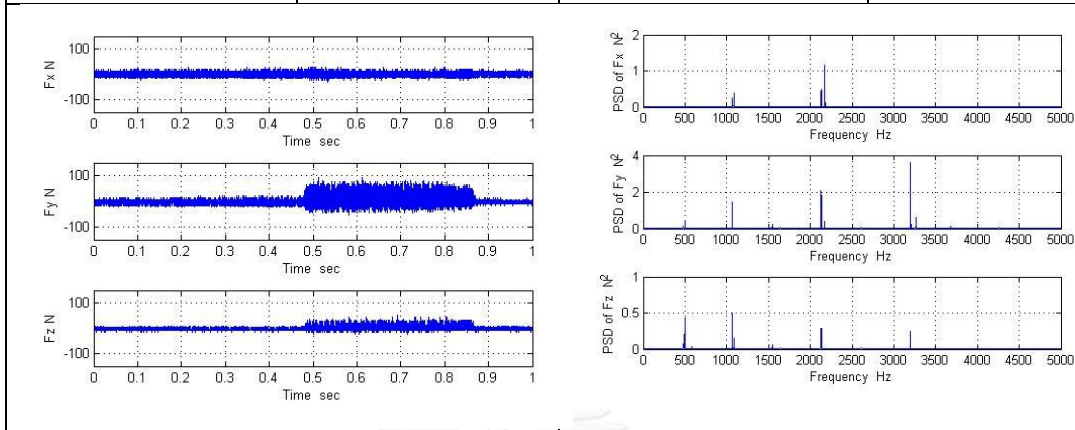
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
20	6600	33	0.01



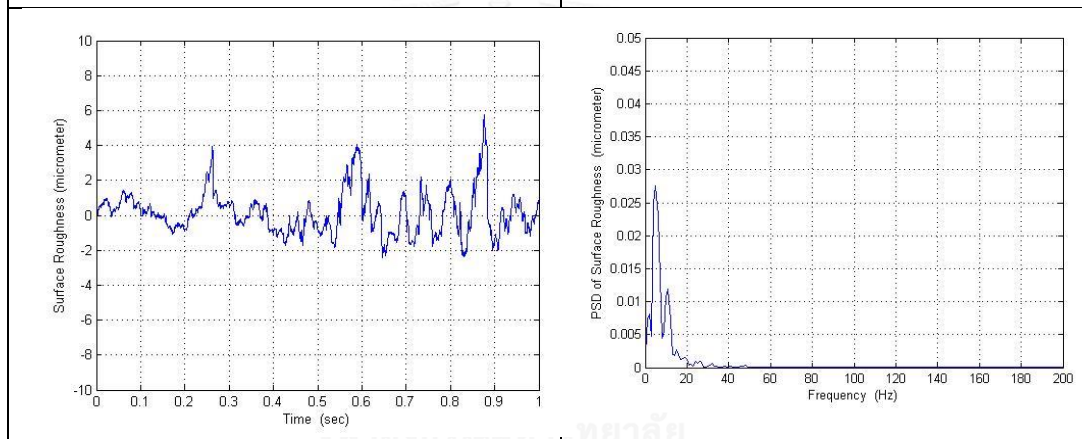
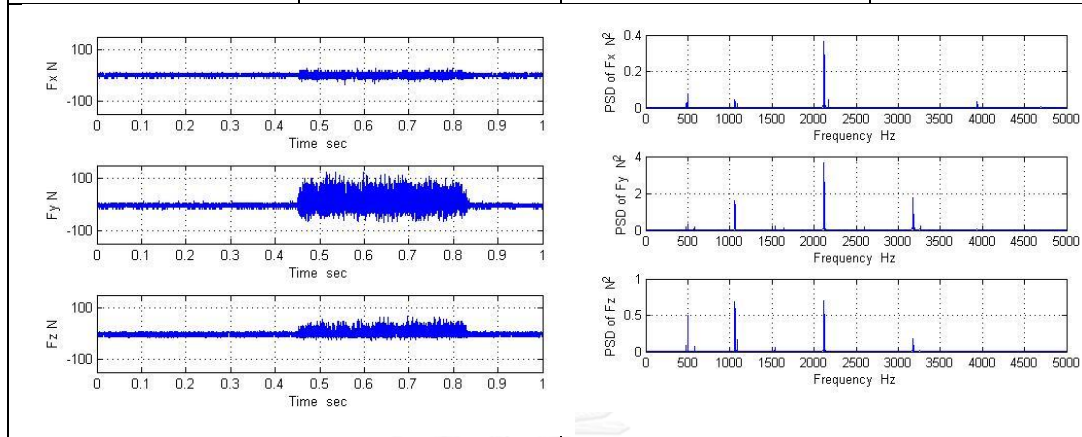
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
21	6600	33	0.015



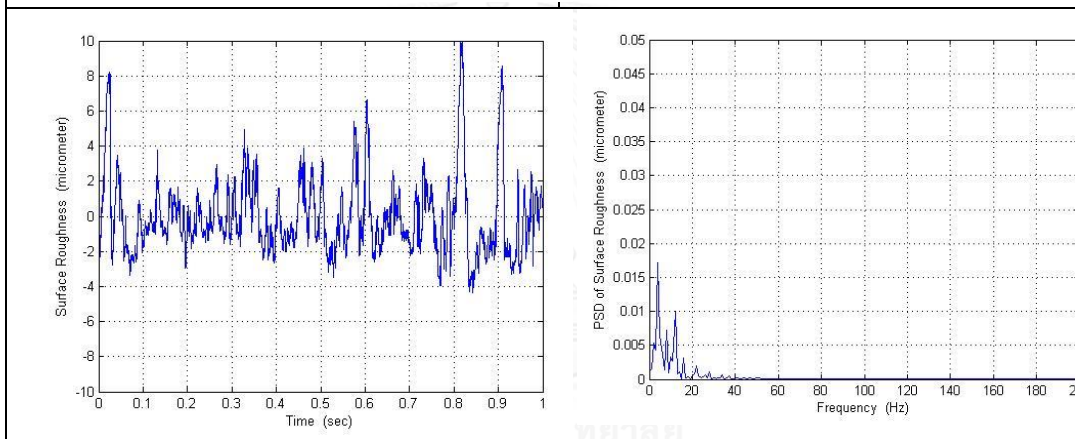
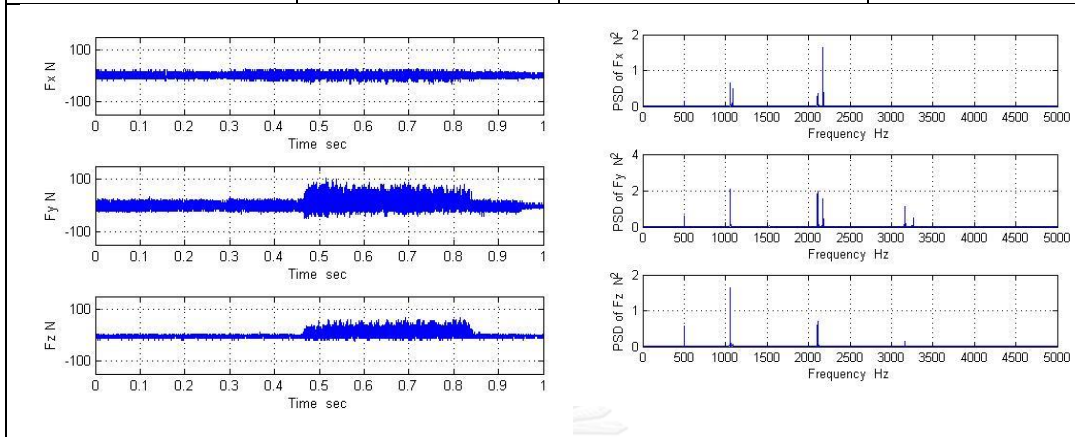
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
22	6600	22	0.005



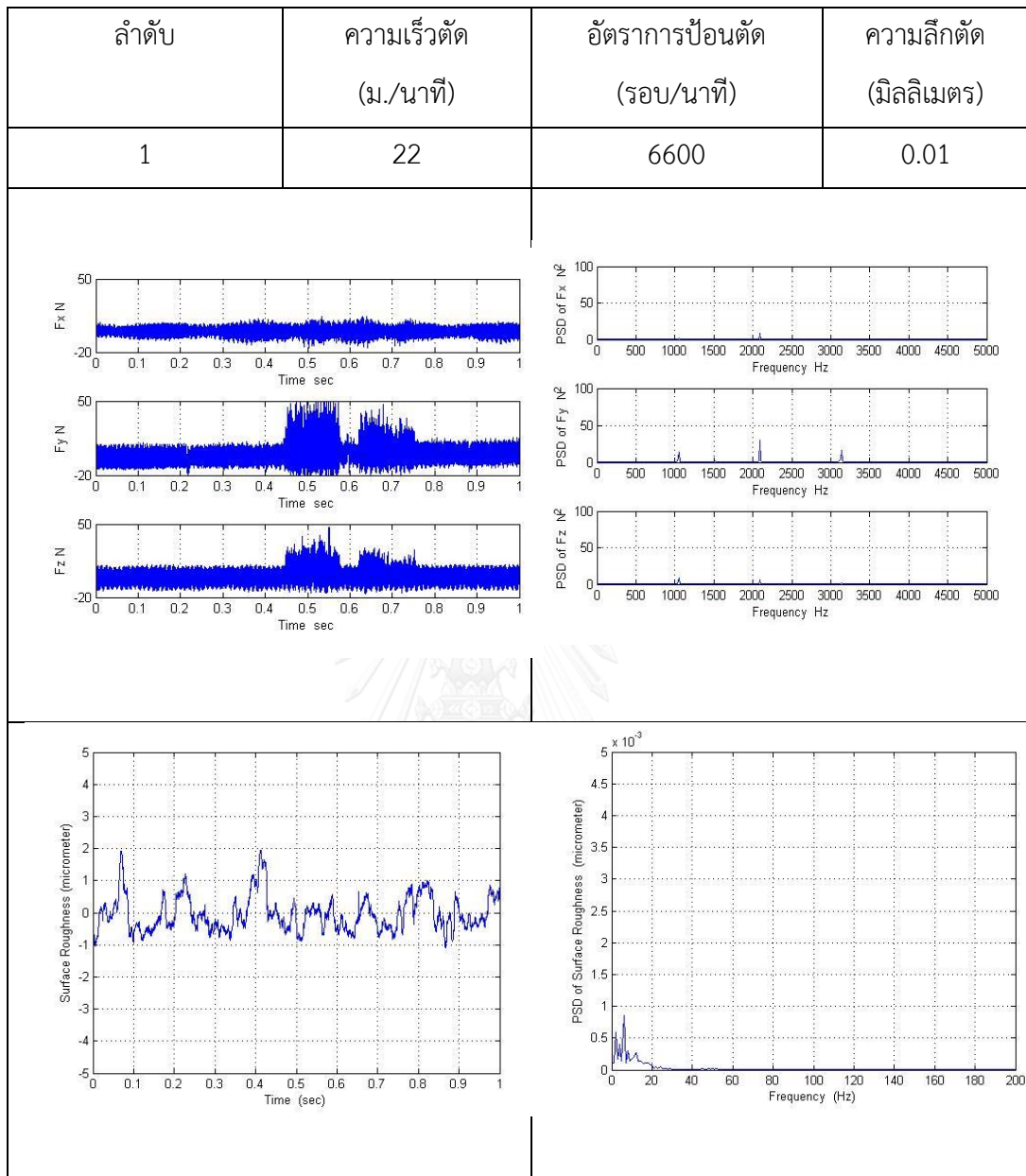
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
23	6600	22	0.01



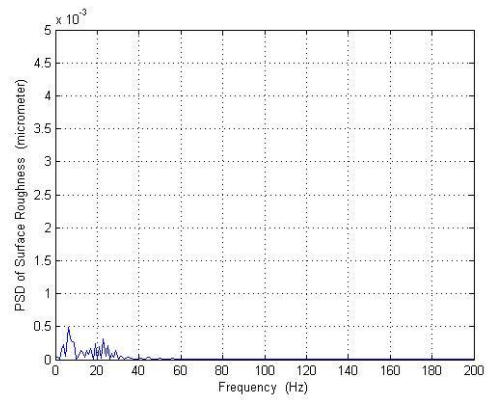
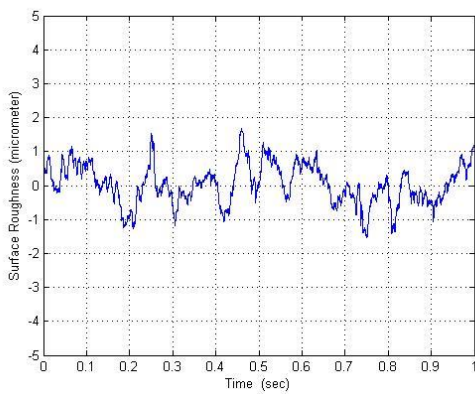
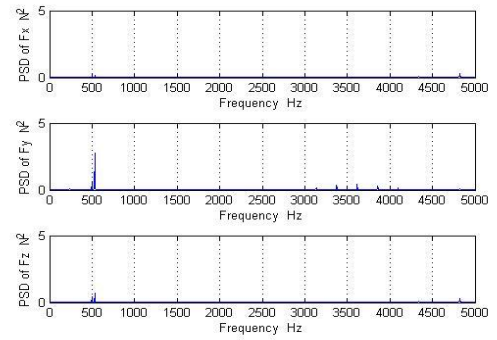
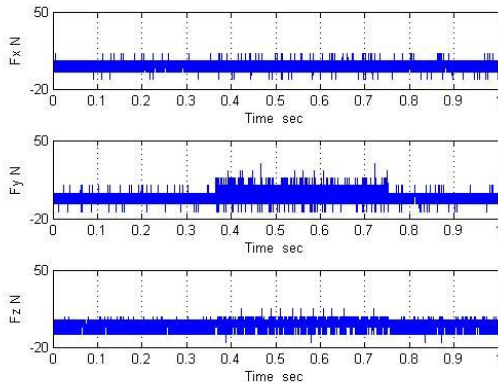
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
24	6600	22	0.015



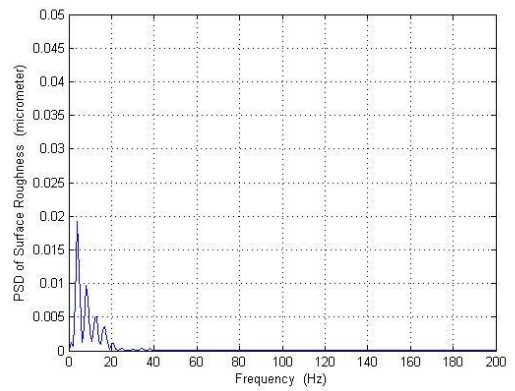
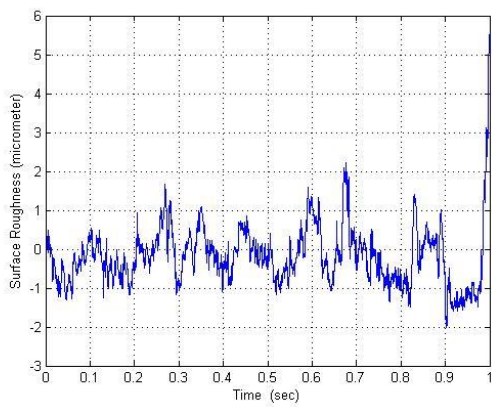
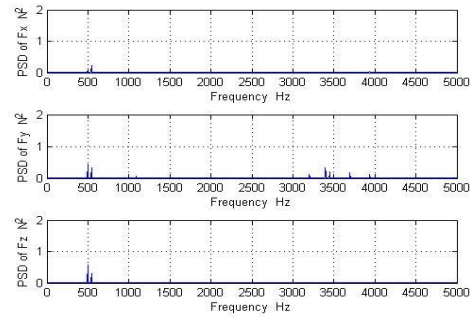
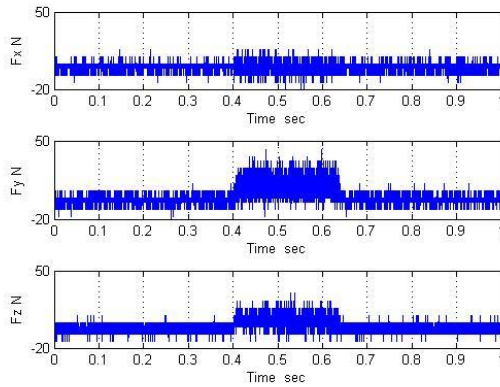
การวิเคราะห์การเจียรระไนสำหรับการทดสอบสมการ



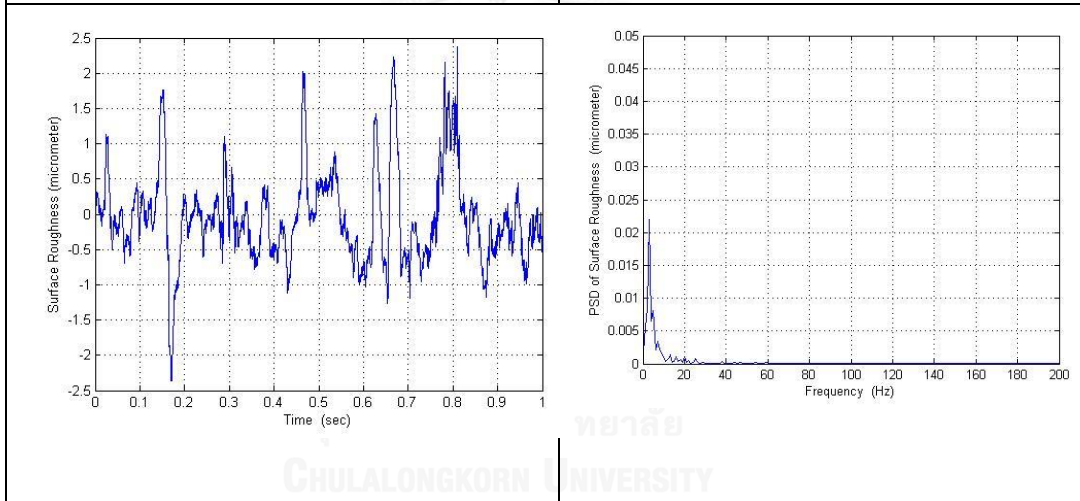
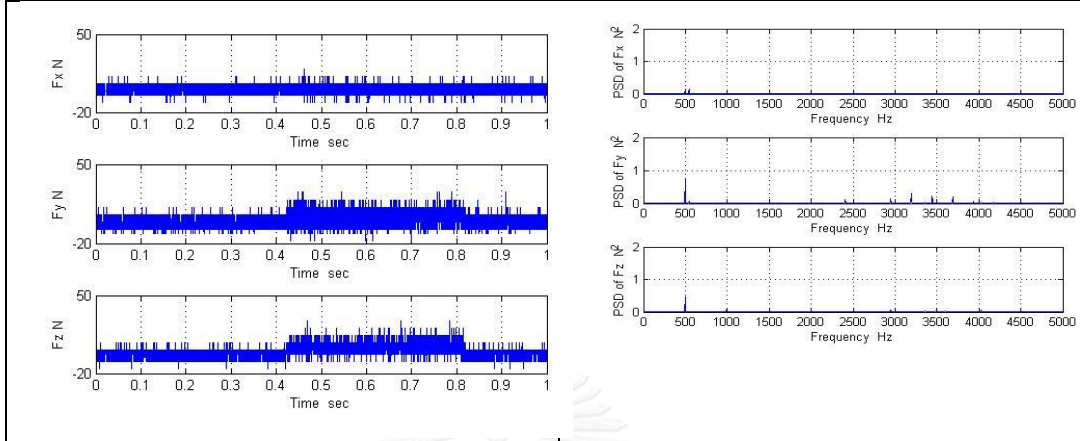
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
2	55	3300	0.015

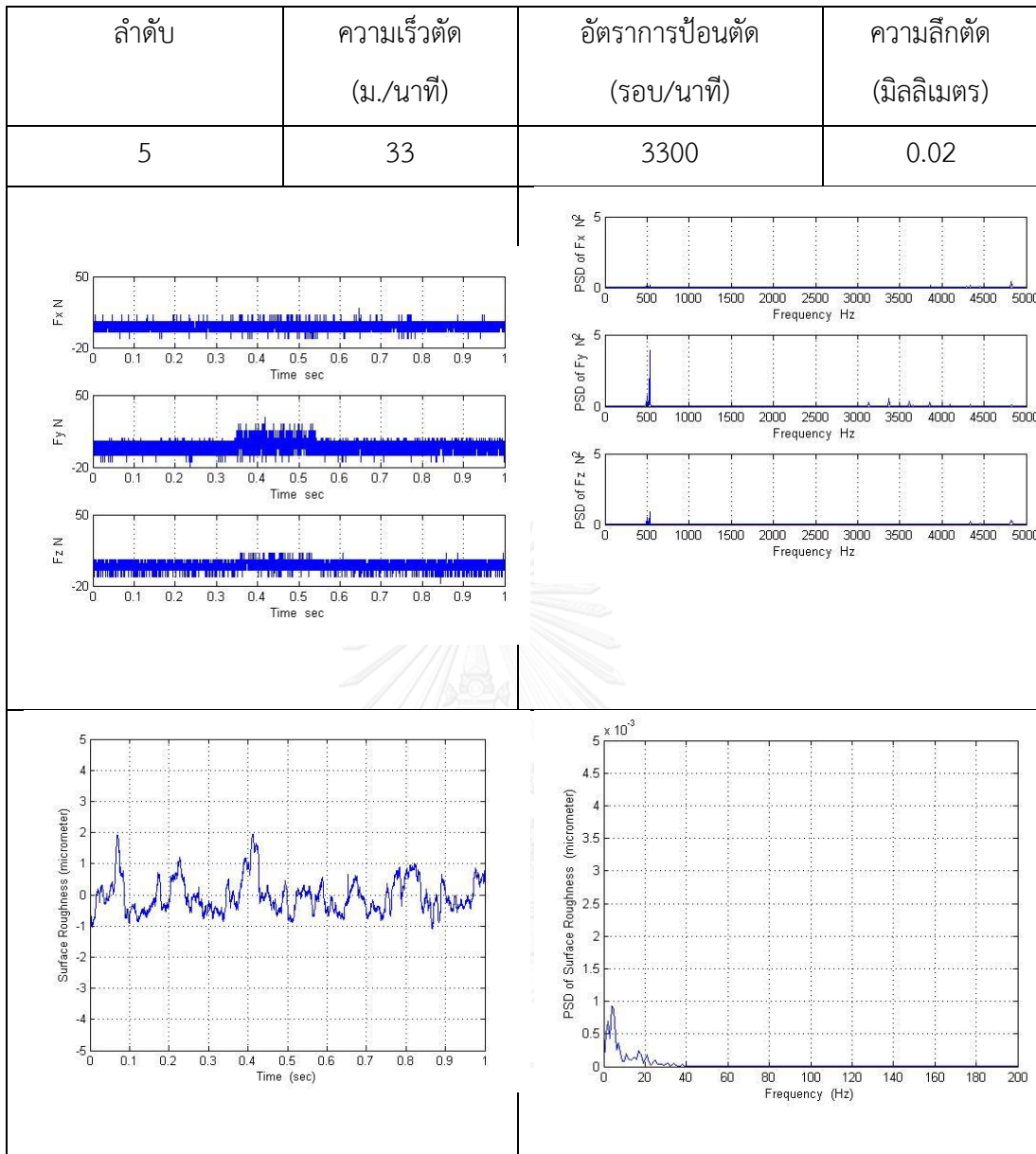


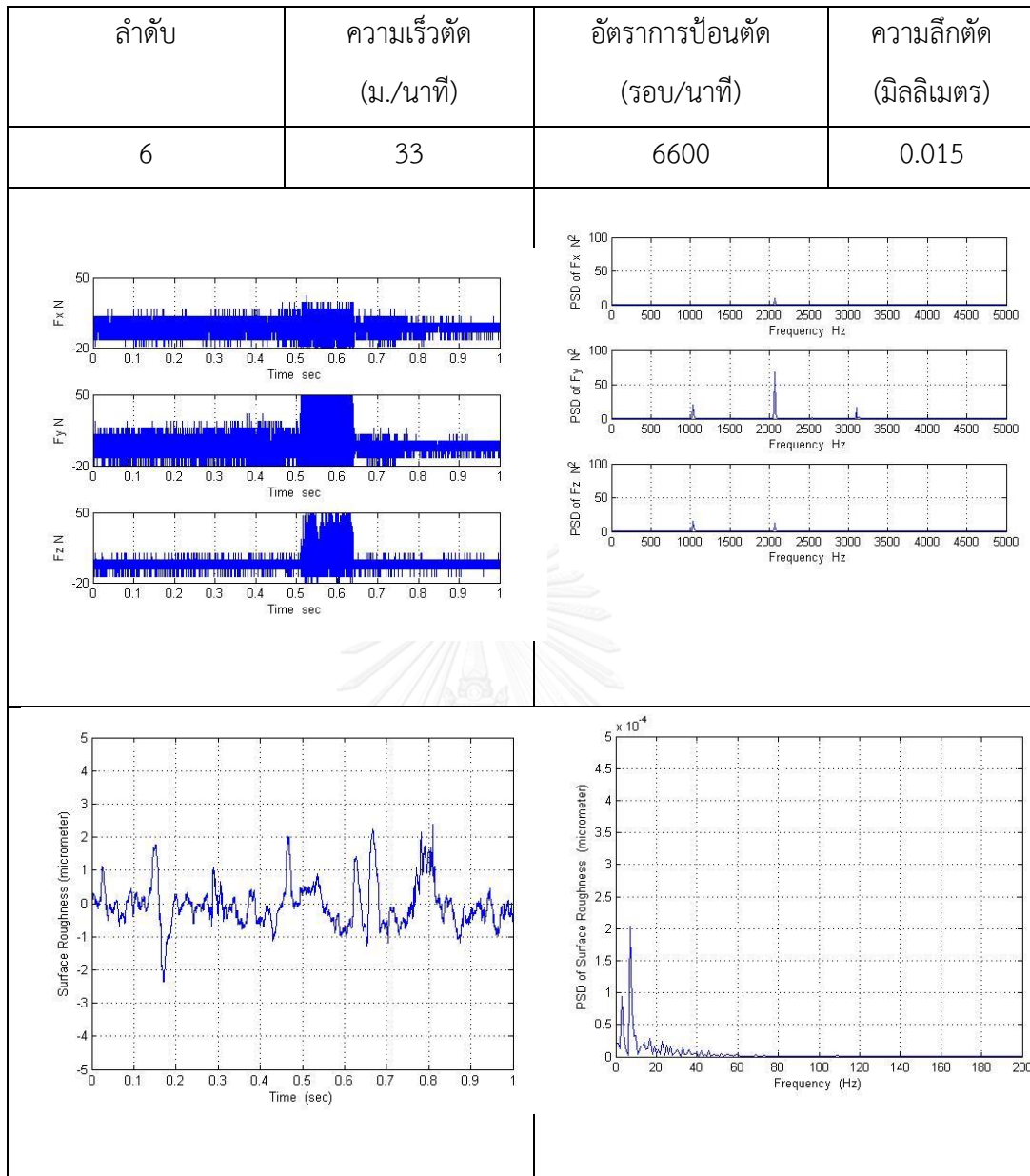
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
3	22	3300	0.01



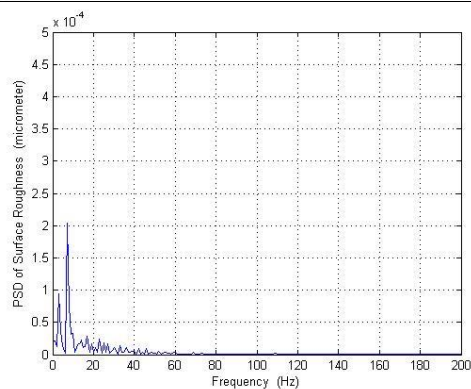
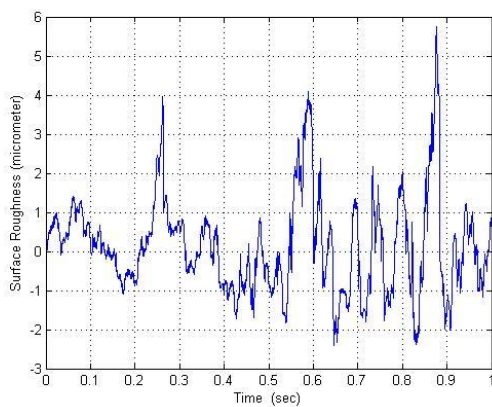
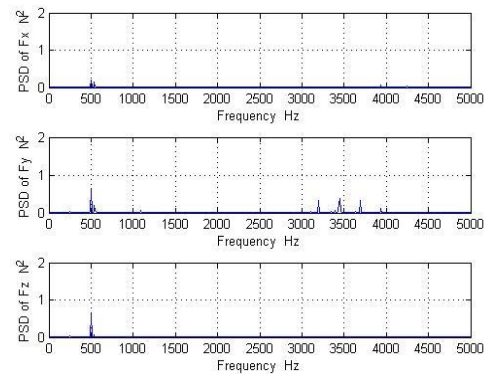
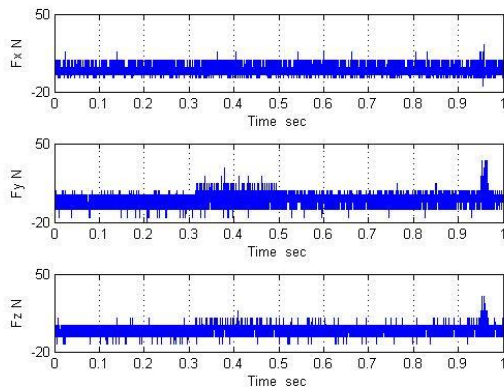
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
4	22	3300	0.02



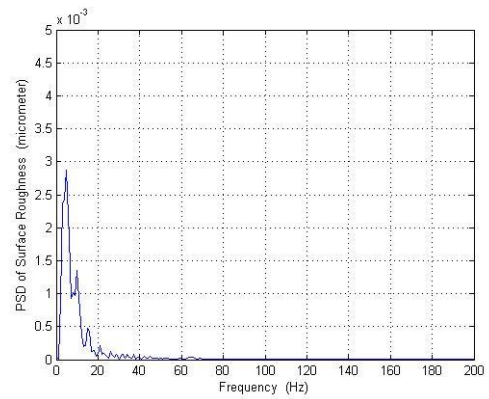
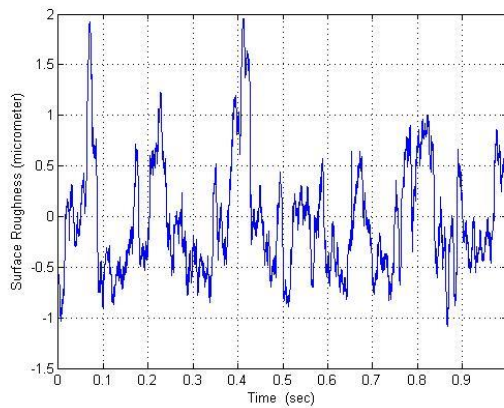
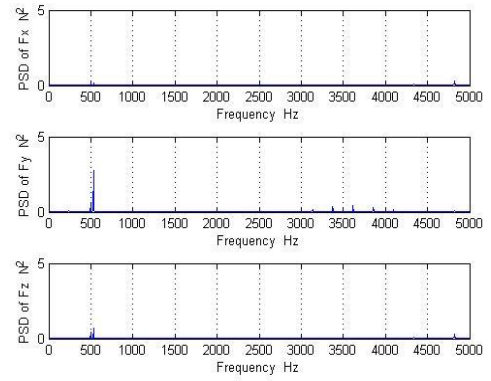
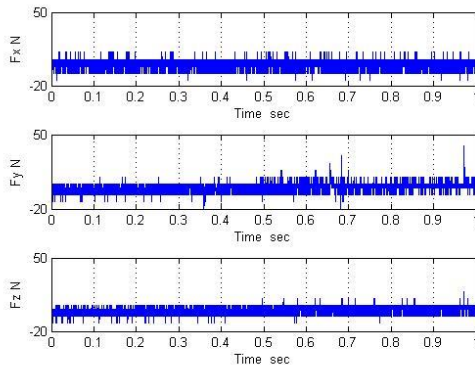




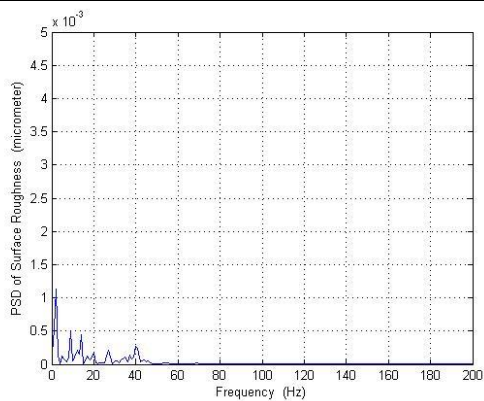
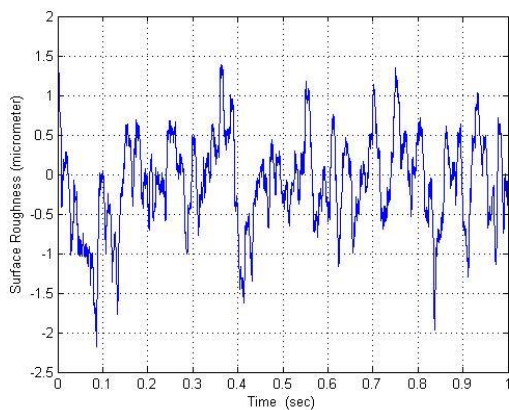
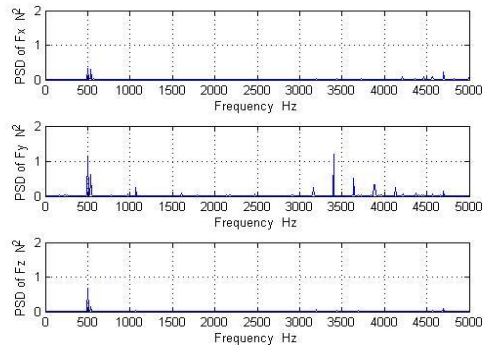
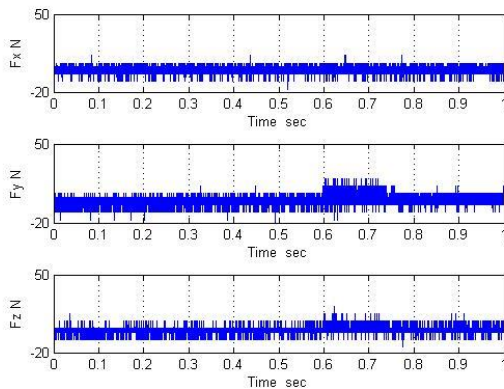
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
7	44	3300	0.01



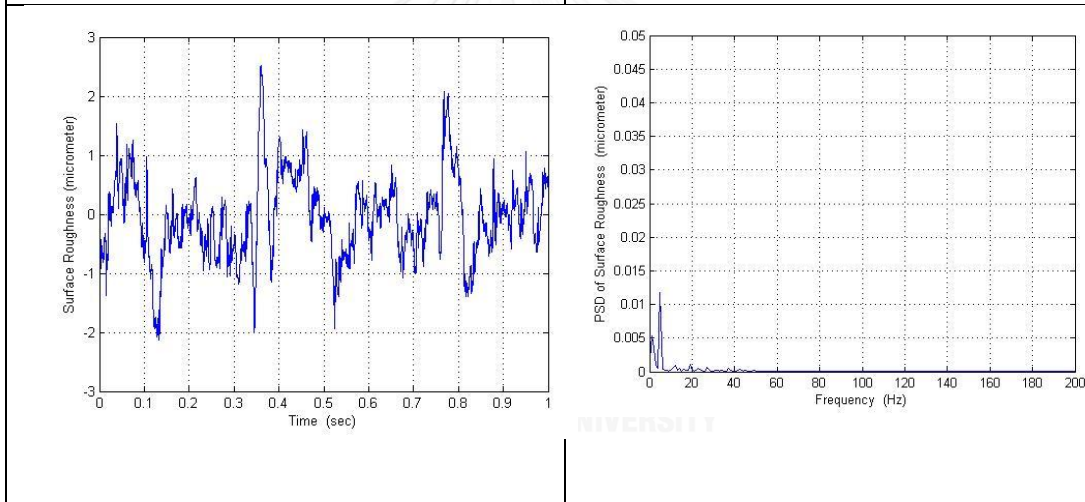
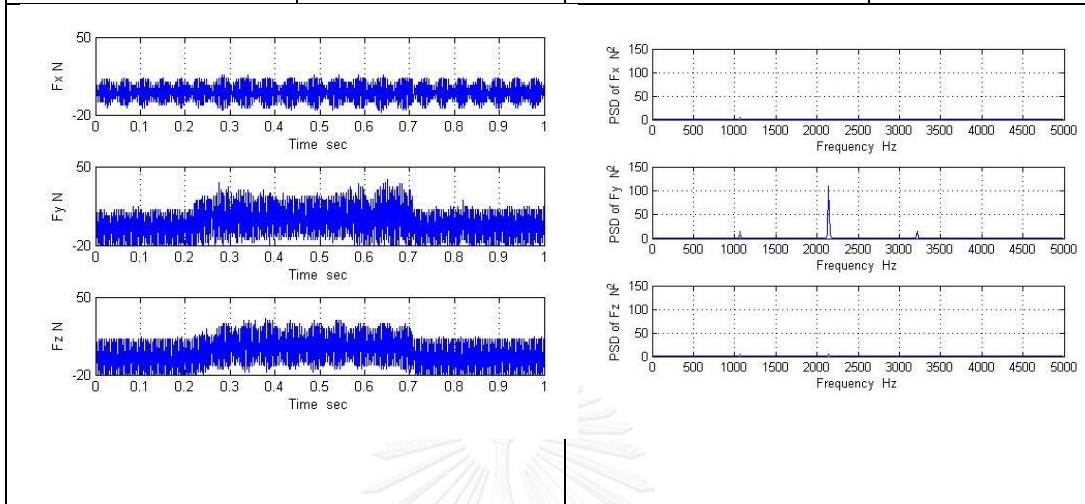
ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
8	33	3300	0.015

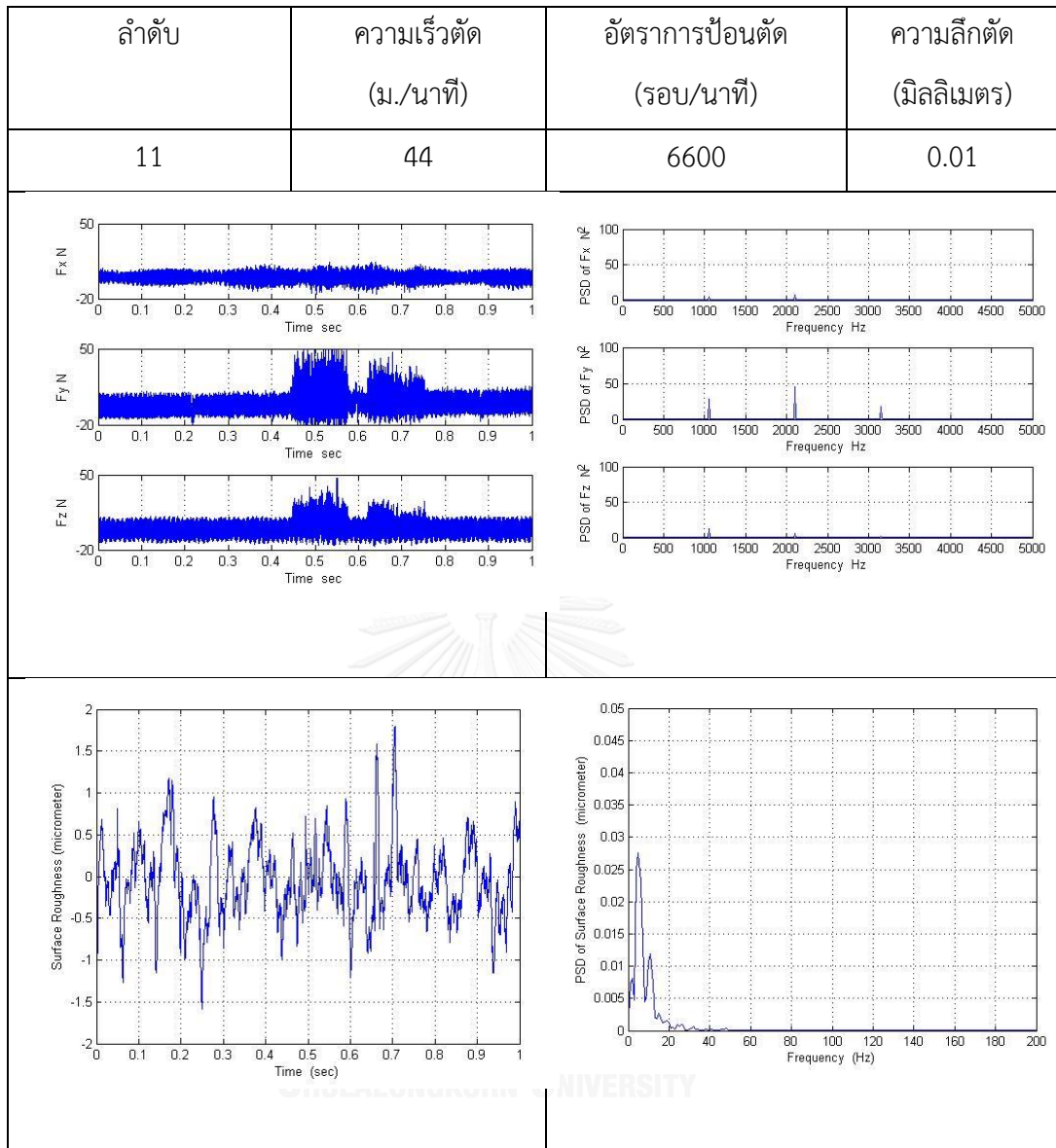


ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
9	44	3300	0.02

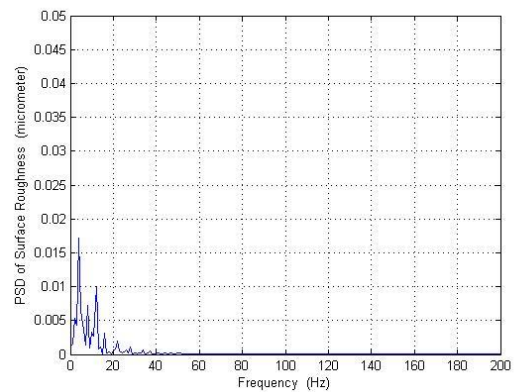
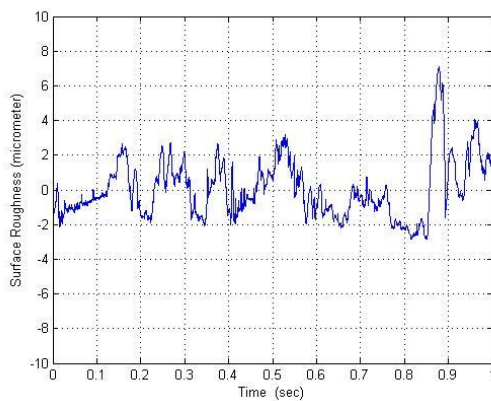
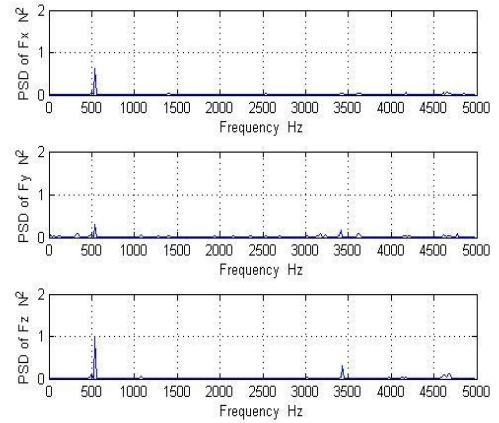
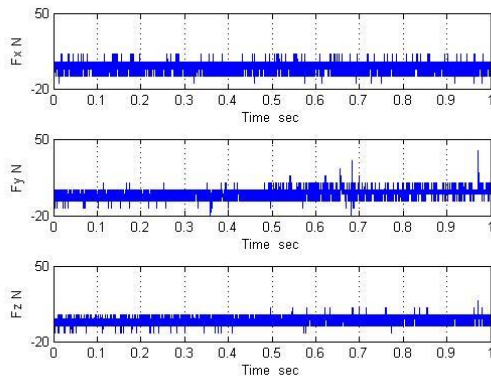


ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
10	55	6600	0.015

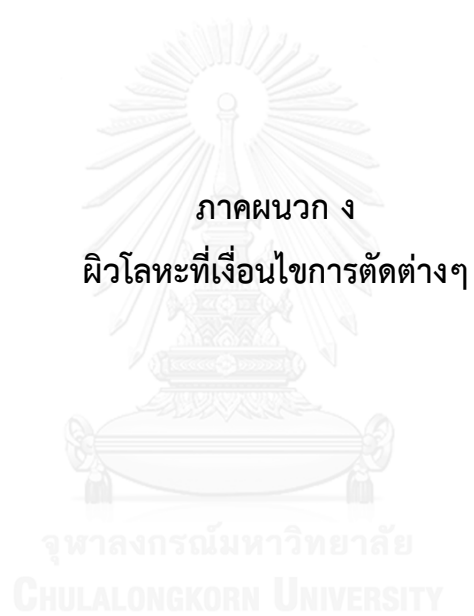






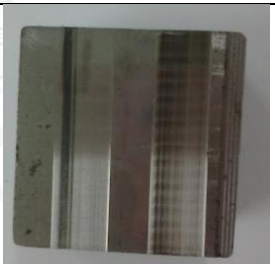


ลำดับ	ความเร็วตัด (ม./นาที)	อัตราการป้อนตัด (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
12	55	3300	0.02


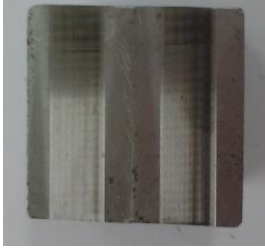
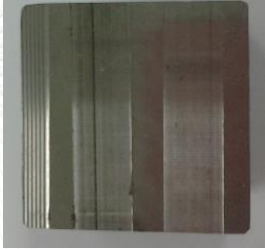


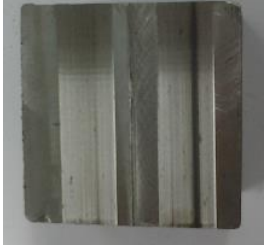


WUOLALUNIVRSITY




ภาพชิ้นงานที่เงื่อนไขการตัดที่ 1-24

Run Order	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/วินาที)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	ภาพชิ้นงาน	Ra	Rz
1	55	3300	0.005		0.46	2.741
2	55	3300	0.01		0.5	2.851
3	55	3300	0.015		0.69	3.86
4	44	3300	0.005		0.49	2.594
5	44	3300	0.01		0.52	3.114

6	44	3300	0.015		0.699	3.8
7	33	3300	0.005		0.523	2.905
8	33	3300	0.01		0.655	3.55
9	33	3300	0.015		0.8	4.25
10	22	3300	0.005		0.637	3.5
11	22	3300	0.01		0.966	5.244

12	22	3300	0.015		0.999	5.282
13	55	6600	0.005		0.543	3.263
14	55	6600	0.01		0.764	4.2
15	55	6600	0.015		0.971	5.199
16	44	6600	0.005		0.552	3.349
17	44	6600	0.01		0.795	4.22

18	44	6600	0.015		0.99	6.356
19	33	6600	0.005		0.6	3.531
20	33	6600	0.01		0.994	5.686
21	33	6600	0.015		1.119	6.697
22	22	6600	0.005		0.75	3.998
23	22	6600	0.01		1.2	6.189

24	22	6600	0.015		1.362	7.68
----	----	------	-------	--	-------	------





โปรแกรมการแปลงสัญญาณเวฟเล็ท แบบตอเบซีส์

```

forceroughness = textread('nan3.txt');
l_x1 = length(forceroughness);
fx = forceroughness(:,1); fy = forceroughness(:,2); fz = forceroughness(:,3);
[N,n]=size(forceroughness);
samp = N;
t=1/samp;
tt=(0:t*(N-1));
f=(0:N-1)/N*samp;
freq1 = f(1:N/2);

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

[cAx2,cDx2] = dwt(cAx1,'db2');
[cAx3,cDx3] = dwt(cAx2,'db2');
[cAx4,cDx4] = dwt(cAx3,'db2');
[cAx5,cDx5] = dwt(cAx4,'db2');

[cAy2,cDy2] = dwt(cAy1,'db2');
[cAy3,cDy3] = dwt(cAy2,'db2');
[cAy4,cDy4] = dwt(cAy3,'db2');
[cAy5,cDy5] = dwt(cAy4,'db2');

[cAz2,cDz2] = dwt(cAz1,'db2');
[cAz3,cDz3] = dwt(cAz2,'db2');
[cAz4,cDz4] = dwt(cAz3,'db2');

```

$[cAz5, cDz5] = \text{dwt}(cAz4, 'db2');$

$Dx1 = \text{upcoef}('d', cDx1, 'db2', 1, l_x1);$

$Dx2 = \text{upcoef}('d', cDx2, 'db2', 2, l_x1);$

$Dx3 = \text{upcoef}('d', cDx3, 'db2', 3, l_x1);$

$Dx4 = \text{upcoef}('d', cDx4, 'db2', 4, l_x1);$

$Dx5 = \text{upcoef}('d', cDx5, 'db2', 5, l_x1);$

$Ax1 = \text{upcoef}('a', cAx1, 'db2', 1, l_x1);$

$Ax2 = \text{upcoef}('a', cAx2, 'db2', 2, l_x1);$

$Ax3 = \text{upcoef}('a', cAx3, 'db2', 3, l_x1);$

$Ax4 = \text{upcoef}('a', cAx4, 'db2', 4, l_x1);$

$Ax5 = \text{upcoef}('a', cAx5, 'db2', 5, l_x1);$

$Dy1 = \text{upcoef}('d', cDy1, 'db2', 1, l_x1);$

$Dy2 = \text{upcoef}('d', cDy2, 'db2', 2, l_x1);$

$Dy3 = \text{upcoef}('d', cDy3, 'db2', 3, l_x1);$

$Dy4 = \text{upcoef}('d', cDy4, 'db2', 4, l_x1);$

$Dy5 = \text{upcoef}('d', cDy5, 'db2', 5, l_x1);$

$Ay1 = \text{upcoef}('a', cAy1, 'db2', 1, l_x1);$

$Ay2 = \text{upcoef}('a', cAy2, 'db2', 2, l_x1);$

$Ay3 = \text{upcoef}('a', cAy3, 'db2', 3, l_x1);$

$Ay4 = \text{upcoef}('a', cAy4, 'db2', 4, l_x1);$

$Ay5 = \text{upcoef}('a', cAy5, 'db2', 5, l_x1);$

```

Dz1 = upcoef('d',cDz1,'db2',1,l_x1);
Dz2 = upcoef('d',cDz2,'db2',2,l_x1);
Dz3 = upcoef('d',cDz3,'db2',3,l_x1);
Dz4 = upcoef('d',cDz4,'db2',4,l_x1);
Dz5 = upcoef('d',cDz5,'db2',5,l_x1);

```

```

Az1 = upcoef('a',cAz1,'db2',1,l_x1);
Az2 = upcoef('a',cAz2,'db2',2,l_x1);
Az3 = upcoef('a',cAz3,'db2',3,l_x1);
Az4 = upcoef('a',cAz4,'db2',4,l_x1);
Az5 = upcoef('a',cAz5,'db2',5,l_x1);

```

```

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

```


 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

```

figure(1);
subplot(6,1,1);
plot(time,forceroughness(:,1));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Original Signal');ylim([-50 50]);
subplot(6,1,2)
plot(time,Dx1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-50 50]);
subplot(6,1,3)
plot(time,Dx2)

```

```

grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-50
50]);
subplot(6,1,4)
plot(time,Dx3)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-50
50]);
subplot(6,1,5)
plot(time,Dx4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D4');ylim([-50
50]);
subplot(6,1,6)
plot(time,Dx5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force x (N)');title('Detail Signal D5');ylim([-50
50]);

figure(2);
subplot(6,1,1);
plot(time,forceroughness(:,2));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Original Signal');ylim([-50 50]);
subplot(6,1,2)
plot(time,Dy1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-50
50]);
subplot(6,1,3)
plot(time,Dy2)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-50
50]);
subplot(6,1,4)
plot(time,Dy3)

```

```

grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-50
50]);
subplot(6,1,5)
plot(time,Dy4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D4');ylim([-50
50]);
subplot(6,1,6)
plot(time,Dy5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force y (N)');title('Detail Signal D5');ylim([-50
50]);

figure(3);
subplot(6,1,1);
plot(time,forceroughness(:,3));
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Original Signal'); ylim([-50 50]);
subplot(6,1,2)
plot(time,Dz1)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D1'); ylim([-50
50]);
subplot(6,1,3)
plot(time,Dz2)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D2'); ylim([-50
50]);
subplot(6,1,4)
plot(time,Dz3)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D3'); ylim([-50
50]);
subplot(6,1,5)
plot(time,Dz4)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D4'); ylim([-50
50]);

```

```
subplot(6,1,6)
plot(time,Dz5)
grid;zoom on ;xlabel('Time (s.);ylabel('Force z (N)');title('Detail Signal D5'); ylim([-50
50]);
```

```
%Fourier Transform%
```

```
[N1,M1] = size(Dx1);
```

```
[N2,M2] = size(Dx2);
```

```
[N3,M3] = size(Dx3);
```

```
[N4,M4] = size(Dx4);
```

```
[N5,M5] = size(Dx5);
```

```
%[N6,M6] = size(Dx6);
```

```
%[N7,M7] = size(Dx7);
```

```
%[N8,M8] = size(Dx8);
```

```
sample = N;
```

```
t = 1/sample;
```

```
tt = (0:t*(N-1));
```

```
f = (0:N-1)/N*sample;
```

```
freq = f(1:N/2);
```

```
fx0 = fft(forceroughness(:,1))/N*2;
```

```
fx1 = fft(Dx1)/N*2;
```

```
fx2 = fft(Dx2)/N*2;
```

```
fx3 = fft(Dx3)/N*2;
```

```
fx4 = fft(Dx4)/N*2;
```

```
fx5 = fft(Dx5)/N*2;
```

```
%fx6 = fft(Dx6)/N*2;
```

```
%fx7 = fft(Dx7)/N*2;
```

```
%fx8 = fft(Dx8)/N*2;
```



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

```

fx0abs = abs(fx0(1:N1/2));
fx1abs = abs(fx1(1:N1/2));
fx2abs = abs(fx2(1:N2/2));
fx3abs = abs(fx3(1:N3/2));
fx4abs = abs(fx4(1:N4/2));
fx5abs = abs(fx5(1:N5/2));
%fx6abs = abs(fx6(1:N6/2));
%fx7abs = abs(fx7(1:N7/2));
%fx8abs = abs(fx8(1:N8/2));

```

```

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

```



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```

fy0 = fft(forceroughness(:,2))/N*2;
fy1 = fft(Dy1)/N*2;
fy2 = fft(Dy2)/N*2;
fy3 = fft(Dy3)/N*2;
fy4 = fft(Dy4)/N*2;
fy5 = fft(Dy5)/N*2;
%fy6 = fft(Dy6)/N*2;
%fy7 = fft(Dy7)/N*2;
%fy8 = fft(Dy8)/N*2;

```

```

fy0abs = abs(fy0(1:N1/2));
fy1abs = abs(fy1(1:N1/2));
fy2abs = abs(fy2(1:N2/2));
fy3abs = abs(fy3(1:N3/2));
fy4abs = abs(fy4(1:N4/2));
fy5abs = abs(fy5(1:N5/2));
%fy6abs = abs(fy6(1:N6/2));
%fy7abs = abs(fy7(1:N7/2));
%fy8abs = abs(fy8(1:N8/2));

```

```

fy0abs2 = fy0abs.^2;
fy1abs2 = fy1abs.^2;
fy2abs2 = fy2abs.^2;
fy3abs2 = fy3abs.^2;
fy4abs2 = fy4abs.^2;
fy5abs2 = fy5abs.^2;
%fy6abs2 = fy6abs.^2;
%fy7abs2 = fy7abs.^2;
%fy8abs2 = fy8abs.^2;

```



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```

fz0 = fft(forceroughness(:,3))/N*2;
fz1 = fft(Dz1)/N*2;
fz2 = fft(Dz2)/N*2;
fz3 = fft(Dz3)/N*2;
fz4 = fft(Dz4)/N*2;
fz5 = fft(Dz5)/N*2;
%fz6 = fft(Dz6)/N*2;
%fz7 = fft(Dz7)/N*2;
%fz8 = fft(Dz8)/N*2;

```

```

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

```



```

fz1abs = abs(fz1(1:N1/2));
fz2abs = abs(fz2(1:N2/2));
fz3abs = abs(fz3(1:N3/2));
fz4abs = abs(fz4(1:N4/2));
fz5abs = abs(fz5(1:N5/2));
%fz6abs = abs(fz6(1:N6/2));
%fz7abs = abs(fz7(1:N7/2));
%fz8abs = abs(fz8(1:N8/2));

```

```

fz0abs2 = fz0abs.^2;
fz1abs2 = fz1abs.^2;
fz2abs2 = fz2abs.^2;
fz3abs2 = fz3abs.^2;
fz4abs2 = fz4abs.^2;
fz5abs2 = fz5abs.^2;
%fz6abs2 = fz6abs.^2;
%fz7abs2 = fz7abs.^2;
%fz8abs2 = fz8abs.^2;

```

```

figure(4);
subplot(6,1,1);
plot(fx0abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Original Signal');
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);
subplot(6,1,2);
plot(fx1abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D1');
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);
subplot(6,1,3);
plot(fx2abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D2');
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);
subplot(6,1,4);

```



```
plot(fx3abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D3');  
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);  
subplot(6,1,5);  
plot(fx4abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D4');  
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);  
subplot(6,1,6);  
plot(fx5abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum x');title('Detail Signal D5');  
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);
```

```
figure(5);  
subplot(6,1,1);  
plot(fy0abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Original Signal');  
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);  
subplot(6,1,2);  
plot(fy1abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D1');  
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);  
subplot(6,1,3);  
plot(fy2abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D2');  
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);  
subplot(6,1,4);  
plot(fy3abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D3');  
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);  
subplot(6,1,5);  
plot(fy4abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D4');  
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);  
subplot(6,1,6);  
plot(fy5abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum y');title('Detail Signal D5');  
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);
```

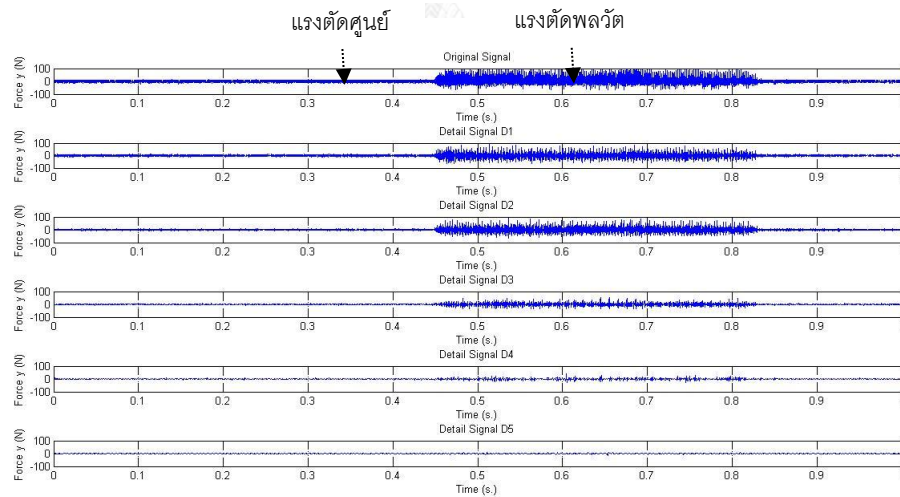
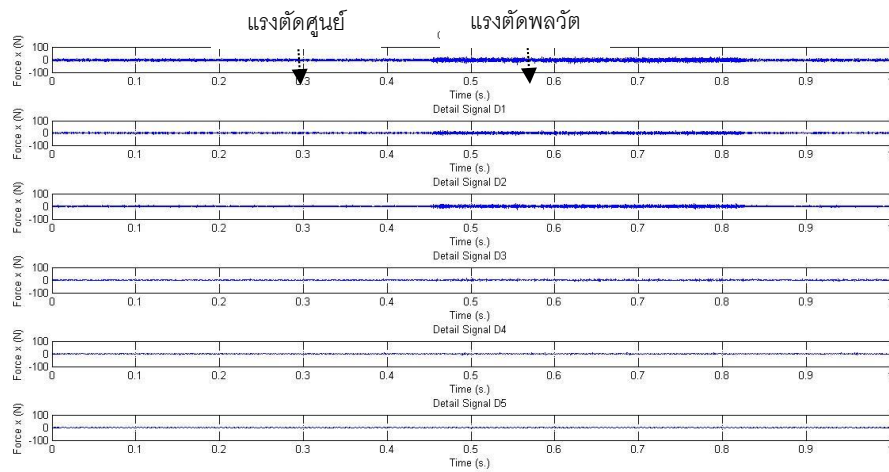
```
figure(6);  
subplot(6,1,1);
```

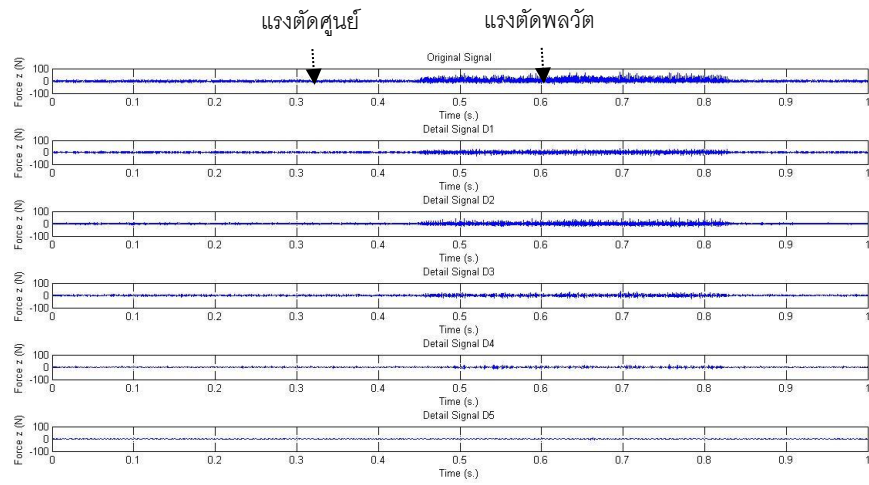
```
plot(fz0abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Original Signal');  
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);  
subplot(6,1,2);  
plot(fz1abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D1');  
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);  
subplot(6,1,3);  
plot(fz2abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D2');  
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);  
subplot(6,1,4);  
plot(fz3abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D3');  
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);  
subplot(6,1,5);  
plot(fz4abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D4');  
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);  
subplot(6,1,6);  
plot(fz5abs2);xlabel('Frequency');ylabel('Power Spectrum z');title('Detail Signal D5');  
xlim([000 2000]); ylim([0 10]);
```

ตัวอย่างการแปลงสัญญาณแรงตัดด้วยเวฟเล็ต

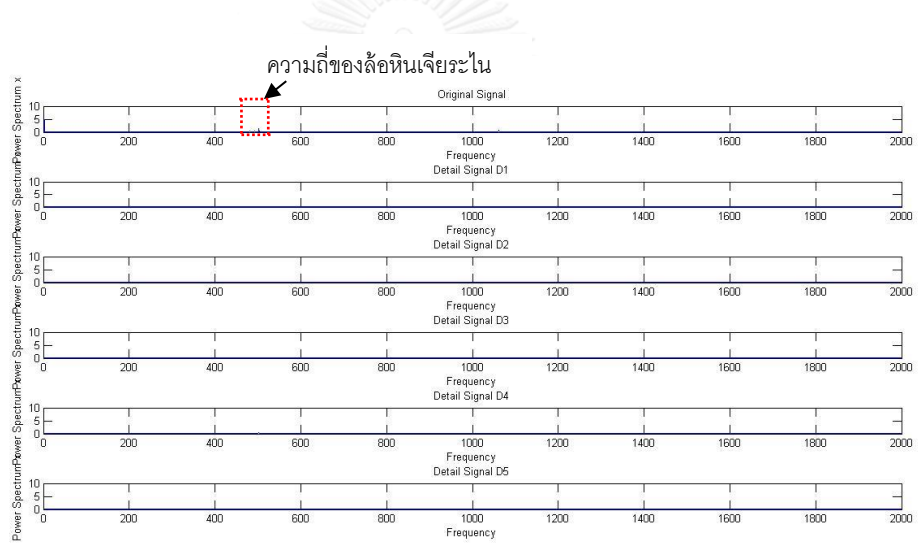
Run Order	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/วินาที)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
19	33	6600	0.005

สัญญาณแรงตัดในโดเมนเวลาโดยแปลงสัญญาณด้วยเวฟเล็ต



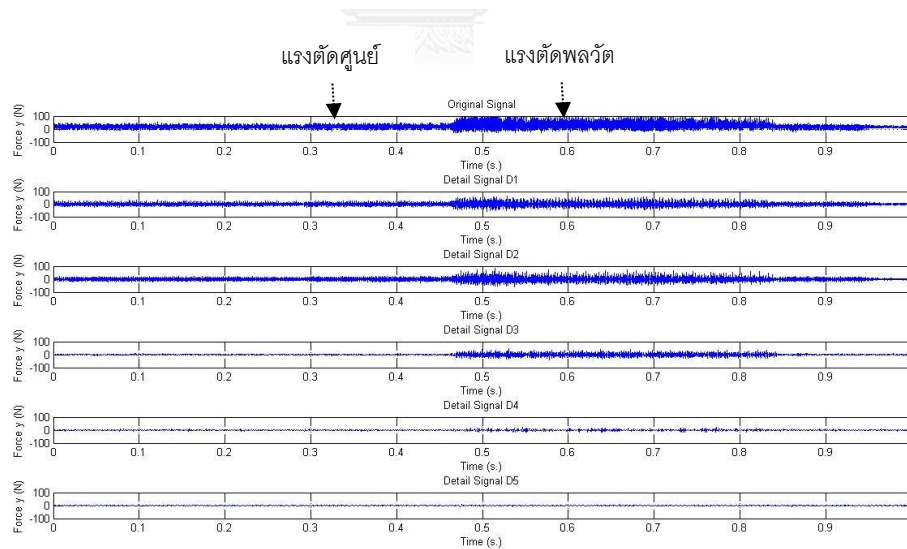
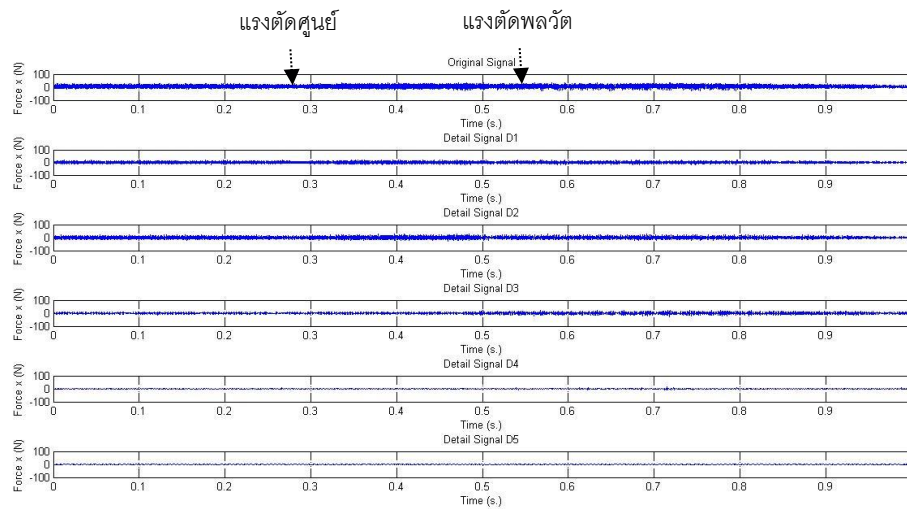


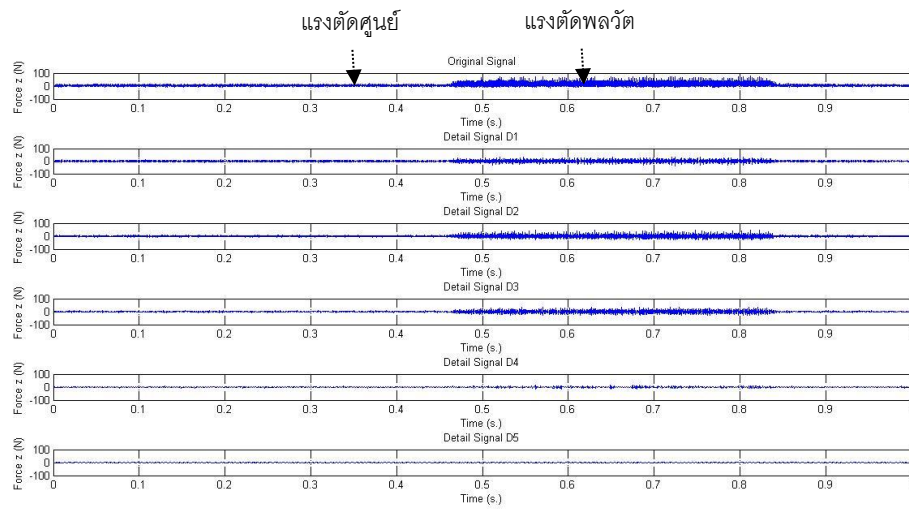
สัญญาณแรงตัดในโดเมนความถี่โดยแปลงสัญญาณด้วยเวฟเล็ต



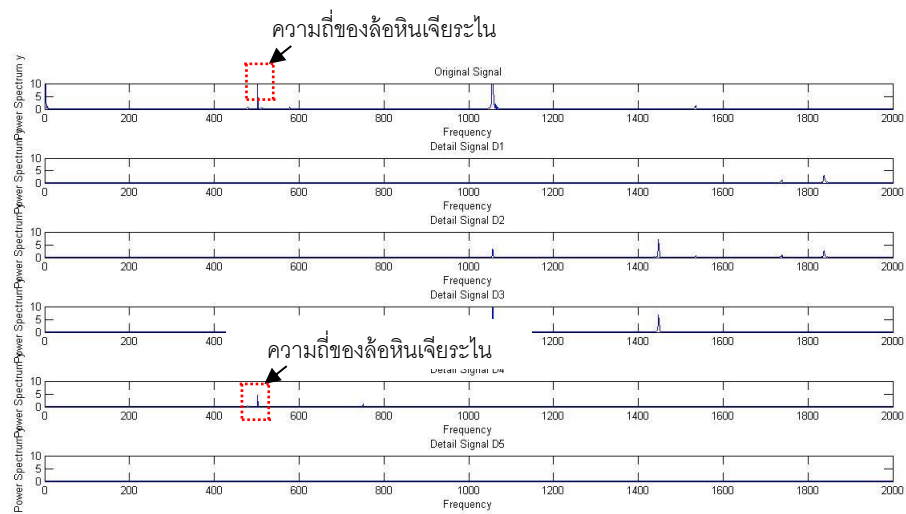
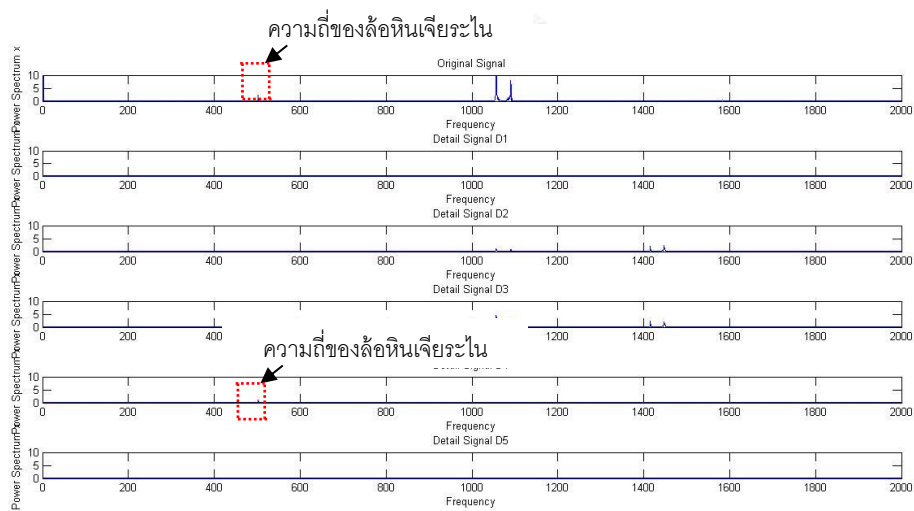
Run Order	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/วินาที)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
20	33	6600	0.01

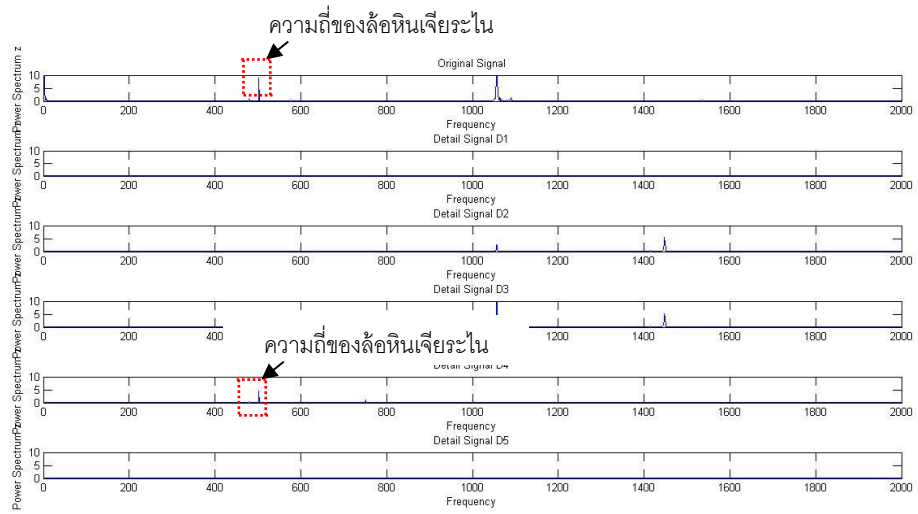
สัญญาณแรงตัดในโดเมนเวลาโดยแปลงสัญญาณด้วยเวฟเล็ต





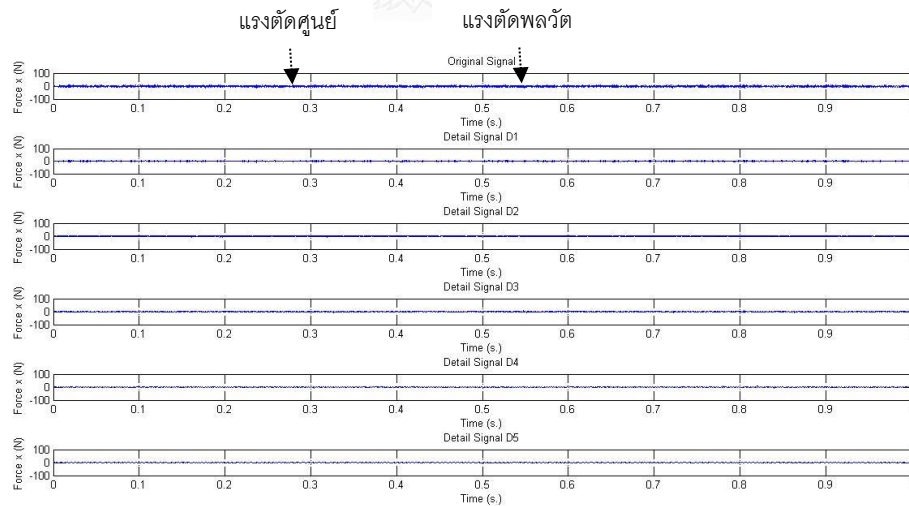
สัญญาณแรงตัดในโดเมนความถี่โดยแปลงสัญญาณด้วยเวฟเล็ต

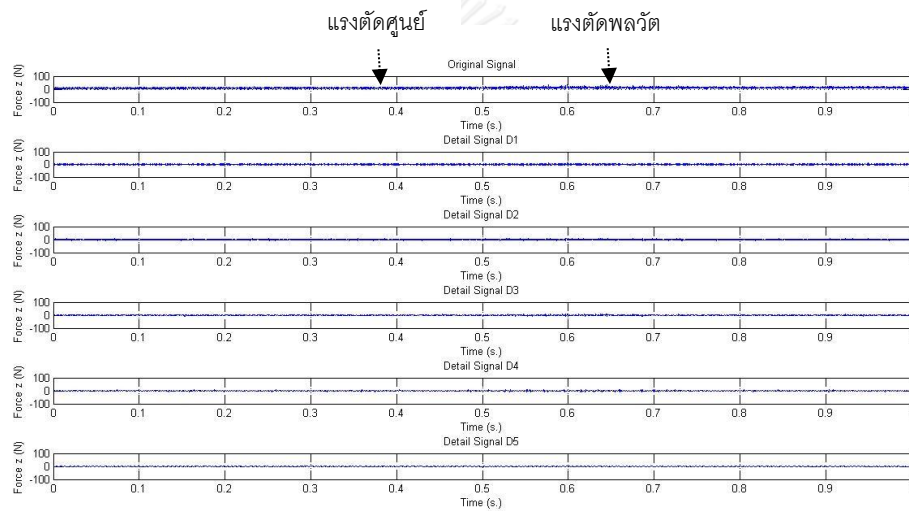
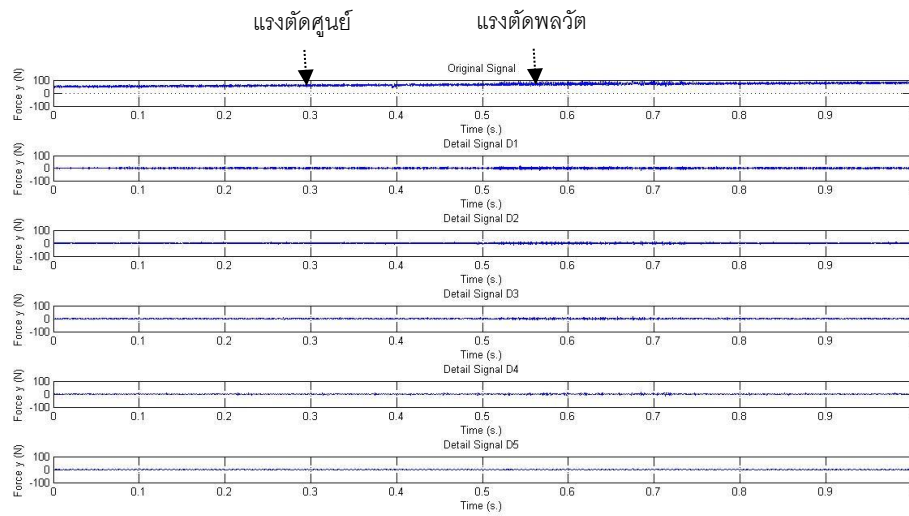




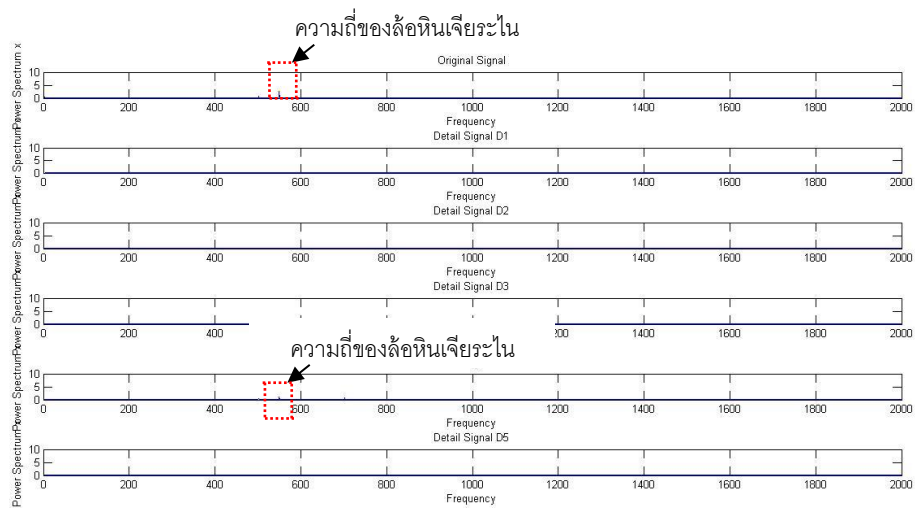
Run Order	อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/วินาที)	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
21	33	6600	0.015

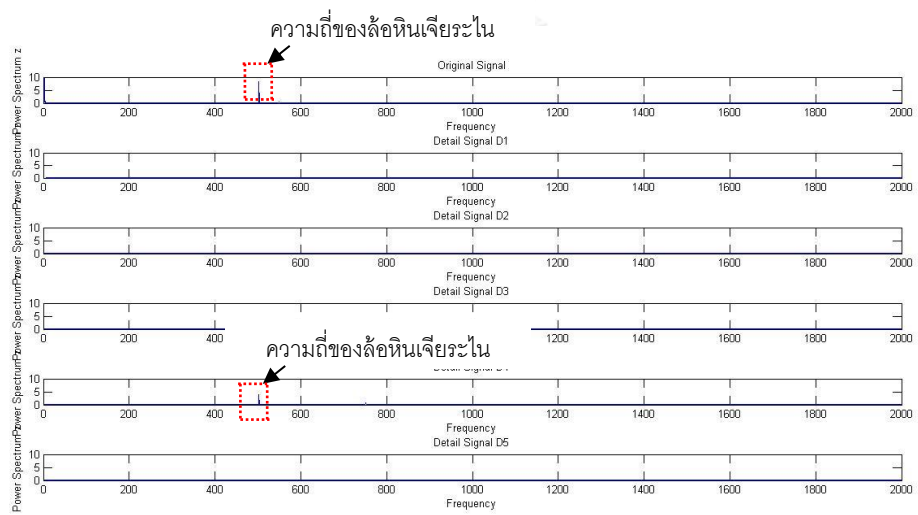
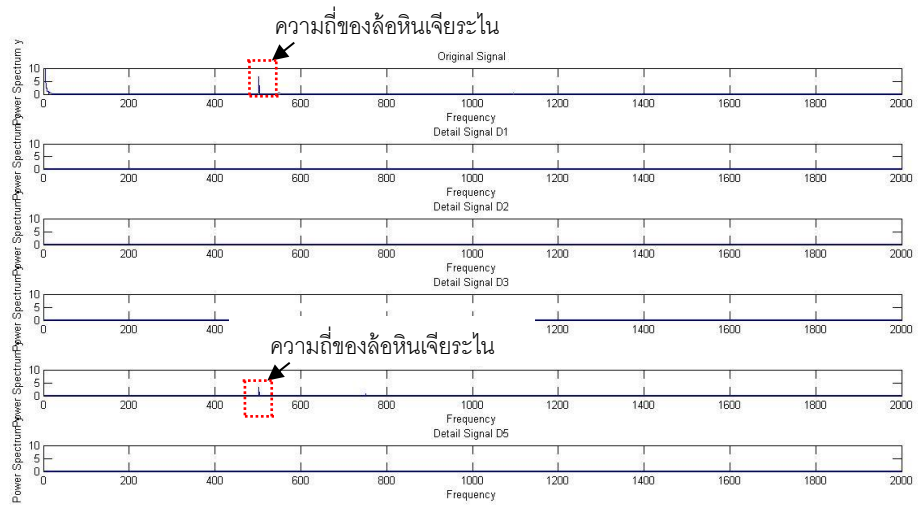
สัญญาณแรงตัดในโดเมนเวลาโดยแปลงสัญญาณด้วยเวฟเล็ต





สัญญาณแรงตัดในโดเมนความถี่โดยแปลงสัญญาณด้วยเวฟเล็ต





ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววิชญา ธรรมสิงห์ เกิดวันที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดกาฬสินธุ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2554

