

การพัฒนาอุปกรณ์แสดงผลและศึกษาสภาวะปัจจัยที่มีผลต่อแรงเฉื่อยในรูปแบบทรงกลม



นายกฤติภัค โกยตุลย์

ศูนย์วิทยพัทยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



4 8 7 0 2 1 1 4 2 1

DEVELOPMENT OF MONITORING EQUIPMENT AND STUDY ON EFFECTIVE FACTORS
TO SPHERICAL GRINDING FORCE



Mr. Kritdipuk Goyadoolya

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2008

Copyright of Chulalongkorn University

512050

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาอุปกรณ์แสดงผลและศึกษาสภาวะปัจจัยที่มีผล
ต่อแรงเฉื่อยขึ้นรูปทรงกลม

โดย

นายกฤติภัค โกยตุลย์

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

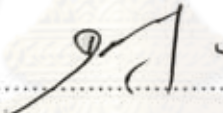
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

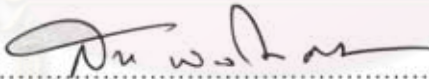
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกสีก)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สิรง ปรีชานนท์)

กฤติภาค โภยดุลย์ : การพัฒนาอุปกรณ์แสดงผลและศึกษาสภาวะปัจจัยที่มีผลต่อแรง
 เจียรขึ้นรูปทรงกลม. (DEVELOPMENT OF MONITORING EQUIPMENT AND
 STUDY ON EFFECTIVE FACTORS TO SPHERICAL GRINDING FORCE) อ.ที่
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร, 206 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานที่มีผล
 ต่อกระบวนการเจียรขึ้นรูปทรงกลม และ (2) เพื่อพัฒนาอุปกรณ์แสดงผลของแรงที่มีผลต่อกระบวนการ
 เจียรขึ้นรูปทรงกลม

การดำเนินการศึกษา ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์เฟส คุณสมบัติเชิงกายภาพ และเชิงกลของ
 วัสดุที่นำมาใช้ ได้ประยุกต์เครื่องทดสอบความล้า โดยติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม ได้แก่ มอเตอร์ผกผัน แผ่น
 ร่องรูปโค้ง และอุปกรณ์วัดแรง ซึ่งประกอบด้วย ไดนาโมมิเตอร์ เครื่องขยายสัญญาณประจุ และ
 ออสซิลโลสโคป ที่ใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูล 10 มิลลิวินาที ต่อตัวอย่างสัญญาณ ชิ้นงานเริ่มต้นเป็นวัสดุ
 ซิลิกเกตทรงลูกบาศก์ขนาดด้านละ 21.0 มิลลิเมตร ทำการเจียรโดยใช้ความเร็วรอบงานขัดตั้งแต่ 200 ถึง
 1000 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนชิ้นงานตั้งแต่ 1 ถึง 60 มิลลิเมตรต่อนาที

ผลการศึกษาพบว่า (1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานหลังการเจียรไม่ขึ้นกับความเร็ว
 รอบงานขัด (N) และอัตราการป้อนชิ้นงาน (f) (2) รูปร่างชิ้นงานที่เกิดขึ้นมีรูปทรงต่างๆ ได้แก่ ทรงรูปไข่
 ทรงกลม ทรงกลมผิวบิดเบี้ยว และทรงกรวย (3) การเจียรขึ้นรูปให้ได้ทรงกลมจะขึ้นกับช่วงความเร็ว
 รอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน เช่น ความเร็วรอบงานขัด 300 ถึง 400 รอบต่อนาที สามารถใช้กับ
 อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 20 มิลลิเมตรต่อนาที เป็นต้น (4) จากขอบเขตที่การเจียรขึ้นรูปทรงกลมได้
 พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบงานขัด (N) และลดอัตราการป้อนชิ้นงาน (f) มีผลให้แรงในแนวเส้นสัมผัส
 (F_t) และแรงกดปกติ (F_n) มีค่าลดลง มีความสัมพันธ์ คือ $F_t = 1.46N^{-0.43}f^{0.5}$ และ $F_n = 23.5N^{-0.92}f^{0.49}$
 ด้วย R^2 เท่ากับ 0.584 และ 0.589 ตามลำดับ (5) สภาวะที่ใช้แรงเจียรที่น้อยที่สุด คือ ความเร็วรอบงาน
 ขัด 400 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนชิ้นงาน 1 มิลลิเมตรต่อนาที (6) อัตราส่วนแรง F_t/F_n (μ) ที่
 เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากเฉพาะความเร็วรอบงานขัดที่เพิ่มขึ้น และมีความสัมพันธ์ คือ $\mu = 0.08N^{0.44}$ ด้วย
 $R^2 = 0.906$ (7) ที่ความเร็วรอบงานขัด 200 รอบต่อนาที ให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างการเจียร
 (μ) น้อยที่สุดเท่ากับ 0.732 นิวตัน/นิวตัน และ (8) อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก (MRR) จะขึ้นกับอัตรา
 การป้อนชิ้นงาน โดยมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้น คือ $MRR = 16 + 491.5f$ ด้วย $R^2 = 0.999$

ภาควิชา : วิศวกรรมอุตสาหการลายมือชื่อนิสิต : *Kut Lerby*
 สาขาวิชา : วิศวกรรมอุตสาหการลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : *Dr.*
 ปีการศึกษา : 2551

4870211421 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORD : SPHERICAL GRINDING / GRINDING FORCE / SILICATE MATERIAL

KRITDIPUK GOYADOOLYA : DEVELOPMENT OF MONITORING EQUIPMENT AND STUDY ON EFFECTIVE FACTORS TO SPHERICAL GRINDING FORCE. THESIS PRINCIPAL ADVISOR : ASST. PROF. SOMCHAI PUAJINDANETR, Ph.D., 206 pp.

This research work aimed to (1) study effect of the rotational speed and the feed rate on spherical forming, and (2) develop the force monitoring device that influences the spherical grinding.

Analyzing phase, physical and mechanical properties of silicate material selected were characterized. The fatigue testing machine was applied by assembling with the additional devices, such as an inverter motor, a circular groove pad, and a force monitoring device. The force monitoring device consisted of a dynamometer, a charge amplifier, and an oscilloscope. The grinding force signals were monitored in every 10 ms of times. The work piece with a cubical dimension of 21.0 mm was ground by controlling the constant rotational speed and feed rate varied from 200 to 1,000 revolution/min, and 1 to 60 mm/min, respectively.

The study found that (1) the diameter of the ground specimen was significant independent upon the rotational speed (N) and the feed rate (f). (2) The ground specimens were found in different shapes being oval, sphere, distorted sphere, and cone. (3) Considering the spherical shape of round specimen, the rotational speed of 300 to 400 revolution/min with the feed rate of 1 to 20 mm/min could be applied. (4) The tangential force (F_t) and normal force (F_n) each related to rotational speed and feed rate as $F_t = 1.46N^{-0.43} f^{0.5}$ with $R^2 = 0.584$ and $F_n = 23.5N^{-0.92} f^{0.49}$ with $R^2 = 0.589$ respectively. (5) Using the rotational speed of 400 revolution/min and the feed rate of 1 mm/min provided the minimum tangential and normal grinding force of 0.092 and 0.078 N, respectively. (6) The force ratio of F_t/F_n (μ) was increased with increasing rotational speed, as $\mu = 0.08N^{0.44}$; $R^2 = 0.906$. (7) Using the rotational speed at 200 revolution/min could provide the minimum grinding friction coefficient (μ) of 0.732 N/N. and (8) The removal rate (MRR) was a linear correlated with the feed rate as $MRR = 16 + 491.5f$ with $R^2 = 0.999$.

Department : INDUSTRIAL ENGINEERING Student's Signature : Krit Goyadoolya
Field of Study : INDUSTRIAL ENGINEERING Principal Advisor's Signature : Somchai Pujindanetr
Academic Year : 2008

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่ท่านได้กรุณาให้ความช่วยเหลือ ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดระยะเวลาของการทำวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงการให้โอกาสเพื่อเรียนรู้และสร้างประสบการณ์พิเศษจากงานวิจัยอื่นๆ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกศึกษ และอาจารย์ ดร.สิริง ปรีชานนท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นเพิ่มเติม เพื่อให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ และทุนอุดหนุนการศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเครื่องทดสอบความล้าและอุปกรณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตขั้นสูงและวิศวกรรมเชิงตรง และผู้ช่วยวิจัย ที่ได้เอื้อเฟื้อชุดเครื่องมือในการวัดแรงและกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พร้อมทั้งให้คำแนะนำการใช้งานเพื่อให้เหมาะกับวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาท วิชา ความรู้ คำแนะนำ และการอบรม ขอขอบพระคุณ ครูไพโรจน์ อนันตเศรษฐกุล ครูชัยฤทธิ์ ขวัญกลับ ที่ให้ความช่วยเหลือ ความรู้ และทักษะทางช่าง ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ พี่อศราวิทย์ เชาวน์พานิช นิสิตปริญญาเอก ที่ได้ชักชวน ให้ข้อเสนอแนะและคำปรึกษา ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณ คุณกรรณิการ์ เดชรักษา สำหรับข้อมูล XRD คุณวิภรณ์ กรองทอง สำหรับข้อมูล SEM อีกทั้งพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ สำหรับมิตรภาพ น้ำใจ และกำลังใจ พร้อมทั้งความช่วยเหลือที่มีให้แก่กันและกัน

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อวินัย และคุณแม่จรรยา ผู้เห็นประโยชน์และความสำคัญของการศึกษา คุณน้ำสมพงษ์ มุทิตากุล คุณสิริวัฐ และ คุณพฤษนิภาดา โกยดุศลย์ คุณศรชล ไยริยะ คุณเสาวนีย์ สินธุบุญ และญาติพี่น้องทุกคน ที่คอยให้การสนับสนุน ความช่วยเหลือ และกำลังใจจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฐ

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การเจ็บระโน	5
2.2 ระบบการเฝ้าสังเกต	18
2.3 คุณสมบัติของทรงกลม	21
2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ	22
2.4.1 การทดสอบสมมติฐาน	22
2.4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน	27
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
2.5.1 การเจ็บขึ้นรูปทรงกลม	32
2.5.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเจ็บ	35

บทที่	หน้า
3 วิธีดำเนินการวิจัย	47
3.1 การเตรียมวัสดุและการศึกษาคุณลักษณะของวัสดุ	47
3.1.1 การเตรียมวัสดุ	47
3.1.2 การวิเคราะห์เฟส	48
3.1.3 การศึกษาคุณลักษณะเชิงกายภาพ	48
3.1.4 การศึกษาคุณลักษณะเชิงกล	50
3.2 การติดตั้งและปรับแต่งอุปกรณ์	54
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	56
3.2.2 การปรับแต่งเครื่องมือเพื่อใช้ในงานวิจัย	69
3.3 การทดลองเจียรขึ้นรูปทรงกลม	72
3.4 การประเมินผลผลการเจียรขึ้นรูปทรงกลม	74
3.4.1 การตรวจสอบรูปทรงชิ้นงานหลังการเจียร	74
3.4.2 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม	74
3.4.3 การประเมินผลแรงเจียร	75
3.4.4 การประเมินผลอัตราการกำจัดเนื้อวัสดุออก	79
3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	80
3.5.1 การศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่อ เส้นผ่านศูนย์กลาง	80
3.5.2 การศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่อ แรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และ อัตราส่วนแรง	81
3.5.3 การศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่อ อัตราการกำจัดเนื้อวัสดุออก	82
4 ผลการวิจัย	83
4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะของวัสดุ	83
4.1.1 การวิเคราะห์เฟส	83
4.1.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะเชิงกายภาพ	84
4.1.3 ผลการศึกษาคุณลักษณะเชิงกล	87
4.2 ผลการทดลอง	89

บทที่	หน้า
4.2.1 การเกิดรูปทรงของชิ้นงาน	89
4.2.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม	92
4.2.3 แรงในแนวเส้นสัมผัส	94
4.2.4 แรงกดปกติ	99
4.2.5 อัตราส่วนแรง	103
4.2.6 อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก	106
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	110
4.3.1 ผลของอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง	110
4.3.2 ผลของอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่มีผลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และ อัตราส่วนแรง	116
4.3.3 ผลของอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก	124
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่มีต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง	127
4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่มีต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก	132
5 อภิปรายผลการวิจัย	133
5.1 อภิปรายผลการวิจัย	134
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	137
5.3 ข้อจำกัดในงานวิจัย	137
6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	138
6.1 สรุปผลการวิจัย	138
6.2 ข้อเสนอแนะ	141
รายการอ้างอิง	142

บทที่	หน้า
ภาคผนวก	154
ภาคผนวก ก ภาพสัญญาณแรงเจียรที่ได้จากการทดลอง	145
ภาคผนวก ข การคำนวณค่าของแรงที่วัดได้ ให้อยู่ในรูปแบบค่ารากกำลังสองเฉลี่ย	182
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ห้สมการเส้นถดถอย	187
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	206



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	19
2.2	20
2.3	29
2.4	31
3.1	71
3.2	73
4.1	83
4.2	84
4.3	85
4.4	85
4.5	87
4.6	87
4.7	88
4.8	92
4.9	93
4.10	96
4.11	96
4.12	100
4.13	100
4.14	103
4.15	104
4.16	107
4.17	108
4.18	111
4.19	115
4.20	121
4.21	122
4.22	123

ตารางที่	หน้า
4.23 ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของอัตราการขาดเนื้อวัสดุออก	126



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ความลึกเกรนของการตัด	5
2.2 การเจียรทรงกระบอกแบบตรงศูนย์	7
2.3 การเจียรแบบไม่ตรงศูนย์	8
2.4 การเจียรตลับลูกปืนด้วยเครื่องเจียรแบบ Tool-post	8
2.5 การเจียรผิวแบบต่างๆ	10
2.6 เปรียบเทียบการเจียรแบบดั้งเดิมกับการเจียรแบบป้องกันความคืบ	10
2.7 ลักษณะของการเจียรแบบจาน	11
2.8 ลักษณะของ เครื่องเจียรแบบ Tool and cutter	12
2.9 ล้อและเม็ดจานขัด	13
2.10 สารขัดอนุทินสายพาน สารขัดอนุทินต่างๆ และ เครื่องเจียร	14
2.11 หัวเจียร เมื่อมีการหมุน และการสั่น ของการเจียรแบบhoning	15
2.12 การเคลื่อนที่ของชิ้นงานและหินขัด	16
2.13 ฟิล์มของสารหล่อลื่นช่วยให้งานมีความเรียบมากขึ้น	17
2.14 Lapping Machine	17
2.15 แบบจำลองการติดตั้งเครื่องมืออย่างง่าย	18
2.16 แบบจำลองการติดตั้งเครื่องมือโดยมีอุปกรณ์เพิ่มเติม	20
2.17 การเจียรทรงกลมด้วยถ้วยหินเจียร	32
2.18 การเจียรทรงกลมแบบไม่ตรงศูนย์	33
2.19 Magnetic fluid grinding	33
2.20 ลักษณะการเจียรด้วยแผ่นจานร่องรูปโค้ง	34
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความลึกเจียรกับเวลา	35
2.22 ตัวแปรที่เป็นผลจากการเจียร	36
2.23 ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นขณะเจียร	37
2.24 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการเจียร	39
2.25 ข้อมูลของตัวแปร ที่เกิดขึ้นระหว่างการเจียร	41
2.26 เครื่องซีเอ็นซี (Moore 450) ที่นำตัวรับรู้มาประยุกต์ติดตั้ง	42
2.27 การประยุกต์ติดตั้งตัวรับรู้บนโรเตอร์	43
2.28 แรงที่เกิดขึ้นในระหว่างการเจียร	43

รูปที่	หน้า
2.29 การติดตั้งตัวรับรู้และวิธีการทดลอง	44
2.30 สัญญาณเสียงAEที่ได้รับ เทียบกับแรงกดปกติที่เกิดขึ้น	45
2.31 การติดตั้งระบบวัดแรงที่ใช้ในการทดลอง	46
2.32 แผนภาพการเปลี่ยนและส่งผ่านข้อมูลสัญญาณ	46
3.1 ลักษณะวัสดุเริ่มต้นในงานวิจัย	47
3.2 หลอดพิดโนมิเตอร์พร้อมฝาปิด	49
3.3 การทดสอบความทนแรงอัด	51
3.4 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง เมื่อเริ่มต้น	52
3.5 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง เมื่อก่อนแตกหัก	53
3.6 ภาพเขียนแบบกรรมวิธีการเจียรขึ้นรูปทรงกลมและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	54
3.7 โครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง	55
3.8 ภาพรวมการทำงานของเครื่องทดสอบความล้า	57
3.9 เครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่องทดสอบความล้า	57
3.10 อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบความล้า	57
3.11 มอเตอร์	58
3.12 เครื่องทดสอบความล้า	58
3.13 หน้าแปลนส่วนล่างของเครื่องทดสอบความล้า	59
3.14 ภาพรวมการทำงานของมอเตอร์ผกผัน	59
3.15 มอเตอร์	60
3.16 ชุดตัวรับไฟฟ้าผกผัน และ ตัวปรับรอบ	60
3.17 หน้าแปลนส่วนบนของเครื่องทดสอบความล้า	60
3.18 หน้าแปลนส่วนบนของเครื่องทดสอบความล้า เมื่อใช้ในการจับยึดมอเตอร์	61
3.19 งานขัดกระดาษทรายต่อเข้ากับแกนของมอเตอร์	61
3.20 กระดาษทรายที่นำมาใช้ติดกับงานหมุน	62
3.21 การทำงานของชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า	62
3.22 ไดนาโมมิเตอร์	63
3.23 หน้าแปลนส่วนล่างของเครื่องทดสอบความล้า เมื่อใช้ในการจับยึดไดนาโมมิเตอร์	63
3.24 เครื่องขยายสัญญาณประจุ	64

รูปที่	หน้า
3.25	64
3.26	64
3.27	65
3.28	67
3.29	68
3.30	70
3.31	70
3.32	71
3.33	74
3.34	76
4.1	84
4.2	86
4.3	86
4.4	89
4.5	90
4.6	93
4.7	95
4.8	95
4.9	97
4.10	97
4.11	99

รูปที่	หน้า
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดปกติ กับความเร็วรอบงานขัด ที่อัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ	101
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดปกติ กับอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่ความเร็วรอบงานขัดต่างๆ	101
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรง กับความเร็วรอบงานขัด ที่อัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ	104
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรง กับอัตราการป้อนชิ้นงาน ความเร็วรอบงานขัดต่างๆ	105
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนชิ้นงานกับเวลาที่ใช้ในการเจียร	106
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก กับความเร็วรอบงานขัด ที่อัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ	109
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก กับอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่ความเร็วรอบงานขัด	109
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรง กับความเร็วรอบงานขัด	120
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก กับอัตราการป้อนชิ้นงาน	125
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัสที่คำนวณจาก $F_t = 1.46N^{-0.43} f^{0.5}$ กับความเร็วรอบงานขัด ที่อัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ	129
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัสที่คำนวณจาก $F_t = 1.46N^{-0.43} f^{0.5}$ กับอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่ความเร็วรอบงานขัดต่างๆ	129
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดปกติที่คำนวณจาก $F_n = 23.5N^{-0.92} f^{0.49}$ กับความเร็วรอบงานขัด ที่อัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ	130
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดปกติที่คำนวณจาก $F_n = 23.5N^{-0.92} f^{0.49}$ กับอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่ความเร็วรอบงานขัดต่างๆ	130
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงที่คำนวณจาก $\mu = 0.08N^{0.44}$ กับความเร็วรอบงานขัด	131
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออกที่คำนวณจาก $MRR = 16 + 491.5f$ กับอัตราการป้อนชิ้นงาน	132
5.1 หน้าตัดของรูปทรงชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเพิ่มความเร็วรอบงานขัด	133

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

การเจียรระไน (Grinding) หรือ การเจียร เป็นวิธีการตกแต่งผิวโดยการขูดเนื้อออก (Abrade) หรือ ทำให้สึกออกไป (Wear) โดยเกิดจากแรงเสียดทาน (Friction) อันเนื่องมาจากการหมุนของล้อจานขัด (Abrasive wheel) กระทำต่อชิ้นงาน ซึ่งโดยทั่วไปนั้นจะเป็นการเจียรเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก (Cylindrical shape) หรือ ทรงกรวย (Cone) และยังรวมไปถึงการเจียรเพื่อขัดผิวชิ้นงาน (Surface grinding) ให้มีขนาดหรือรูปทรงตามที่ต้องการได้อีกด้วย

สำหรับการผลิต (Manufacturing) เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่เป็นทรงกลมนั้น ไม่ค่อยจะได้รับการกล่าวถึงมากนักในการเจียรขึ้นรูป เพราะนับว่าเป็นการเจียรที่ต้องการความเที่ยง (Precision) และความแม่นยำ (Accuracy) สูง อีกทั้งยังต้องอาศัยทักษะและความชำนาญ (Skill) ของผู้ปฏิบัติด้วย และยังต้องการเทคโนโลยีที่มีความเฉพาะของตัวเอง ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีราคาแพง และต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ ทำให้เกิดต้นทุนที่มีราคาสูงอีกด้วย

การเจียรขึ้นรูปทรงกลม สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การใช้ทักษะของผู้ปฏิบัติ และการใช้ล้อจานขัดที่มีลักษณะเป็นส่วนเว้า (Concave) สำหรับการเจียรที่ต้องใช้ทักษะของผู้ปฏิบัติเองนั้น ต้องใช้เวลาและความสามารถเป็นอย่างมากในการเจียรหรือขัดแต่งให้ได้ตามขนาด (Dimension) รูปทรง (Shape) และความกลม (Sphericity) ตามที่ต้องการ ทั้งนี้ทำให้ต้องสูญเสียเวลาและวัสดุไปโดยเปล่าประโยชน์ หากว่าได้ชิ้นงานขนาดที่ผิดพลาดจากแบบที่ต้องการ ซึ่งบางครั้งอาจจะต้องเสียเวลาไปทั้งวันและไม่ได้ชิ้นงานอีกด้วย และในอีกกรณีคือ การใช้ล้อจานขัดซึ่งมีลักษณะเป็นส่วนเว้า จำเป็นต้องใช้ล้อจานขัดที่มีขนาด และ รัศมีของส่วนเว้า ที่มีลักษณะเฉพาะตัวในแต่ละแบบของชิ้นงาน ซึ่งเมื่อมีการใช้งานไป ก็ทำให้เกิดการสึกของล้อจานขัด ก็มีโอกาสทำให้ขนาด และรูปทรง ของล้อจานขัดเปลี่ยนไป จึงต้องมีการเปลี่ยนล้อจานขัด ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีกด้วย

ในงานวิจัยนี้เป็นการเจียรขึ้นรูปทรงกลม โดยการดัดแปลงเครื่องมืออย่างง่าย (Simplification) เพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่ายและมีต้นทุนที่ต่ำ โดยใช้ฐานรองที่มีลักษณะเป็นร่อง (Groove) และใช้จานขัดที่ติดด้วยกระดาษทราย ซึ่งมีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป ประกอบเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าในการให้กำลังไฟฟ้า

การเจียรขึ้นรูปเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดและความกลมให้ได้ตามต้องการนั้น จะช่วยลดตำหนิที่เกิดขึ้นกับและขจัดต้นทุนที่ไม่จำเป็นทั้งในด้านเวลาและวัสดุ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมปัจจัยต่างๆ เช่น ความเร็วรอบของล้อจานขัด (Wheel speed) ขนาดของวัสดุขัดถู (Abrasive grit size) แรงที่เกิดจากการกด (Normal force) และ กำลังของมอเตอร์ (Power) เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถควบคุมปัจจัยเหล่านี้ให้ได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการเฝ้าสังเกต (Monitoring) และศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องต่อการเจียรขึ้นรูปทรงกลม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. เพื่อศึกษาความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานที่มีผลต่อกระบวนการเจียรขึ้นรูปทรงกลม
2. เพื่อพัฒนาอุปกรณ์แสดงผลของแรงที่มีผลต่อกระบวนการเจียรขึ้นรูปทรงกลม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สามารถพิจารณาขอบเขตได้ใน 2 ประเด็น คือ

1. ขอบเขตด้านวัสดุและอุปกรณ์
2. ขอบเขตด้านการศึกษา

1. ขอบเขตด้านวัสดุและอุปกรณ์

- 1.1 ศึกษาเครื่องมือทดสอบความล้า (Fatigue testing machine) และประยุกต์ใช้ให้เหมาะกับงานวิจัยนี้
- 1.2 ศึกษาชุดอุปกรณ์สำหรับหมุนจานขัด ได้แก่ มอเตอร์ ตัวปรับไฟฟ้าผกผัน และตัวรับรอบ
- 1.3 ศึกษาชุดอุปกรณ์สำหรับการวัดแรง ได้แก่ ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) เครื่องขยายสัญญาณประจุ (Charge Amplifier) และเครื่องแสดงผลและบันทึกข้อมูลหรือออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ที่ใช้ในงานวิจัย

2. ขอบเขตด้านการศึกษา

- 2.1 ศึกษาขอบเขตที่สามารถขึ้นรูปทรงกลมโดยใช้วัสดุซิลิเกต โดยการเปลี่ยนแปลงปัจจัย ทั้งความเร็วรอบของจานขัด (Rotational speed) และอัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed rate)
- 2.2 ศึกษาและเฝ้าสังเกตผลของแรงที่ตรวจวัดได้จากไดนาโมมิเตอร์ เพื่อนำไปคำนวณ เป็นแรงในแนวเส้นสัมผัส (Tangential Force) และแรงกดปกติ (Normal Force)
- 2.3 ศึกษาและเฝ้าสังเกตค่าแรงเฉื่อย โดยเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบจานขัด และอัตราการป้อนชิ้นงาน
- 2.4 ศึกษาผลตอบสนอง (Responses) ที่เกิดขึ้น เช่น รูปทรงของชิ้นงานหลังการเจียร (Shape) เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม (Diameter) และ อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก (Material removal rate; MRR)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากงานวิจัย จะได้รับประโยชน์ คือ

1. สามารถทราบถึงขอบเขตของความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่สามารถเจียรขึ้นรูปทรงกลมได้
2. สามารถพัฒนาอุปกรณ์แสดงผลของแรงที่มีผลต่อการเจียรขึ้นรูปทรงกลมได้
3. สามารถบอกถึงกลไกของปัจจัยที่เกิดขึ้นระหว่างการเจียรขึ้นรูปทรงกลมได้
4. สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการเจียรขึ้นรูปทรงกลมได้

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

สามารถลำดับการดำเนินการศึกษาได้ดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจียร ตัวรับรู้ การเปลี่ยน-การรับ และการส่งผ่านข้อมูล และความสัมพันธ์ของข้อมูล เป็นต้น
2. ศึกษาความสามารถเครื่องทดสอบความล้า และทดลองใช้ในรายละเอียดต่างๆ เช่น ลักษณะการขับเคลื่อนของเพลาและไฮโดรลิก และโปรแกรมการทำงานของเครื่องทดสอบความล้า เป็นต้น

3. ติดตั้งอุปกรณ์เสริมกับเครื่องทดสอบความล้า โดยติดตั้งมอเตอร์ผกผัน (Inverter motor) และชุดให้กำลังพร้อมด้วยจานขัดไว้กับแท่นจับยึดด้านบน และแผ่นรองรูปโค้งไว้กับแท่นจับยึดด้านล่าง
4. ติดตั้งตัวรับรู้หรืออุปกรณ์ตรวจจับไปในตำแหน่งต่างๆ เพื่อให้สามารถตรวจวัดปัจจัยที่ต้องการได้
5. ติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยในการส่งผ่าน แสดงผล และการเก็บบันทึกข้อมูล
6. ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ความหนาแน่นมวลวัสดุ (Material mass density) ความพรุนตัว (Porosity) ความทนแรงอัด (Compressive strength) ความทนแรงดัดโค้ง (Bending strength) และ ความเครียดการดัดโค้ง (Bending strain) เป็นต้น
7. ทำการทดลอง โดยการศึกษปัจจัยต่างๆ ไปตามที่ได้ออกแบบไว้
8. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ และสรุปผลที่ได้จากการทดลอง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

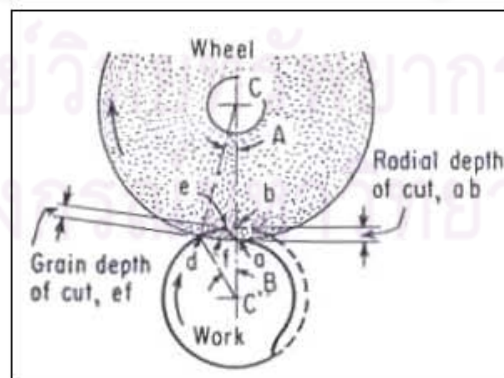
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับการเจียรระไน ระบบการเฟืองสังเกด คุณสมบัติของทรงกลม และการวิเคราะห์ทางสถิติ ได้แก่ การทดสอบสมมติฐานและการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจียรขึ้นรูปทรงกลมและปัจจัยที่มีผลต่อการเจียร

2.1 การเจียรระไน (Grinding)

การเจียร เป็นกระบวนการกำจัดเนื้อวัสดุชิ้นเล็กๆ ออกจากชิ้นงาน ด้วยการขูดเนื้อออกหรือทำให้เนื้อสึกออกไป ด้วยแรงกดที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาควัสดุของล้อหินขัดและชิ้นงาน

ในขณะที่อนุภาคของวัสดุขัดถูได้เริ่มเข้าสัมผัสกับผิวชิ้นงาน ความลึกของการตัด (Depth of cut) จะเท่ากับศูนย์ เมื่อล้อหินขัดและชิ้นงานเริ่มหมุน ความลึกของการตัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงค่าที่มากที่สุดบนส่วนโค้งของการสัมผัสระหว่างล้อหินขัดกับชิ้นงาน ปกติแล้วล้อหินขัดจะหมุนเร็วกว่าชิ้นงาน ณ จุดที่ความลึกตัดมากที่สุด โดยทั่วไปแล้วจะเป็นจุดที่ล้อหินขัดห่างจากชิ้นงาน โดยจะเรียกจุดที่มีความลึกตัดมากที่สุดว่า ความลึกอนุภาคของการตัด (Grain depth of cut) (Dallas, D. B. , 1976)



รูปที่ 2.1 ความลึกเกรนของการตัด (Grain depth of cut)

จากรูปที่ 2.1 จุด C และ C' เป็นจุดกึ่งกลางของล้อหินขัดและชิ้นงาน ตามลำดับ (เครื่องเจียรแบบศูนย์กลาง – center type) ab เป็น รัศมีความลึกของการตัด ad เป็น ส่วนโค้งการสัมผัสระหว่างล้อหินขัดและชิ้นงาน และ ef คือ ความลึกอนุภาคของการตัด

สมมติให้อนุภาควัสดุหินขัดมีเพียงแค่อนุภาคเดียวที่จุด a ในรูปที่ 2.1 เมื่อล้อหินขัดหมุนอนุภาคนี้จะเคลื่อนที่ไปที่จุด d ภายในหนึ่งหน่วยเวลา และ ณ เวลาเดียวกัน จุด d บนชิ้นงานก็เคลื่อนที่ไปที่จุด e เมื่อชิ้นงานหมุนช้ากว่าหินขัดมาก ความยาว de จะสั้นกว่า ad โดยอนุภาคนี้จะขจัดเนื้อ (chip) ade ออกมา ในเวลานั้น

เมื่อเพิ่มระยะ ef ไปถึงระยะที่มากที่สุด เนื้อวัสดุ ade จะโดนขจัดออกมา โดยเรียกระยะ ef นี้ว่า ความลึกอนุภาคการตัด สำหรับการควบคุมความลึกอนุภาคการตัดนี้ สามารถทำได้โดยใช้หินขัดที่อ่อนลงหรือแข็งขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคือ เพิ่มหรือลดความลึกอนุภาคการตัด นอกจากนี้ ระยะ ef เปลี่ยนแปลงไปตาม การเพิ่มหรือการลดความเร็วของการหมุนชิ้นงาน หรือรัศมีความลึกการตัด

Dallas, D. B., 1976 ได้ระบุข้อดีของการเจียร ดังนี้

1. ใช้ตัดแต่งวัสดุที่มีความแข็งหรือกเวลล์ (Rockwell hardness) มากกว่า C50
2. ปริมาณวัสดุที่ถูกขจัดออก (Material removal) มีความหลากหลาย
3. โดยปกติแล้วชิ้นงานมีความหยาบผิว (Roughness) อยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 2200 ไมครอน (μm) ทั้งนี้เนื่องมาจากหินขัดเล็กๆ จำนวนมากที่ติดอยู่กับล้อหินขัด
4. มีความแม่นยำ (Accuracy) ในการทำชิ้นงานให้ได้ขนาดที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว มีขนาดเผื่อ (Tolerance) ± 0.005 mm.
5. ความดันในการเจียร (Grinding pressure) มีค่าน้อย

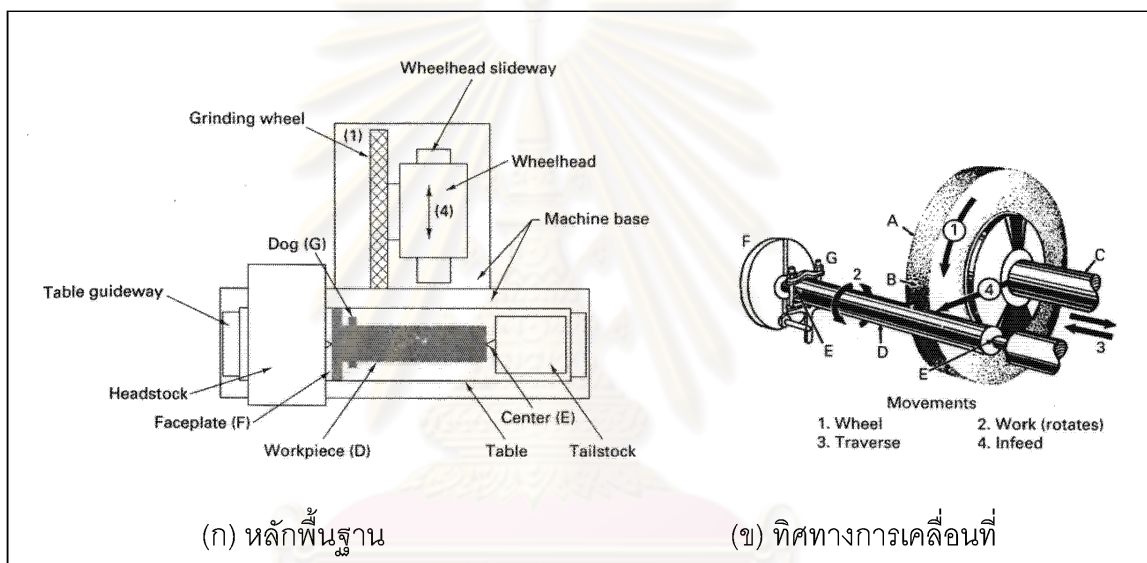
Degarmo, et al., 2003 ได้แบ่งประเภทของการเจียร ที่มีความแตกต่างกันตามประเภทการใช้งานของเครื่องจักร ซึ่งสามารถจำแนกได้ 12 ประเภท ดังนี้

1. การเจียรทรงกระบอก (Cylindrical grinding)

การเจียรทรงกระบอกมัก จะเป็นการเจียรที่ผิวนอกของชิ้นงาน (External cylindrical grinding) โดยรูปที่ 2.2 (ก) แสดงหลักพื้นฐานการทำงาน ชิ้นงานจะถูกยึดจัดศูนย์ (Center) กับส่วนหัว (Headstock) และท้าย (Tailstock) สำหรับล้อหินขัดจะขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ที่ยึดติดอยู่

กับหัวล้อ การป้อนชิ้นงานสามารถป้อนได้ละเอียดถึง 0.001 นิ้วหรือ 25.4 ไมโครเมตร เครื่องมือประเภทนี้บางเครื่อง จะมีหัวแต่งคมซึ่งเป็นเพชรจะทำการแต่งคมอัตโนมัติ รูปที่ 2.2 (ข) แสดงการเคลื่อนที่ในระหว่างการทำงาน โดยล้อหินขัดหมุนไปในทิศทางที่ 1 ชิ้นงานหมุนไปตามทิศทางที่ 2 ล้อหินขัดเคลื่อนที่ตามแนวทิศทางที่ 3 ล้อหินขัดเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานในทิศทางที่ 4

การเจียรแบบนี้ล้อหินขัดจะหมุนด้วยความเร็วสูง และชิ้นงานจะหมุนด้วยความเร็วต่ำ โดยจะมีทิศทางที่ตรงข้ามกัน การเจียรในลักษณะนี้จำเป็นที่จะต้องใช้ผู้ที่มีทักษะสูงในการจับยึดชิ้นงานให้ได้ศูนย์กลาง และต้องทำการเผื่อปริมาณเนื้องานทั้งในส่วนหัวและท้าย



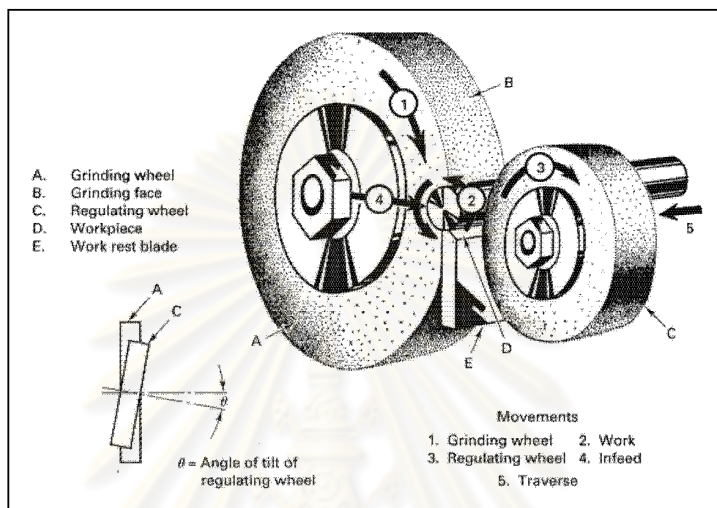
รูปที่ 2.2 การเจียรทรงกระบอกแบบตรงศูนย์

2. การเจียรแบบไม่ตรงศูนย์ (Centerless grinding)

การเจียรแบบไม่ตรงศูนย์ สามารถกระทำเจียรได้สองรูปแบบคือ เจียรผิวภายนอกและภายใน (External and internal cylindrical surfaces) โดยไม่ต้องจับยึดชิ้นงานเข้าศูนย์ ทำให้ลดเรื่องการตอกนำศูนย์และการจับยึดชิ้นงาน ซึ่งทำให้ลดรอบเวลาการทำงานได้ (Cycle time) ได้ แสดงความสัมพันธ์ของชิ้นงานและล้อหินขัดไว้ในรูปที่ 2.3 มีล้อหินขัด 2 ล้อ ล้อหินขัด (A) จะมีหน้าหินขัด (B) สำหรับเจียร โดยหมุนในทิศทางที่ 1 ส่วนล้อควบคุม (C) หมุนในทิศทางที่ (3) จะคอยจัดระเบียบชิ้นงาน (D) ซึ่งหมุนในทิศทางที่ 2 โดยล้อควบคุมได้วางตัวทำมุม (θ) กับล้อหินขัด

การเจียรแบบนี้มีข้อดี คือ ใช้เวลาในการติดตั้งน้อย ไม่จำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีทักษะสูง สามารถออกแบบให้เป็นระบบอัตโนมัติได้ (Automatic) ชิ้นงานไม่เกิดการบิดเบี้ยว (Distortion)

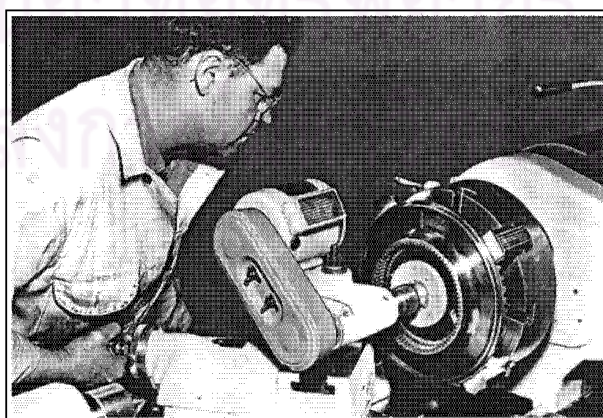
ทำให้ควบคุมขนาดได้ง่าย และ การใช้ล้อหินขัดใหญ่ทำให้ลดการสึกของล้อหินขัดได้ แต่การเจียรแบบนี้ก็มีข้อเสีย คือ ต้องใช้เครื่องจักรที่มีความพิเศษเฉพาะตัว ชิ้นงานต้องมีลักษณะกลม มีข้อจำกัดเรื่องชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1 ขนาด และในกรณีของการเจียรทอไม่สามารถรับประกันได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในจะรวมศูนย์กลางกัน (Concentric)



รูปที่ 2.3 การเจียรแบบไม่ตรงศูนย์กลาง

3. Tool-post grinding

วิธีนี้ส่วนมากจะใช้ในการกลึง แต่บางครั้งก็นำมาใช้ในการเจียรทรงกระบอกด้วยเช่นกัน โดยมอเตอร์ที่ใช้ก็น่าจะเป็นได้ทั้ง มอเตอร์ไฟฟ้าความเร็วสูง (High-speed motor) หรือมอเตอร์ลม (Air motor) โดยล้อหินขัดจะต่อตรงกับแกนเพลามอเตอร์ โดยเครื่องมือมีลักษณะดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเจียรตลับลูกปืนด้วยเครื่องเจียรแบบ Tool-post

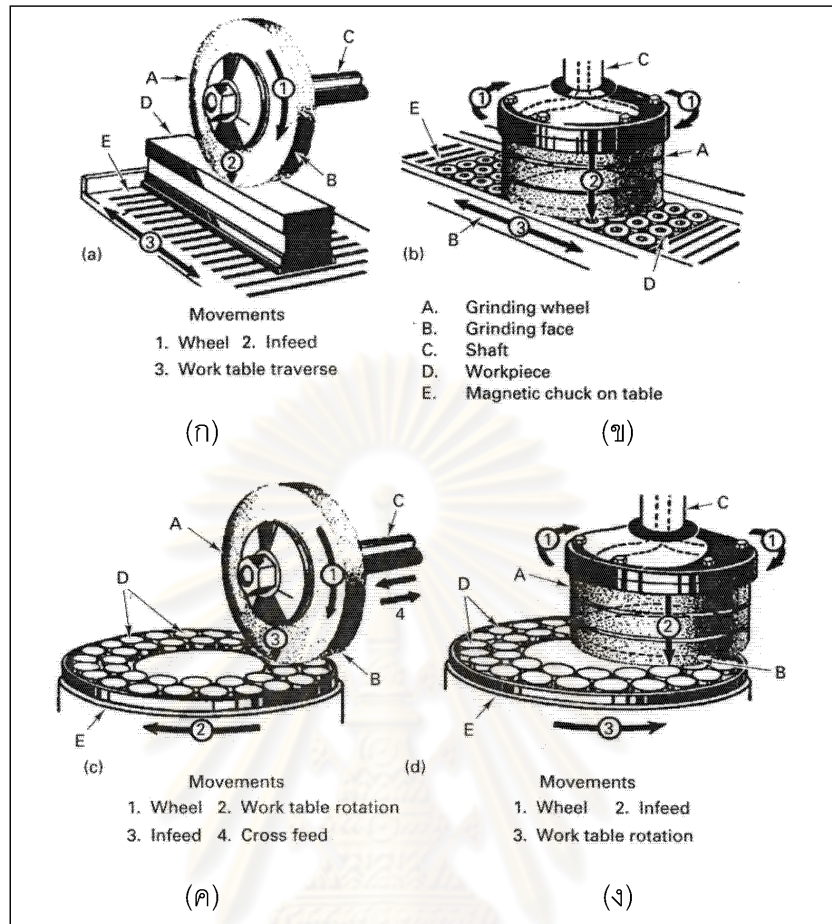
4. Surface grinding

การเจียรแบบนี้ใช้ในการขัดผิวเรียบ (Flat surfaces) แต่ก็สามารถขึ้นรูปได้โดยการ ออกแบบ ล้อหินขัดให้เหมาะกับงาน โดยทั่วไปสามารถแบ่ง เครื่องจักรในการเจียรผิวเรียบออกได้ ตามการเคลื่อนที่ของชิ้นงานและล้อหินขัด เป็น 4 ลักษณะด้วยกัน ดังรูปที่ 2.5 คือ

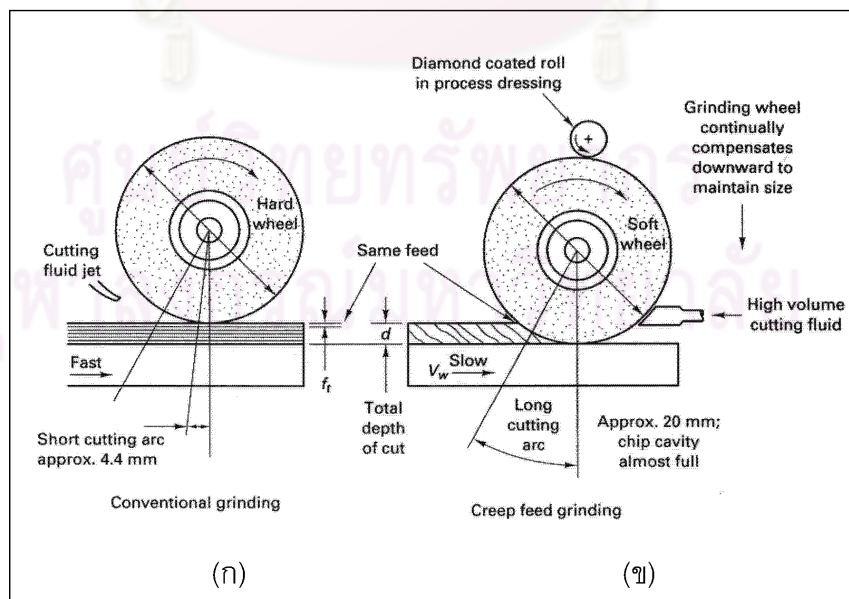
- (ก) การเจียรผิวแบบแนวระนาบ และมีโต๊ะเคลื่อนที่แบบไปกลับ ดังรูปที่ 2.5 (ก) หินขัด (A) หมุนในทิศทาง 1 และเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน (D) ในทิศทาง 2 ชิ้นงานที่ถูกจับยึด อยู่บนโต๊ะ (E) งานจะเคลื่อนที่ไปมาในทิศทาง 3
- (ข) การเจียรผิวแบบแนวตั้งด้วยโต๊ะเคลื่อนที่แบบไปกลับ ดังรูปที่ 2.5 (ข) หินขัด (A) จับ ยึดด้วยเพลา (C) หมุนในทิศทาง 1 และเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน(D) ในทิศทาง 2 โดย ผิวขัด (B) ขัดอยู่กับชิ้นงานที่ถูกจับยึดอยู่บนโต๊ะ (E) งานจะเคลื่อนที่ไปมาในทิศทาง 3
- (ค) การเจียรผิวแบบแนวระนาบ กับโต๊ะหมุน ดังรูปที่ 2.5 (ค) หินขัด (A) หมุนในทิศทาง 1 เคลื่อนที่ในทิศทาง 3 เพื่อเข้าหาผิวชิ้นงาน (D) ซึ่งหมุนในทิศทาง 2 โดยล้อหินขัด เคลื่อนที่เข้าออกด้วยทิศทาง 4
- (ง) การเจียรผิวแบบแนวตั้ง กับโต๊ะหมุน ดังรูปที่ 2.5 (ง) หินขัด (A) หมุนในทิศทาง 1 เคลื่อนที่ผิวเจียร (B) ตามทิศทาง 2 เพื่อเข้าสู่ผิวชิ้นงาน (D) ซึ่งหมุนในทิศทาง 3

5. Creep feed grinding

ส่วนมากจะเป็นการเจียรผิวชิ้นงาน มีความแตกต่างกับการเจียรแบบดั้งเดิม ดังรูปที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบการเจียรแบบดั้งเดิมกับการเจียรแบบป้อนความคืบ ซึ่งสามารถเพิ่มความลึกการ ตัดได้ถึง 1,000 ถึง 10,000 เท่า โดยที่ชิ้นงานเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V_w ที่ช้า มีการใช้ของไหลช่วย ตัดในปริมาณมาก เพิ่มส่วนโค้งสัมผัสผิวดังระหว่างชิ้นงานกับล้อหินขัด นอกจากนี้ยังมีล้อเพชรแต่งผิว ล้อหินขัด การเจียรแบบนี้จะช่วยให้โปรไฟล์ (Profile) ของล้อหินขัดใช้ได้ยาวนานขึ้น มีอัตราการกัดเนื้อ เพิ่มขึ้น สามารถเจียรชิ้นงานให้ได้ความแม่นยำ ลดแรงเจียร และลดผลกระทบของอุณหภูมิต่อ ชิ้นงาน



รูปที่ 2.5 การเจียรผิวแบบต่างๆ



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบ (ก) การเจียรแบบดั้งเดิมกับ (ข) การเจียรแบบป้อนความคืบ

6. Disk grinding

การเจียรแบบนี้เป็นการเจียรโดยใช้จานขัดที่มีลักษณะเป็นจาน โดยจะมี 2 แบบ คือ แบบ ด้านเดียว และแบบสองด้าน สำหรับการเจียรแบบด้านเดียวนี้ ดังรูปที่ 2.7 (ก) และ (ข) จะต้องทำการถือและใช้งานด้วยมือโดยวางชิ้นงานบนโต๊ะ จะได้งานที่มีความเที่ยงไม่มาก แต่ค่าเครื่องมือถูก สำหรับการเจียรแบบสองด้าน ดังรูปที่ 2.7 (ค) จะเป็นการนำชิ้นงานผ่านไประหว่างจานเจียรสองจานพร้อมกัน ปกติแล้วจะเป็นการทำงานโดยอัตโนมัติ ซึ่งจะได้งานที่มีความเที่ยงสูงและมีค่าใช้จ่ายที่ประหยัด



รูปที่ 2.7 ลักษณะของการเจียรแบบจาน

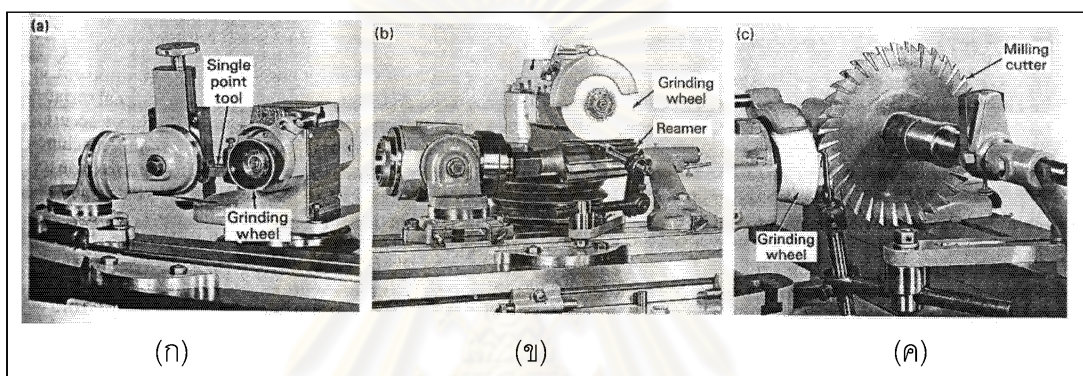
7. Tool and cutter grinding

การเจียรแบบอย่างง่าย คือ Single-point tools เป็นการเจียรโดยใช้มือบังคับกับเครื่องเจียรแบบมีฐาน ดังรูปที่ 2.8 (ก) สำหรับในกรณีที่ซับซ้อนขึ้น เช่น milling cutters รูปที่ 2.8 (ข) reamers รูปที่ 2.8 (ค) และ hobs ส่วน single-point tools นั้นสำหรับการผลิตระดับอุตสาหกรรมนั้น จะมีการออกแบบเครื่องมือให้สมบูรณ์ขึ้น โดยเรียกว่า Universal tool and cutter grinders ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับ Universal cylindrical center-type grinders แต่มีความแตกต่างใน 4 ประเด็น คือ

1. ส่วนของ headstock ไม่มีมือเดอรัติดตั้ง
2. ส่วนของ headstock สามารถหมุนได้ทั้งในแนวแกนนอนและแกนตั้ง

3. ส่วนของ wheelhead สามารถยกขึ้นและลดระดับลง และสามารถหมุนในแนว แกนตั้งได้ 360 องศา
4. ส่วนต่างๆ ของเครื่อง ต้องปรับด้วยมือ

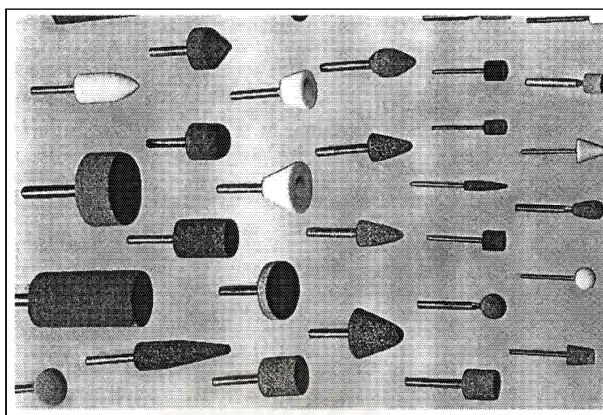
เครื่องเจียรชนิดนี้มีลักษณะที่ยืดหยุ่นสูง (Flexibility) ในส่วนของเครื่องมือ (Tool) และลัทธิหินขัด สามารถปรับได้หลากหลาย ซึ่งการติดตั้งนั้นต้องให้พนักงานที่มีทักษะสูงในการปรับแต่ง แต่เมื่อติดตั้งแล้ว ก็จะใช้งานได้โดยง่าย



รูปที่ 2.8 ลักษณะของ เครื่องเจียรแบบ Tool and cutter (ก) Single-point tool (ข) Reamer และ (ค) Milling cutter

8. Mounted wheels and points grinding

การเจียรแบบนี้จะใช้ลัทธิหินขัดขนาดเล็ก หรือเป็นจุด ซึ่งมีรูปร่างหลากหลาย ดังรูปที่ 2.9 โดยไปจับยึดกับเครื่องเจียรขนาดเล็ก มีมอเตอร์ความเร็วสูงอาจจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าหรือลม สามารถทำงานด้วยความเร็วได้ถึง 100,000 รอบต่อนาที ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของลัทธิหินขัด โดยทั่วไปจะเป็นการใช้ลบคมหรือแต่งผิว (Deburring) และขัดผิวเรียบ (Finishing)



รูปที่ 2.9 ล้อและเม็ดหินขัด

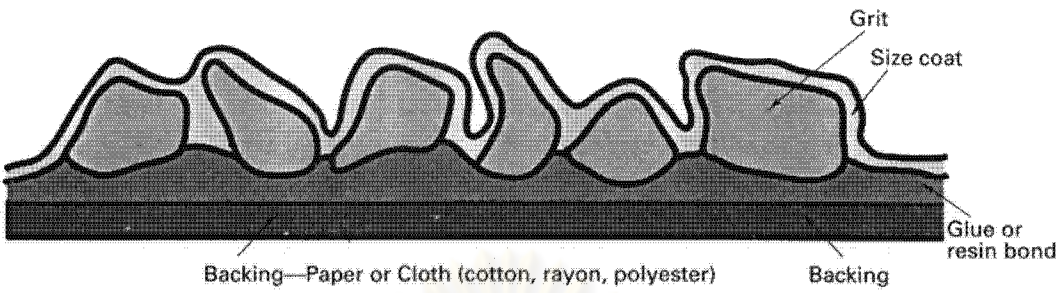
9. Coated abrasive grinding

สารขัดถูชนิดฉาบ ใช้งานมากในการขัดผิวเรียบทั้งผลิตภัณฑ์พวกโลหะและอโลหะ สารขัดถูชนิดฉาบผลิตโดยติดอนุภาคของสารขัดถูลงบนพื้นผิวเรียบและยึดหยุ่น ดังรูปที่ 2.10 (ก) เช่น ผ้า กระดาษ ไฟเบอร์ หรือ พลาสติก เป็นต้น ตัวอย่างสารขัดถูสังเคราะห์ (Synthetic abrasives) เช่น อะลูมินา (Aluminum Oxide) SiC (Silicon Carbide) Al (Aluminum) Zirconia CBN และเพชร เป็นต้น ส่วนสารขัดถูธรรมชาติ ได้แก่ ทราาย หินเหล็กไฟ (flint) โกเมน (garnet) และ emery สำหรับสารที่ใช้ยึดติดอนุภาคสารขัดถูกับแผ่นหลังจะเป็นสารประกอบ (compound) ที่ช่วยทำให้มีความยืดหยุ่นด้วย

สารขัดถูชนิดฉาบมีหลายประเภทด้วยกัน ดังรูปที่ 2.10 (ข) เช่น แบบแผ่น (Sheet) ม้วน (Roll) สายพาน (Endless belt) ดังรูปที่ 2.10 (ค) และจาน (Disc)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Belt composition



Grit size—Grade

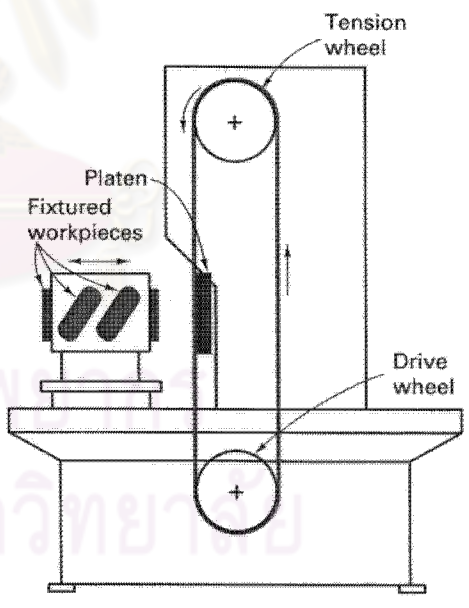

vs	Approx.	Finish (rms)	Name	Make coat	Size coat	Backing
24	300	μ in.	Glue bond	Glue	Glue	Non WP
36	250	"	Modified glue	Mod. glue	Mod. glue	"
50	140	"	Resin over glue	Glue	Resin	"
80	125	"	Resin over resin	Resin	Resin	"
120	60-80	"	Waterproof	Resin	Resin	WP
150	40-60	"				

Bonds

WP = waterproof

(ก)

Platen grinder

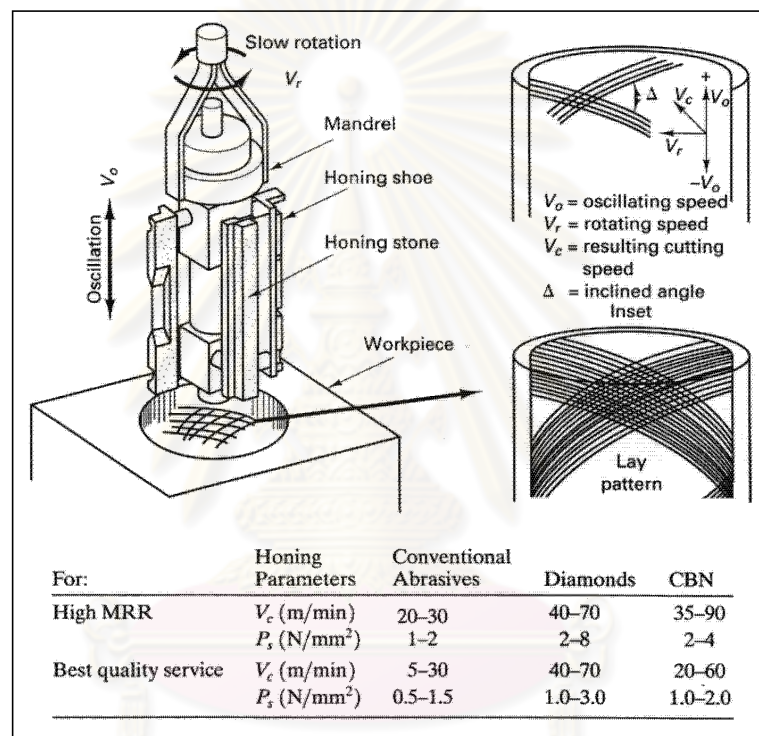
(ข)

(ค)

รูปที่ 2.10 (ก) ส่วนผสมของสารขัดถู (ข) ตัวอย่างสารขัดถูแบบต่างๆ และ (ค) ตัวอย่างเครื่องเจียร

10. Honing

กระบวนการที่ใช้หินขัดแบบละเอียด มีการกินเนื้อน้อย โดยมีความเร็วรอบต่ำกว่าการเจียรทั่วไป ใช้ในการขัดเรียบรูเจาะ แก๊ซผิดพลาดที่เกิดจากการเจาะ หรือการลบรอยที่เกิดจากการเจียร ส่วนมากแล้วจะเป็นการขัดผิวภายในทรงกระบอก จะเกิดลายภายใน (Lay pattern) และได้แสดงตัวอย่างค่าจำเพาะสำหรับการเจียร ไว้ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 หัวเจียร เมื่อมีการหมุน (Rotary) และการสั่น (Oscillation) ของการเจียรแบบ honing

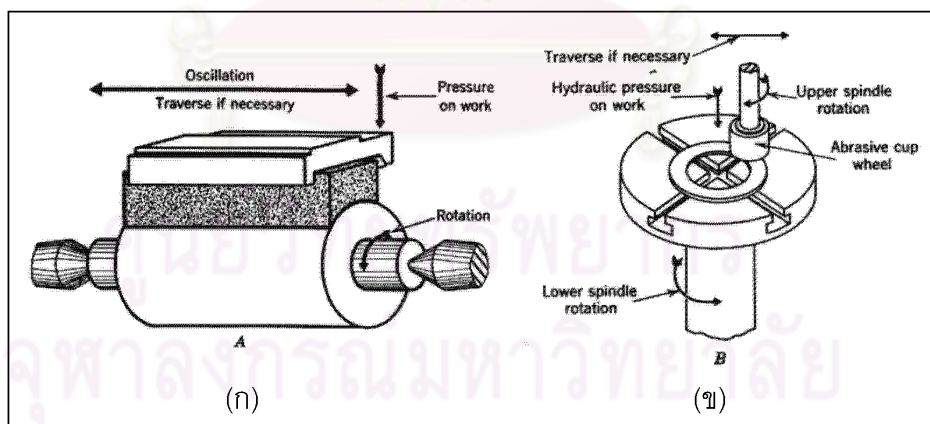
จากรูปที่ 2.11 หัวเจียรมีหินเจียรที่แรงกด P_s กระทำบนผิวชิ้นงาน หมุนด้วยความเร็ว V_r และเคลื่อนที่ขึ้นลงด้วยความเร็ว V_o ทำให้เกิดความเร็วลัพธ์ V_c เกิดลายภายในที่มีมุมเอียง Δ บนผิวชิ้นงาน โดยหากต้องการอัตราการขจัดเนื้อวัสดุสูง สำหรับวัสดุขัดสีชนิดดั้งเดิม หัวเจียรเพชร และหัวเจียร CBN ต้องใช้ความเร็วลัพธ์ V_c 20 – 30 40 – 70 และ 35 – 90 เมตรต่อนาที และแรงกด P_s 1 – 2 2 – 8 และ 2 – 4 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ

11. Superfinishing

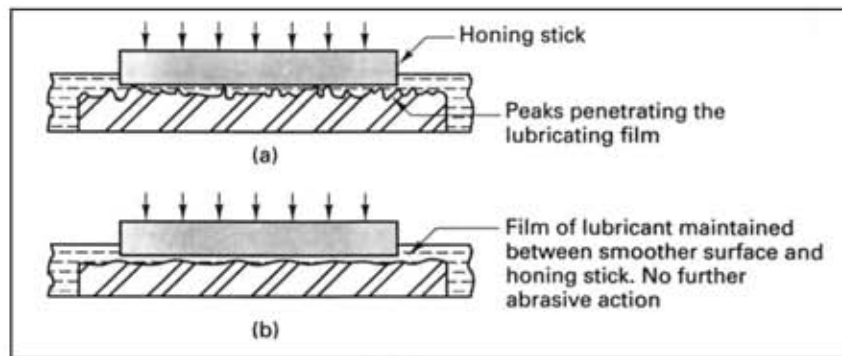
การเจียรแบบ superfinishing สามารถใช้ได้ทั้งกับงานผิวทรงกระบอกและงานผิวเรียบ มีการกินเนื้อน้อย ใช้กับงานที่ต้องการความเรียบผิวสูง โดยมีการใช้ทั้งสารหล่อลื่นและสารหล่อเย็น เพื่อให้คุณสมบัติในการทำงานมีความสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.12 โดยรูป (ก) แสดงการเจียรชิ้นงานทรงกระบอก โดยใช้แรงกดกระทำต่อชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานกำลังหมุน และ (ข) แสดงเจียรผิวเรียบ โดยใช้แรงดันไฮดรอลิกในการกดชิ้นงาน

มีกลไกการเกิดความเรียบดังรูปที่ 2.13 โดยใช้แรงกดจากแท่งหินและการเกิดฟิล์มของสารหล่อลื่น ช่วยให้มีผิวที่ไม่เรียบในรูป (a) กลายเป็นผิวเรียบ (b) โดยไม่ต้องใช้กลไกของวัสดุขัดสีเลย และ นอกจากนี้ยังช่วยขจัดเศษเนื้อหรืออนุภาคที่หลุดออกมาเพื่อป้องกันรอยที่จะเกิดขึ้นบนผิวงานด้วย การเจียรแบบนี้มีลักษณะเฉพาะคือ

- ก. แรงที่ใช้กดเบามาก ประมาณ 10 – 40 psi
- ข. รวดเร็ว (ประมาณ 400 รอบ ต่อ นาที) ระยะเคลื่อนที่สั้น (น้อยกว่า 6.35 มิลลิเมตร หรือ 0.25 นิ้ว)
- ค. มีการควบคุมไม่ให้เกิดการเจียรย้อนกลับมาที่รอยเดิม
- ง. มีการใช้สารหล่อลื่นและสารหล่อเย็นที่มีความหนืดต่ำ



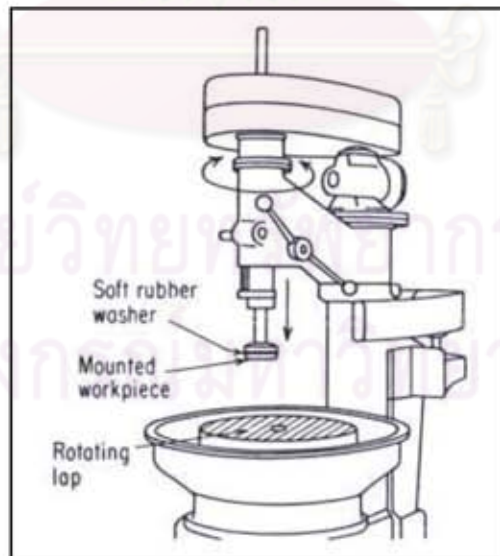
รูปที่ 2.12 การเคลื่อนที่ของชิ้นงานและหินขัด (ก) ชิ้นงานทรงกระบอก (ข) ชิ้นงานผิวเรียบ



รูปที่ 2.13 พิล์มของสารหล่อลื่นช่วยให้งานมีความเรียบมากขึ้น

12. Lapping

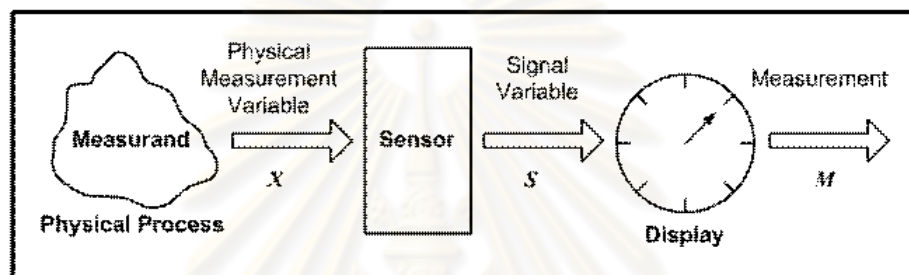
การบดผิว (Lapping) เป็นการเจียรผิวเรียบ โดยใช้ผิวหน้าสัมผัส 2 ผิวในการขัดถูกัน มีการจับมีการกินเนื้อน้อย (น้อยกว่า 25.4 ไมโครเมตร) ทำให้สามารถบรรอยที่เกิดจากการเจียรหายไปได้ การบดผิวนี้ใช้อนุภาคขัดถูขนาดละเอียด เช่น อะลูมินา ซิลิกอนคาร์ไบด์ หรือ เพชร เป็นต้น ติดกับวัสดุนุ่มเป็นตัวขัด (Lap) เช่น วัสดุจำพวกผ้า เหล็กหล่อ หรือ ทองแดง โดยตัวขัดนี้จะนุ่มหรืออ่อนกว่าชิ้นงาน การบดผิวนี้สามารถใช้ได้ทั้งวัสดุพวกโลหะและอโลหะ ในรูปที่ 2.14 แสดงเครื่องจักรที่ใช้ในการ Lapping โดยมีตัวยึดชิ้นงานและกดชิ้นงานเพื่อสัมผัสกับหน้าตัวขัด



รูปที่ 2.14 Lapping Machine

2.2 ระบบการเฝ้าสังเกต (Monitoring system)

เครื่องมือ (Instrument) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยเปลี่ยนรูปแบบ ของตัวแปรกายภาพ (Physical variable) ที่สนใจศึกษา หรือ สิ่งที่ได้รับการวัด (Measurand) ไปสู่รูปแบบที่เหมาะสม สำหรับการบันทึกค่าในการวัด (Measurement) ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้การวัดนั้น มีจุดประสงค์ที่เด่นชัดและแน่นอน ควรจะมีระบบมาตรฐานของหน่วย ที่ใช้ในการวัด และสามารถเปรียบเทียบกับการวัดอื่นได้ (Webster, J.G, 1999)



รูปที่ 2.15 แบบจำลองการติดตั้งเครื่องมืออย่างง่าย

รูปที่ 2.15 แสดงแบบจำลองการติดตั้งเครื่องมืออย่างง่าย กระบวนการทางกายภาพที่วัดได้ซึ่งอยู่ทางซ้ายของรูป และสามารถนำเสนอโดยเป็นตัวแปรกายภาพ X หน้าที่หลักของส่วนต่างๆ ในแบบจำลองเครื่องมือในรูปนี้ ได้แก่ ตัวรับรู้ (Sensor) มีหน้าที่ในการเปลี่ยนจากค่าป้อนเข้าของตัวแปรกายภาพ (Physical variable input) ไปเป็นค่าส่งออกของตัวแปรสัญญาณ (Signal variable output; S) สำหรับตัวแปรสัญญาณนั้น สามารถที่จะควบคุมคุณสมบัติในระบบการส่งผ่านได้ (Transmission) เช่น วงจรไฟฟ้าหรือทางกล (Electrical or mechanical circuits) เพราะว่าคุณสมบัติเหล่านี้ที่ทำให้ตัวแปรสัญญาณสามารถที่จะส่งผ่านออกมา หรือส่งไปสู่เครื่องมือบันทึก (Recording device) ซึ่งต่อเซ็นเซอร์ได้ โดยทั่วไปแล้ว ตัวแปรสัญญาณในวงจรไฟฟ้าจะเป็นแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ส่วนในระบบทางกลนั้นจะเป็นการกระจัด (Displacement) หรือแรง (Force) สำหรับตัวอย่างของตัวแปรกายภาพและตัวแปรสัญญาณอื่นๆ ได้แสดงในตารางที่ 2.1 และในตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะการวัดและชนิดของตัวรับรู้ ซึ่งมีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะ ประเภทและความเหมาะสมในการวัด

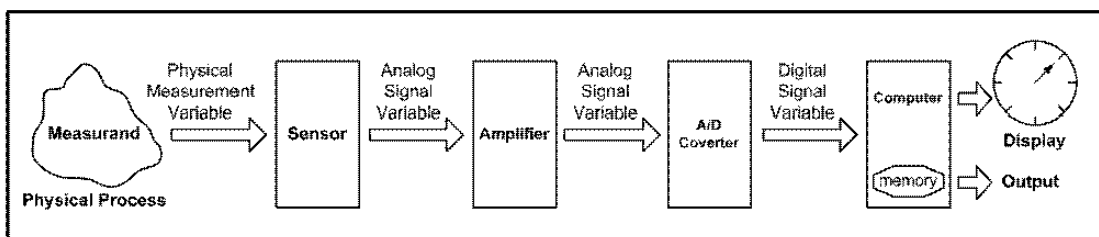
สำหรับสัญญาณที่ออกมาจากตัวรับรู้ นั้น สามารถที่จะแสดง บันทึก หรือใช้สัญญาณเหล่านี้กับอุปกรณ์หรือระบบอื่นได้ ในเครื่องมือพื้นฐาน สัญญาณได้ถูกส่งผ่านไปเพื่อแสดงผล (Display) หรือบันทึก เมื่อการวัดนั้นสามารถอ่านโดยการสังเกตของมนุษย์ ค่าส่งออกที่ได้จากการ

สังเกตจากการวัดจะออกมาอยู่ในรูปของ M โดยเครื่องมือแสดงผลนั้นมีหลายชนิดด้วยกัน สามารถที่จะจัดสเกลง่ายๆ ไปสู่ระบบที่ซับซ้อนของคอมพิวเตอร์ สัญญาณสามารถใช้ได้โดยตรงกับระบบที่ใหญ่ขึ้น โดยเครื่องมือนี้เป็นส่วนหนึ่งของระบบ เช่น สัญญาณที่ได้นี้สามารถนำมาใช้เป็นสัญญาณที่ป้อนเข้ากับระบบควบคุม

ตารางที่ 2.1 ชนิดของตัวแปรเชิงกายภาพและตัวแปรเชิงสัญญาณที่ใช้โดยทั่วไป

ตัวแปรเชิงกายภาพ (Physical variables)	ตัวแปรเชิงสัญญาณ (Signal variables)
Force	Current
Length	Voltage
Temperature	Displacement
Acceleration	Force
Velocity	Frequency
Pressure	Light
Frequency	Pressure
Capacity	
Resistance	
Time	
...	

ถ้าสัญญาณที่ออกมาจากตัวรับรู้นั้นมีค่าน้อย ก็จำเป็นที่จะต้องขยายสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เมื่อขยายสัญญาณออกมาแล้วก็สามารถที่จะส่งผ่านเพื่อแสดงหรือบันทึกได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยส่วนมากแล้วจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือที่สามารถจัดหาสัญญาณเชิงตัวเลข (สัญญาณดิจิทัล; Digital signal) ซึ่งสามารถต่อประสาน (Interface) กับระบบการได้ข้อมูล (Data acquisition) หรือการสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ ถ้าตัวรับรู้อาจไม่สามารถส่งสัญญาณดิจิทัลได้ตัวเองก็สามารถที่จะเปลี่ยนสัญญาณเชิงอุปมาน (สัญญาณแอนะล็อก; Analog signal) ด้วยการใช้ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to digital converter; ADC) สัญญาณดิจิทัลส่งไปสู่ตัวประมวลผลคอมพิวเตอร์ (Computer processor) ซึ่งสามารถที่จะแสดง เก็บ หรือส่งผ่านข้อมูล ซึ่งส่งออกไปยังระบบอื่นที่ใช้ในการวัดได้



รูปที่ 2.16 แบบจำลองการติดตั้งเครื่องมือโดยมีอุปกรณ์เพิ่มเติม

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของการวัดและชนิดของตัวรับรู้

ลักษณะการวัด	ประเภทของการวัด	ตัวอย่างของตัวรับรู้
การวัดตัวแปรเชิงพื้นที่ (Spatial Variable Measurement)	การวัดการกระจัด (Displacement Measurement)	Resistive Sensors Inductive Sensors Capacitive Sensors Piezoelectric Transducers and Sensors Laser Interferometer Sensors Bore Gaging Sensors Time-of-Flight Ultrasonic Sensors Optical Encoder Sensors Magnetic Sensors Synchro / Resolver Sensors Optical Fiber Sensors Optical Beam Deflection Sensing
การวัดตัวแปรเชิงกล (Mechanical Variable Measurement)	การวัดการยืดตัว (ความเครียด) (Strain Measurement)	Strain Sensors ได้แก่ Piezoresistive Foil Gages Piezoresistive Semiconducting Gages Piezoelectric Gages Fiber Optic Strain Gages Birefringent Film Strain Sensing Moiré Strain Sensing
	การวัดแรง (Force Measurement)	Force Sensors ได้แก่ Strain Gage Load Cell Piezoelectric Methods Capacitive Force Transducer Force Sensing Resistors Magnetoresistive Force Sensor Magnetoelastive Force Sensor Tactile Sensors

2.3 คุณสมบัติของทรงกลม (Property of the sphere)

Hilbert, D., 1952 ได้ระบุคุณสมบัติของทรงกลมไว้ 11 ประการ ดังนี้

1. จุดของทรงกลมมีระยะทางเท่ากัน (Equidistant) จากจุดตริ่ง และอัตราส่วนของระยะทางของจุดนั้นกับจุดตริ่งเป็นค่าคงที่ด้วย
2. เส้นรอบขอบ (Contour) และระนาบตัดของทรงกลม (Plane sections) เป็นวงกลม
3. ทรงกลมมีความกว้าง (Width) และเส้นระหว่างจุดที่สั้นที่สุดบนเส้นรอบวง (Girth) เป็นค่าคงที่
4. ทุกจุดของทรงกลมเป็นจุดที่มีความสัมพันธ์กับจุดศูนย์กลาง (Umbilics)
5. วงกลมของทรงกลมมีจุดศูนย์กลางเดียวกัน
6. ทุกจีโอเดสิก (Geodesics; เส้นที่สั้นที่สุดระหว่างสองจุดบนพื้นผิว) ของทรงกลมเป็นส่วนโค้งปิด (Closed curves)
7. ทรงกลมเป็นทรงตันที่มีพื้นที่ผิวที่เล็กที่สุด โดยมีปริมาตรที่มากที่สุด
8. ทรงกลมมีความโค้งเฉลี่ยรวม (Total mean curvature) ที่เล็กที่สุดของทรงตันที่มีลักษณะโค้งนูน (Convex solids)
9. ทรงกลมมีความโค้งเฉลี่ย (Mean curvature) คงที่
10. ทรงกลมมีความโค้งเกาส์เซียน (Gaussian curvature) เป็นบวกที่คงที่
11. ทรงกลมเมื่อถูกเปลี่ยนสภาพ (Transformed) ให้กลายเป็นทรงกลม ต้องปรับค่าทั้งสามแกน ทั้งในแกน x y และ z

2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดสอบสถิติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย

1. การทดสอบสมมติฐาน
2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน

2.4.1 การทดสอบสมมติฐาน (Test of hypothesis)

การทดสอบสมมติฐาน ที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ

1. การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยกรณีประชากรเดียว
2. การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยกรณีประชากรสองชุด

การทดสอบสมมติฐาน คือ การตัดสินใจแบบมีการทดลองด้วยการยืนยันความเชื่ออย่างใดอย่างหนึ่งแล้ว ก็สามารถกำหนดตัวแบบการตัดสินใจอีกประเภทหนึ่งซึ่งมีลักษณะเป็นการตัดสินใจแบบก่อนการทดลอง (กิตติศักดิ์ พลอยเจริญพานิช, 2540)

สมมติฐานแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ สมมติฐานหลัก (Null hypothesis; H_0) และ สมมติฐานอื่น (Alternative hypothesis; H_1) สำหรับสมมติฐานหลัก หมายถึง สมมติฐานที่ตั้งขึ้นเพื่อทดสอบว่าจะยอมรับหรือไม่ว่ามันเป็นจริง และการปฏิเสธไม่ยอมรับสมมติฐานหลัก ก็คือ การยอมรับสมมติฐานอื่น ว่าเป็นจริง (ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ, 2536)

สมมติฐานทั้งสองชนิดอาจแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ สมมติฐานแบบสองด้าน (Two-sided alternative hypothesis) ดังสมการที่ 2.1 และสมมติฐานแบบด้านเดียว (One-sided alternative hypothesis) ดังสมการที่ 2.2 เมื่อ μ_0 คือ ค่าเฉพาะเจาะจง

$$\begin{aligned} H_0 : \mu &= \mu_0 \\ H_1 : \mu &\neq \mu_0 \end{aligned} \dots\dots\dots (2.1)$$

เมื่อตั้งสมมติฐานแบบด้านเดียว สามารถบอกได้ว่า

$$\begin{aligned} H_0 : \mu &\leq \mu_0 \\ H_1 : \mu &> \mu_0 \end{aligned} \dots\dots\dots (2.2)$$

และในทำนองเดียวกัน ก็อาจจะตั้งสมมติฐานได้ว่า

$$\begin{aligned} H_0 : \mu &\geq \mu_0 \\ H_1 : \mu &< \mu_0 \end{aligned} \dots\dots\dots (2.3)$$

การทดสอบสมมติฐานทางวิศวกรรม แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ทดสอบค่าพารามิเตอร์ของการกระจายของความน่าจะเป็น ซึ่งอาจจะเป็นการทดสอบค่าพารามิเตอร์กับค่าคงที่ ระหว่างค่าพารามิเตอร์ของสองประชากร และการทดสอบลักษณะของการกระจายของความน่าจะเป็น

1. การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยกรณีประชากรเดียว

การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยกรณีประชากรเดียว สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่ากรณีการแบบสองด้าน

$$H_0 : \mu = \mu_0$$

$$H_1 : \mu \neq \mu_0$$

กรณีการแบบด้านเดียว

ก. $H_0 : \mu = \mu_0$ หรือ $H_0 : \mu \leq \mu_0$

$$H_1 : \mu > \mu_0$$

ข. $H_0 : \mu = \mu_0$ หรือ $H_0 : \mu \geq \mu_0$

$$H_1 : \mu < \mu_0$$

1.1 การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่มปกติ กรณีที่ค่าเฉลี่ยมาจากประชากรที่ทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เป็นการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของประชากรแบบปกติชุดหนึ่งมีค่าแตกต่างหรือมากกว่า หรือน้อยกว่า ค่าที่กำหนดค่าหนึ่งอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยมีข้อสมมติว่าประชากรชุดดังกล่าวมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่าใด

ในการทดสอบความมีนัยสำคัญนั้น จะกำหนดให้ X เป็นตัวแปรปกติที่มีค่าเฉลี่ย (μ) ที่ไม่ทราบค่า และมีความแปรปรวนที่ทราบค่าเป็น σ^2 และสมมติว่าทำการชักสิ่งตัวอย่างมา n ตัว ได้ $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n$ และในการอธิบายค่า μ จะอาศัยตัวสถิติ \bar{X} โดยในกรณีนี้ทราบว่า $\bar{X} \sim N(\mu, \sigma^2/n)$ เมื่อกำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ α สามารถคำนวณค่าสถิติสำหรับทดสอบได้จากสมการที่ 2.4

$$Z = \frac{(\bar{X} - \mu)\sqrt{n}}{\sigma} \dots\dots\dots (2.4)$$

ในกรณีการทดสอบแบบสองด้าน จะได้ช่วงที่มีการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-Z_{\alpha/2}, Z_{\alpha/2})$

ในกรณีการทดสอบแบบด้านเดียว สำหรับ $H_1 : \mu > \mu_0$ จะได้ช่วงการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-\infty, Z_\alpha)$ และ สำหรับ $H_1 : \mu < \mu_0$ จะได้ช่วงการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-Z_\alpha, \infty)$ หากอยู่นอกช่วงดังกล่าว แสดงว่า ปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1

1.2 การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่มปกติ กรณีที่ค่าเฉลี่ยมาจากประชากรที่ไม่ทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ในการทดสอบความมีนัยสำคัญนั้น จะกำหนดให้ X เป็นตัวแปรปกติที่มีค่าเฉลี่ย (μ) ที่ไม่ทราบค่า และความแปรปรวนที่ไม่ทราบค่า คือ σ^2 ถ้าหากทำการชักสิ่งตัวอย่างมา n ตัว ได้ $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n$ และจากสิ่งตัวอย่างเหล่านี้ จะคำนวณค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของสิ่งตัวอย่างได้ \bar{X} และ S^2 ตามลำดับ ทั้งนี้ความแปรปรวนไม่ใช่ค่าที่แท้จริง แต่มาจากความชำนาญหรือประสบการณ์ แล้วสามารถคำนวณค่าสถิติสำหรับการทดสอบได้จากสมการที่ 2.5

$$t = \frac{(\bar{X} - \mu)\sqrt{n}}{S} \dots\dots\dots (2.5)$$

ในกรณีการทดสอบแบบสองด้าน จะได้ช่วงที่มีการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-t_{\alpha/2, n-1}, t_{\alpha/2, n-1})$

ในกรณีการทดสอบแบบด้านเดียว สำหรับ $H_1 : \mu > \mu_0$ จะได้ช่วงการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-\infty, t_{\alpha, n-1})$ และ สำหรับ $H_1 : \mu < \mu_0$ จะได้ช่วงการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-t_{\alpha, n-1}, \infty)$ หากอยู่นอกช่วงดังกล่าว แสดงว่า ปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1

2. การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยกรณีประชากรสองชุด

การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยกรณีประชากรสองชุด สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังนี้

กรณีการแบบสองด้าน

$$H_0 : \mu_x = \mu_y$$

$$H_1 : \mu_x \neq \mu_y$$

กรณีการแบบด้านเดียว

ก. $H_0 : \mu_x = \mu_y$ หรือ $H_0 : \mu_x \leq \mu_y$

$$H_1 : \mu_x > \mu_y$$

ข. $H_0 : \mu_x = \mu_y$ หรือ $H_0 : \mu_x \geq \mu_y$

$$H_1 : \mu_x < \mu_y$$

2.1 การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของสองประชากรซึ่งมีการกระจายตัวแบบปกติ โดยที่ทราบความแปรปรวนของทั้งสองประชากร

ให้ X และ Y คือประชากรที่ให้ความสนใจ 2 ชุดซึ่งมีการแจกแจงแบบปกติ มีค่าเฉลี่ย μ_x และ μ_y และมีความแปรปรวนที่ทราบค่าเป็น σ_x^2 และ σ_y^2

ในการทดสอบได้กำหนดให้ทำการขัดสิ่งตัวอย่างขนาด n_x และ n_y ตัว จากประชากร X และ Y และกำหนดให้เป็น X_1, X_2, \dots, X_{n_x} และ Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_y} ตามลำดับ เป็นการแจกแจงแบบปกติที่มีค่าเฉลี่ย μ_x และ μ_y และ มีความแปรปรวน σ_x^2 และ σ_y^2 แล้วคำนวณ \bar{X} และ \bar{Y} เมื่อกำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ α สามารถคำนวณค่าทางสถิติได้จากสมการ 2.6

$$Z = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{n_x} + \frac{\sigma_y^2}{n_y}}} \dots\dots\dots (2.6)$$

ในกรณีการทดสอบแบบสองด้าน จะได้ช่วงที่มีการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-Z_{\alpha/2}, Z_{\alpha/2})$

ในกรณีการทดสอบแบบด้านเดียว สำหรับ $H_1 : \mu > \mu_0$ จะได้ช่วงการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-\infty, Z_\alpha)$ และ สำหรับ $H_1 : \mu < \mu_0$ จะได้ช่วงการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-Z_\alpha, \infty)$ หากอยู่นอกช่วงดังกล่าว แสดงว่า ปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1

2.2 การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของสองประชากรซึ่งมีการกระจายตัวแบบปกติ โดยไม่ทราบความแปรปรวนของทั้งสองประชากรแต่ทราบว่าเท่ากัน

ให้ X และ Y คือประชากรที่ให้ความสนใจ 2 ชุดซึ่งมีการแจกแจงแบบปกติ มีค่าเฉลี่ย μ_x และ μ_y และมีความแปรปรวนที่ไม่ทราบค่าเป็น σ_x^2 และ σ_y^2 โดยที่ X และ Y มีความอิสระต่อกัน และ $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$

ในการทดสอบให้ทำการชักสิ่งตัวอย่างขนาด n_x และ n_y ตัว จากประชากร X และ Y และกำหนดให้เป็น X_1, X_2, \dots, X_{n_x} และ Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_y} ตามลำดับ แล้วคำนวณค่าของตัวสถิติ \bar{X} และ \bar{Y} เมื่อกำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ α สามารถคำนวณค่าทางสถิติได้จากสมการ 2.7

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_x} (X_i - \bar{X})^2 + \sum_{i=1}^{n_y} (Y_i - \bar{Y})^2}{n_x + n_y - 2}}} \dots\dots (2.7)$$

2.3 การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของสองประชากรซึ่งมีการกระจายตัวแบบปกติ โดยไม่ทราบความแปรปรวนของทั้งสองประชากร และไม่จำเป็นต้องเท่ากัน

ในการตัดสินใจปัญหาทางวิศวกรรมนั้น มีหลายครั้งที่อาจจะไม่มีเหตุผลเพียงพอที่จะกำหนดให้ $\sigma_x^2 = \sigma_y^2$ จึงทำให้ไม่สามารถใช้ตัวสถิติสำหรับการทดสอบ t สำหรับการทดสอบความแตกต่างของ μ_x และ μ_y ได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องอาศัยการประมาณตัวสถิติสำหรับการทดสอบขึ้น โดยอาศัย t' เป็นสถิติสำหรับการทดสอบ โดยที่ t' มีคุณสมบัติว่า ถ้า $\mu_x = \mu_y$ แล้ว การกระจายของความน่าจะเป็นจะมีลักษณะใกล้เคียงกับการกระจายแบบ t ค่าสถิติสำหรับการทดสอบ t' มีสูตรดังสมการที่ 2.8

$$t' = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{S_x^2}{n_x} + \frac{S_y^2}{n_y}}} \dots\dots\dots (2.8)$$

เมื่อ $\mu_x = \mu_y$ และ $t' = t_{\alpha, v}$ โดยที่ α เท่ากับระดับนัยสำคัญ และ v คือ องศาอิสระ มีสูตรการหาดังสมการที่ 2.9

$$v = \frac{\left(\frac{S_x^2}{n_x} + \frac{S_y^2}{n_y} \right)^2}{\frac{(S_x^2/n_x)^2}{n_x + 1} + \frac{(S_y^2/n_y)^2}{n_y + 1}} - 2 \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

โดยมีช่วงการยอมรับ สมมติฐานหลัก ดังนี้

- กรณี $H_1 : \mu_x \neq \mu_y$ ยอมรับ H_0 ในช่วง $(-t_{\alpha/2, v}, t_{\alpha/2, v})$
 กรณี $H_1 : \mu_x > \mu_y$ ยอมรับ H_0 ในช่วง $(-\infty, t_{\alpha, v})$
 กรณี $H_1 : \mu_x < \mu_y$ ยอมรับ H_0 ในช่วง $(-t_{\alpha, v}, \infty)$

2.4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน คือ เทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรผัน (Variation) ที่เกิดขึ้นในข้อมูลเป็นส่วนย่อยๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความแปรผัน อาจเขียนเป็นสมการที่ 2.10

$$\begin{aligned} \text{ความแปรผันทั้งหมด} &= \text{ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย} \\ &+ \text{ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล} \dots(2.10) \end{aligned}$$

สมการดังกล่าวได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลนั้นไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความแปรผันโดยธรรมชาติ หรือที่เรียกว่า ความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random error) ของข้อมูล แต่เพียงอย่างเดียว แต่น่าจะมาจากปัจจัย (Factor) หนึ่งปัจจัยใดหรือหลายๆ ปัจจัย ทำให้เกิดความแปรผัน ดังนั้นความแปรผันทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยและธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความแปรผันของข้อมูลถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตามซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้เก็บรวบรวมหรือวัดผลมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะไม่มีความเดียวแต่จะมีหลายๆ ค่าซึ่งเรียกว่า ระดับ (Level) ของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นมีผลต่อตัวแปรตามจริงๆ แต่ละระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามที่ไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำได้โดยทำการทดลอง (Treatment)

กำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่างๆ เพื่อหาค่าตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้นๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญหรือไม่เมื่อเทียบกับความแปรผันโดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้มีความเชื่อมั่นในผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลอง จึงมักจะต้องการทำการทวนซ้ำ (Replicated) ให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัย ถ้าเป็นการเจาะจง รูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าเป็นแบบเจาะจง (Fixed effect model) ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปได้เฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดสอบ แต่ถ้าเป็นการเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกแบบสุ่ม รูปแบบของการทดสอบจะเป็นแบบสุ่ม (Random effect model) ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปอิทธิพลโดยรวมของปัจจัย

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยเดียว (Single factor ANOVA)

เมื่อมีปัจจัย k ระดับที่คาดว่ามีความแปรผันของข้อมูล และสมมติว่าได้ทำการทดลองที่แต่ละระดับ n ครั้ง อาจจัดเรียงข้อมูลได้ในตารางที่ 2.3

สมมติให้ μ_j เป็นค่าเฉลี่ยของประชากรที่ได้จากการทดลองที่ระดับ j และทุกประชากรมีความแปรปรวนร่วมกัน σ^2 และทุกประชากรมีลักษณะการกระจายของความน่าจะเป็นแบบนอร์มอล นั่นคือ $X_{ij} \sim N(\mu_j, \sigma^2)$ เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$ และ $j = 1, 2, \dots, k$ ดังนั้นสามารถอธิบายด้วยสมการ 2.11

$$X_{ij} = \mu + \alpha_j + \varepsilon_{ij} \quad \dots \dots \dots (2.11)$$

เมื่อ X_{ij} = ผลจากการทดลองของการทดลองที่ i และการซ้ำครั้งที่ j
 μ_{ij} = ค่าเฉลี่ยทั้งหมดซึ่งเป็นค่าคงที่
 α_j = อิทธิพลของปัจจัยระดับที่ j
 ε_{ij} = ความผิดพลาดแบบสุ่ม

ตารางที่ 2.3 ผลการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การทดลองที่	ข้อมูลจากการทดลอง			
	1	2	3.....k	
1	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{1n}
2	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{2k}
.
.
.
n	X_{n1}	X_{n2}	X_{n3}	X_{nk}
รวม	$T_{.1}$	$T_{.2}$	$T_{.3}$	$T_{.k}$
เฉลี่ย	$\bar{X}_{.1}$	$\bar{X}_{.2}$	$\bar{X}_{.3}$	$\bar{X}_{.k}$

เพื่อทดสอบอิทธิพลของปัจจัย จึงทดสอบสมมติฐานหลักว่า ค่าเฉลี่ยของทุกประชากรเท่ากันหรือไม่ เพราะถ้าตอบรับสมมติฐานแสดงว่าปัจจัยไม่มีอิทธิพลต่อความแปรผันของข้อมูล นั่นคือ

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

หรือ $H_0 : \mu + \sigma_1 = \mu + \sigma_2 = \dots = \mu + \sigma_k$

หรือ $H_0 : \sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_k$

เพราะว่า $\sum_{j=1}^k \alpha_j = 0$ ดังนั้นสมมติฐานที่จะทดสอบจึงเป็น

$$H_0 : \alpha_j = 0 \quad \text{สำหรับทุก } j \quad \text{หรือ } H_0 : \text{ปัจจัยที่พิจารณาไม่มีผล}$$

$$H_1 : \alpha_j \neq 0 \quad \text{สำหรับบาง } j \quad \text{หรือ } H_1 : \text{ปัจจัยที่พิจารณา มีผล}$$

สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตามเนื่องจากปัจจัยเดียว มีขั้นตอนดังนี้

1. เนื่องจากความแปรผันของตัวแปรตาม X_{ij} คาดว่ามีผลมาจากอิทธิพลของปัจจัยหนึ่ง ปัจจัยจึงอาจเขียนรูปแบบของความแปรผัน X_{ij} ได้เป็น

$$X_{ij} = \mu + \alpha_j + \varepsilon_{ij}$$

สมมติฐานที่จะทดสอบ คือ $H_0 : \alpha_j = 0$ สำหรับทุก j
 $H_1 : \alpha_j \neq 0$ สำหรับบาง j

2. คำนวณผลบวกกำลังสองทั้งหมด (Total sum of square; SS_T) ได้จากสมการที่ 2.12 หรือ 2.13 และองศาของควมอิสระได้จาก สมการที่ 2.14

$$SS_T = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_{..})^2 \dots\dots\dots (2.12)$$

$$= \sum_j \sum_i X_{ij}^2 - \frac{\left(\sum_j \sum_i X_{ij}\right)^2}{nk} \dots\dots\dots (2.13)$$

องศาของควมอิสระ (DF) $\nu_T = nk - 1 \dots\dots\dots (2.14)$

3. คำนวณผลบวกกำลังสองเนื่องจากปัจจัย (Treatment sum of square; SS_{Tr}) ได้จากสมการที่ 2.15 หรือ 2.16 และองศาของควมอิสระได้จาก สมการที่ 2.17

$$SS_{Tr} = \sum_j (\bar{X}_{.j} - \bar{X}_{..})^2 \dots\dots\dots (2.15)$$

$$= \frac{\sum_j \left(\sum_i X_{ij}\right)^2}{n} - \frac{\left(\sum_j \sum_i X_{ij}\right)^2}{nk} \dots\dots\dots (2.16)$$

องศาของควมอิสระ $\nu_{Tr} = k - 1 \dots\dots\dots (2.17)$

4. คำนวณผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม (Error sum of square; SS_E) ได้จากสมการที่ 2.18 และองศาของควมอิสระได้จาก สมการที่ 2.19

$$SS_E = SS_T - SS_{Tr} \dots\dots\dots (2.18)$$

องศาของควมอิสระ $\nu_E = nk - k \dots\dots\dots (2.19)$

5. คำนวณค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (Mean square; MS) สำหรับปัจจัยและค่าผิดพลาดแบบสุ่มได้จากสมการที่ 2.20 และ 2.21 ตามลำดับ

$$MS_{Tr} = \frac{SS_{Tr}}{\nu_{Tr}} \dots\dots\dots (2.20)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{\nu_E} \dots\dots\dots (2.21)$$

6. คำนวณค่าสถิติสำหรับทดสอบ F ได้จากสมการที่ 2.22

$$F = \frac{MS_{Tr}}{MS_E} \dots\dots\dots (2.22)$$

7. เปรียบเทียบค่าสถิติสำหรับทดสอบ F กับ $F_{\alpha, \nu_{Tr}, \nu_E}$

ถ้า $F \geq F_{\alpha, \nu_{Tr}, \nu_E}$ ปฏิเสธ H_0

ถ้า $F < F_{\alpha, \nu_{Tr}, \nu_E}$ ยอมรับ H_0

เพื่อสรุปผลการทดสอบให้ดูได้ง่าย จึงจัดทำเป็นตารางที่เรียกว่า ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยเดียว

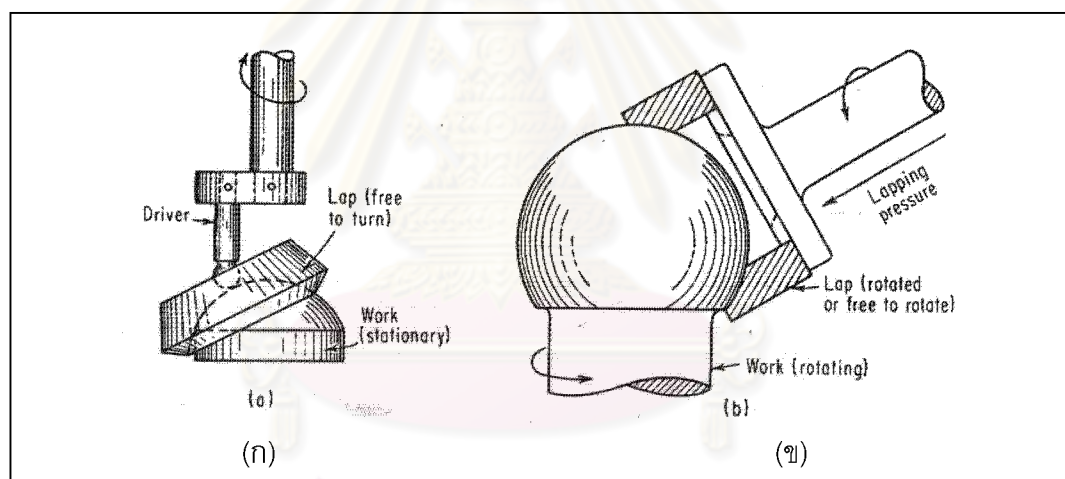
แหล่งความแปรผัน	องศาของควมอิสระ	ผลบวกกำลังสอง	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง	F
ปัจจัย	ν_{Tr}	SS_{Tr}	MS_{Tr}	$\frac{MS_{Tr}}{MS_E}$
ความผิดพลาดแบบสุ่ม	ν_E	SS_E	MS_E	
รวม	ν_T	SS_T		

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การเจียรขึ้นรูปทรงกลม (Spherical grinding)

การขึ้นรูปทรงกลมนั้น สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การอัดขึ้นรูป (Die pressing) การหล่อแบบ (Die casting) และการเจียรขึ้นรูปทรงกลม (Spherical grinding) เป็นต้น สำหรับการเจียรขึ้นรูปทรงกลมนั้น เป็นการนำวัสดุขัดถูมาขัดผิวชิ้นงานเพื่อให้เกิดชิ้นงานทรงกลมขึ้น ซึ่งมีหลายประเภทด้วยกัน ดังนี้

1. การเจียรด้วยถ้วยหินเจียร (Cup lapping) เป็นการนำวัสดุขัดถูที่มีลักษณะว่าเป็นถ้วย มาใช้ในการเจียรทำให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปทรงและขนาดตามลักษณะของถ้วยหินเจียร (Dallas, D., 1976) ดังรูปที่ 2.17

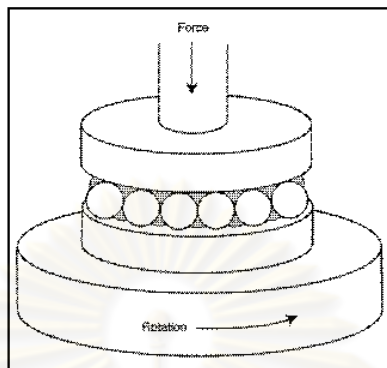


รูปที่ 2.17 การเจียรทรงกลมด้วยถ้วยหินเจียร (ก) ชิ้นงานอยู่กับที่ (ข) ชิ้นงานเคลื่อนที่

จากรูปที่ 2.17 (ก) เครื่องจักรนี้จะมีลักษณะคล้ายเครื่องเจาะ โดยมีลักษณะข้อเหวี่ยงที่มีระยะเหวี่ยงที่พอดี เมื่อแกนหมุนส่งผลให้ตัวขัดได้หมุนตามไปด้วย โดยตัวขัดมีการเคลื่อนที่ที่เป็นอิสระตามระยะข้อเหวี่ยง ตัวขัดจะเคลื่อนที่แต่ชิ้นงานจะอยู่กับที่ การเจียรแบบนี้สามารถเจียรแบบแรงดันได้

รูปที่ 2.17 (ข) ชิ้นงานและตัวขัดจะเคลื่อนที่ด้วยกันทั้งคู่ โดยตัวขัดมีลักษณะว่า เพื่อให้ได้รัศมีของชิ้นงานที่ต้องการ จำเป็นจะต้องตั้งการจัดเรียงให้ดี โดยลักษณะการเจียรแบบนี้ได้นำไปใช้ผลิตเลนส์ หรือ ล้อหินขัดเพชร

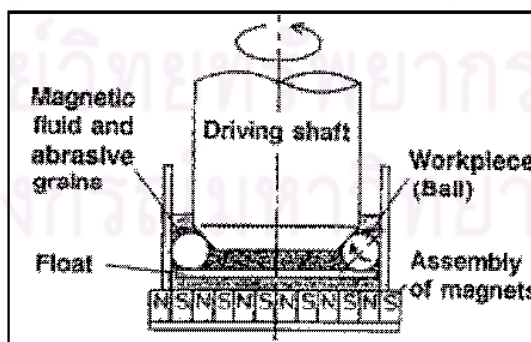
2. การเจียรทรงกลมแบบไม่ตรงศูนย์ (Centerless Spherical Grinding) ซึ่งนิยมใช้กันในเชิงพาณิชย์ (http://www.precisionballs.com/all_wias2.htm)



รูปที่ 2.18 การเจียรทรงกลมแบบไม่ตรงศูนย์

การเจียรทรงกลมแบบไม่ตรงศูนย์ ดังรูปที่ 2.18 ทำการเจียรโดยให้ชิ้นงานป้อนเข้าไปในแผ่นวงแหวน 2 วง โดยวงหนึ่งหมุน อีกวงอยู่กับที่ หลักการคือใส่ลูกบอลมาตรฐาน 3 ลูก เข้าไประหว่างแผ่นวงแหวน ทำการเจียรโดยหมุนแผ่นล่าง และออกแรงกดจากด้านบน ทำให้เกิดการขจัดเนื้อออกอย่างรวดเร็ว วิธีการนี้ทำให้ความแตกต่างของขนาดและความหยาบผิวในแต่ละล้อตกรวดผลิตลดลง หรือ ในทุกๆ ล้อตกรวดผลิตจะชิ้นงานที่กลมและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน

3. Magnetic fluid grinding เป็นการเจียรชิ้นงานซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) ด้วยของไหล ซึ่งอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก (Umehara, N., 1996) ดังรูปที่ 2.19



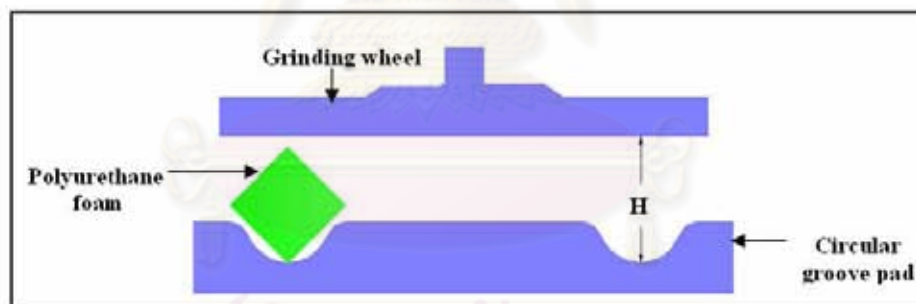
รูปที่ 2.19 Magnetic fluid grinding

จากรูปที่ 2.19 แสดงของไหลสารแม่เหล็ก (Magnetic fluid) เกรนวัสดุขัดสี (abrasive grain) ชิ้นงาน แผ่นลอย และแม่เหล็กถาวร โดยเกรนวัสดุขัดสี ชิ้นงาน และแผ่นลอย ไม่ได้มี

คุณสมบัติทางแม่เหล็ก ได้ลอยอยู่ในของไหลสารแม่เหล็กด้วยแรงลอย (Buoyant force) เมื่อเพลาขับเคลื่อนด้วยความเร็ว 5000 รอบต่อนาที ทำให้ชิ้นงานหมุนรอบตัวเองและหมุนไปรอบผนังด้านในของภาชนะ โดยชิ้นงานถูกเจียรด้วยเกรนวัสดุขัดสี มีอัตราการขจัด (Removal rate) $12.4 \mu\text{m}$ ต่อนาที ความกลม $2.4 \mu\text{m}$ และความเรียบผิว $0.05 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ และพบว่า เมื่อของไหลสารแม่เหล็กกับเกรนวัสดุขัดสีมีความหนืดต่ำ ทำให้ไม่เกิดการหมุนตัวของชิ้นงาน ในทางตรงกันข้ามหากมีความหนืดสูง จะทำให้การเจียรของวัสดุไม่มีประสิทธิภาพ

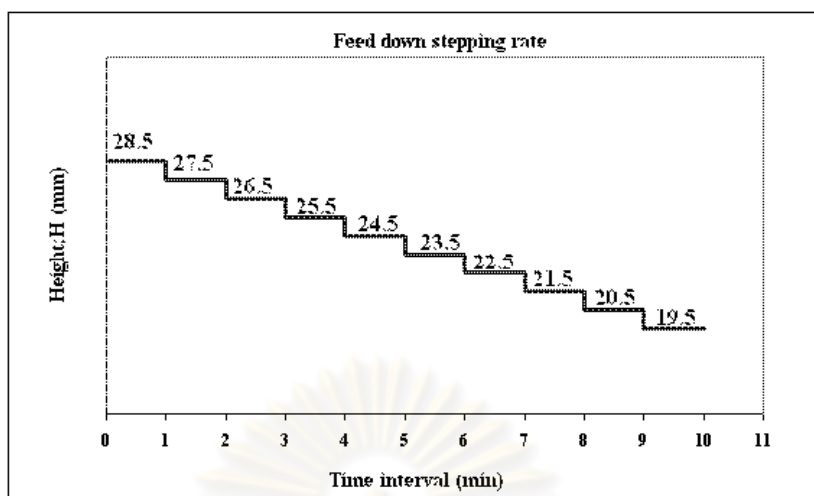
4. การเจียรทรงกลมด้วยร่องรูปโค้ง (Circular - groove grinding) เป็นการเจียรโดยใช้กระดาษทรายความหยาบเบอร์ 240 ติดกับจานขัดด้านบน และแผ่นจานร่องด้านล่าง ได้ทำการเจียรชิ้นรูปวัสดุทรงกลมโดยใช้วัสดุชนิดโพลียูรีเทนโฟม โดยให้ความเร็วรอบจานขัด 520 รอบต่อนาที ทำการเจียรดังรูปที่ (Isarawit Chaopanich, *et.al.*, 2007)

ทำการเจียรด้วยระยะความลึกเจียร (H) ในรูปที่ 2.20 โดย H มีค่าตั้งแต่ 28.5 ถึง 19.5 มิลลิเมตร ทำการเจียรแบบขั้นบันได โดยลดระดับลงครั้งละ 1 มิลลิเมตรและคงที่ไว้ในระดับนั้นระดับละ 1 นาที ดังรูป 2.21



รูปที่ 2.20 ลักษณะการเจียรด้วยแผ่นจานร่องรูปโค้ง

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ สามารถขึ้นเจียรชิ้นรูปชิ้นงานโพลียูรีเทนโฟมทรงกลมขนาด 19.33 ± 0.06 มิลลิเมตร โดยมีอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก 591 ± 12 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที

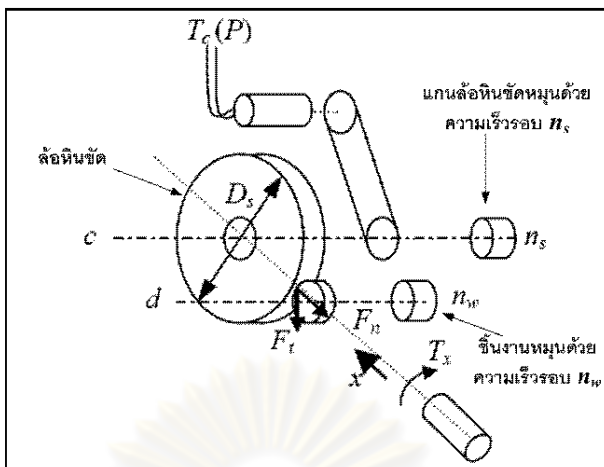


รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความลึกเฉียกับเวลา

2.5.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเฉีย

Stianko, M., 2005 ได้ศึกษาและเฝ้าสังเกตปัจจัยที่เกิดขึ้นในระหว่างการเฉียผิวชิ้นงานรูปทรงกระบอกโดยใช้เครื่องซีเอ็นซี (CNC) โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

T_x	ทอร์ก (Torque) รอบแกน x
T_c	ทอร์กรอบแกน c
P	กำลัง
F_n	แรงกดปกติ (Normal force)
F_t	แรงในแนวเส้นสัมผัส (Tangential force)
v_s	ความเร็วรอบของล้อหินขัด
v_w	ความเร็วรอบของชิ้นงาน
D_s	เส้นผ่านศูนย์กลางของล้อหินขัด
R_s	รัศมีของล้อหินขัด
ω_s	ความเร็วเชิงมุมของล้อหินขัด
x	ตำแหน่งในแนวแกน x



รูปที่ 2.22 ตัวแปรที่เป็นผลจากการเจียร

รูปที่ 2.22 แสดงกลไกของการเจียรผิวชิ้นงานรูปทรงกระบอกด้วยล้อหินเจียรที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง D_s และได้จำแนกตัวแปรต่างๆ ที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้นในขณะที่เจียร โดยล้อหินขัดหมุนรอบแกน c ด้วยความเร็วรอบ n_s โดยมีทอร์ก T_c และกำลังขัด (P) ที่เกิดขึ้น ขณะเจียรผิวบนชิ้นงานที่หมุนด้วยความเร็วรอบ n_w รอบแกน d เกิดแรงกระทำ คือ แรงกดปกติ (Normal force; F_n) ที่มีทิศทางด้านชิ้นงานในแนวแกน x และแรงในแนวเส้นสัมผัส (Tangential force; F_t) ในแนวเส้นสัมผัสกับล้อเจียร ดังรูป สามารถบันทึกค่าต่างๆ ในระหว่างการเฝ้าสังเกต เช่น ทอร์กบนแกน c ทอร์กบนแกน x ความเร็วของล้อหินขัด ความเร็วของชิ้นงาน และตำแหน่งในแนวแกน x เป็นต้น

จากตัวแปรข้างต้น สามารถนำมาคำนวณหาตัวแปรตอบสนองต่างๆ ได้แก่ กำลังที่ใช้ในการเจียร (Power) แรงปกติ (Normal force) แรงในแนวเส้นสัมผัส (Tangential force) อัตราส่วนความเร็ว (Speed ratio) อัตราส่วนแรง (Force ratio) และพลังงานจำเพาะ (Specific energy) เป็นต้น

กำลังที่ใช้ในการเจียร (Power; P) คำนวณได้จาก ทอร์กรอบแกน c (T_c) กับความเร็วรอบของล้อหินขัด (n_s) ดังสมการที่ 2.23

$$P = \frac{T_c \cdot 2\pi \cdot n_s}{60} \dots\dots\dots (2.23)$$

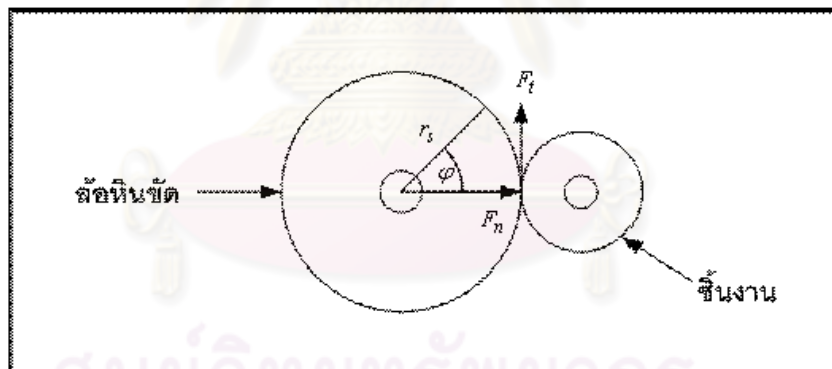
- เมื่อ P = กำลังที่ใช้ในการเจียร (นิวตัน-เมตร / วินาที)
- T_c = ทอร์กรอบแกน c (นิวตัน-เมตร)
- n_s = ความเร็วรอบของล้อหินขัด (รอบต่อนาที)

แรงกดปกติ (Normal force; F_n) คำนวณได้จาก ทอร์กรอบแกน x (T_x) ระยะเวลาเคลื่อนที่เชิงมุม (φ) และ ตำแหน่งในแนวแกน x (x) ได้ดังสมการที่ 2.24

$$F_n = \frac{T_x \cdot \varphi}{x} \dots\dots\dots (2.24)$$

- เมื่อ F_n = แรงกดปกติ (นิวตัน)
- T_x = ทอร์กรอบแกน x (นิวตัน-เมตร)
- φ = ระยะเวลาเคลื่อนที่เชิงมุม
- x = ตำแหน่งในแนวแกน x (เมตร)

แรงในแนวเส้นสัมผัส (Tangential force; F_t) ได้แสดงลักษณะการเกิดแรงในรูปที่ 2.23 สามารถคำนวณได้จาก กำลังที่ใช้ในการเจียร (P) และความเร็วตัดของส้อมหินขัด (v_s) ดังสมการที่ 2.25



รูปที่ 2.23 ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นขณะเจียร

$$F_t = \frac{P}{v_s} \dots\dots\dots (2.25)$$

โดย $v_s = \frac{\pi n_s D_s}{60} \dots\dots\dots (2.26)$

เมื่อแทนสมการ 2.26 ลงในสมการที่ 2.25 จะได้

$$F_t = \frac{60P}{\pi n_s D_s} \dots\dots\dots (2.27)$$

- เมื่อ F_t = แรงในแนวเส้นสัมผัส (นิวตัน)
- P = กำลังที่ใช้ในการเจียร (นิวตัน-เมตร / วินาที)
- v_s = ความเร็วตัดของล้อหินขัด (เมตรต่อวินาที)
- n_s = ความเร็วรอบของล้อหินขัด (รอบต่อนาที)
- D_s = เส้นผ่านศูนย์กลางของล้อหินขัด (เมตร)

อัตราส่วนความเร็ว (Speed ratio; q) แสดงถึงคุณภาพผิวของชิ้นงานในการเจียรทรงกระบอก ขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างความเร็วรอบหินขัด (n_s) และความเร็วรอบชิ้นงาน (n_w) ดังสมการที่ 2.28 อัตราส่วนความเร็วเป็นเลขจำนวนเต็ม ระหว่างการเจียร (ตัวอย่างเช่น $q = 17$ หรือ 18 เป็นต้น) และอัตราส่วนความเร็วเป็นเลขทศนิยม ระหว่างการเกิดประกายไฟ (Spark-out) (ตัวอย่างเช่น $q = 17.3$ หรือ 17.5 เป็นต้น)

$$q = \frac{n_s}{n_w} \dots\dots\dots (2.28)$$

- เมื่อ n_s = ความเร็วรอบของล้อหินขัด (รอบต่อนาที)
- n_w = ความเร็วรอบของชิ้นงาน (รอบต่อนาที)

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient; μ) หรือเรียกว่า อัตราส่วนแรง (force ratio) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัสล้อหินเจียรต่อแรงกดปกติบนผิวชิ้นงาน หาได้จากสมการ 2.29

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \dots\dots\dots (2.29)$$

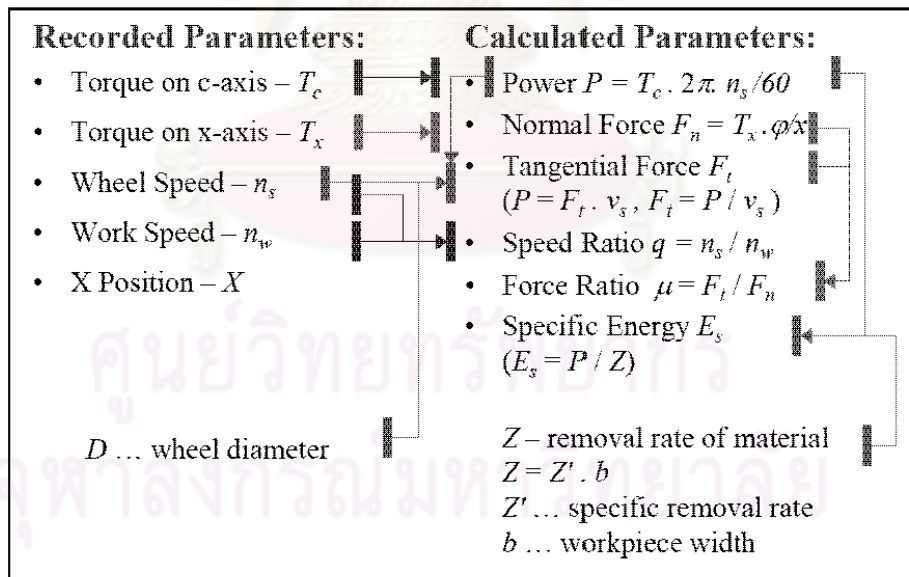
- เมื่อ μ = อัตราส่วนแรง
- F_t = แรงในแนวเส้นสัมผัส (นิวตัน)
- F_n = แรงกดปกติ (นิวตัน)

พลังงานเฉื่อยจำเพาะ (Specific grinding energy; E_s) คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังที่ใช้ในการเฉื่อยต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุออกใน 1 หน่วยปริมาตร แสดงได้ดังสมการที่ 2.30 ซึ่งสามารถบอกได้ถึงคุณภาพของกระบวนการเฉื่อยระหว่างล้อหินขัดและชิ้นงาน

$$E_s = \frac{P}{Z} \dots\dots\dots (2.30)$$

- เมื่อ E_s = พลังงานเฉื่อยจำเพาะ (นิวตัน-เมตร / ลูกบาศก์มิลลิเมตร)
 P = กำลังที่ใช้ในการเฉื่อย (นิวตัน-เมตร / วินาที)
 Z = อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก (ลูกบาศก์มิลลิเมตร / วินาที)

ดังนั้น ตัวแปรที่สามารถคำนวณได้ คือ กำลังที่ใช้ในการเฉื่อย แรงกดปกติ แรงในแนวเส้นสัมผัส อัตราส่วนความเร็ว อัตราส่วนแรง และพลังงานเฉื่อยจำเพาะ จากข้อมูลทั้งในส่วนของคุณค่าของตัวแปร ที่ได้จากบันทึกและการคำนวณสามารถเขียนแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการเฉื่อย

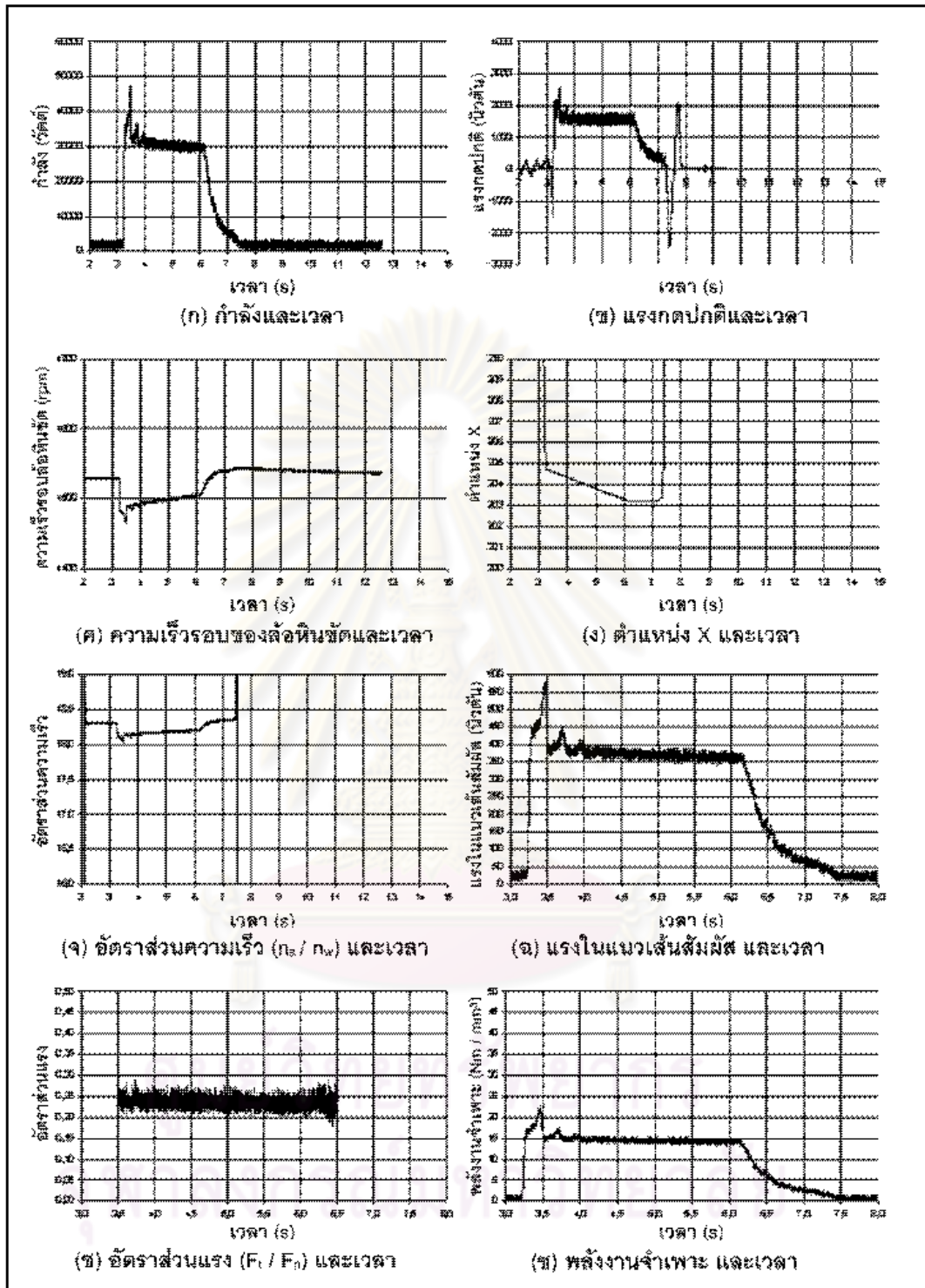
จากการเฝ้าสังเกตปัจจัย พบว่างานวิจัยนี้สามารถที่แสดงสารสนเทศที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจน เช่น กำลังที่ใช้ในการเฉื่อย ความเร็วรอบของล้อ

หิ้นซ์ด อัตรำส่วนควำมเร็ว อัตรำส่วนแรง แรงกดปกติ แรงในแนวเส้นสัมผัส ต่ำแหน่งในแนวแกน X และ พลังงำนเจียรจำพะวะ เป็นต้น

โดยได้แสดงปัจจัยต่างๆนี้ เทียบกับเวลาดังรูปที่ 2.25 เช่น ก่อนที่ชิ้นงำนจะเคลื่อนที่เข้ำถึง หิ้นซ์ด กำล้งที่ใช้ในการเจียรมีค่ำประมำณ 1000 วัตต์ (รูป ก) และมีความเร็วรอบของล้อหิ้นซ์ด ประมำณ 4540 รอบต่อนำที (รูป ค) ณ เวลำน 3.3 วินำที ชิ้นงำนเริ่มปะทะกับล้อหิ้นซ์ดทำให้ กำล้งที่ใช้ในการเจียร แรงกดปกติและแรงในแนวเส้นสัมผัสมีค่ำเพิ่มขึ้น (รูป ก ข และ ค ตามล่ำดับ) ส่วน ความเร็วรอบล้อหิ้นซ์ดจะลดควำมเร็วลงไปเหลือ 4470 รอบต่อนำที เป็นต้น



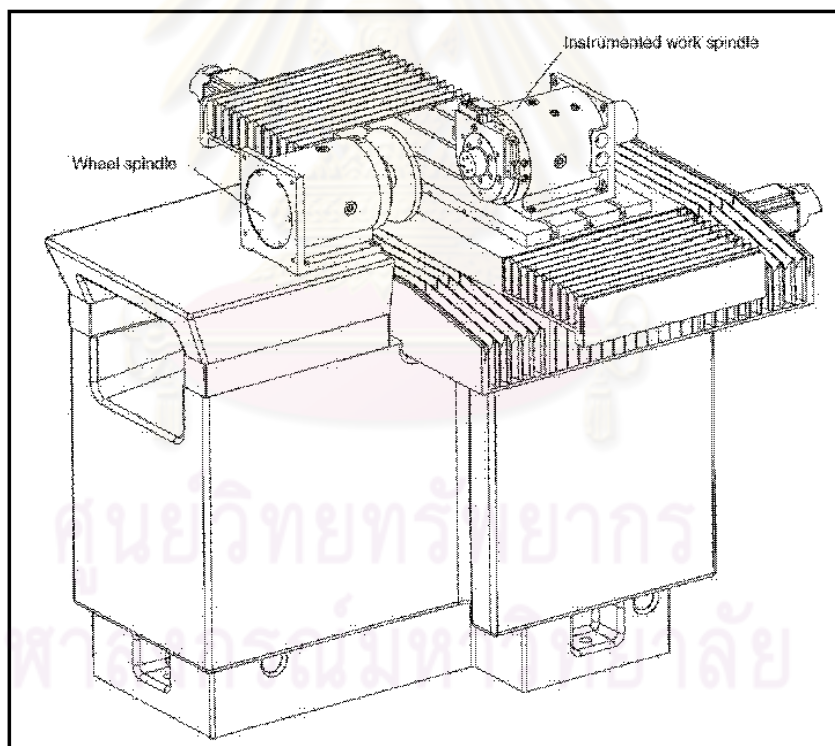
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



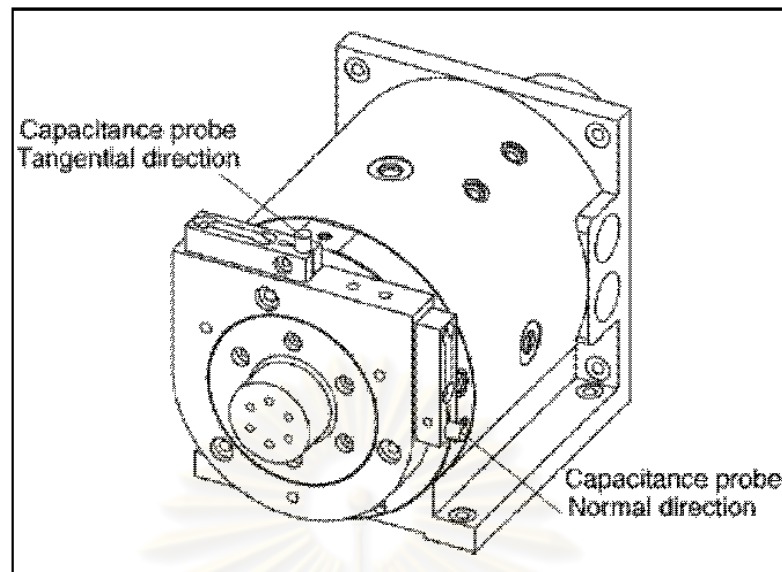
รูปที่ 2.25 ข้อมูลของตัวแปร ที่เกิดขึ้นระหว่างการเจียร

Couey, J. A., 2005 ได้ใช้ตัวรับรู้ชนิดวัดการกระจัดชนิด Capacitance probe (Capacitive displacement sensor) ที่มีความไวสูง และสามารถตรวจจับได้ถึงระดับ มิลลินิวตัน (milli-Newton) มาติดตั้งกับกระสวยอากาศสถิต (Aerostatic spindle) โดยไม่ต้องทำการดัดแปลงเครื่องมือ โดยใช้เครื่อง CNC-Moore 450 ดังรูปที่ 2.26 ในการเจียรชิ้นงานทรงกระบอกความเที่ยงสูง เป็นการวัดความสัมพันธ์ระหว่างโรเตอร์ (Rotor) และ สเตเตอร์ (Stator) ทำการติดตั้งหัววัด (Probe) แรงในแนวเส้นสัมผัสและแรงกดปกติ ดังรูปที่ 2.27 ทำให้ค่าที่วัดได้มีความเที่ยง เสถียร และสามารถวัดค่าได้ถึงแม้ว่าแรงที่เกิดขึ้นมีน้อยก็ตาม แสดงค่าของแรงในแนวเส้นสัมผัส และแรงกดปกติที่วัดได้ในรูปที่ 2.28

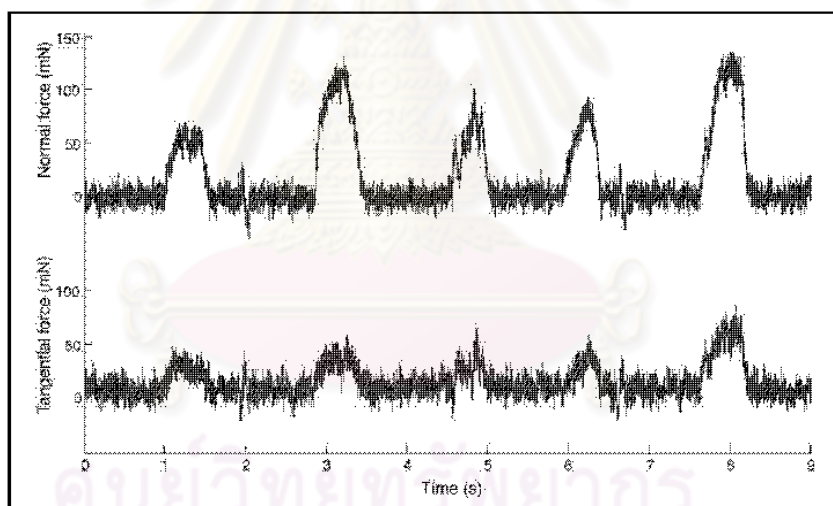
จากงานวิจัยนี้มีข้อดี คือ ทำให้ทราบการเกิดสภาวะ ที่ความเหมาะสมของกระบวนการ สามารถปรับปรุงกระบวนการ และผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงได้



รูปที่ 2.26 เครื่องซีเอ็นซี (Moore 450) ที่นำตัวรับรู้มาประยุกต์ติดตั้ง

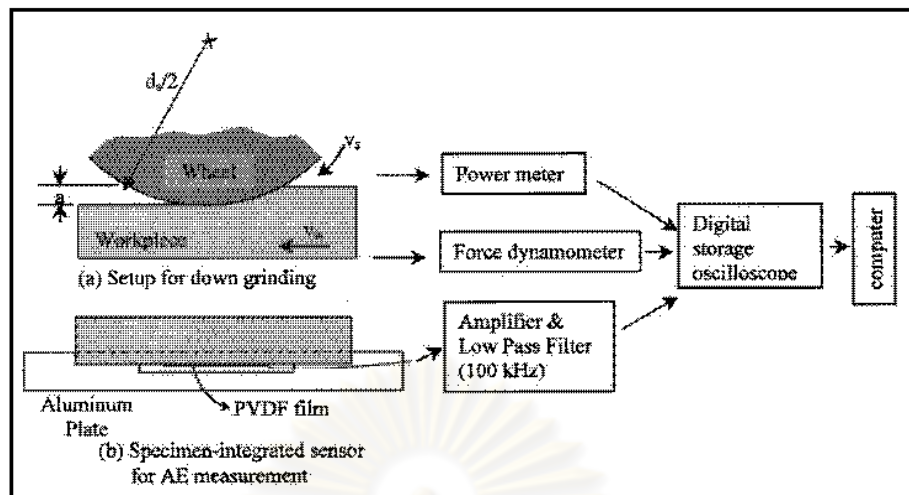


รูปที่ 2.27 การประยุกต์ติดตั้งตัวรับรู้บนโรเตอร์



รูปที่ 2.28 แรงที่เกิดขึ้นในระหว่างการเจียร

Hwang, T. W., 2000 ได้ทำการใช้ตัวรับรู้ประเภทรับค่าด้วยเสียง (Acoustic emission: AE) ในการเฝ้าสังเกตการเจียรซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon nitride) ด้วยความเร็วสูง (14,000 รอบต่อนาที) และได้ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer: Kister 9257A) ในการวัดแรงเจียรในแนวเส้นสัมผัส (tangential grinding force) โดยตัวรับรู้ที่ใช้ คือ ฟิล์มแปลงสัญญาณชนิด polyvinylidene fluoride piezoelectric (PVDF) ซึ่งได้ความเข้มสัญญาณสูง ช่วงกว้าง กะทัดรัด ติดตั้งได้ง่าย และราคาถูก แสดงการติดตั้งในรูปที่ 2.29



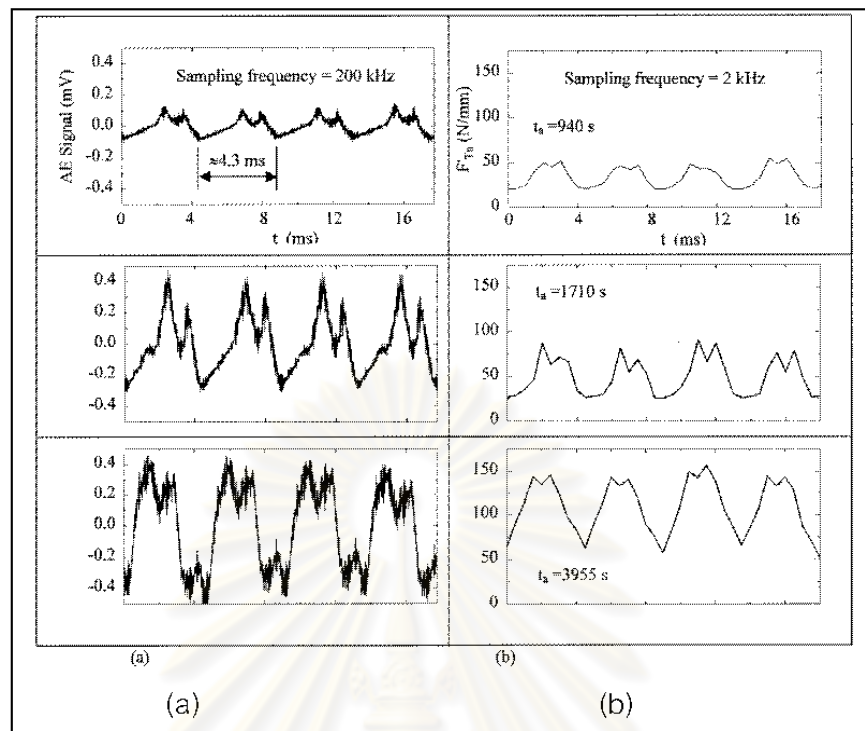
รูปที่ 2.29 การติดตั้งตัวรับรู้และวิธีการทดลอง

จากรูปที่ 2.29 (a) การเจียรชิ้นงานซิลิคอนไนไตรด์ ความลึกตัด $a = 25.4 \mu\text{m}$ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $v_w = 42.3 \text{ mm/s}$ เข้าสู่ล้อหินขัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $d_s = 203.2 \text{ mm}$ ที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $v_s = 149 \text{ m/s}$ โดยมีการวัดการใช้กำลังและแรงในการเจียรที่เกิดขึ้นด้วยมิเตอร์วัดกำลัง (Power meter) และไดนามิเตอร์ (Kistler 9257A) ตามลำดับ ส่งสัญญาณไปให้ออสซิลโลสโคป และเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล

จากรูปที่ 2.29 (b) ติดตั้งฟิล์ม PVDF ไว้ใต้ชิ้นงาน ซึ่งจับยึดด้วยแผ่นอะลูมิเนียม เมื่อทำการเจียร ฟิล์ม PVDF จะแปลงสัญญาณเสียงที่ได้รับ ส่งเข้าสู่เครื่องขยายและกรองสัญญาณความถี่ต่ำ ส่งสัญญาณเข้าสู่ออสซิลโลสโคป และคอมพิวเตอร์ ตามลำดับ

สิ่งสำคัญของการเฝ้าสังเกตที่จะต้องพิจารณา คือ การเลือกใช้ชนิดตัวรับรู้ที่เหมาะสมกับตำแหน่งที่ต้องการติด กระบวนการในการประมวลผลข้อมูล และ สারণนเทศที่ต้องการ

จากรูปที่ 2.30 จากการเฝ้าสังเกตสัญญาณและแรงที่เกิดขึ้น ณ เวลา $t_s = 940 \text{ } 1710$ และ 3955 วินาที ดังรูปที่ 2.30 (a) พบว่า สัญญาณ AE มีการเกิดเป็นคาบสัญญาณประมาณ 4.3 ms ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วรอบหินขัด 14000 รอบต่อนาที (233 Hz) และเมื่อเวลาเจียรเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้แอมพลิจูดของสัญญาณ AE เพิ่มมากขึ้นด้วย โดยมีทิศทางเดียวกับการเพิ่มขึ้นของการลึกของล้อหินขัด ซึ่งวัดค่าแรงกดปกติได้ในรูปที่ 2.30 (b) ดังนั้น จึงสามารถเฝ้าสังเกตสัญญาณ AE สำหรับการเจียรด้วยความเร็วสูงได้ ทำให้ได้ทราบถึงข้อมูลที่มีประโยชน์ เช่น การลึกของล้อหินขัด และ โพรไฟล์ของล้อ ซึ่งนำไปใช้สำหรับการพยากรณ์ความเสียหายของล้อหินขัดได้



รูปที่ 2.30 (a) สัญญาณเสียง AE ที่ได้รับ เทียบกับ (b) แรงกดปกติที่เกิดขึ้นในขณะเจียร

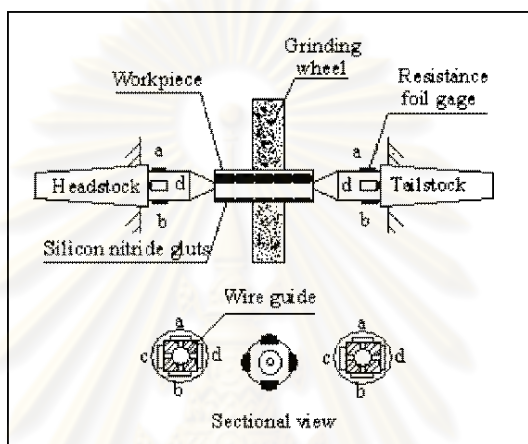
Li, Z., 2002 ระบุว่า การตรวจวัดแรงที่แม่นยำ (Accurate measurement) นั้นส่งผลให้เกิดคุณค่าต่อการวิจัย และมีนัยสำคัญในการศึกษาในเรื่องการเจียร ดังนั้นเพื่อที่จะศึกษาลึกลงไปในกระบวนการเจียรนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการติดตั้งระบบการตรวจวัด (Measurement system) เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงเจียรที่เกิดขึ้นในระหว่างการเจียร โดยทั่วไปแล้ว การตรวจวัดจะประกอบไปด้วย ตัวตรวจจับ (Sensor) เครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier) เครื่องแสดงผลและบันทึกข้อมูล (Oscilloscope) และ คอมพิวเตอร์ (Computer)

หลายบทความได้ระบุว่า แรงเจียรเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดของกระบวนการเจียร โดยสามารถบอกได้ถึงค่าและความเป็นไปของกระบวนการเจียรทั้งหมด โดยทั่วไปนั้นสามารถแบ่งแรงเจียรออกได้เป็น 3 ส่วนดังนี้ คือ

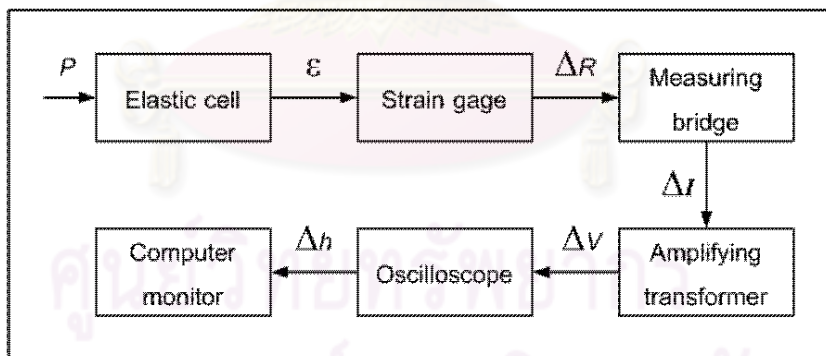
1. แรงเจียรกดปกติ (Normal grinding Force; F_n) หรือ แรงกดปกติ (Normal Force) เป็นแรงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปของผิวชิ้นงาน (Surface deformation) และ ความหยาบของผิวชิ้นงาน (Roughness)
2. แรงเจียรในแนวเส้นสัมผัส (Tangential grinding Force; F_t) หรือ (Tangential Force) เป็นแรงที่มีผลต่อกำลังที่ใช้ในการเจียร (Power consumption) และ อายุการใช้งาน (Service life) ของล้อหินขัด

- 3. แรงป้อน (Feed Force) เป็นแรงที่เกิดขึ้นตามแนวทิศทางของการป้อน (Longitudinal feed) ซึ่งมีค่าน้อย

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ตัวรับรู้ชนิด Strain gage โดยมีการติดตั้งดังรูปที่ 2.31 เพื่อศึกษาแรงเฉียร โดย แรงกดปกติ จะมีผลต่อรูปทรงของผิวชิ้นงานและความเรียบผิว ขณะที่ แรงในแนวเส้นสัมผัส จะมีผลต่อการใช้กำลังและอายุการใช้งานของล้อขัด



รูปที่ 2.31 การติดตั้งระบบวัดแรงที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2.32 แผนภาพการเปลี่ยนและส่งผ่านข้อมูลสัญญาณ

จากรูปที่ 2.32 เมื่อเซลล์ยืดหยุ่น (Elastic cell) ได้รับแรงกระทำ P ก็ได้เปลี่ยนแรงเป็นความเครียด (Strain; ϵ) ส่งเข้าสู่ Strain gage แปลงสัญญาณเป็นส่วนต่างความต้านทาน (ΔR) ส่งไปให้ Measuring bridge เพื่อแปลงส่วนต่างความต้านทานให้เป็นส่วนต่างกระแสไฟฟ้า (ΔI) เข้าสู่ Amplifying transformer โดยส่งค่าออกเป็นส่วนต่างความต่างศักย์ (ΔV) เข้าสู่ออสซิลอสโคป เพื่อแสดงผลสู่จอคอมพิวเตอร์

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้ ได้กล่าวถึง การเตรียมวัสดุและการศึกษาคุณลักษณะของวัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัย การติดตั้งและปรับแต่งอุปกรณ์ ขั้นตอนการทดลองเจาะขึ้นรูปทรงกลม รวมถึงการประมวลผลการเจาะขึ้นรูปทรงกลม และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

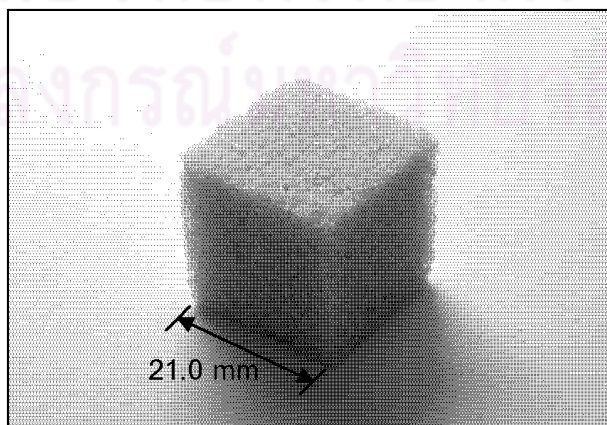
3.1 การเตรียมวัสดุและการศึกษาคุณลักษณะของวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ วัสดุเซรามิก (Ceramic Material) ซึ่งประกอบมี ซิลิกา (Silica; SiO_2) เป็นเฟสหลัก หรือเรียกว่า วัสดุซิลิเกต (Silicate Material) โดยมีการเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของวัสดุ โดยแบ่งเป็นประเด็นได้ ดังต่อไปนี้

1. การเตรียมวัสดุ
2. การวิเคราะห์เฟสของวัสดุ
3. การศึกษาคุณสมบัติเชิงกายภาพ
4. การศึกษาคุณสมบัติเชิงกล

3.1.1 การเตรียมวัสดุ

สำหรับการเตรียมวัสดุเพื่อใช้ในงานวิจัยนั้น มีรูปทรงเป็นลูกบาศก์ ดังรูปที่ 3.1 โดยมีขนาดชิ้นงานมิติ กว้าง \times ยาว \times สูง เป็น 21 \times 21 \times 21 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 ลักษณะวัสดุเริ่มต้นในงานวิจัย

3.1.2 การวิเคราะห์เฟส (Phase analysis)

ในงานวิจัยนี้ศึกษาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุ ทำให้สามารถทราบถึงรูปแบบโครงสร้างผลึก หรือบ่งบอกถึงส่วนประกอบของวัสดุ โดยอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงานและเกิดการเลี้ยวเบนของรังสี ที่มีมุมต่างๆกัน โดยมีอุปกรณ์ตรวจจับ (Detector) ค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมา ณ มุมต่างๆ แล้วนำมาเทียบเปรียบเทียบกับโครงสร้างผลึกในฐานข้อมูล ICDD (International Center Diffraction Data) ของเครื่องทดสอบ ซึ่งจัดทำโดย JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) เนื่องจากธาตุและสารประกอบต่างๆ จะมีส่วนผสมและโครงสร้างที่แตกต่างกันไป ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่มีมุมที่มีองศาต่างกัน ดังนั้นข้อมูลที่ได้ จึงสามารถบอกได้ถึงชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารทดสอบได้ (บัญชา ธนบุญสมบัติ, 2544) สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบโดยใช้ค่า 2θ (Two - Theta) ระหว่าง 20 ถึง 80 องศา (Degree)

3.1.3 การศึกษาคุณลักษณะเชิงกายภาพ (Physical properties characterization)

การศึกษาคุณลักษณะเชิงกายภาพ ได้ศึกษา ความหนาแน่นรวม ความหนาแน่นมวลวัสดุ ความพรุนตัว และขนาดรูพรุน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1.3.1 ความหนาแน่นรวม (Bulk density)

ความหนาแน่นรวม (ρ_B) คือ อัตราส่วนระหว่างมวลของวัสดุต่อปริมาตร ซึ่งจะรวมถึงรูพรุนด้วย โดยใช้แนวทางตาม ASTM: C 373 สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 3.1

$$\rho_B = \frac{m}{V} \dots\dots\dots (3.1)$$

เมื่อ ρ_B = ความหนาแน่นรวม มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
 m = มวล มีหน่วยเป็น กรัม
 V = ปริมาตร มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.1.3.2 ความหนาแน่นมวลวัสดุ (Material mass density)

ความหนาแน่นมวลวัสดุ (ρ_T) คือ ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุซึ่งไม่รวมรูพรุน สามารถหาได้โดยใช้หลอดพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer) ดังรูปที่ 3.2 โดยใช้แนวทางตาม ASTM: C 135 ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังสมการที่ 3.2

$$\rho_T = \frac{(\rho_{H_2O})(W - P)}{(W_1 - P) - (W_2 - W)} \dots\dots\dots (3.2)$$

- เมื่อ ρ_T = ความหนาแน่นมวลวัสดุ มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
 P = น้ำหนักของหลอดพิคโนมิเตอร์เปล่าพร้อมฝาปิด มีหน่วยเป็น กรัม
 W = น้ำหนักของหลอดพิคโนมิเตอร์และสารพร้อมฝาปิด มีหน่วยเป็น กรัม
 W_1 = น้ำหนักของหลอดพิคโนมิเตอร์และน้ำพร้อมฝาปิด มีหน่วยเป็น กรัม
 W_2 = น้ำหนักของหลอดพิคโนมิเตอร์ สาร และน้ำ พร้อมฝาปิด มีหน่วยเป็น กรัม
 ρ_{H_2O} = ความหนาแน่นของน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.9975 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 3.2 หลอดพิคโนมิเตอร์พร้อมฝาปิด

3.1.3.3 ความพรุนตัว (Porosity)

ความพรุนตัว ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่บอกระดับปริมาณรูพรุนซึ่งอยู่ในวัสดุทั้งในเนื้อและที่ผิวของวัสดุนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ 3.3

$$\phi = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_T} \dots\dots\dots (3.3)$$

เมื่อ ϕ = ความพรุนตัว

ρ_B = ความหนาแน่นรวมมีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ρ_T = ความหนาแน่นมวลวัสดุ มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.1.3.4 ขนาดรูพรุน (Pore size)

ขนาดของรูพรุนนั้น ได้ทำการวัดขนาดโดยการดูภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope)

3.1.4 การศึกษาคุณลักษณะเชิงกล (Mechanical properties characterization)

การศึกษาคุณลักษณะเชิงกลนี้ ได้ใช้เครื่องทดสอบความล้า ซึ่งสามารถใช้ทดสอบได้ถึง 50 กิโลนิวตัน (kN) โดยทดสอบความสามารถในการทนแรงอัด และแรงดัดโค้ง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

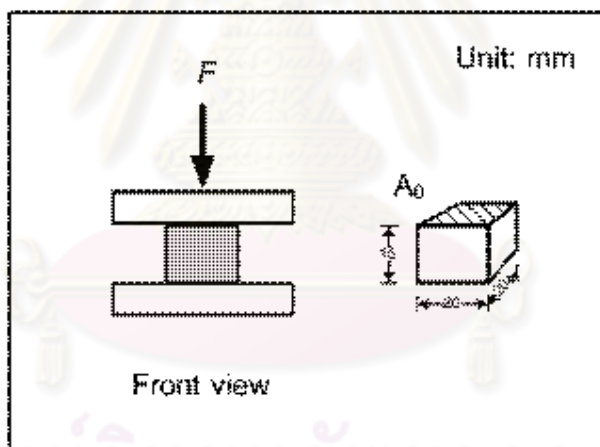
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.4.1 ความทนแรงอัด (Compressive strength)

ความสามารถในการทนต่อแรงอัด หรือ ความเค้นแรงอัด (σ_c) หาได้จาก แรงกดสูงสุดต่อพื้นที่หน้าตัด ดังสมการที่ 3.4 โดยมีแนวทางศึกษาตามมาตรฐาน ASTM: D 1621 และใช้ชิ้นงานทดสอบขนาด หน้าตัด 20 x 20 ตารางมิลลิเมตร และสูง 15 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.3

$$\sigma_c = \frac{F_{\max}}{A_0} \dots\dots\dots (3.4)$$

- เมื่อ σ_c = ความเค้นแรงอัด มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
 F_{\max} = แรงสูงสุดที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 A_0 = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเริ่มต้น มีหน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 การทดสอบความทนแรงอัด

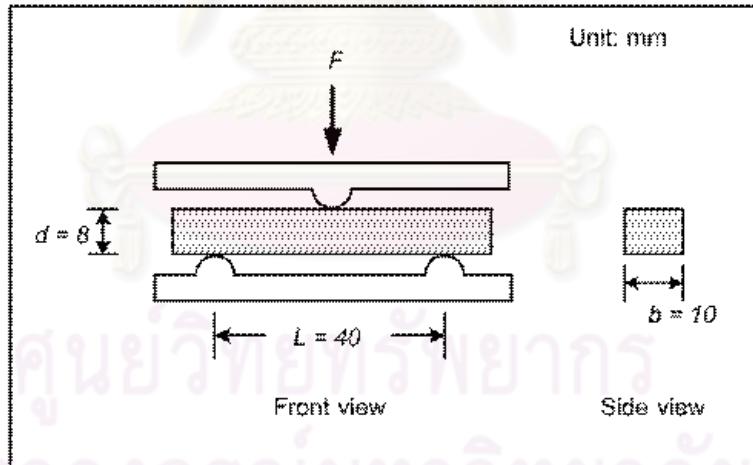
ศูนย์วิจัยและพัฒนา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.4.2 ความทนแรงดัดโค้ง (Bending strength)

ความสามารถในการทนต่อแรงดัดโค้ง หรือ ความเค้นแรงดัดโค้ง (σ_b) หาได้จากสมการที่ 3.5 และใช้ชิ้นงานทดสอบขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 10 x 55 x 8 มิลลิเมตร โดยมีแนวทางการศึกษาตามมาตรฐาน ASTM: D 790 ดังรูปที่ 3.4

$$\sigma_b = \frac{3FL}{2bd^2} \dots\dots\dots (3.5)$$

- เมื่อ σ_b = ความเค้นแรงดัดโค้ง มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
 F = แรงสูงสุดที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 L = ความกว้างระหว่างจุดรองรับ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
 b = ความลึกของชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
 d = ความหนาเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร



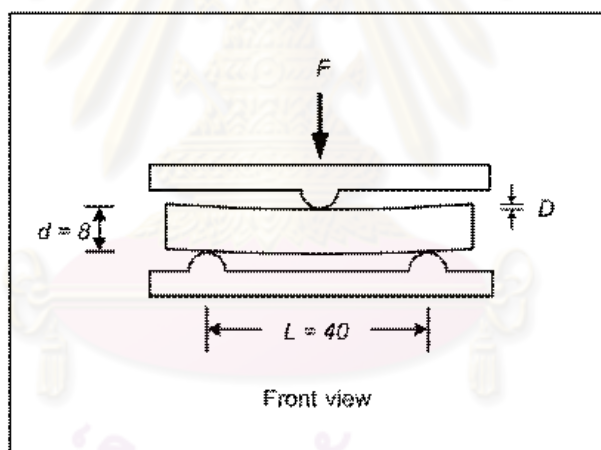
รูปที่ 3.4 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง เมื่อเริ่มต้น

3.1.4.3 ความเครียดการดัดโค้ง (Bending strain)

อัตราส่วนระหว่างระยะที่โค้งตัวได้ต่อระยะความหนาเดิม หรือหาได้จากสมการที่ 3.6 และรูปที่ 3.5 โดยมีแนวทางการศึกษาตามมาตรฐาน ASTM: D 790

$$\varepsilon_b = \frac{6Dd}{L^2} \dots\dots\dots (3.6)$$

- เมื่อ ε_b – ความเครียดการดัดโค้ง มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร
 D – ระยะการโค้งตัวสูงสุดก่อนขึ้นงานทดสอบแตก มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
 d – ความหนาเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
 L – ความกว้างระหว่างจุดรองรับ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

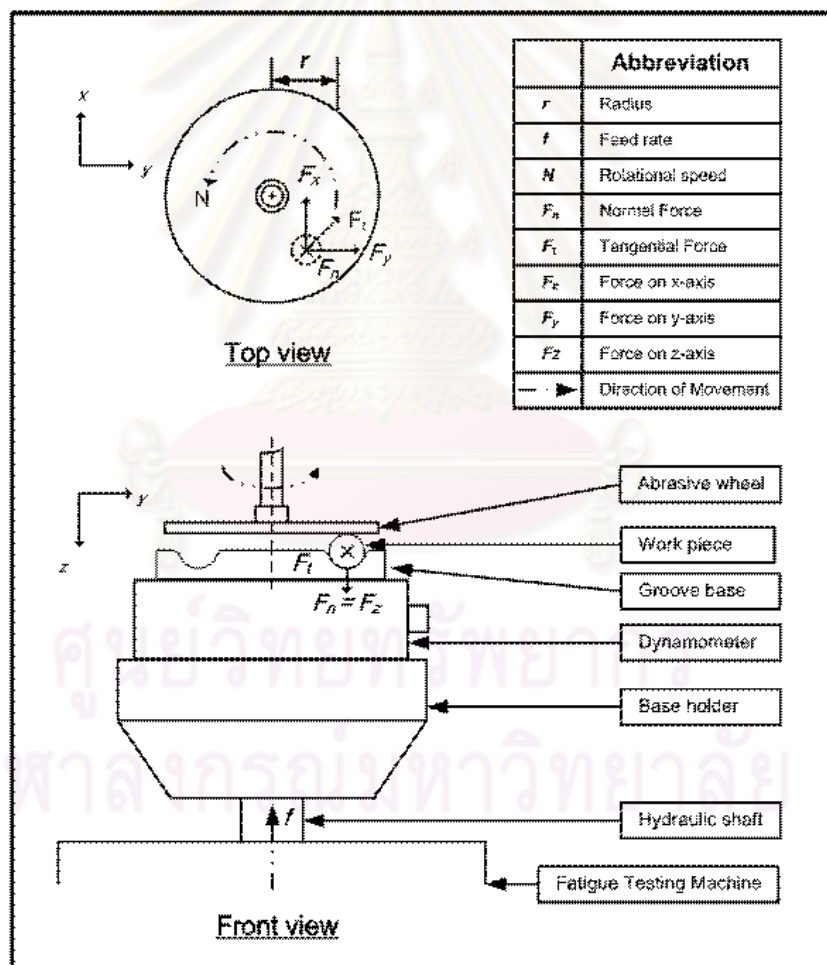


รูปที่ 3.5 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง เมื่อก่อนแตกหัก

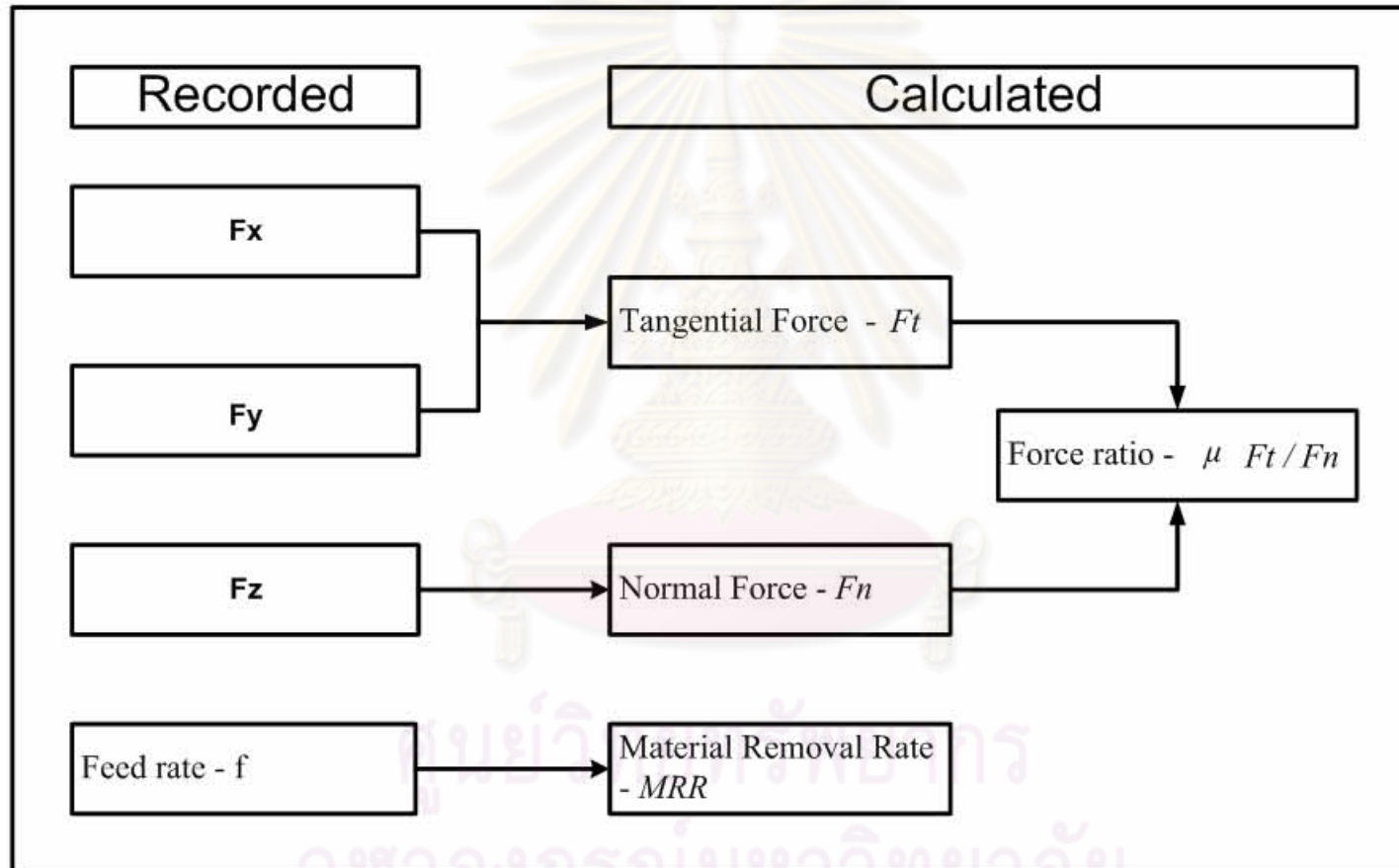
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 การติดตั้งและปรับแต่งอุปกรณ์

จากการศึกษาทฤษฎีและสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำให้ได้แนวคิดการติดตั้งอุปกรณ์การวัดและควบคุมการเจียรขึ้นรูปทรงกลม รวมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น แรงเจียรซึ่งประกอบด้วยแรงกดปกติ (F_n) และ แรงในแนวเส้นสัมผัส (F_t) ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางงานขัดกับจุดศูนย์กลางชิ้นงาน (r) อัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed rate; f) ความเร็วล้องานขัด (N) ดังรูปที่ 3.6 และจากปัจจัยพื้นฐานนี้ สามารถนำไปสร้างความสัมพันธ์ของปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ตามสมการเชิงกลศาสตร์ เช่น สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient) หรือ อัตราส่วนแรง (Force ratio) เป็นต้น ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ภาพเขียนแบบกรรมวิธีการเจียรขึ้นรูปทรงกลมและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 3.7 โครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

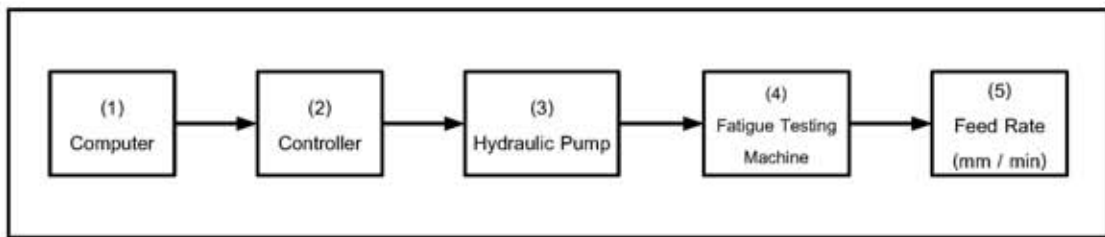
เครื่องมือหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ 4 ชุด ดังนี้

1. ชุดอุปกรณ์ในการขับเคลื่อน
2. ชุดอุปกรณ์ในควบคุมการหมุนงานขัดกระดาษทราย
3. ชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า
4. แผ่นงานรอง

3.2.1.1 ชุดอุปกรณ์ในการขับเคลื่อน

ชุดอุปกรณ์ในการขับเคลื่อนชิ้นงานเข้าหาจานขัดกระดาษทราย ได้ประยุกต์ใช้เครื่องทดสอบความล้า (Fatigue testing machine) ของ SHIMADZU รุ่น SERVOPLUSER โดยใช้ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic system) ในการควบคุมอัตราการป้อนชิ้นงาน มีการทำงานดังรูปที่ 3.8 มีรายละเอียดดังนี้

- (1) เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer) ดังรูปที่ 3.9 สำหรับทำงานผ่านโปรแกรมของเครื่อง หรือ GLOUN software
- (2) อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบ (Controller) ดังรูปที่ 3.10 เมื่อได้รับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ แล้วจะส่งการทำงานไปยังปั๊มไฮดรอลิก
- (3) ปั๊มไฮดรอลิก (Hydraulic pump) ดังรูปที่ 3.11 เมื่อได้รับคำสั่งจากตัวควบคุมแล้ว ปั๊มไฮดรอลิกจะทำการปรับความดันเพื่อให้เพลลาขับของเครื่องทดสอบความล้าเคลื่อนที่
- (4) เครื่องทดสอบความล้า (Fatigue testing machine) ดังรูปที่ 3.12 ในงานวิจัยนี้ได้ดัดแปลงหน้าแปลนส่วนล่าง รูปที่ 3.13 เพื่อจับยึดชุดอุปกรณ์วัดแรง โดยการเคลื่อนที่ของเพลลาขับของเครื่องทดสอบความล้านี้ มาจากการทำงานของปั๊มไฮดรอลิก
- (5) อัตราการป้อนชิ้นงาน ได้จากการเคลื่อนที่ของเพลลาขับ ของเครื่องทดสอบความล้า ในงานวิจัยนี้มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.8 ภาพรวมการทำงานของเครื่องทดสอบความล้า



รูปที่ 3.9 เครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่องทดสอบความล้า



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบความล้า



รูปที่ 3.11 ปั๊มไฮดรอลิก



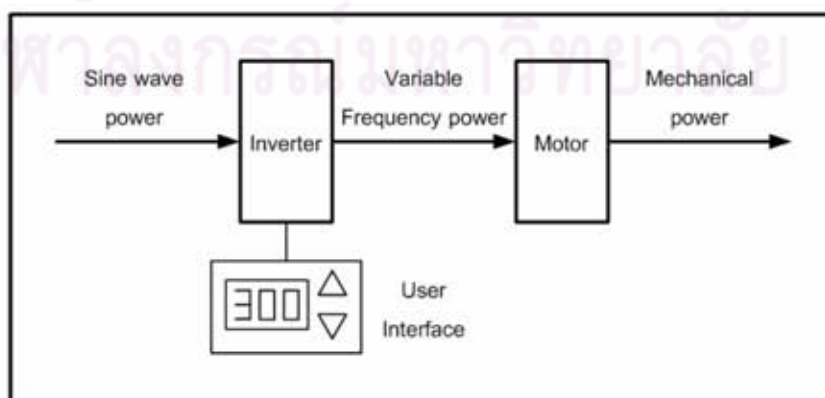
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความล้า



รูปที่ 3.13 หน้าแปลนส่วนล่างของเครื่องทดสอบความล้า

3.2.1.2 ชุดอุปกรณ์ควบคุมการหมุนงานขัดกระดาษทราย

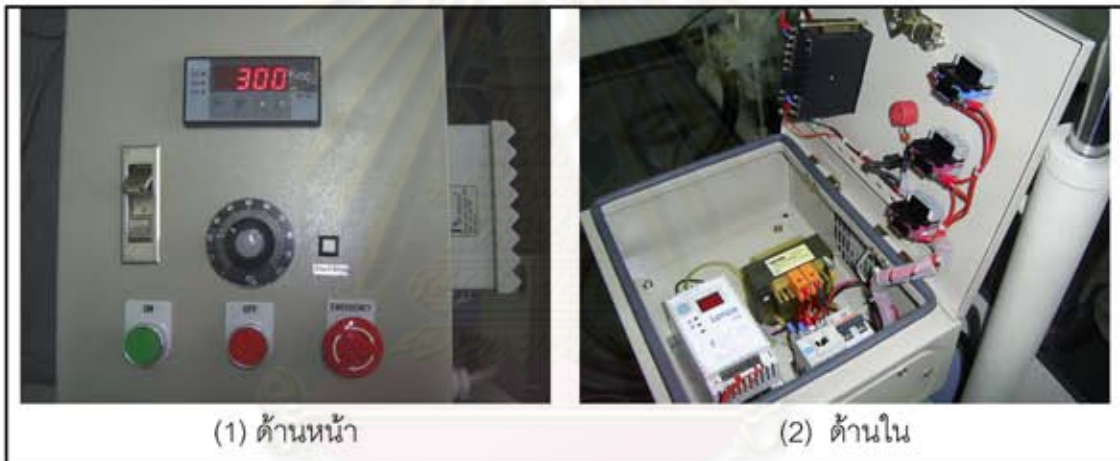
ชุดอุปกรณ์นี้ได้ใช้มอเตอร์ผกผัน (Inverter motor) ของ Lenze ซึ่งสามารถปรับรอบได้ แสดงภาพรวมดังรูปที่ 3.14 ประกอบด้วยอุปกรณ์ส่วนย่อย คือ มอเตอร์ และ ชุดตัวปรับไฟฟ้า ผกผันและตัวปรับรอบ ดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ สำหรับมอเตอร์นั้นเป็นมอเตอร์แบบ วาย (Y) 390 โวลต์ ความเร็วสูงสุด 2790 รอบต่อนาที (rpm) แรงบิด 0.81 นิวตันเมตร (Nm) ในงานวิจัยนี้ได้นำเอามอเตอร์มาใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบความล้า โดยจับยึดกับหน้าแปลนส่วนบนของเครื่องทดสอบความล้า ในรูปที่ 3.17 เมื่อประกอบแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.18 จากนั้นจึงนำจานหมุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร มาต่อแกนประกบต่อเข้ากับแกนของมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.14 ภาพรวมการทำงานของมอเตอร์ผกผัน



รูปที่ 3.15 มอเตอร์



(1) ด้านหน้า

(2) ด้านใน

รูปที่ 3.16 ชุดตัวปรับไฟฟ้าผกผัน และ ตัวปรับรอบ



รูปที่ 3.17 หน้าแปลนส่วนบนของเครื่องทดสอบความล้า



รูปที่ 3.18 หน้าแปลนส่วนบนของเครื่องทดสอบความล้า เมื่อใช้ในการจับยึดมอเตอร์



รูปที่ 3.19 งานขัดกระดาษทรายต่อเข้ากับแกนของมอเตอร์

งานขัดกระดาษทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้กระดาษทรายซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ความหยาบเบอร์ 240 ซึ่งมีอนุภาคผงขัดขนาด 53.0 ไมโครเมตร (μm) ตามกำหนดของ CAMI (Coated Abrasive Manufacturers Institute) โดยเตรียมจากแผ่นกระดาษทรายมาตรฐานซึ่งมีขนาด 9 x 11 นิ้ว (228.6 x 279.4 มิลลิเมตร) ให้เป็นแผ่นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.20 เพื่อให้สามารถแนบติดกับงานหมุนได้พอดี

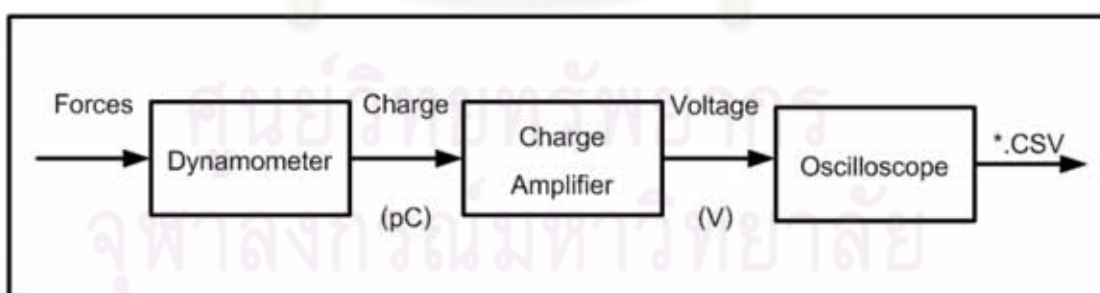


รูปที่ 3.20 กระดาษทรายที่นำมาใช้ติดกับจานหมุน

3.2.1.3 ชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า

ชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า ประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ชิ้น ได้แสดงการต่อพ่วงในรูปที่ 3.21 ดังนี้

1. ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)
2. เครื่องขยายสัญญาณประจุ (Charge amplifier)
3. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)



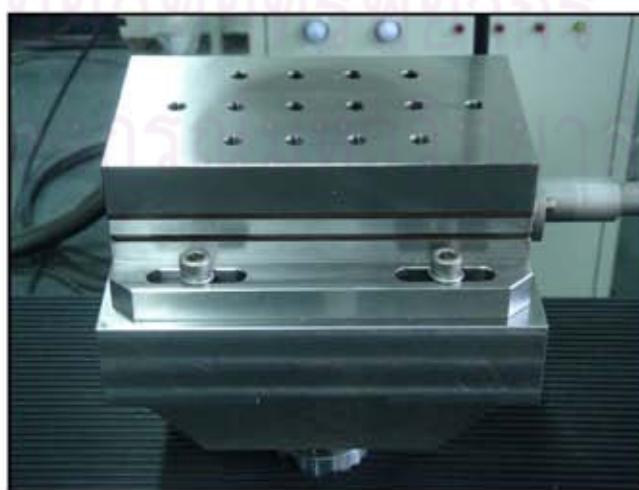
รูปที่ 3.21 การทำงานของชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า

ในรูปที่ 3.21 แสดงภาพรวมการต่อพ่วงชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ไดนาโมมิเตอร์ ของ KISTLER รุ่น 9257B (รูปที่ 3.22) สำหรับวัดแรงสามารถวัดแรงได้ 3 แกน คือ แกน x y และ z โดยส่งสัญญาณออกเป็นรูปแบบปริมาณประจุไฟฟ้า (Charge) ในหน่วย พิโคคูลอมบ์ (Pico coulomb; pC) และได้ทำการติดตั้งเพื่อใช้งานร่วมกับเครื่องทดสอบความล้า โดยทำการยึดกับหน้าแปลนส่วนล่าง ดังรูปที่ 3.23
2. เครื่องขยายสัญญาณประจุของ KISTLER รุ่น 5070 สำหรับขยายสัญญาณที่ได้จาก ไดนาโมมิเตอร์ แล้วส่งสัญญาณในรูปแบบความต่างศักย์ (Voltage) ในหน่วยโวลต์ (Volts; V) ไปให้กับออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 3.24
3. ออสซิลโลสโคป ของ YOKOGAWA รุ่น DL 750 ดังรูปที่ 3.25 สำหรับแสดงผลและบันทึกค่า ความต่างศักย์ (Voltage) ในหน่วยโวลต์ (Volts; V) ที่ได้จากการวัดรูปแบบ CSV (Comma-separated valued)



รูปที่ 3.22 ไดนาโมมิเตอร์



รูปที่ 3.23 หน้าแปลนส่วนล่างของเครื่องทดสอบความล้า เมื่อใช้ในการจับยึดไดนาโมมิเตอร์



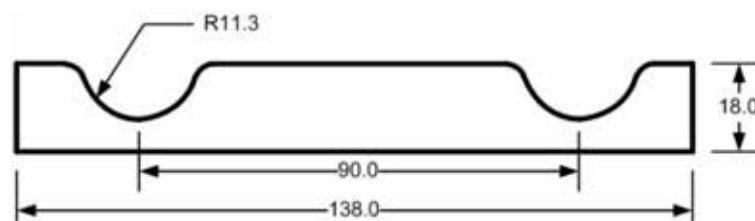
รูปที่ 3.24 เครื่องขยายสัญญาณประจุ



รูปที่ 3.25 ออสซิลโลสโคป

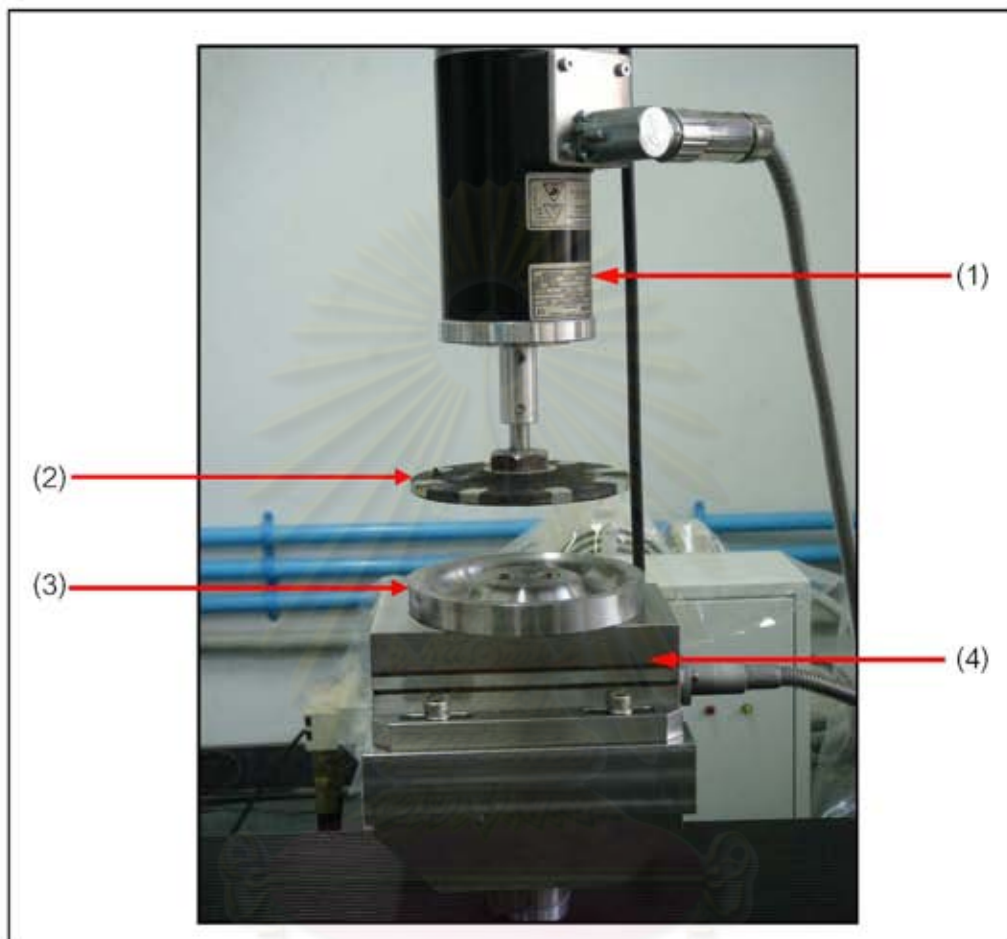
3.2.1.4 แผ่นจานร่อง

แผ่นจานร่อง (Groove disc pad) ขึ้นรูปจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless) เกรด 304 ซึ่งมีมิติ ดังรูปที่ 3.26 จากนั้นนำมาวางและยึดบนไดนาโมมิเตอร์ เพื่อใช้ในการวัดแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.26 มิติของแผ่นจานร่องรูปโค้ง (หน่วย: มิลลิเมตร)

เมื่อประกอบอุปกรณ์ (1) มอเตอร์ (2) จานขีดกระดาษทราย (3) แผ่นจานรอง และ (4) ไดนาโมมิเตอร์ ต่างๆ รวมกับเครื่องทดสอบความล้า จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 เครื่องทดสอบความล้า เมื่อประกอบอุปกรณ์เข้าไปแล้ว คือ (1) มอเตอร์ (2) จานขีดกระดาษทราย (3) แผ่นจานรอง และ (4) ไดนาโมมิเตอร์

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากชุดอุปกรณ์หลักทั้งสี่สามารถแสดงองค์ประกอบต่างๆ ของชุดอุปกรณ์เจียร์ ดังรูปที่

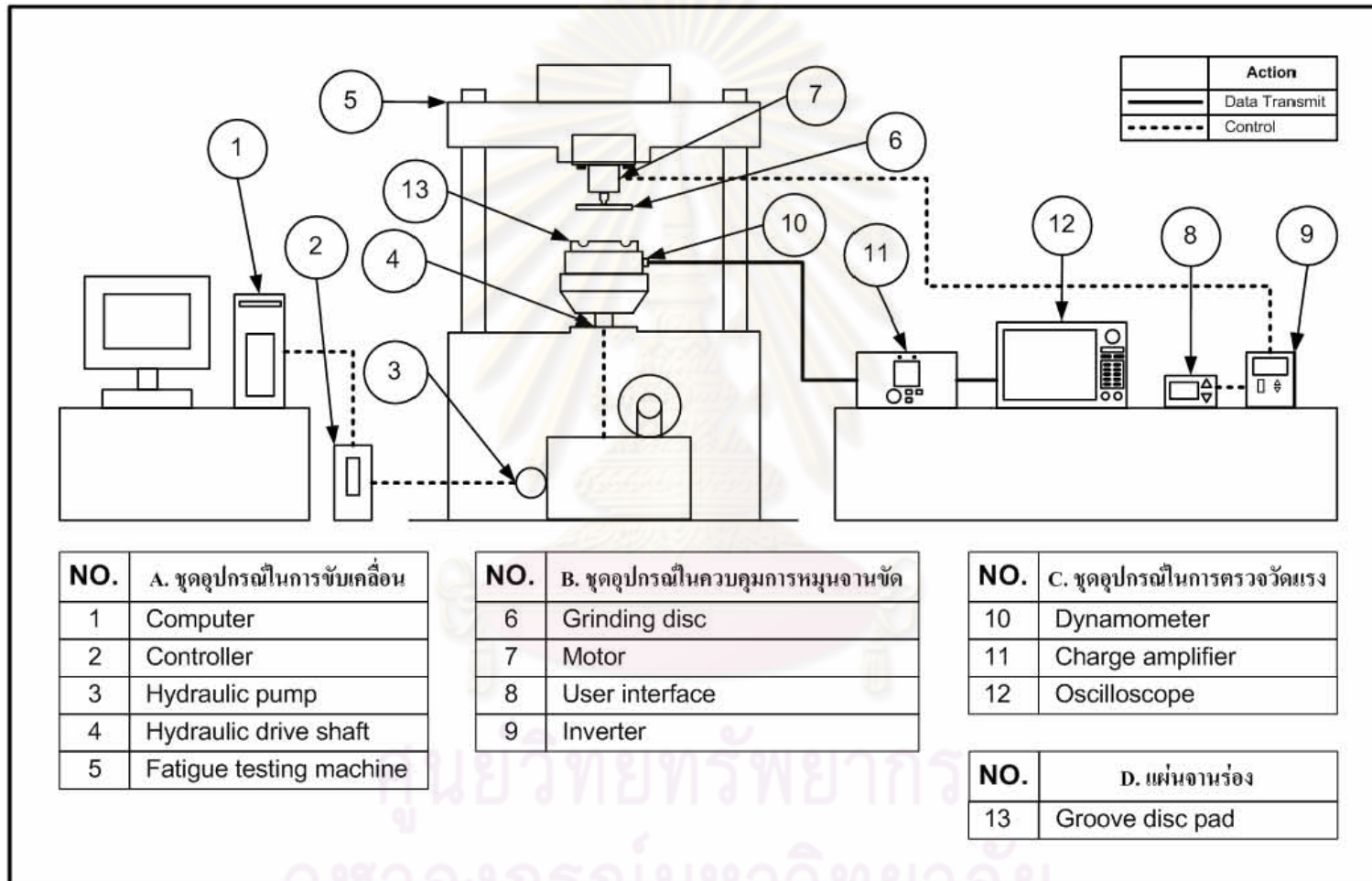
3.28 ประกอบด้วย

1. ชุดอุปกรณ์ในการขับเคลื่อน ประกอบด้วยรายการที่ (1) (2) (3) (4) และ (5) ในรูปที่ 3.28
2. ชุดอุปกรณ์ในควบคุมการหมุนจานขัดกระดาษทราย ประกอบด้วยรายการที่ (6) (7) (8) และ (9) ในรูปที่ 3.28
3. ชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า ประกอบด้วยรายการที่ (10) (11) และ (12) ในรูปที่ 3.28
4. แผ่นจานร่อง คือรายการที่ (13) ในรูปที่ 3.28

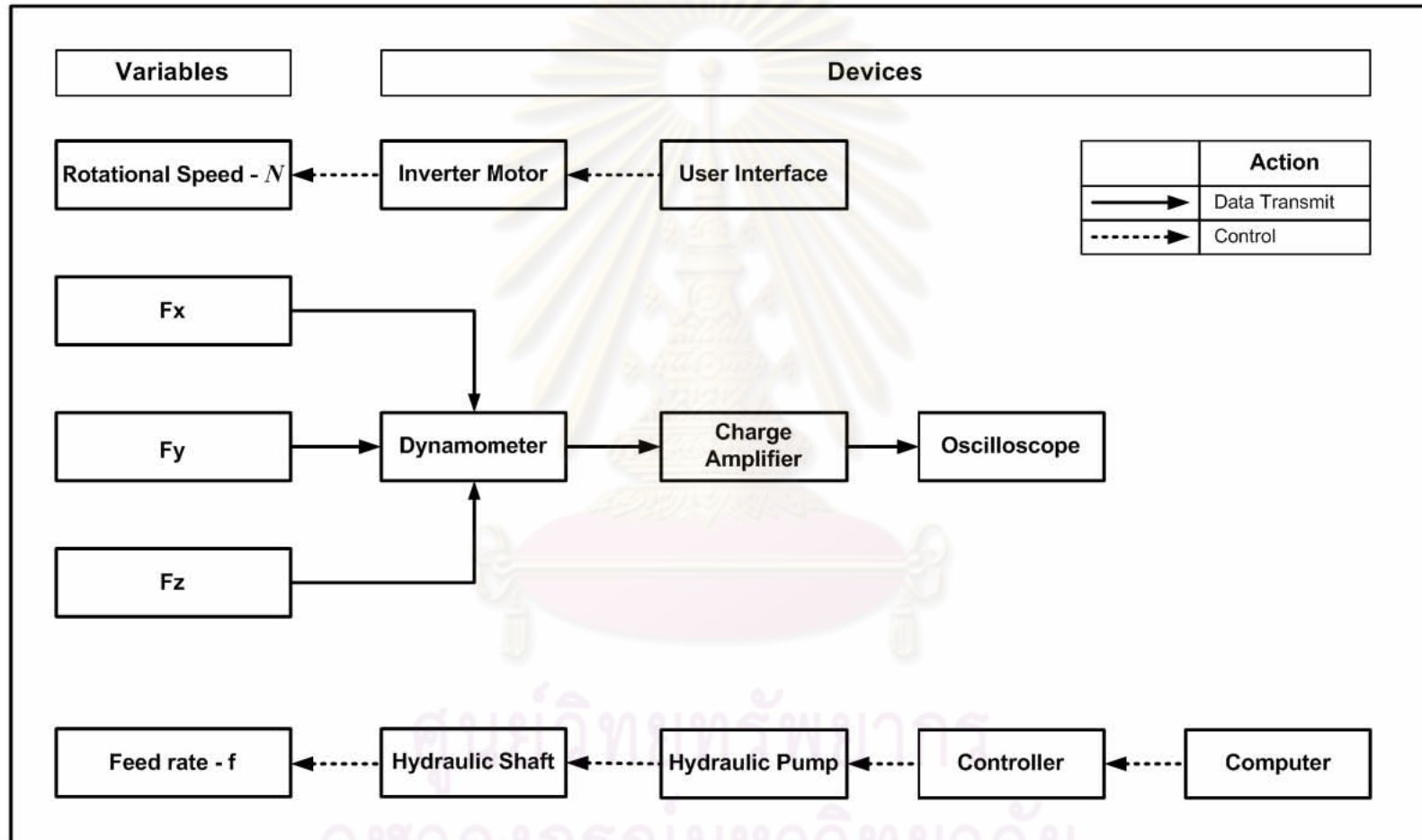
จากรูปที่ 3.29 แสดงโครงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (Variables) กับเครื่องมือในงานวิจัยนี้ โดยแบ่งตามตัวแปรได้ดังนี้

1. ความเร็วรอบจานขัด (N) ได้จากการส่งการผ่าน ตัวต่อประสาน (Interface) ซึ่งจะไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์เพื่อหมุนจานขัด
2. แรงในแนวแกน x y และ z หรือ F_x F_y และ F_z ตามลำดับ เมื่อสามารถวัดค่าของตัววัดเหล่านั้นได้ ไดนานาไมมิเตอร์ก็จะส่งค่าในรูปแบบสัญญาณประจุ ให้เครื่องขยายสัญญาณประจุ โดยได้ทำการขยายสัญญาณและเปลี่ยนเป็นรูปแบบความต่างศักย์เพื่อส่งให้ออสซิลโลสโคปแสดงผลและบันทึกค่า
3. อัตราการป้อนชิ้นงาน (f) เริ่มการส่งการที่โปรแกรมสั่งการของเครื่องทดสอบความล้า ตัวควบคุมจะตอบรับการสั่งการ แล้วไปสั่งให้ปั๊มไฮดรอลิกทำงาน เพื่อขับเคลื่อนเพลาขับของเครื่องทดสอบความล้า ทำให้ได้อัตราการป้อนชิ้นงานที่ต้องการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.28 ภาพรวมของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.29 โครงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (Variables) ต่างๆ กับเครื่องมือ (Devices) ในงานวิจัย

3.2.2 การปรับแต่งเครื่องมือเพื่อใช้ในงานวิจัย

การปรับแต่งเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. การปรับแต่งชุดอุปกรณ์ในการขับเคลื่อน
 2. การปรับแต่งชุดอุปกรณ์ในการหมุนจานขัด
 3. การปรับแต่งชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า
- มีรายละเอียดดังนี้

3.2.2.1 การปรับแต่งชุดอุปกรณ์ในการขับเคลื่อน

อัตราการป้อนชิ้นงานสามารถควบคุมได้โดยใช้โปรแกรมของเครื่องทดสอบความล้า สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 60 มิลลิเมตรต่อนาที โดยที่จุดเริ่มต้นได้ตั้งค่าระยะลี้กการเฉียร (H_0) ที่ 29.7 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.30 และดำเนินการเฉียรไปจนถึงสิ้นสุดที่ระยะลี้กการเฉียร (H_1) ที่ 20.3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.31 ซึ่งแสดงว่าชิ้นงานจะเคลื่อนที่เข้าหาจานขัดเป็นระยะรวม 9.4 มิลลิเมตร

3.2.2.2 การปรับแต่งชุดอุปกรณ์ในการหมุนจานขัด

ความเร็วในการหมุนจานขัด สามารถปรับแต่งที่ตัวปรับรอบของชุดอุปกรณ์มอเตอร์ฝึกฝน โดยใช้ความเร็วรอบ 100 ถึง 1000 รอบต่อนาที

3.2.2.3 การปรับแต่งชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรง และบันทึกค่า

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับแต่งไดนาโมมิเตอร์และเครื่องขยายสัญญาณประจุ โดยตั้งช่วงของแรงที่ต้องการจะวัดไว้ที่ 0 ± 100 นิวตัน (N) ดังรูปที่ 3.33 (ก) และทำการปรับแต่งค่าความไวของไดนาโมมิเตอร์ ตามใบรับรองการสอบเทียบมาตรฐานของไดนาโมมิเตอร์ ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.32 การปรับตั้งไดนาโมมิเตอร์และเครื่องขยายสัญญาณประจุ

ตารางที่ 3.1 การปรับตั้งค่าของไดนาโมมิเตอร์และเครื่องขยายสัญญาณประจุ

แรงในแกน	ช่วงของแรงที่ต้องการวัด Measurement Range (N)	ค่าความไว Sensitivity (pC/N)
x	0 -500	-7.950
y	0 -500	-7.951
z	0 - 100	-3.701

ในส่วนของการปรับตั้งออสซิลอโคป มี 2 ส่วนที่ต้องปรับตั้ง คือ อัตราในการเก็บข้อมูล (Sampling rate) และระยะเวลาในการเก็บข้อมูล (Record range) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อัตราการเก็บข้อมูลเป็น 100 ตัวอย่างต่อวินาที (Sample/sec) หรือ 10 มิลลิวินาทีต่อตัวอย่าง (ms/Sample) และ ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลสูงสุด เท่ากับ 600.60 วินาที (หากว่าระยะเวลาในการเก็บข้อมูลน้อยกว่า 600.60 วินาที ก็ จะเก็บข้อมูลตามเวลาที่ใช้จริง)

3.3 การทดลองเจียรขึ้นรูปทรงกลม

การทดลองเจียรขึ้นรูปทรงกลมมีขั้นตอน ดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานตัวอย่างให้เป็นรูปทรงเป็นลูกบาศก์มีมิติ กว้าง x ยาว x สูง เป็น $21 \times 21 \times 21$ มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.1
2. เตรียมกระดาษทรายแผ่นใหม่ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร แล้วนำมาติดกับจานขัด ดังรูปที่ 3.20
3. นำจานขัดประกอบเข้ากับแกนของมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.19
4. นำชิ้นงานมาวางบนแผ่นจานรอง และปรับระยะความลึกเริ่มต้น (H_0) เท่ากับ 29.7 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.30
5. เริ่มการทำงานของออสซิลโลสโคป เครื่องขยายสัญญาณประจุ และมอเตอร์ โดยควบคุมความเร็วรอบจานขัดให้คงที่ ที่ค่าต่างๆ ตามตารางที่ 3.2
6. เริ่มทำการเจียร ด้วยการสั่งการทำงานไปที่เครื่องทดสอบความล้าผ่านโปรแกรม โดยควบคุมให้อัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ ที่ค่าต่างๆ ตามตารางที่ 3.2
7. เมื่อถึงระยะ H_1 เท่ากับ 20.3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.31 จะหยุดการเคลื่อนที่ชิ้นงานเข้าสู่จานขัดอัตโนมัติ
8. หยุดการทำงานของมอเตอร์ เครื่องขยายสัญญาณประจุ และออสซิลโลสโคป ตามลำดับ
9. เมื่อเสร็จการทดลอง ทำการบันทึกค่าลงกับคอมแพคแฟลช (Compact flash card) ที่อยู่ในออสซิลโลสโคป ซึ่งจะได้ชุดข้อมูลในรูปแบบ CSV (Comma-separated valued)
10. ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 10 โดยเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ โดยแต่ละชุดการทดลองได้ทดลองซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.2 สภาวะปัจจัยของการเจียร

ปัจจัย	ค่า
ความเร็วรอบของจานขัด	100 - 1000 รอบต่อนาที
อัตราการป้อนชิ้นงาน	1 - 60 มิลลิเมตรต่อนาที
ระยะลึกการเจียร	29.7 - 20.3 มิลลิเมตร
จานขัด	กระดาษทราย SiC (ความหยาบเบอร์ 240)

เมื่อสิ้นสุดการเจียร ทำให้ได้ผลตอบสนองของการเจียร ดังนี้

1. รูปร่างของชิ้นงาน (Shape)
2. ขนาด (Dimension) หรือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชิ้นงานทรงกลม (Diameter; D_{avg}) มีหน่วยคือ มิลลิเมตร (mm.)
3. แรงในแนวเส้นสัมผัส (Tangential force; F_t) มีหน่วยคือ นิวตัน (N)
4. แรงกดปกติ (Normal force; F_n) มีหน่วยคือ นิวตัน (N)
5. อัตราส่วนแรงระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัสกับแรงกดปกติ (Force ratio) หรือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction; μ)
6. อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก (Material removal rate) มีหน่วยคือ ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที (mm^3 / min)

3.4 การประมวลผลการเจียรขึ้นรูปทรงกลม

สามารถแยกประเด็นการประมวลผลการเจียรขึ้นรูปทรงกลมได้ ดังนี้

1. การตรวจสอบรูปทรงชิ้นงานหลังการเจียร
2. การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม
3. การประมวลผลแรงเจียร
4. การประมวลผลอัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ

3.4.1 การตรวจสอบรูปทรงชิ้นงานหลังการเจียร

การพิจารณารูปทรงชิ้นงานหลังจากการเจียรนั้น จะพิจารณาว่าได้รูปทรงกลมหรือไม่ ได้พิจารณาด้วยสายตา โดยใช้คุณสมบัติของทรงกลม (ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2) ข้อที่ 2 คือ เส้นรอบขอบ และระนาบตัดของทรงกลม ต้องเป็นวงกลม ดังนั้น หากระนาบตัดของชิ้นงานเป็นวงกลม สามารถระบุได้ว่าเป็นทรงกลม หากว่าชิ้นงานหลังการเจียรมีรูปทรงเป็นทรงกลมก็จะนำผลตอบสนองของชิ้นงานนั้นมาวิเคราะห์ต่อไป

3.4.2 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม

เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานนี้ เป็นการศึกษาเฉพาะชิ้นงานที่เป็นทรงกลมเท่านั้น โดยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยเครื่องมือวัดขนาดแบบดิจิตอล (Digimatic caliper) ของ MITUTOYO ซึ่งมีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ดังรูป 3.33 โดยทำการวัดชิ้นงานละ 20 ค่า แล้วนำมาหาคำนวนหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชิ้นงานทรงกลม (D_{avg})



รูปที่ 3.33 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม

3.4.3 การประมวลผลแรงเจียร์

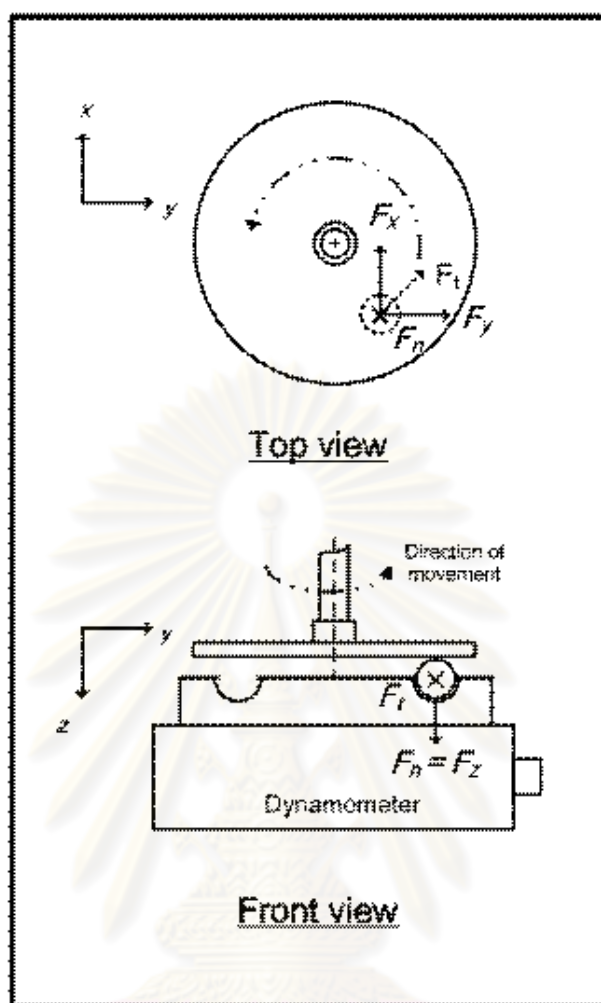
แรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง (ระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัสต่อแรงกดปกติ) ได้มาจากการประมวลผลของชุดข้อมูลความต่างศักย์ที่ได้จากออกสซีโลสโคป มาคำนวณด้วยการคูณด้วยค่าคงที่สำหรับปัจจัยมาตราส่วนในการก่อกำเนิดแรง (Force generator scale factor, FGSF) ซึ่งได้จากการปรับแต่งไดนาโมมิเตอร์และเครื่องขยายสัญญาณประจุ ในที่นี้จะป็น 10 นิวตันต่อโวลต์ (N / V) ดังรูปที่ 3.33 (ข) โดยใช้สมการที่ 3.7 และได้แสดงตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ข

$$F_{ij} = V_{ij} \times FGSF \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

- เมื่อ F_{ij} = แรงในแนวแกน i ณ เวลา j ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 V_{ij} = ความต่างศักย์แรงที่วัดได้ในแกน i ณ เวลา j ใดๆ มีหน่วยเป็น โวลต์
 $FGSF$ = ค่าคงที่สำหรับปัจจัยมาตราส่วนในการก่อกำเนิดแรง สำหรับงานวิจัยนี้เท่ากับ 10 นิวตันต่อโวลต์
 i = แนวแกน x y หรือ z
 j = เวลาใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน

แรงเจียร์ที่คำนวณได้ในขั้นตอนนี้ จะเป็นแรงในแนวแกน x y และ z โดยแสดงภาพสัญญาณของแรงในภาคผนวก ก และสามารถคำนวณแรงในแนวเส้นสัมผัสได้จากแรงในแนวแกน x และ y หรือ แรงลัพธ์ระหว่างแรงในแกน x และ y ณ เวลานั้นๆ ดังสมการที่ 3.8 ส่วนแรงกดปกติ นั้นได้จากแรงในแนวแกน z ดังสมการที่ 3.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.34 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกน x y และ z กับ แรงในแนวสัมผัส และแรงปกติ

$$F_{t_i} = \sqrt{F_{x_i}^2 + F_{y_i}^2} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

$$F_{n_i} = F_{z_i} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

- เมื่อ F_{t_i} = แรงในแนวเส้นสัมผัส หรือ แรงตัทธ์ ณ เวลา i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 F_{n_i} = แรงปกติ ณ เวลา i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 F_{x_i} = แรงในแนวแกน x ณ เวลา i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 F_{y_i} = แรงในแนวแกน y ณ เวลา i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 F_{z_i} = แรงในแนวแกน z ณ เวลา i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 i = เวลา มีหน่วยเป็น วินาที

เมื่อได้แรงในแนวเส้นสัมผัส และแรงกดปกติ ณ เวลาใดๆ แล้ว (Ft_i, Fn_i) จากนั้นจึงนำมาคำนวณเป็นค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (Root-mean-square; rms) ซึ่งเหมาะสำหรับการประมวลค่าที่เป็นสัญญาณพลวัต (Dynamic signal) ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังสมการที่ 3.10 (Richard S. F., 2006)

$$y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} y^2 dt} \dots\dots\dots (3.10)$$

- เมื่อ y_{rms} = ผลตอบสนองของตัวแปร
- t_1 = จุดเวลา ณ จุดที่ 1
- t_2 = จุดเวลา ณ จุดที่ 2
- t = เวลา
- y = ตัวแปรใดๆ

จากสมการที่ 3.10 เมื่อนำค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา มาประมาณการ (Estimate) เป็นแบบวิยุต (Discrete) ด้วยสมการสมมูล (Equivalent of equation) ได้ดังสมการ 3.11

$$y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2} \dots\dots\dots (3.11)$$

- เมื่อ y_{rms} = ผลตอบสนองของตัวแปร
- i = ลำดับของข้อมูล เป็นเลขจำนวนเต็ม มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง N
- y = ตัวแปร
- N = จำนวนข้อมูล

จากสมการที่ 3.11 สามารถนำมาเขียนเพื่อให้อยู่ในรูปแบบของแรง ได้ดังสมการที่ 3.12 โดยข้อมูลลำดับที่ 1 เป็นเวลา 0.01 วินาที

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i^2} \dots\dots\dots (3.12)$$

- เมื่อ F_{rms} = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรง มีหน่วยเป็น นิวตัน
 i = ลำดับข้อมูล มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง N
 F_i = แรง ณ ลำดับข้อมูล ที่ i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 N = จำนวนข้อมูล

เมื่อได้ค่าแรงในแนวเส้นสัมผัสและแรงกดปกติแล้ว ก็นำมาคำนวณอัตราส่วนแรง ได้จากสมการที่ 3.13

$$\mu = \frac{Ft_{rms}}{Fn_{rms}} \dots\dots\dots (3.13)$$

- เมื่อ μ = อัตราส่วนแรง
 Ft_{rms} = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงในแนวเส้นสัมผัส มีหน่วยเป็น นิวตัน
 Fn_{rms} = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงกดปกติ มีหน่วยเป็น นิวตัน

ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงในแนวเส้นสัมผัส (Ft_{rms}) และค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงกดปกติ (Fn_{rms}) ในที่นี้จะเรียกว่า แรงในแนวเส้นสัมผัส (Ft_{rms}) และแรงกดปกติ (Fn_{rms}) ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.4 การประมวลผลอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก

อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก เป็นการศึกษาความสามารถในการขจัดเนื้อวัสดุออกโดยเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเจียร ในที่นี้สามารถคำนวณได้จากการนำปริมาตรชิ้นงานก่อนการเจียรซึ่งมีรูปทรงลูกบาศก์ ดังสมการที่ 3.14 มาลบออกด้วยปริมาตรชิ้นงานทรงกลมหลังการเจียร คำนวณได้จากสมการที่ 3.15 จากนั้นนำผลต่างของปริมาตรของชิ้นก่อนและหลังการเจียรหารด้วยเวลาที่ใช้ในการเจียร หาได้จากสมการที่ 3.16 ทำให้ได้อัตราการขจัดเนื้อวัสดุ ดังสมการที่ 3.17 และสามารถเขียนเป็นสมการอย่างง่ายได้ในสมการที่ 3.18

$$V_{cube} = D_c^3 \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

$$V_{sphere} = \frac{4}{3} \times \pi \times \left(\frac{D_{avg}}{2} \right)^3 \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

$$T = \frac{H_0 - H_1}{f} \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

$$MRR = \frac{V_{cube} - V_{sphere}}{T} \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

$$MRR = \frac{6D^3 - \pi D_{avg}^3}{6T} \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

- เมื่อ
- V_{cube} = ปริมาตรทรงลูกบาศก์ก่อนเจียร มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตร
 - V_{sphere} = ปริมาตรทรงกลมหลังเจียร มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตร
 - D_c = ความกว้างลูกบาศก์ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
 - D_{avg} = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชิ้นงานทรงกลมหลังเจียร มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตร
 - T = เวลาที่ใช้ในการเจียร มีหน่วยเป็น นาที
 - H_0 = ระยะความลึกเริ่มต้น มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
 - H_1 = ระยะความลึกสิ้นสุด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
 - f = อัตราการป้อนชิ้นงาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อนาที
 - MRR = อัตราการขจัดเนื้อวัสดุ มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลอง ได้ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน โดยแยกเป็นประเด็น ดังต่อไปนี้

1. เส้นผ่านศูนย์กลาง
2. แรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง
3. อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก

3.5.1 การศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง

การศึกษาดังกล่าว ได้ใช้การหลักการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังนี้

- 1) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรแบบสุ่มปกติ (กรณีประชากรเดียว)
 ประชากรเดียว ในที่นี้หมายถึง กลุ่มของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานในแต่ละความเร็วรอบจานขัด
- 2) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรแบบสุ่มปกติ (กรณีประชากรสองชุด)
 ประชากรสองชุด ในที่นี้หมายถึง กลุ่มของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานที่มีอัตราการป้อนชิ้นงานแตกต่างกัน 2 กลุ่ม และ กลุ่มของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานระหว่างกลุ่มความเร็วรอบจานขัดที่แตกต่างกัน 2 กลุ่ม
- 3) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากประชากรเดียว
 ประชากรเดียว ในที่นี้หมายถึง กลุ่มของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานในกลุ่มความเร็วรอบจานขัด หรือ อัตราการป้อนชิ้นงานเดียวกัน

3.5.2 การศึกษาอิทธิพลของความเร็วยานยนต์และอัตราการป้อนชิ้นงานต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง

การศึกษาอิทธิพลของความเร็วยานยนต์และอัตราการป้อนชิ้นงานต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง ได้ใช้การหลักการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังนี้

- 1) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากประชากรเดียว
ประชากรเดียว ในที่นี้หมายถึง กลุ่มของแรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง ในกลุ่มความเร็วยานยนต์ หรือ อัตราการป้อนชิ้นงานเดียวกัน
- 2) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรแบบสุ่มปกติ (กรณีประชากรสองชุด)
ประชากรเดียว ในที่นี้หมายถึง กลุ่มของอัตราส่วนแรงในแต่ละความเร็วยานยนต์

การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วยานยนต์และอัตราการป้อนชิ้นงาน สามารถหาได้จากหลักการวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อนแบบกำลัง (Multiple power regression) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.19 แต่ทั้งนี้เพื่อให้การประมวลผลที่มีประสิทธิภาพ จึงได้โปรแกรม SigmaPlot ในการประมวลผล ซึ่งต้องแปลงสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงดังสมการที่ 3.20 โดยการแปลงให้อยู่ในรูปแบบของลอการิทึมธรรมชาติ (Logarithm transform model) ดังสมการที่ 3.21 แล้วจึงทำการประมวลผลด้วยหลักการวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อนแบบเส้นตรง (Multiple linear regression) จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณด้วยเลขชี้กำลัง (Exponential) เพื่อแปลงค่ากลับเป็นเลขฐานสิบ ดังสมการที่ 3.20 ทำให้ได้ค่าในรูปสมการที่ 3.19 โดยมีการคำนวณดังนี้

$$z = ax^b y^c \dots\dots\dots (3.19)$$

$$Z = A + BX + CY \dots\dots\dots (3.20)$$

$$\ln z = \ln a + b \ln x + c \ln y \dots\dots\dots (3.21)$$

$$e^{\ln z} = e^{\ln a} \cdot e^{b \ln x} \cdot e^{c \ln y} \dots\dots\dots (3.22)$$

- เมื่อ z คือ ผลตอบสนองซึ่งมีความสัมพันธ์กับตัวแปร x และ y ในแบบกำลัง โดยมี a เป็นค่าคงที่ ส่วน b และ c เป็นสัมประสิทธิ์ยกกำลัง
- Z คือ ผลตอบสนองซึ่งมีความสัมพันธ์กับตัวแปร x และ y ในแบบเส้นตรง โดยมี A เป็นค่าคงที่ ส่วน B และ C เป็นสัมประสิทธิ์ตัวคูณ

จากสมการที่ 3.19 เมื่อนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ z จะหมายถึง ผลตอบสนองในที่นี้คือ แรงในแนวเส้นสัมผัส และ แรงกดปกติ โดย x และ y คือความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำค่าที่แปลงรูปให้อยู่ในรูปแบบของลอการิทึมธรรมชาติไปประมวลผลด้วยโปรแกรม SigmaPlot ทำให้ได้ค่า a b และ c ของสมการที่ 3.21 ออกมา แล้วนำค่า a b และ c นี้ไปยกกำลังด้วย เลขชี้กำลัง (e) ดังสมการที่ 3.22 เพื่อแปลงกลับมาให้อยู่ในรูปแบบ สมการที่ 3.19 และได้แสดงการวิเคราะห์สมการเส้นถดถอยในภาคผนวก ค

3.5.3 การศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่ออัตราการขัดเนื้อวัสดุออก

การศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่ออัตราการขัดเนื้อวัสดุ ได้ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากประชากรเดียวเพื่อพิจารณาผลของอิทธิพลจากความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน

บทที่ 4 ผลการวิจัย

ในบทนี้ ได้กล่าวถึงผลการศึกษาคูณลักษณะของวัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัย ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาคูณลักษณะของวัสดุ (Material characterization)

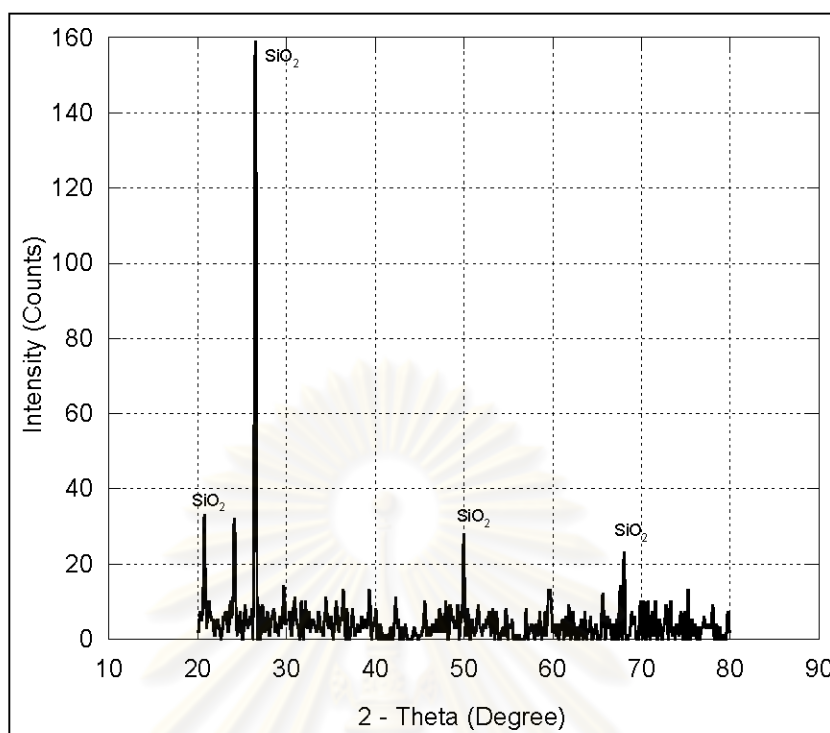
จากการศึกษาคูณลักษณะของวัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัยนั้น สามารถสรุปผลการศึกษาคูณลักษณะเชิงกายภาพ และเชิงกล ดังตารางที่ 4.1 และมีรายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อ 4.1.1 ถึง 4.1.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 คูณลักษณะของวัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัย

คุณสมบัติ	ค่า
เฟสหลัก	ซีลิกา
ความหนาแน่นรวม (g / cm^3)	0.23
ความหนาแน่นมวลวัสดุ (g / cm^3)	2.41
ความพรุนตัว (%)	88.80
ขนาดรูพรุน (mm)	0.5 – 1.0
ความทนแรงอัด (MPa)	0.65
ความทนแรงดัดโค้ง (MPa)	1.97
ความเครียดแรงดัดโค้ง (mm / mm)	0.006

4.1.1 การวิเคราะห์เฟส (Phase analysis)

จากการศึกษาเฟสของวัสดุด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) สามารถวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมา ที่ 2θ และสามารถระบุเฟสหลักของวัสดุ ได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีเฟสซีลิกา อยู่ที่ 2θ เท่ากับ 20.78 20.54 50.00 และ 67.62 องศา



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD

4.1.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะเชิงกายภาพ (Physical properties characterization)

จากการศึกษาคุณลักษณะเชิงกายภาพของวัสดุที่นำมาวิจัย มีรายละเอียด ดังนี้

4.1.2.1 ความหนาแน่นรวม (Bulk density)

ความหนาแน่นรวมของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ได้แสดงค่าทางสถิติไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าทางสถิติของความหนาแน่นรวมของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ค่าทางสถิติ	ค่า
ค่าสูงสุด (g / cm^3)	0.285
ค่าต่ำสุด (g / cm^3)	0.193
ค่าเฉลี่ย (g / cm^3)	0.231
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.018
สัมประสิทธิ์ความแปรผัน	7.63%

4.1.2.2 ความหนาแน่นมวลวัสดุ (Material mass density)

ความหนาแน่นมวลวัสดุของวัสดุ สามารถแสดงค่าทางสถิติไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าทางสถิติของความหนาแน่นมวลวัสดุของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ค่าทางสถิติ	ค่า
ค่าสูงสุด (g / cm ³)	2.501
ค่าต่ำสุด (g / cm ³)	2.143
ค่าเฉลี่ย (g / cm ³)	2.406
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.153
สัมประสิทธิ์ความแปรผัน	6.38%

4.1.2.3 ความพรุนตัว (Porosity)

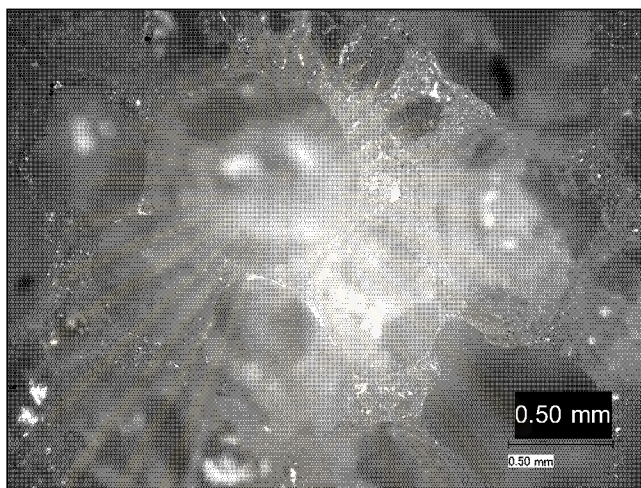
ความพรุนตัวของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ได้แสดงค่าทางสถิติไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าทางสถิติของความพรุนตัวของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

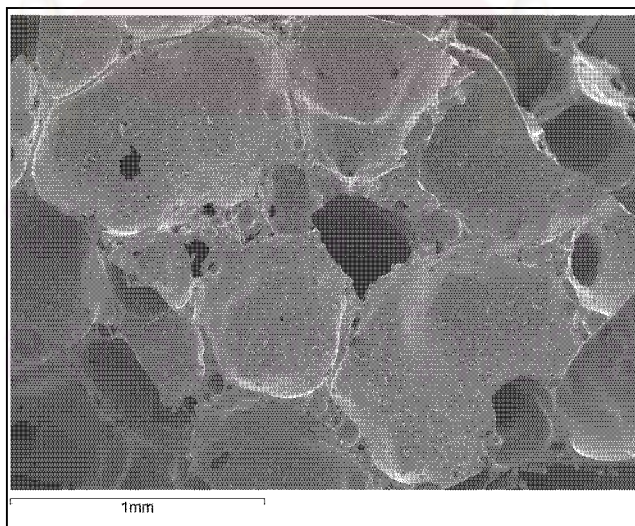
ค่าทางสถิติ	ค่า
ค่าสูงสุด (%)	90.76
ค่าต่ำสุด (%)	89.22
ค่าเฉลี่ย (%)	90.36
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.662
สัมประสิทธิ์ความแปรผัน	0.73%

4.1.2.4 ขนาดรูพรุน (Pore size)

ขนาดรูพรุนของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย วัดจากภาพถ่ายซึ่งพบว่ามีขนาด 0.5 ถึง 1.0 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 โดยถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ชิ้นงานถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 20 เท่า



รูปที่ 4.3 ชิ้นงานถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งที่กำลังขยาย 50 เท่า

4.1.3 ผลการศึกษาคุณลักษณะเชิงกล (Mechanical properties characterization)

จากการศึกษาคุณลักษณะเชิงกลของวัสดุที่นำมาวิจัย มีรายละเอียด ดังนี้

4.1.3.1 ความทนแรงอัด (Compressive strength)

ความทนแรงอัดของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าทางสถิติของความทนแรงอัดของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ค่าทางสถิติ	ค่า
ค่าสูงสุด (MPa)	0.776
ค่าต่ำสุด (MPa)	0.541
ค่าเฉลี่ย (MPa)	0.649
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.092
สัมประสิทธิ์ความแปรผัน	14.22%

4.1.3.2 ความทนแรงดัดโค้ง (Bending strength)

ความทนแรงดัดโค้งของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าทางสถิติของความทนแรงดัดโค้งของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ค่าทางสถิติ	ค่า
ค่าสูงสุด (MPa)	2.195
ค่าต่ำสุด (MPa)	1.775
ค่าเฉลี่ย (MPa)	1.970
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.179
สัมประสิทธิ์ความแปรผัน	9.08%

4.1.3.3 ความเครียดแรงดัดโค้ง (Bending strain)

ความเครียดแรงดัดโค้งของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย แสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าทางสถิติของความเครียดแรงดัดโค้งของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ค่าทางสถิติ	ค่า
ค่าสูงสุด (mm/mm)	0.009
ค่าต่ำสุด (mm/mm)	0.004
ค่าเฉลี่ย (mm/mm)	0.006
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.002
สัมประสิทธิ์ความแปรผัน	31.07%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ผลการทดลอง

จากแผนการดำเนินการและขั้นตอนการทดลองที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 นั้น ทำให้ได้ผลตอบสนองการเจียรดังนี้

4.2.1 การเกิดรูปทรงของชิ้นงาน (Shape)

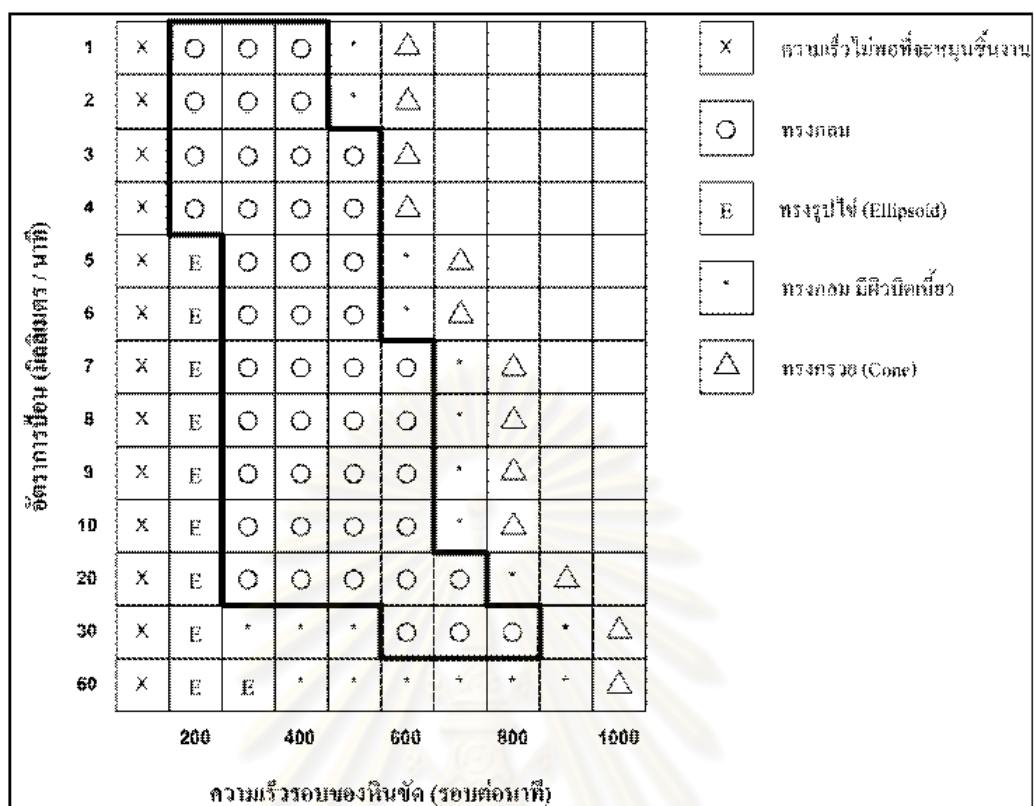
การพิจารณารูปทรงของชิ้นงานหลังการเจียร ได้ใช้คุณสมบัติของทรงกลมที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 นั้น พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเจียรนั้น มีรูปทรงเกิดขึ้นแตกต่างกันไป โดยสามารถระบุได้เป็น 4 รูปทรง ดังนี้ (ภาพถ่ายของรูปทรงชิ้นงานหลังการเจียร ดังรูปที่ 4.4)

1. ทรงรูปไข่ (Oval) หรือ ทรงรี (Ellipsoid)
2. ทรงกลม (Sphere)
3. ทรงกลมที่มีผิวบิดเบี้ยว (Distorted sphere)
4. ทรงกรวย (Cone)

จากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยระหว่าง ความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน พบว่า จะทำให้เกิดขอบเขตของปัจจัยที่สามารถเจียรขึ้นรูปทรงกลมได้ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ลักษณะรูปทรงชิ้นงานหลังการเจียร



รูปที่ 4.5 รูปทรงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเจียร ที่ความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ

จากผลการทดลองสามารถแยกช่วงของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานที่สามารถเจียรขึ้นรูปทรงกลม ได้ดังนี้

- (1) ความเร็วรอบงานขัด 200 รอบต่อนาที สามารถเจียรขึ้นรูปทรงกลมที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 4 มิลลิเมตรต่อนาที
- (2) ความเร็วรอบงานขัด 300 ถึง 400 รอบต่อนาที สามารถเจียรขึ้นรูปทรงกลมที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 20 มิลลิเมตรต่อนาที
- (3) ความเร็วรอบงานขัด 500 รอบต่อนาที สามารถเจียรขึ้นรูปทรงกลมที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 3 ถึง 20 มิลลิเมตรต่อนาที
- (4) ความเร็วรอบงานขัด 600 รอบต่อนาที สามารถเจียรขึ้นรูปทรงกลมที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 7 ถึง 30 มิลลิเมตรต่อนาที
- (5) ความเร็วรอบงานขัด 700 รอบต่อนาที สามารถเจียรขึ้นรูปทรงกลมที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 20 ถึง 30 มิลลิเมตรต่อนาที

- (6) ความเร็วรอบจานชุด 800 รอบต่อนาที สามารถเจียรขึ้นรูปทรงกลมที่อัตราการป้อน
ชิ้นงาน 30 มิลลิเมตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาในแต่ละอัตราการป้อนชิ้นงาน เมื่อเพิ่มความเร็วรอบจานชุดแนวโน้มของ
รูปทรงชิ้นงานที่ได้หลังจากเจียร สามารถจำแนกความแตกต่างได้ดังนี้

- (1) ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 2 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อเพิ่มความเร็วรอบจานชุด จะได้
ชิ้นงานทรงกลม ทรงกลมมีผิวบิดเบี้ยว และทรงกรวย ตามลำดับ
- (2) ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 3 ถึง 4 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อเพิ่มความเร็วรอบจานชุด จะได้
ชิ้นงานทรงกลม และทรงกรวย ตามลำดับ
- (3) ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 5 ถึง 20 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อเพิ่มความเร็วรอบจานชุด จะ
ได้ชิ้นงานทรงรูปไข่ ทรงกลม ทรงกลมมีผิวบิดเบี้ยว และทรงกรวย ตามลำดับ
- (4) ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 30 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อเพิ่มความเร็วรอบจานชุด จะได้
ชิ้นงานทรงรูปไข่ ทรงกลมมีผิวบิดเบี้ยว ทรงกลม ทรงกลมมีผิวบิดเบี้ยว และทรง
กรวย ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม (Diameter)

เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานหลังการเจียร จะพิจารณาเฉพาะชิ้นงานที่มีรูปทรงเป็นทรงกลม โดยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลมแล้วนำมาคำนวณค่าเฉลี่ย ซึ่งได้แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละชิ้นงาน ดังในตารางที่ 4.8 และนำค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยทั้ง 3 ชุดทดสอบมาคำนวณค่าเฉลี่ย ดังในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 เส้นผ่านศูนย์กลางและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชิ้นงานทั้ง 3 ชุดทดสอบ

อัตราการป้อน ชิ้นงาน (มม. / นาที)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)						
	ความเร็วรอบงานขีด (รอบต่อนาที)						
	200	300	400	500	600	700	800
	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD
1	20.19 ± 0.05	20.17 ± 0.12	20.00 ± 0.06				
2	20.46 ± 0.08	20.19 ± 0.06	20.13 ± 0.06				
3	20.10 ± 0.06	20.14 ± 0.06	20.24 ± 0.06	20.08 ± 0.05			
4	20.27 ± 0.13	20.29 ± 0.06	20.20 ± 0.05	20.02 ± 0.05			
5		20.02 ± 0.07	19.91 ± 0.07	20.13 ± 0.05			
6		19.93 ± 0.09	20.14 ± 0.07	20.12 ± 0.06			
7		20.14 ± 0.09	20.05 ± 0.06	20.26 ± 0.04	20.17 ± 0.04		
8		20.10 ± 0.21	19.86 ± 0.07	20.07 ± 0.06	20.39 ± 0.06		
9		20.13 ± 0.15	20.12 ± 0.08	20.12 ± 0.05	20.13 ± 0.09		
10		20.05 ± 0.13	20.29 ± 0.08	20.58 ± 0.16	20.45 ± 0.07		
20		20.06 ± 0.17	20.00 ± 0.08	19.95 ± 0.08	19.96 ± 0.07	19.98 ± 0.09	
30					20.07 ± 0.16	20.02 ± 0.06	19.97 ± 0.07
1	20.09 ± 0.07	20.10 ± 0.06	20.46 ± 0.06				
2	20.13 ± 0.08	20.43 ± 0.10	20.26 ± 0.06				
3	20.27 ± 0.09	20.66 ± 0.07	20.45 ± 0.06	20.45 ± 0.09			
4	20.11 ± 0.06	20.51 ± 0.06	20.48 ± 0.10	20.51 ± 0.07			
5		20.24 ± 0.05	20.24 ± 0.09	20.22 ± 0.05			
6		20.48 ± 0.06	20.49 ± 0.07	20.37 ± 0.09			
7		20.42 ± 0.11	20.49 ± 0.06	20.47 ± 0.05	20.16 ± 0.47		
8		20.22 ± 0.04	20.49 ± 0.04	20.20 ± 0.07	20.33 ± 0.12		
9		20.25 ± 0.08	20.44 ± 0.08	20.47 ± 0.06	20.40 ± 0.13		
10		20.49 ± 0.06	20.46 ± 0.07	20.46 ± 0.04	20.14 ± 0.07		
20		20.06 ± 0.08	20.09 ± 0.05	20.11 ± 0.07	20.06 ± 0.07	20.08 ± 0.09	
30					20.02 ± 0.05	20.05 ± 0.07	20.12 ± 0.21
1	20.35 ± 0.05	20.60 ± 0.06	20.23 ± 0.08				
2	20.57 ± 0.05	20.56 ± 0.07	20.35 ± 0.06				
3	20.56 ± 0.06	20.30 ± 0.08	20.48 ± 0.11	20.01 ± 0.46			
4	20.75 ± 0.49	20.63 ± 0.13	20.52 ± 0.10	20.45 ± 0.18			
5		20.54 ± 0.13	20.30 ± 0.06	20.48 ± 0.09			
6		20.26 ± 0.09	20.53 ± 0.15	20.51 ± 0.09			
7		20.53 ± 0.09	20.55 ± 0.08	20.25 ± 0.05	20.37 ± 0.11		
8		20.68 ± 0.24	20.30 ± 0.04	20.48 ± 0.15	20.32 ± 0.19		
9		20.61 ± 0.14	20.46 ± 0.09	20.41 ± 0.20	20.15 ± 0.07		
10		20.61 ± 0.15	20.43 ± 0.05	20.27 ± 0.04	20.40 ± 0.08		
20		20.33 ± 0.41	20.11 ± 0.08	20.04 ± 0.08	20.07 ± 0.06	20.07 ± 0.05	
30					20.01 ± 0.07	20.01 ± 0.06	19.95 ± 0.11

หมายเหตุ พื้นที่ว่างในตาราง คือ บริเวณที่ชิ้นงานหลังการเจียรไม่เป็นทรงกลม

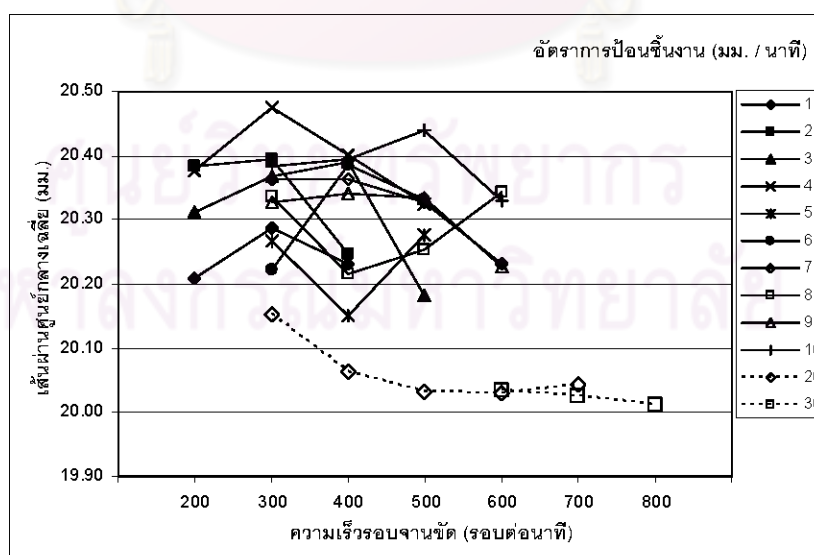
ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม

อัตราการป้อน (มม. / นาที)	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)						
	ความเร็วรอบงานขัด (รอบต่อนาที)						
	200	300	400	500	600	700	800
(มม. / นาที)	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD
1	20.21 ± 0.13	20.29 ± 0.27	20.23 ± 0.23				
2	20.38 ± 0.23	20.39 ± 0.19	20.25 ± 0.11				
3	20.31 ± 0.23	20.37 ± 0.26	20.39 ± 0.13	20.18 ± 0.24			
4	20.38 ± 0.33	20.48 ± 0.17	20.40 ± 0.18	20.33 ± 0.27			
5		20.27 ± 0.26	20.15 ± 0.21	20.28 ± 0.18			
6		20.22 ± 0.28	20.39 ± 0.22	20.33 ± 0.20			
7		20.36 ± 0.20	20.36 ± 0.27	20.33 ± 0.12	20.23 ± 0.12		
8		20.34 ± 0.31	20.22 ± 0.32	20.25 ± 0.21	20.34 ± 0.04		
9		20.33 ± 0.25	20.34 ± 0.19	20.33 ± 0.19	20.23 ± 0.15		
10		20.38 ± 0.30	20.39 ± 0.09	20.44 ± 0.15	20.33 ± 0.16		
20		20.15 ± 0.15	20.06 ± 0.06	20.03 ± 0.08	20.03 ± 0.06	20.04 ± 0.07	
30					20.03 ± 0.03	20.03 ± 0.07	20.01 ± 0.13

หมายเหตุ พื้นที่ว่างในตาราง คือ บริเวณที่ชิ้นงานหลังการเจียรไม่เป็นทรงกลม

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยมีค่า 19.86 ถึง 20.75 มิลลิเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทั้งหมดเท่ากับ 20.27 ± 0.21 มิลลิเมตร ที่ขอบเขตความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ ดังตารางที่ 4.8

เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังรูปที่ 4.6 พบว่า ที่อัตราการป้อนชิ้นงานระหว่าง 20 และ 30 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างออกไปจากอัตราการป้อนชิ้นงานอื่น โดยได้วิเคราะห์ความแตกต่างในหัวข้อการวิเคราะห์ผลการทดลอง



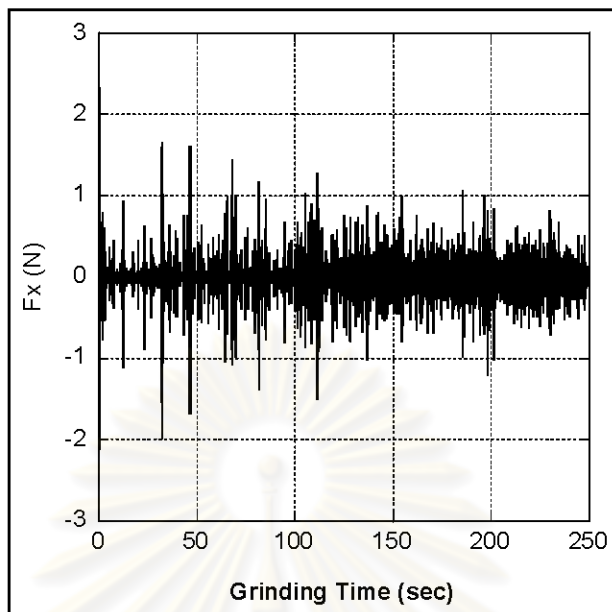
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชิ้นงานทรงกลม กับความเร็วรอบงานขัด ที่อัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ

4.2.3 แรงในแนวเส้นสัมผัส (Tangential force; F_t)

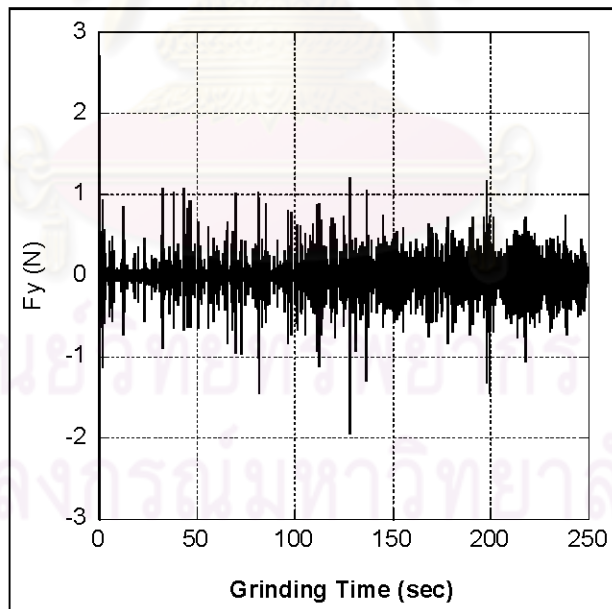
แรงในแนวเส้นสัมผัสที่นำมาพิจารณานี้ จะพิจารณาเฉพาะแรงที่เกิดจากการเฉื่อยขึ้นงานที่มีรูปทรงเป็นทรงกลมและมีขนาดตามที่ต้องการเท่านั้น โดยนำเสนอในรูปแบบค่ารากกำลังสองเฉลี่ยซึ่งได้มาจากการคำนวณในบทที่ 3 แล้ว ทั้งนี้ได้แสดงตัวอย่างของแรงในแนวแกน x และ y ที่เกิดขึ้นระหว่างการเฉื่อยขึ้นงานทรงกลมที่ความเร็วรอบงานขัด 300 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนขึ้นงาน 2 มิลลิเมตรต่อนาที ในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ซึ่งพบว่า แรงในแนวแกน x และ y ไม่มีรูปแบบการเกิดแรงที่แน่นอน ซึ่งขึ้นอยู่กับจังหวะที่ขึ้นงานโดนกระทำด้วยแรงจากอนุภาคของวัสดุขัดสีของกระดาษทราย

สำหรับค่าของแรงในแนวเส้นสัมผัสที่เกิดจากการเฉื่อยขึ้นงานเพื่อให้ได้ขึ้นงานทรงกลมที่มีขนาดตามที่ต้องการนั้นได้แสดงในตารางที่ 4.10 และแสดงค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ชุดทดสอบในตารางที่ 4.11

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 แรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน x ขณะเจียรที่ความเร็วรอบจานขัด 300 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนชิ้นงาน 2 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.8 แรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน y ขณะเจียรที่ความเร็วรอบจานขัด 300 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนชิ้นงาน 2 มิลลิเมตรต่อนาที

ตารางที่ 4.10 แรงในแนวเส้นสัมผัสทั้ง 3 ชุดทดสอบ

อัตราการบิน ขึ้นงาน (มม. / นาที)	แรงในแนวเส้นสัมผัส (Ft rms) (N)				
	ความเร็วรอบงานชุด (รอบต่อนาที)				
	200	300	400	500	600
1	0.173	0.151	0.101		
2	0.255	0.154	0.137		
3	0.286	0.205	0.153	0.146	
4	0.363	0.214	0.222	0.227	
5		0.278	0.234	0.278	
6		0.270	0.262	0.281	
7		0.321	0.280	0.262	0.219
8		0.373	0.311	0.304	0.230
9		0.242	0.223	0.214	0.271
10		0.249	0.366	0.274	0.299
1	0.117	0.122	0.131		
2	0.180	0.180	0.201		
3	0.225	0.188	0.247	0.153	
4	0.243	0.229	0.289	0.194	
5		0.246	0.334	0.219	
6		0.269	0.394	0.220	
7		0.293	0.456	0.257	0.196
8		0.390	0.483	0.278	0.237
9		0.396	0.499	0.277	0.402
10		0.502	0.510	0.357	0.380
1	0.165	0.121	0.092		
2	0.236	0.170	0.145		
3	0.309	0.197	0.181	0.167	
4	0.343	0.241	0.202	0.223	
5		0.236	0.226	0.257	
6		0.273	0.261	0.269	
7		0.301	0.318	0.324	0.155
8		0.318	0.301	0.409	0.202
9		0.306	0.293	0.346	0.184
10		0.364	0.389	0.423	0.216

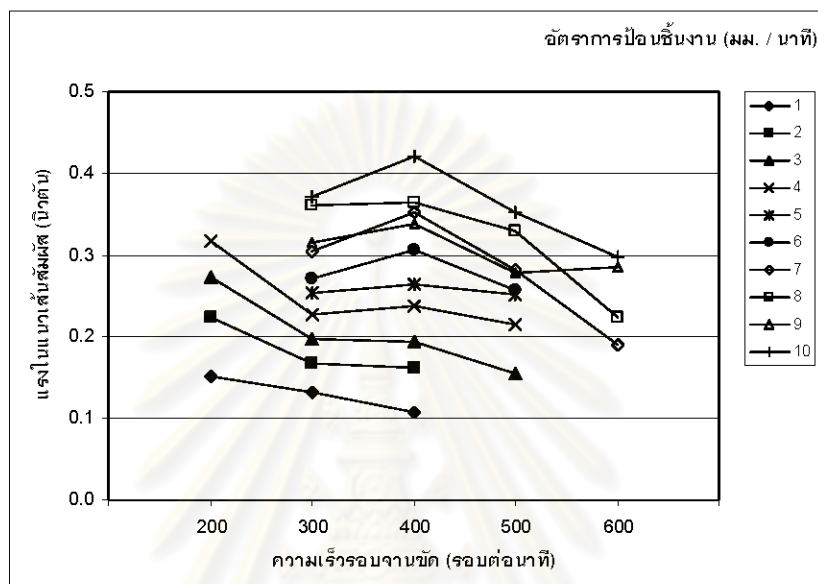
หมายเหตุ พื้นที่ว่างในตาราง คือ บริเวณที่ขึ้นงานหลังการเจียรไม่เป็นทรงกลม

ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยของแรงในแนวเส้นสัมผัส

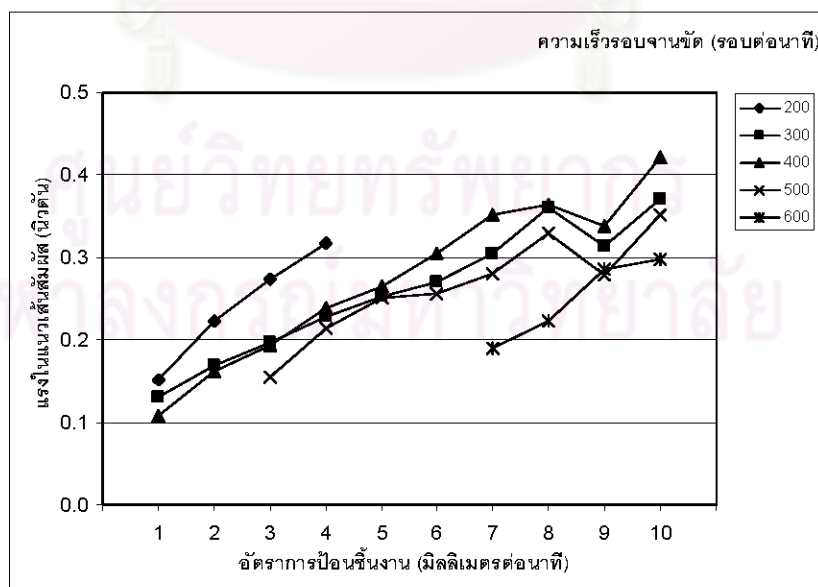
อัตราการบิน ขึ้นงาน (มม. / นาที)	ค่าเฉลี่ยแรงในแนวเส้นสัมผัส (Ft rms) (N)									
	ความเร็วรอบงานชุด (รอบต่อนาที)									
	200		300		400		500		600	
	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD
1	0.152 ± 0.030	0.131 ± 0.017	0.108 ± 0.021							
2	0.224 ± 0.039	0.168 ± 0.013	0.161 ± 0.035							
3	0.274 ± 0.043	0.197 ± 0.008	0.194 ± 0.049	0.155 ± 0.011						
4	0.316 ± 0.064	0.228 ± 0.014	0.238 ± 0.045	0.215 ± 0.018						
5		0.253 ± 0.022	0.265 ± 0.060	0.251 ± 0.030						
6		0.271 ± 0.002	0.305 ± 0.077	0.257 ± 0.032						
7		0.305 ± 0.015	0.351 ± 0.092	0.281 ± 0.037	0.190 ± 0.032					
8		0.360 ± 0.037	0.365 ± 0.102	0.330 ± 0.069	0.223 ± 0.019					
9		0.314 ± 0.077	0.338 ± 0.143	0.279 ± 0.066	0.285 ± 0.110					
10		0.372 ± 0.127	0.422 ± 0.077	0.352 ± 0.075	0.298 ± 0.082					

หมายเหตุ พื้นที่ว่างในตาราง คือ บริเวณที่ขึ้นงานหลังการเจียรไม่เป็นทรงกลม

แรงในแนวเส้นสัมผัสที่เกิดขึ้นจากการเฉื่อยเพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกลมที่มีขนาดที่ต้องการนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.092 ถึง 0.510 นิวตัน ที่ขอบเขตความเร็วรอบจวนขีดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ ดังตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัส กับความเร็วรอบจวนขีดที่อัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัส กับอัตราการป้อนชิ้นงานที่ความเร็วรอบจวนขีดต่างๆ

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 เมื่อมีการเปลี่ยนความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน ส่งผลให้แรงแนวเส้นสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อความเร็วรอบจานขัดคงที่ และเพิ่มอัตราการป้อนชิ้นงานทำให้แรงในแนวเส้นสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ ทำให้แรงในแนวสัมผัสมีแนวโน้มลดต่ำลง เมื่อเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 400 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนชิ้นงาน 1 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้แรงในแนวเส้นสัมผัสมีค่าที่ต่ำที่สุด

จากรูปที่ 4.9 การเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 400 รอบต่อนาที เมื่ออัตราการป้อนเพิ่มขึ้น ทำให้ส่วนต่างระหว่างแรงที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบจานขัด 300 กับ 400 รอบต่อนาทีเปลี่ยนไป คือ

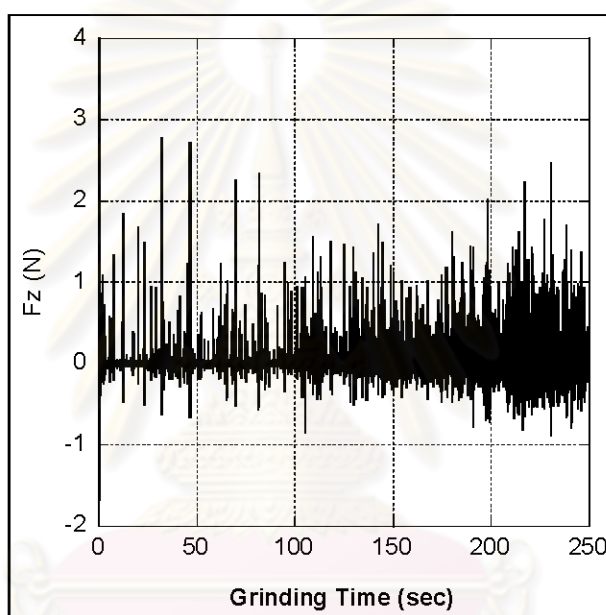
- (1) เมื่ออัตราการป้อน 1 มิลลิเมตรต่อนาที แรงที่เกิดขึ้นจากความเร็วรอบจานขัด 400 รอบต่อนาทีจะมีค่าน้อยกว่าแรงที่เกิดขึ้นจากความเร็วรอบจานขัด 300 รอบต่อนาที
- (2) เมื่ออัตราการป้อน 2 และ 3 มิลลิเมตรต่อนาที แรงที่เกิดขึ้นจากความเร็วรอบจานขัด 400 รอบต่อนาทีจะมีค่าใกล้เคียงกับแรงที่เกิดขึ้นจากความเร็วรอบจานขัด 300 รอบต่อนาที
- (3) เมื่ออัตราการป้อน 4 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที แรงที่เกิดขึ้นจากความเร็วรอบจานขัด 400 รอบต่อนาทีจะมีค่ามากกว่าแรงที่เกิดขึ้นจากความเร็วรอบจานขัด 300 รอบต่อนาที และจะมีส่วนต่างที่สุดที่อัตราการป้อน 10 มิลลิเมตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.10 การเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 300 ถึง 500 รอบต่อนาที แรงในแนวเส้นสัมผัสที่เกิดขึ้น ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 9 มิลลิเมตรต่อนาที จะมีน้อยกว่า ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 8 มิลลิเมตรต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.4 แรงกดปกติ (Normal force; F_n)

แรงในแนวเส้นสัมผัสที่นำมาพิจารณานี้ จะพิจารณาเฉพาะแรงที่เกิดจากการเจียรชิ้นงานที่มีรูปทรงเป็นทรงกลมและมีขนาดตามที่ต้องการเท่านั้น โดยนำเสนอในรูปแบบค่ารากกำลังสองเฉลี่ยซึ่งได้มาจากการคำนวณในบทที่ 3 ทั้งนี้ได้แสดงตัวอย่างของแรงในแนวแกน z ที่เกิดขึ้นระหว่างการเจียรชิ้นงานทรงกลมที่ความเร็วรอบงานขัด 300 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนชิ้นงาน 2 มิลลิเมตรต่อนาที ในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน z ขณะเจียรที่ความเร็วรอบงานขัด 300 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนชิ้นงาน 2 มิลลิเมตรต่อนาที

ค่าของแรงกดปกติที่เกิดจากการเจียรชิ้นงานเพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกลมที่มีขนาดตามที่ต้องการนั้นได้แสดงในตารางที่ 4.12 และแสดงค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ชุดทดสอบในตารางที่ 4.13

แรงกดปกติที่เกิดจากการเจียรเพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกลมอยู่ระหว่าง 0.078 ถึง 0.568 นิวตัน ที่ขอบเขตความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 แรงกดปกติทั้ง 3 ชุดทดสอบ

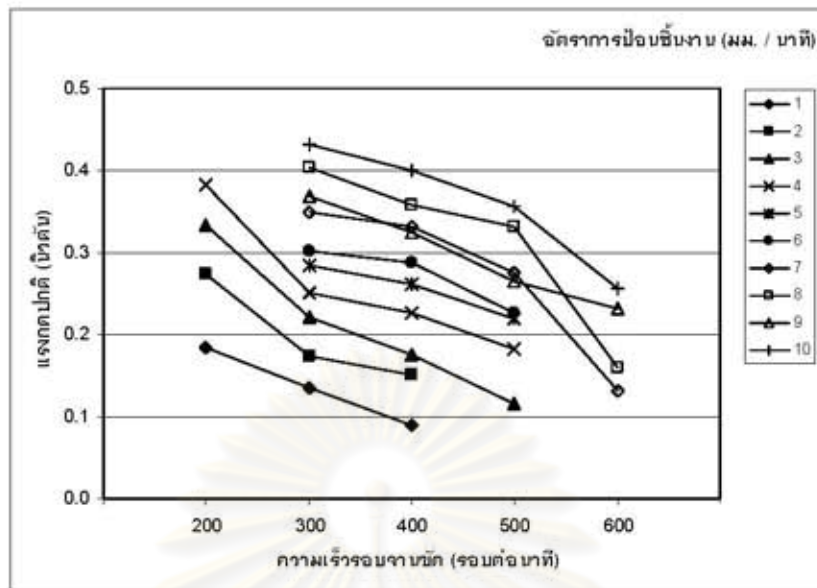
อัตราการบิน ขึ้นงาน (มม./นาที)	แรงกดปกติ (Fn rms) (N)				
	ความเร็วรอบงานชุด (รอบต่อนาที)				
	200	300	400	500	600
1	0.215	0.176	0.092		
2	0.338	0.177	0.150		
3	0.391	0.233	0.177	0.139	
4	0.439	0.248	0.223	0.210	
5		0.318	0.238	0.268	
6		0.311	0.268	0.292	
7		0.382	0.277	0.302	0.194
8		0.429	0.351	0.343	0.233
9		0.281	0.212	0.200	0.268
10		0.293	0.379	0.292	0.279
1	0.135	0.113	0.097		
2	0.204	0.161	0.178		
3	0.241	0.218	0.195	0.099	
4	0.285	0.250	0.259	0.165	
5		0.270	0.326	0.180	
6		0.285	0.349	0.164	
7		0.344	0.429	0.230	0.098
8		0.449	0.456	0.291	0.131
9		0.488	0.472	0.284	0.286
10		0.568	0.461	0.362	0.350
1	0.202	0.117	0.078		
2	0.282	0.180	0.126		
3	0.368	0.209	0.152	0.108	
4	0.423	0.257	0.197	0.171	
5		0.265	0.222	0.209	
6		0.310	0.243	0.224	
7		0.320	0.289	0.293	0.104
8		0.333	0.267	0.361	0.114
9		0.335	0.287	0.310	0.140
10		0.434	0.363	0.416	0.139

หมายเหตุ พื้นที่ว่างในตาราง คือ บริเวณที่ขึ้นงานหลังการเจียรไม่เป็นทรงกลม

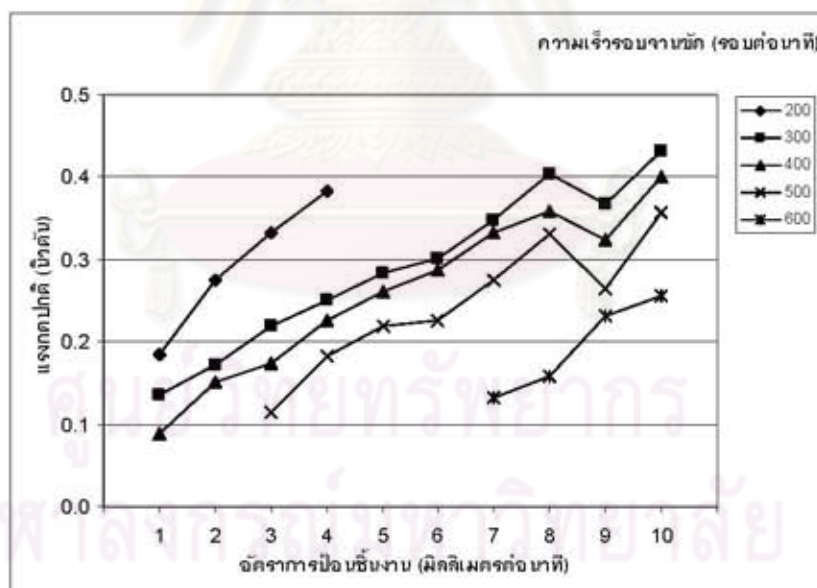
ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยของแรงกดปกติ

อัตราการบิน ขึ้นงาน (มม. / นาที)	ค่าเฉลี่ยแรงกดปกติ (Fn rms) (N)				
	ความเร็วรอบงานชุด (รอบต่อนาที)				
	200	300	400	500	600
	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD
1	0.184 ± 0.043	0.135 ± 0.036	0.089 ± 0.010		
2	0.275 ± 0.068	0.173 ± 0.010	0.151 ± 0.026		
3	0.334 ± 0.081	0.220 ± 0.012	0.175 ± 0.021	0.115 ± 0.021	
4	0.383 ± 0.085	0.252 ± 0.005	0.226 ± 0.031	0.182 ± 0.024	
5		0.284 ± 0.029	0.262 ± 0.056	0.219 ± 0.045	
6		0.302 ± 0.015	0.287 ± 0.055	0.227 ± 0.064	
7		0.349 ± 0.031	0.332 ± 0.085	0.275 ± 0.039	0.132 ± 0.054
8		0.404 ± 0.062	0.358 ± 0.095	0.332 ± 0.037	0.159 ± 0.065
9		0.368 ± 0.107	0.324 ± 0.134	0.265 ± 0.057	0.232 ± 0.080
10		0.431 ± 0.138	0.401 ± 0.053	0.357 ± 0.062	0.256 ± 0.108

หมายเหตุ พื้นที่ว่างในตาราง คือ บริเวณที่ขึ้นงานหลังการเจียรไม่เป็นทรงกลม



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดปกติ กับความเร็วรอบจานขัด
ที่จัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดปกติ กับจัตราการป้อนชิ้นงาน
ที่ความเร็วรอบจานขัดต่างๆ

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 เมื่อมีการเปลี่ยนความเร็วรอบจันซ์และอัตราการป้อนชิ้นงาน ส่งผลให้แรงกดปกติมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อความเร็วรอบจันซ์คงที่ และเพิ่มอัตราการป้อนชิ้นงานทำให้แรงกดปกติมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ ทำให้แรงกดปกติมีแนวโน้มลดต่ำลง เมื่อเจียรที่ความเร็วรอบจันซ์ 400 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนชิ้นงาน 1 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้แรงกดปกติมีค่าที่ต่ำที่สุด

จากรูปที่ 4.13 การเจียรด้วยความเร็วรอบจันซ์ 300 ถึง 500 รอบต่อนาที แรงกดปกติที่เกิดขึ้น ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 9 มิลลิเมตรต่อนาที จะมีน้อยกว่า ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 8 มิลลิเมตรต่อนาที



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.5 อัตราส่วนแรง (Force ratio; Ft / Fn)

อัตราส่วนแรง ได้คำนวณมาจาก แรงในแนวเส้นสัมผัสและแรงกดปกติ ได้แสดงค่าไว้ใน ตารางที่ 4.14 และแสดงค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ชุดทดสอบในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.14 อัตราส่วนแรงทั้ง 3 ชุดทดสอบ

อัตราการป้อน ชิ้นงาน (มม. / นาที)	อัตราส่วนแรง (Ft/Fn)				
	ความเร็วรอบงานขัด (รอบต่อนาที)				
	200	300	400	500	600
1	0.805	0.857	1.101		
2	0.753	0.871	0.916		
3	0.732	0.877	0.864	1.050	
4	0.826	0.863	0.997	1.078	
5		0.877	0.981	1.035	
6		0.868	0.974	0.963	
7		0.842	1.010	0.870	1.130
8		0.869	0.884	0.886	0.987
9		0.859	1.054	1.069	1.010
10		0.852	0.967	0.938	1.072
1	0.864	1.081	1.351		
2	0.883	1.118	1.130		
3	0.936	0.863	1.268	1.544	
4	0.852	0.916	1.116	1.174	
5		0.909	1.025	1.215	
6		0.944	1.127	1.343	
7		0.852	1.061	1.117	2.001
8		0.868	1.059	0.955	1.814
9		0.811	1.056	0.974	1.403
10		0.884	1.105	0.987	1.084
1	0.814	1.037	1.173		
2	0.839	0.941	1.151		
3	0.839	0.941	1.186	1.545	
4	0.810	0.937	1.029	1.303	
5		0.889	1.017	1.228	
6		0.881	1.073	1.199	
7		0.940	1.101	1.106	1.493
8		0.955	1.128	1.131	1.779
9		0.913	1.020	1.116	1.312
10		0.840	1.073	1.017	1.558

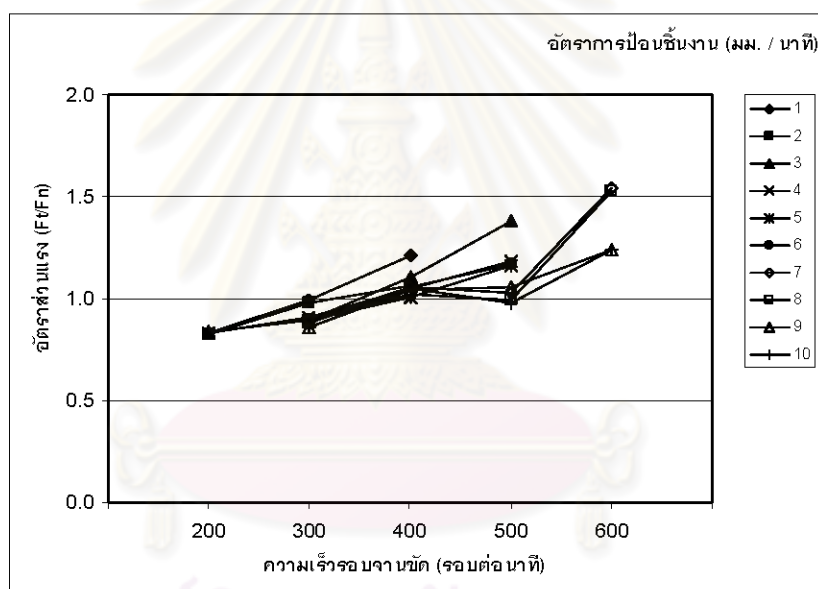
หมายเหตุ พื้นที่ว่างในตาราง คือ บริเวณที่ชิ้นงานหลังการเจียรไม่เป็นทรงกลม

อัตราส่วนแรงที่เกิดจากการเจียรเพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกลมอยู่ระหว่าง 0.732 ถึง 2.001 ที่ขอบเขตความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ ดังตารางที่ 4.14

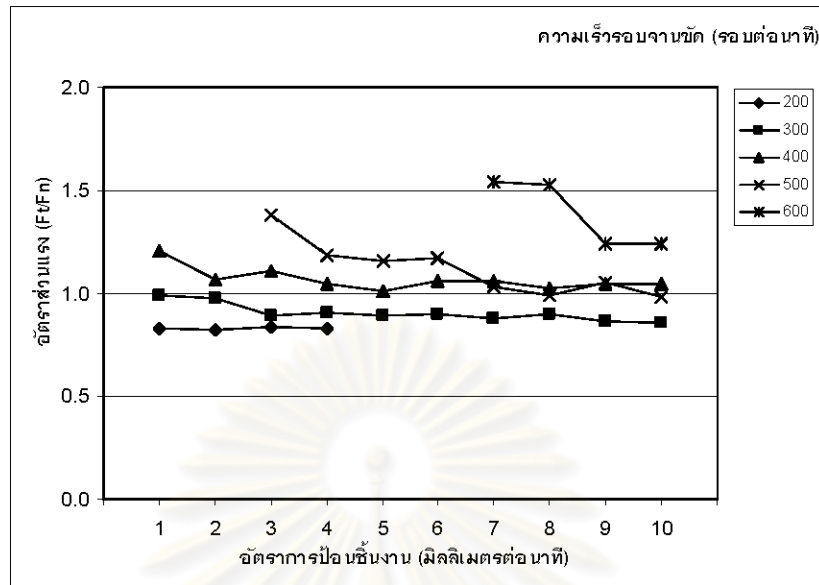
ตารางที่ 4.15 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนแรง

อัตราการป้อน ชิ้นงาน (มม. / นาที)	ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนแรง (F _v /F _n)									
	ความเร็วรอบงานขีด (รอบต่อนาที)									
	200		300		400		500		600	
	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD
1	0.828 ± 0.032	0.992 ± 0.119	1.209 ± 0.129							
2	0.825 ± 0.066	0.977 ± 0.127	1.066 ± 0.130							
3	0.836 ± 0.102	0.894 ± 0.042	1.106 ± 0.213	1.380 ± 0.286						
4	0.830 ± 0.021	0.905 ± 0.038	1.047 ± 0.062	1.185 ± 0.113						
5		0.892 ± 0.016	1.008 ± 0.023	1.160 ± 0.108						
6		0.898 ± 0.041	1.058 ± 0.077	1.169 ± 0.192						
7		0.878 ± 0.054	1.057 ± 0.046	1.031 ± 0.140	1.541 ± 0.438					
8		0.897 ± 0.050	1.024 ± 0.126	0.991 ± 0.126	1.527 ± 0.468					
9		0.861 ± 0.051	1.044 ± 0.020	1.053 ± 0.073	1.242 ± 0.206					
10		0.859 ± 0.023	1.048 ± 0.072	0.981 ± 0.040	1.238 ± 0.277					

หมายเหตุ พื้นที่ว่างในตาราง คือ บริเวณที่ชิ้นงานหลังการเจียรไม่เป็นทรงกลม



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรง กับความเร็วรอบงานขีด
ที่อัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ



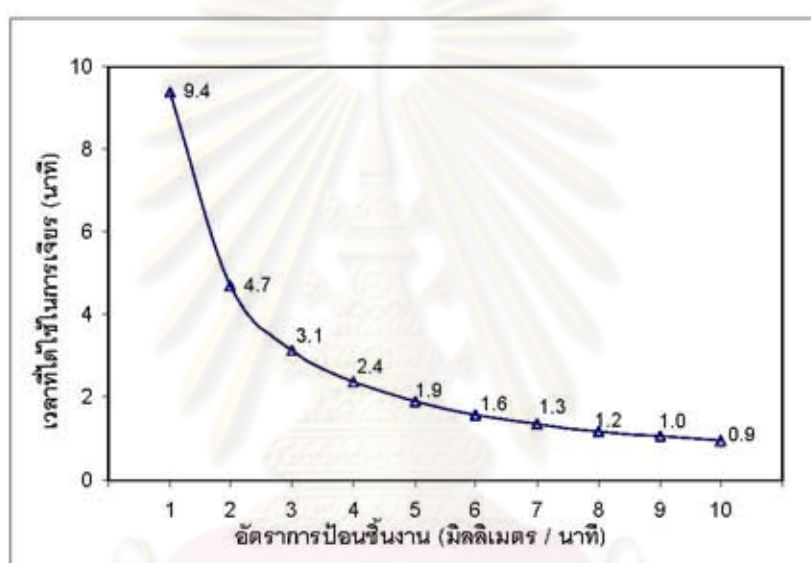
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรง กับอัตราการป้อนชิ้นงาน
ที่ความเร็วรอบจวนซัดต่างๆ

จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 ที่ความเร็วรอบจวนซัด 200 รอบต่อนาที การเพิ่มอัตราการป้อนชิ้นงาน ส่งผลให้อัตราส่วนแรงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่ที่ความเร็วรอบจวนซัดที่สูงขึ้น คือ 500 และ 600 รอบต่อนาที การเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อน ทำให้อัตราส่วนแรงมีการเปลี่ยนแปลงไปมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.6 อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก (Material removal rate; MRR)

การพิจารณาอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก จะพิจารณาเฉพาะการเจียรที่ได้ชิ้นงานที่มีรูปทรงเป็นทรงกลมและมีขนาดตามที่ได้ออกแบบไว้เท่านั้น โดยสามารถคำนวณได้จากสมการในบทที่ 3 จากอัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนชิ้นงานกับเวลาที่ใช้ในการเจียร ดังรูปที่ 4.16 สำหรับค่าของอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออกได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.16 และแสดงค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ชุดทดสอบในตารางที่ 4.17



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนชิ้นงานกับเวลาที่ใช้ในการเจียร

ตารางที่ 4.16 อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออกในการเจียรขึ้นรูปชิ้นงานทรงกลม

อัตราการป้อน ชิ้นงาน (มม. / นาที)	อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก (mm ³ /min)				
	ความเร็วรอบงานขัด (รอบต่อนาที)				
	200	300	400	500	600
1	474.92	492.51	529.35		
2	978.75	1009.36	958.35		
3	1446.87	1394.45	1349.35	1451.16	
4	1890.58	1602.13	1934.67	1942.06	
5		2380.49	2626.61	2539.61	
6		3101.25	3081.63	2790.02	
7		3109.47	3575.53	3094.99	3294.03
8		3548.73	3974.14	3666.28	3824.16
9		4142.80	4082.69	4508.28	4405.32
10		4795.66	4659.53	4434.98	4924.80
1	512.30	546.19	547.68		
2	990.62	1014.77	1046.96		
3	1411.80	1481.84	1535.02	1499.07	
4	1867.30	1843.23	2007.39	2089.31	
5		2475.66	2472.57	2505.23	
6		2803.44	3078.95	2924.22	
7		3407.19	3801.67	3434.17	3706.61
8		3872.59	3927.55	4313.12	4387.02
9		4763.71	4967.78	4206.47	4642.68
10		5012.70	4450.89	5142.90	5021.39
1	494.24	523.48	519.67		
2	953.32	1079.05	1012.72		
3	1523.39	1612.53	1671.60	1548.33	
4	1845.88	2158.16	2032.12	1946.57	
5		2666.34	2409.23	2472.96	
6		3130.95	2698.67	2907.87	
7		3370.82	3567.35	3386.36	3627.49
8		3725.05	3918.83	4378.73	4078.07
9		4382.62	4648.30	4589.15	4706.06
10		5343.24	4931.41	4843.71	4934.65

หมายเหตุ พื้นที่ว่างในตาราง คือ บริเวณที่ชิ้นงานหลังการเจียรไม่เป็นทรงกลม

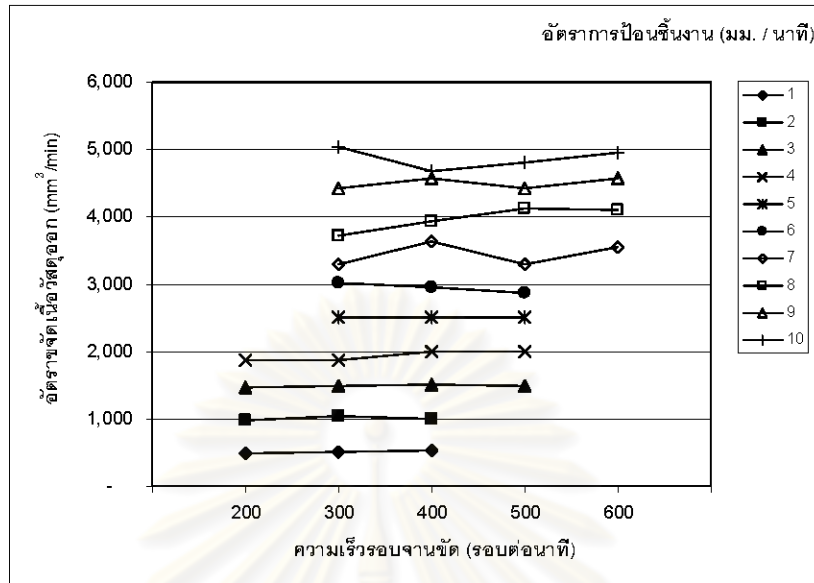
ในการเจียรชิ้นงานทรงลูกบาศก์เพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกลมที่มีขนาดตามที่ต้องการ มีค่าอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออกอยู่ระหว่าง 475 ถึง 5243 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที ที่ขอบเขตความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยของอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก

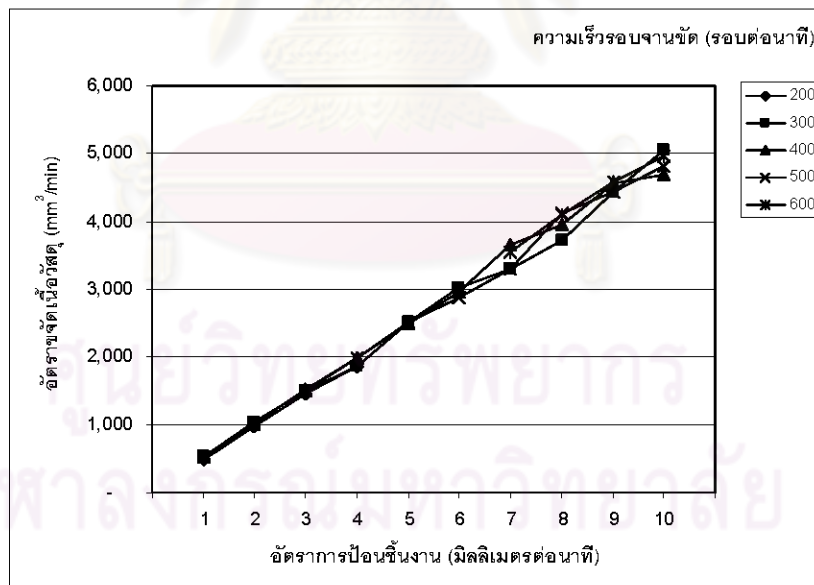
อัตราการป้อน ชิ้นงาน (มม. / นาที)	ค่าเฉลี่ยอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก (mm ³ /min)									
	ความเร็วรอบงานขัด (รอบต่อนาที)									
	200		300		400		500		600	
	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD
1	494 ± 19	521 ± 27	532 ± 14							
2	974 ± 19	1034 ± 39	1006 ± 45							
3	1461 ± 57	1496 ± 110	1519 ± 162			1500 ± 49				
4	1868 ± 22	1868 ± 279	1991 ± 51			1993 ± 84				
5		2507 ± 146	2503 ± 112			2506 ± 33				
6		3012 ± 181	2953 ± 220			2874 ± 73				
7		3296 ± 162	3648 ± 133			3305 ± 184			3543 ± 219	
8		3715 ± 162	3940 ± 30			4119 ± 394			4096 ± 282	
9		4430 ± 313	4566 ± 448			4435 ± 202			4585 ± 159	
10		5051 ± 276	4681 ± 241			4807 ± 355			4960 ± 53	

หมายเหตุ พื้นที่ว่างในตาราง คือ บริเวณที่ชิ้นงานหลังการเจียรไม่เป็นทรงกลม

การเพิ่มอัตราการป้อนชิ้นงานมีผลทำให้อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.18 ในแต่ละอัตราการป้อนชิ้นงาน อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออกมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก กับความเร็วรอบงานตัด ที่อัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก กับอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่ความเร็วรอบงานตัดต่างๆ

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลอง ได้ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติในการศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน ด้วยการทดสอบแบบต่างๆ ดังนี้

- 1) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรแบบสุ่มปกติ (กรณีประชากรเดียว)
- 2) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรแบบสุ่มปกติ (กรณีประชากรสองชุด)
- 3) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากประชากรเดียว

ทั้งนี้ เนื่องจากผลการทดลองที่ได้นั้น ได้ทำการพิจารณาเฉพาะส่วนที่สามารถเจาะลึกชิ้นงานทรงกลมได้เท่านั้น จึงทำให้ผลของอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานบางส่วนไม่ได้นำมาพิจารณา ดังนั้น การทดสอบด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจาก 2 ปัจจัย (Two factors ANOVA) จึงไม่สามารถใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ได้

4.3.1 ผลของอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง

การศึกษาผลของอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

- 1) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรแบบสุ่มปกติ (กรณีประชากรสองชุด)

จากผลการทดลองสามารถใช้การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรแบบสุ่มปกติ (กรณีประชากรสองชุด) ได้ใน 2 กรณี ดังนี้

- 1.1) กรณีประชากรสองชุดระหว่างกลุ่มอัตราการป้อนชิ้นงาน 2 กลุ่ม
- 1.2) กรณีประชากรสองชุดระหว่างกลุ่มความเร็วรอบงานขัดที่แตกต่างกัน

1.1) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย กรณีประชากรสองชุด ระหว่างอัตราการ
ป้อนชิ้นงาน 2 กลุ่ม มีรายละเอียดดังนี้

จากผลการทดลอง สามารถแยกกลุ่มชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยได้เป็น 2 กลุ่ม คือ
กลุ่มที่ 1 อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที และกลุ่มที่ 2 อัตราการป้อนชิ้นงาน 20
และ 30 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อนำค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชิ้นงานทั้ง 2 กลุ่ม มาวิเคราะห์
ทางสถิติ โดยการทดสอบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม มีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

เมื่อ μ_1 = ค่าเฉลี่ยของประชากรกลุ่มที่ 1 (อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 10
มิลลิเมตรต่อนาที)
 μ_2 = ค่าเฉลี่ยของประชากรกลุ่มที่ 2 (อัตราการป้อนชิ้นงาน 20 และ 30
มิลลิเมตรต่อนาที)

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม

	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2
ค่าเฉลี่ย	20.32	20.05
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.19	0.08
จำนวนตัวอย่าง	108	24
ค่าทางสถิติที่ทดสอบได้	16.9	
ช่วงที่ยอมรับ H_0 ได้	$-1.96 \leq Z \leq 1.96$	
ผลการทดสอบ	ปฏิเสธ H_0	

จากตารางที่ 4.18 สามารถพิสูจน์ได้ว่า ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทั้ง 2
กลุ่มคือ ชิ้นงานที่ผ่านการเจียรด้วยอัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที และ ชิ้นงานที่
ผ่านการเจียรด้วยอัตราการป้อนชิ้นงาน 20 ถึง 30 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลาง
ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ดังนั้น ในการวิเคราะห์และพิจารณา ในส่วนต่อไป จะทำการพิจารณาเพียงแค่กลุ่มชิ้นงาน
ทรงกลมที่สามารถขึ้นรูปได้ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วรอบ
งานขีด 200 ถึง 600 รอบต่อนาที เท่านั้น

1.2) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย กรณีประชากรสองชุด ระหว่างกลุ่มความเร็วรอบงานชุดที่แตกต่างกัน มีรายละเอียดดังนี้

การทดสอบค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของ 2 กลุ่มตัวอย่าง สามารถทำได้โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานที่ความเร็วรอบงานชุดนั้นกับความเร็วรอบงานชุดถัดไป เช่น ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความเร็วรอบงานชุด 200 รอบต่อนาทีเทียบกับความเร็วรอบงานชุด 300 รอบต่อนาที เป็นต้น โดยมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \mu_i = \mu_{i+100}$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_{i+100}$$

เมื่อ μ_i = ค่าเฉลี่ยของประชากรกลุ่มความเร็วรอบงานชุดที่ i
 i = ความเร็วรอบงานชุดที่ 200 300 400 และ 500 รอบต่อนาที

สำหรับผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.19 พบว่า ยอมรับสมมติฐานหลักในทุกการเปรียบเทียบ ซึ่งหมายถึง ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางในแต่ละกลุ่มความเร็วรอบงานชุดมีค่าเท่ากัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในทุกการเปรียบเทียบ

2) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากประชากรเดียว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยเดี่ยวของเส้นผ่านศูนย์กลาง สามารถวิเคราะห์ได้ 2 ประเด็น มีรายละเอียดดังนี้

2.1) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วรอบงานชุด

2.2) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงาน

2.1) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วรอบงานชุด

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วรอบงานชุดที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ โดยพิจารณาค่า F และ P-value ที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับค่า F ได้จากข้อมูลการกระจายตัวแบบ F และ P-value ซึ่งเท่ากับ 0.05 โดยกำหนดให้ค่า $\alpha = 0.05$ มีสมมติฐานดังนี้

H_0 : ความเร็วรอบงานชุดที่พิจารณาไม่มีผลกระทบ

H_1 : ความเร็วรอบงานชุดที่พิจารณามีผลกระทบ

สำหรับผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.19 โดยพิจารณาทั้งค่า F และ P-value พบว่า ทุกการเปรียบเทียบยอมรับสมมติฐานหลัก แสดงว่า ที่อัตราการป้อนชิ้นงานใดๆ สำหรับ ความเร็วรอบงานชุดที่เปลี่ยนแปลงไปนั้น ไม่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม ในทุก อัตราการป้อนชิ้นงาน

2.2) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงาน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อ ความเร็วรอบคงที่ โดยพิจารณาค่า F และ P-value ที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับค่า F ได้จาก ข้อมูลการกระจายตัวแบบ F และ P-value ซึ่งเท่ากับ 0.05 โดยกำหนดให้ ค่า $\alpha = 0.05$ มี สมมติฐานดังนี้

H_0 : อัตราการป้อนชิ้นงานที่พิจารณาไม่มีผลกระทบ

H_1 : อัตราการป้อนชิ้นงานที่พิจารณามีผลกระทบ

สำหรับผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.19 โดยพิจารณาทั้งค่า F และ P-value พบว่า ทุกการเปรียบเทียบยอมรับสมมติฐานหลัก แสดงว่า ที่ความเร็วรอบงานชุดใดๆ สำหรับ อัตราการป้อนชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปนั้น ไม่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลมอย่าง มีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในทุกความเร็วรอบงานชุด

ดังนั้น จึงทำการทดสอบค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของ 2 กลุ่มตัวอย่างที่ความเร็ว รอบต่างๆ เพื่อพิสูจน์ว่า ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความเร็วรอบต่าง ๆ จะมีค่าเท่ากันหรือไม่

3) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรแบบสุ่มปกติ (กรณี ประชากรเดียว)

การพิสูจน์ว่า ชิ้นงานทรงกลมที่ได้ในแต่ละความเร็วรอบงานชุดนั้น มีค่าตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ ได้ใช้การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรแบบสุ่มปกติ (กรณีประชากร เดียว) โดยสมมติฐานได้ดังนี้

$$H_0 : \mu = 20.30$$

$$H_1 : \mu \neq 20.30$$

เมื่อ μ = ค่าเฉลี่ยของกลุ่มประชากร

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.19 พบว่า ในทุกกลุ่มยอมรับสมมติฐานหลัก แสดงว่า ชิ้นงานทรงกลมในแต่ละกลุ่มความเร็วรอบจานซ์มีเส้นผ่านศูนย์กลางตามที่ได้ออกแบบไว้ ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95%



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม

อัตราการป้อน ชิ้นงาน (มม. / นาที)	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)					ค่าทางสถิติ				ผลการวิเคราะห์ที่ 1 ¹				
	ความเร็วรอบงานขัด (รอบต่อนาที)					Min	Max	Mean	SD	F-table $\alpha=0.05$	F	P-value		
	200	300	400	500	600									
1	20.21 ± 0.13	20.29 ± 0.27	20.23 ± 0.23			20.21	20.29	20.24	0.04	5.14	0.11	accept	0.90	accept
2	20.38 ± 0.23	20.39 ± 0.19	20.25 ± 0.11			20.25	20.39	20.34	0.08	5.14	0.62	accept	0.57	accept
3	20.31 ± 0.23	20.37 ± 0.26	20.39 ± 0.13	20.18 ± 0.24		20.18	20.39	20.31	0.09	4.07	0.54	accept	0.67	accept
4	20.38 ± 0.33	20.48 ± 0.17	20.40 ± 0.18	20.33 ± 0.27		20.33	20.48	20.39	0.06	4.07	0.19	accept	0.90	accept
5		20.27 ± 0.26	20.15 ± 0.21	20.28 ± 0.18		20.15	20.28	20.23	0.07	5.14	0.31	accept	0.75	accept
6		20.22 ± 0.28	20.39 ± 0.22	20.33 ± 0.20		20.22	20.39	20.31	0.08	5.14	0.39	accept	0.70	accept
7		20.36 ± 0.20	20.36 ± 0.27	20.33 ± 0.12	20.23 ± 0.12	20.23	20.36	20.32	0.06	4.07	0.31	accept	0.82	accept
8		20.34 ± 0.31	20.22 ± 0.32	20.25 ± 0.21	20.34 ± 0.04	20.22	20.34	20.29	0.06	4.07	0.20	accept	0.90	accept
9		20.33 ± 0.25	20.34 ± 0.19	20.33 ± 0.19	20.23 ± 0.15	20.23	20.34	20.31	0.05	4.07	0.22	accept	0.88	accept
10		20.38 ± 0.30	20.39 ± 0.09	20.44 ± 0.15	20.33 ± 0.16	20.33	20.44	20.39	0.04	4.07	0.16	accept	0.92	accept
ค่าทางสถิติ	Min	20.21	20.22	20.15	20.18	20.23								
	Max	20.38	20.48	20.40	20.44	20.34								
	Mean	20.32	20.34	20.31	20.31	20.28								
	SD	0.08	0.07	0.09	0.07	0.06								
ผลการวิเคราะห์ที่ 2 ²	F-table $\alpha=0.05$	4.07	2.39	2.39	2.66	4.07								
	F	0.34	0.24	0.59	0.42	0.72								
	accept	accept	accept	accept	accept	accept								
	$\alpha=0.05$ P-value	0.80	0.98	0.79	0.87	0.57								
accept	accept	accept	accept	accept	accept									
ผลการวิเคราะห์ที่ 3 ³	$\alpha=0.05$ Z	-0.83	1.49	0.17	1.21									
	$-1.96 \leq Z \leq 1.96$	accept	accept	accept	accept									
ผลการวิเคราะห์ที่ 4 ⁴	$\alpha=0.05$ Z	0.87	3.40	0.76	0.59	-1.11								
	$-1.96 \leq Z \leq 1.96$	accept	reject	accept	accept	accept								

หมายเหตุ

*¹การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วรอบงานขัด ของ 3 ชุดทดสอบ*²การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงาน ของ 3 ชุดทดสอบ*³การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย กรณีประชากรสองชุด ระหว่างกลุ่มความเร็วรอบงานขัดที่แตกต่างกัน ของ 3 ชุดทดสอบ*⁴การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรแบบสุ่มปกติ (กรณีประชากรเดียว) ของ 3 ชุดทดสอบ

4.3.2 ผลของอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่อแรง ในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง

การศึกษาผลของอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

1) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากประชากรเดียว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยเดียวของแรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และ อัตราส่วนแรง สามารถวิเคราะห์ได้ 2 ประเด็น มีรายละเอียดดังนี้

- 1.1) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วรอบงานขัด
- 1.2) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงาน

1.1) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วรอบงานขัด

ก. แรงในแนวเส้นสัมผัส

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วรอบงานขัดที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ โดยพิจารณาค่า F และ P-value ที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับค่า F ได้จากข้อมูลการกระจายตัวแบบ F และ P-value ซึ่งเท่ากับ 0.05 โดยกำหนดให้ ค่า $\alpha = 0.05$ มีสมมติฐานดังนี้

H_0 : ความเร็วรอบงานขัดที่พิจารณาไม่มีผลกระทบ

H_1 : ความเร็วรอบงานขัดที่พิจารณามีผลกระทบ

สำหรับผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.20 โดยพิจารณาทั้งค่า F และ P-value พบว่า ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 3 และ 7 มิลลิเมตรต่อนาทีเท่านั้นที่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก หรือกล่าวได้ว่า เฉพาะที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 3 และ 7 มิลลิเมตรต่อนาทีเท่านั้น ที่ความเร็วรอบงานขัดมีผลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ข. แรกกดปกติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วรอบงานชุดที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ โดยพิจารณาค่า F และ P-value ที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับค่า F ได้จากข้อมูลการกระจายตัวแบบ F และ P-value ซึ่งเท่ากับ 0.05 โดยกำหนดให้ ค่า $\alpha = 0.05$ มีสมมติฐานดังนี้

H_0 : ความเร็วรอบงานชุดที่พิจารณาไม่มีผลกระทบ

H_1 : ความเร็วรอบงานชุดที่พิจารณามีผลกระทบ

สำหรับผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.21 โดยพิจารณาทั้งค่า F และ P-value พบว่า ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 4 และ 7 ถึง 8 มิลลิเมตรต่อนาทีเท่านั้นที่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก ซึ่งหมายความว่า ที่อัตราป้อนชิ้นงานอื่นๆ ความเร็วรอบงานชุดมีผลต่อแรกกดปกติ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ค. อัตราส่วนแรง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วรอบงานชุดที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ โดยพิจารณาค่า F และ P-value ที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับค่า F ได้จากข้อมูลการกระจายตัวแบบ F และ P-value ซึ่งเท่ากับ 0.05 โดยกำหนดให้ ค่า $\alpha = 0.05$ มีสมมติฐานดังนี้

H_0 : ความเร็วรอบงานชุดที่พิจารณาไม่มีผลกระทบ

H_1 : ความเร็วรอบงานชุดที่พิจารณามีผลกระทบ

สำหรับผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.22 โดยพิจารณาทั้งค่า F และ P-value พบว่า ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 3 4 5 7 และ 9 มิลลิเมตรต่อนาทีเท่านั้น ที่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก นั่นคือ ที่อัตราป้อนชิ้นงานอื่นๆ ความเร็วรอบงานชุด ไม่มีผลต่ออัตราส่วนแรง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

1.2) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงาน

ก. แรงในแนวเส้นสัมผัส

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อความเร็วรอบคงที่ โดยพิจารณาค่า F และ P -value ที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับค่า F ได้จากข้อมูลการกระจายตัวแบบ F และ P -value ซึ่งเท่ากับ 0.05 โดยกำหนดให้ ค่า $\alpha = 0.05$ มีสมมติฐานดังนี้

H_0 : อัตราการป้อนชิ้นงานที่พิจารณาไม่มีผลกระทบ

H_1 : อัตราการป้อนชิ้นงานที่พิจารณามีผลกระทบ

สำหรับผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.20 โดยพิจารณาทั้งค่า F และ P -value พบว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเร็วรอบงานชุด 200 ถึง 500 รอบต่อนาที ได้ปฏิเสธสมมติฐานหลัก แสดงว่า ที่ความเร็วรอบนั้นๆ เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไป มีผลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเร็วรอบงานชุด 600 รอบต่อนาที ยอมรับสมมติฐานหลัก หมายความว่า เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไป ที่ความเร็วงานชุด 600 รอบต่อนาที จะไม่มีผลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มค่า α ให้เท่ากับ 0.30 จะทำให้สามารถยอมรับสมมติฐานหลัก ในการทดสอบทางสถิติทั้งค่า F และ P -value

ข. แรงกดปกติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อความเร็วรอบคงที่ โดยพิจารณาค่า F และ P -value ที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับค่า F ได้จากข้อมูลการกระจายตัวแบบ F และ P -value ซึ่งเท่ากับ 0.05 โดยกำหนดให้ ค่า $\alpha = 0.05$ มีสมมติฐานดังนี้

H_0 : อัตราการป้อนชิ้นงานที่พิจารณาไม่มีผลกระทบ

H_1 : อัตราการป้อนชิ้นงานที่พิจารณามีผลกระทบ

สำหรับผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.21 โดยพิจารณาทั้งค่า F และ P -value พบว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเร็วรอบงานชุด 200 ถึง 500 รอบต่อนาที ปฏิเสธ

สมมติฐานหลัก แสดงว่า ที่ความเร็วรอบนั้นๆ เมื่ออัตราการป้อนเปลี่ยนแปลงไป มีผลต่อแรงกดปกตಿಯ่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเร็รรอบจานขัด 600 รอบต่อนาที ยอมรับสมมติฐานหลัก หมายความว่า เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไป ที่ความเร็วรอบจานขัด 600 รอบต่อนาที จะไม่มีผลต่อแรงกดปกตಿಯ่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มค่า α ให้เท่ากับ 0.26 จะทำให้สามารถยอมรับสมมติฐานหลัก ในการทดสอบทางสถิติทั้งค่า F และ P-value

ค. อัตราส่วนแรง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อความเร็วรอบคงที่ โดยพิจารณาค่า F และ P-value ที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับค่า F ได้จากข้อมูลการกระจายตัวแบบ F และ P-value ซึ่งเท่ากับ 0.05 โดยกำหนดให้ ค่า $\alpha = 0.05$ มีสมมติฐานดังนี้

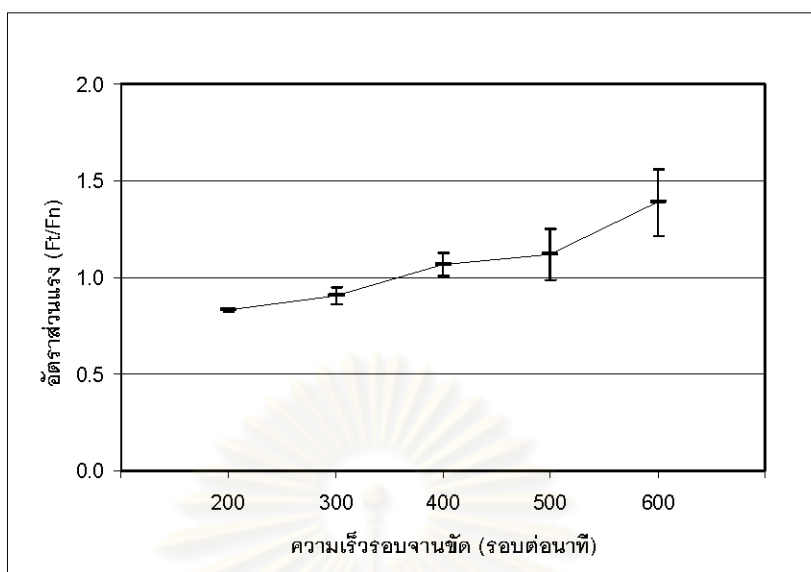
H_0 : อัตราการป้อนชิ้นงานที่พิจารณาไม่มีผลกระทบ

H_1 : อัตราการป้อนชิ้นงานที่พิจารณา มีผลกระทบ

สำหรับผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.22 โดยพิจารณาทั้งค่า F และ P-value พบว่า ยอมรับสมมติฐานหลักในทุกการทดสอบ นั่นคือ ที่ความเร็วรอบจานขัดใดๆ สำหรับอัตราการป้อนชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปนั้น ไม่มีผลต่ออัตราส่วนแรงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในทุกความเร็วรอบจานขัด

เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานไม่มีผลต่ออัตราส่วนแรงแล้ว สามารถนำค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนแรง มาสร้างความสัมพันธ์กับความเร็วรอบจานขัด ดังรูปที่ 4.19 พบว่าที่ความเร็วรอบจานขัด 200 ถึง 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนแรงจะมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำ

เมื่อพบว่าอัตราการป้อนชิ้นงานไม่มีผลต่ออัตราส่วนแรง จากนั้นได้ทำการทดสอบค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนแรงในแต่ละความเร็วรอบจานขัด เพื่อพิสูจน์ว่า ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนแรงในแต่ละความเร็วรอบจานขัด มีค่าเท่ากันหรือไม่ ซึ่งจะกล่าวถึงในต่อไปในส่วนของการการทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย กรณีประชากรสองชุด ระหว่างกลุ่มความเร็วรอบจานขัดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรง กับความเร็วรอบจานซัด

2) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย กรณีประชากรสองชุด ระหว่างกลุ่มความเร็วรอบจานซัดที่แตกต่างกัน

การทดสอบค่าเฉลี่ยอัตราส่วนแรงของ 2 กลุ่มตัวอย่าง สามารถทำได้โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนแรงที่ความเร็วรอบจานซัดนั้นกับความเร็วรอบจานซัดถัดไป เช่น ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนแรงที่ความเร็วรอบจานซัด 200 รอบต่อนาทีเทียบกับความเร็วรอบจานซัด 300 รอบต่อนาที เป็นต้น โดยมีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \mu_i = \mu_{i+100}$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_{i+100}$$

เมื่อ μ_i = ค่าเฉลี่ยของประชากรกลุ่มความเร็วรอบจานซัดที่ i
 i = ความเร็วรอบจานซัดที่ 200 300 400 และ 500 รอบต่อนาที

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.22 พบว่า การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนแรงระหว่างความเร็วรอบจานซัด 400 กับ 500 รอบต่อนาที ยอมรับสมมติฐานหลัก นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนแรงมีค่าแตกต่างกันเกือบทุกกลุ่ม ยกเว้นการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มความเร็วรอบจานซัด 400 กับ 500 รอบต่อนาที ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของแรงในแนวเส้นสัมผัส

อัตราการป้อน ชิ้นงาน (มม. / นาที)	ค่าเฉลี่ยแรงในแนวสัมผัส (Ft rms) (N)					ค่าทางสถิติ				ผลการวิเคราะห์ 1 ^{*1}				
	ความเร็วรอบงานขัด (รอบต่อนาที)					Min	Max	Mean	SD	F-table $\alpha=0.05$	F	P-value		
	200	300	400	500	600									
1	0.152 ± 0.030	0.131 ± 0.017	0.108 ± 0.021			0.108	0.152	0.130	0.022	5.14	2.64	accept	0.15	accept
2	0.224 ± 0.039	0.168 ± 0.013	0.161 ± 0.035			0.161	0.224	0.184	0.034	5.14	3.65	accept	0.09	accept
3	0.274 ± 0.043	0.197 ± 0.008	0.194 ± 0.049	0.155 ± 0.011		0.194	0.274	0.221	0.045	4.07	6.67	reject	0.01	reject
4	0.316 ± 0.064	0.228 ± 0.014	0.238 ± 0.045	0.215 ± 0.018		0.228	0.316	0.261	0.048	4.07	3.74	accept	0.06	accept
5		0.253 ± 0.022	0.265 ± 0.060	0.251 ± 0.030		0.253	0.265	0.259	0.008	5.14	0.09	accept	0.91	accept
6		0.271 ± 0.002	0.305 ± 0.077	0.257 ± 0.032		0.271	0.305	0.288	0.025	5.14	0.83	accept	0.48	accept
7		0.305 ± 0.015	0.351 ± 0.092	0.281 ± 0.037	0.190 ± 0.032	0.305	0.351	0.328	0.033	4.07	4.92	reject	0.03	reject
8		0.360 ± 0.037	0.365 ± 0.102	0.330 ± 0.069	0.223 ± 0.019	0.360	0.365	0.363	0.003	4.07	3.09	accept	0.09	accept
9		0.314 ± 0.077	0.338 ± 0.143	0.279 ± 0.066	0.285 ± 0.110	0.314	0.338	0.326	0.017	4.07	0.21	accept	0.89	accept
10		0.372 ± 0.127	0.422 ± 0.077	0.352 ± 0.075	0.298 ± 0.082	0.372	0.422	0.397	0.035	4.07	0.91	accept	0.48	accept
ค่าทางสถิติ	Min	0.152	0.131	0.108	0.155	0.190								
	Max	0.316	0.372	0.422	0.352	0.298								
	Mean	0.241	0.260	0.275	0.265	0.249								
	SD	0.071	0.080	0.100	0.062	0.051								
ผลการวิเคราะห์ 2 ^{*2}	F-table $\alpha=0.05$	4.07	2.39	2.39	2.66	4.07								
	F	reject	reject	reject	reject	accept								
	$\alpha=0.05$ P-value	0.01	0.00	0.00	0.00	0.27								

หมายเหตุ *¹การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วรอบงานขัด ของ 3 ชุดทดสอบ

*²การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงาน ของ 3 ชุดทดสอบ

ตารางที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของแรงกดปกติ

อัตราการป้อน ชิ้นงาน (มม. / นาที)	ค่าเฉลี่ยแรงกดปกติ (Fn rms) (N)					ค่าทางสถิติ				ผลการวิเคราะห์ 1 ¹				
	ความเร็วรอบงานขัด (รอบต่อนาที)					Min	Max	Mean	SD	F-table $\alpha=0.05$	F	P-value	P-value	
	200	300	400	500	600									
1	0.184 ± 0.043	0.135 ± 0.036	0.089 ± 0.010			0.089	0.184	0.136	0.048	5.14	6.38	reject	0.03	reject
2	0.275 ± 0.088	0.173 ± 0.010	0.151 ± 0.026			0.151	0.275	0.200	0.066	5.14	7.36	reject	0.02	reject
3	0.334 ± 0.081	0.220 ± 0.012	0.175 ± 0.021	0.115 ± 0.021		0.175	0.334	0.243	0.082	4.07	13.47	reject	0.00	reject
4	0.383 ± 0.085	0.252 ± 0.005	0.226 ± 0.031	0.182 ± 0.024		0.226	0.383	0.287	0.084	4.07	10.16	reject	0.00	reject
5		0.284 ± 0.029	0.262 ± 0.056	0.219 ± 0.045		0.262	0.284	0.273	0.016	5.14	1.65	accept	0.27	accept
6		0.302 ± 0.015	0.287 ± 0.055	0.227 ± 0.064		0.287	0.302	0.294	0.010	5.14	1.93	accept	0.23	accept
7		0.349 ± 0.031	0.332 ± 0.085	0.275 ± 0.039	0.132 ± 0.054	0.332	0.349	0.340	0.012	4.07	9.26	reject	0.01	reject
8		0.404 ± 0.062	0.358 ± 0.095	0.332 ± 0.037	0.159 ± 0.065	0.358	0.404	0.381	0.032	4.07	7.49	reject	0.01	reject
9		0.368 ± 0.107	0.324 ± 0.134	0.265 ± 0.057	0.232 ± 0.080	0.324	0.368	0.346	0.031	4.07	1.14	accept	0.39	accept
10		0.431 ± 0.138	0.401 ± 0.053	0.357 ± 0.062	0.256 ± 0.108	0.401	0.431	0.416	0.022	4.07	1.90	accept	0.21	accept
ค่าทางสถิติ	Min	0.184	0.135	0.089	0.115	0.132								
	Max	0.383	0.431	0.401	0.357	0.256								
	Mean	0.294	0.292	0.261	0.246	0.195								
	SD	0.085	0.098	0.099	0.078	0.059								
ผลการวิเคราะห์ 2 ²	F-table $\alpha=0.05$	4.07	2.39	2.39	2.66	4.07								
	F	4.35	7.64	6.55	8.59	1.65								
	P-value	0.04	0.00	0.00	0.00	0.25								

หมายเหตุ

*¹การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วรอบงานขัด ของ 3 ชุดทดสอบ*²การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงาน ของ 3 ชุดทดสอบ

ตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของอัตราส่วนแรง

อัตราการป้อน ชิ้นงาน (มม. / นาที)	ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนแรง (F/Fn)					ค่าทางสถิติ				ผลการวิเคราะห์ 1 ¹		
	ความเร็วรอบงานขัด (รอบต่อนาที)					Min	Max	Mean	SD	F-table $\alpha=0.05$	F	P-value
	200	300	400	500	600							
	Mean \pm SD	Mean \pm SD	Mean \pm SD	Mean \pm SD	Mean \pm SD							
1	0.828 \pm 0.032	0.992 \pm 0.119	1.209 \pm 0.129			0.828	1.209	1.009	0.191	5.14	10.36 reject	0.01 reject
2	0.825 \pm 0.066	0.977 \pm 0.127	1.066 \pm 0.130			0.825	1.066	0.956	0.122	5.14	3.55 accept	0.10 accept
3	0.836 \pm 0.102	0.894 \pm 0.042	1.106 \pm 0.213	1.380 \pm 0.286		0.836	1.106	0.945	0.142	4.07	5.23 reject	0.03 reject
4	0.830 \pm 0.021	0.905 \pm 0.038	1.047 \pm 0.062	1.185 \pm 0.113		0.830	1.047	0.927	0.111	4.07	16.11 reject	0.00 reject
5		0.892 \pm 0.016	1.008 \pm 0.023	1.160 \pm 0.108		0.892	1.008	0.950	0.082	5.14	13.03 reject	0.01 reject
6		0.898 \pm 0.041	1.058 \pm 0.077	1.169 \pm 0.192		0.898	1.058	0.978	0.113	5.14	3.75 accept	0.09 accept
7		0.878 \pm 0.054	1.057 \pm 0.046	1.031 \pm 0.140	1.541 \pm 0.438	0.878	1.057	0.967	0.127	4.07	4.59 reject	0.04 reject
8		0.897 \pm 0.050	1.024 \pm 0.126	0.991 \pm 0.126	1.527 \pm 0.468	0.897	1.024	0.961	0.089	4.07	3.80 accept	0.06 accept
9		0.861 \pm 0.051	1.044 \pm 0.020	1.053 \pm 0.073	1.242 \pm 0.206	0.861	1.044	0.952	0.129	4.07	5.74 reject	0.02 reject
10		0.859 \pm 0.023	1.048 \pm 0.072	0.981 \pm 0.040	1.238 \pm 0.277	0.859	1.048	0.953	0.134	4.07	3.58 accept	0.07 accept
ค่าทางสถิติ	Min	0.825	0.859	1.008	0.981	1.238						
	Max	0.836	0.992	1.209	1.380	1.541						
	Mean	0.830	0.905	1.067	1.119	1.387						
	SD	0.004	0.045	0.056	0.133	0.170						
ผลการวิเคราะห์ 2 ²	F-table $\alpha=0.05$	4.07	2.39	2.39	2.66	4.07						
	F	0.02 accept	1.36 accept	0.84 accept	2.30 accept	0.65 accept						
	P-value	1.00 accept	0.27 accept	0.59 accept	0.08 accept	0.60 accept						
ผลการวิเคราะห์ 3 ³	$\alpha=0.05$											
	Z -1.96 \leq Z \leq 1.96	-9.62 reject	-12.92 reject	-1.89 accept	-5.64 reject							

หมายเหตุ

*¹การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วรอบงานขัด ของ 3 ชุดทดสอบ*²การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงาน ของ 3 ชุดทดสอบ*³การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย กรณีประชากรสองชุด ระหว่างกลุ่มความเร็วรอบงานขัดที่แตกต่างกัน ของ 3 ชุดทดสอบ

4.3.3 ผลของอิทธิพลของความเร็วยานยนต์และอัตราการป้อนชิ้นงานต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก

การศึกษารูปแบบของอิทธิพลของความเร็วยานยนต์และอัตราการป้อนชิ้นงานต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

1) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากประชากรเดียว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยเดียวของแรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และ อัตราส่วนแรง สามารถวิเคราะห์ได้ 2 ประเด็น มีรายละเอียดดังนี้

- 1.1) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วยานยนต์
- 1.2) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงาน

1.1) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วยานยนต์

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วยานยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ โดยพิจารณาค่า F และ P-value ที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับค่า F ได้จากข้อมูลการกระจายตัวแบบ F และ P-value ซึ่งเท่ากับ 0.05 โดยกำหนดให้ ค่า $\alpha = 0.05$ มีสมมติฐานดังนี้

H_0 : ความเร็วยานยนต์ที่พิจารณาไม่มีผลกระทบ

H_1 : ความเร็วยานยนต์ที่พิจารณามีผลกระทบ

สำหรับผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.23 เมื่อพิจารณาทั้งค่า F และ P-value พบว่า ทุกอัตราการป้อนชิ้นงาน ยอมรับสมมติฐานหลัก นั่นคือ ที่อัตราการป้อนชิ้นงานนั้นๆ ความเร็วยานยนต์ไม่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

1.2) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงาน

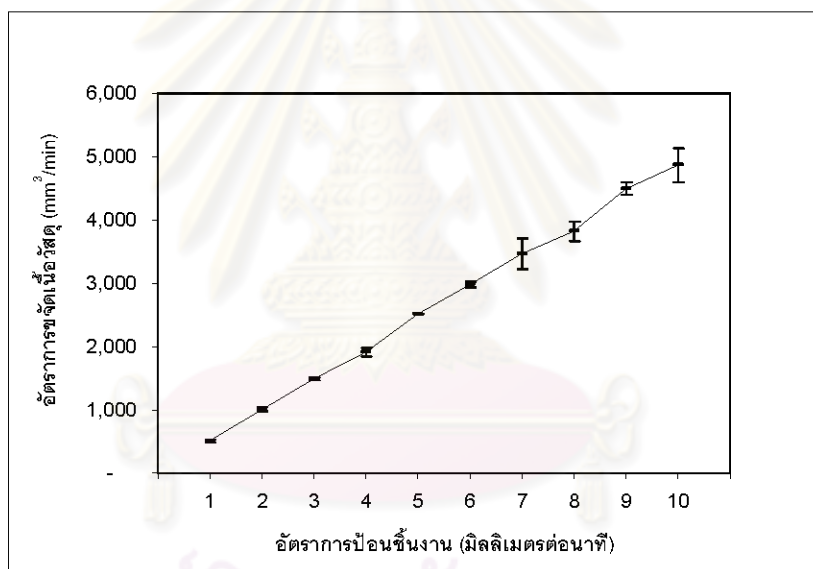
การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อความเร็วยานยนต์คงที่ โดยพิจารณาค่า F และ P-value ที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับค่า F ได้จากข้อมูลการกระจายตัวแบบ F และ P-value ซึ่งเท่ากับ 0.05 โดยกำหนดให้ ค่า $\alpha = 0.05$ มีสมมติฐานดังนี้

H_0 : อัตราการป้อนชิ้นงานที่พิจารณาไม่มีผลกระทบ

H_1 : อัตราการป้อนชิ้นงานที่พิจารณามีผลกระทบ

สำหรับผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.23 โดยพิจารณาทั้งค่า F และ P-value พบว่า ปฏิเสธสมมติฐานหลักที่ทุกการทดสอบ แสดงว่า ที่ความเร็วรอบงานชุดนั้นๆ เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไป ทำให้มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุออกอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อความเร็วรอบงานชุดไม่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุแล้ว สามารถนำค่าเฉลี่ยของอัตราการขจัดเนื้อวัสดุ มาสร้างความสัมพันธ์กับอัตราการป้อนชิ้นงาน ได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก กับอัตราการป้อนชิ้นงาน

ตารางที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก

อัตราการป้อน ชิ้นงาน (มม. / นาที)	ค่าเฉลี่ยอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก (mm ³ /min) ความเร็วรอบงานขัด (รอบ/นาที)					ค่าทางสถิติ				ผลการวิเคราะห์ที่ 1 [*]							
	200		300		400		500		600		Min	Max	Mean	SD	F-table α=0.05	F	P-value
	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD									
1	494 ± 19	521 ± 27	532 ± 14			494	532	516	20	5.14	2.74	accept	0.14	accept			
2	974 ± 19	1034 ± 39	1006 ± 45			974	1034	1005	30	5.14	2.11	accept	0.20	accept			
3	1461 ± 57	1496 ± 110	1519 ± 162	1500 ± 49		1461	1519	1492	29	4.07	0.16	accept	0.92	accept			
4	1868 ± 22	1868 ± 279	1991 ± 51	1993 ± 84		1868	1991	1909	71	4.07	0.70	accept	0.58	accept			
5		2507 ± 146	2503 ± 112	2506 ± 33		2503	2507	2505	3	5.14	0.00	accept	1.00	accept			
6		3012 ± 181	2953 ± 220	2874 ± 73		2953	3012	2982	42	5.14	0.50	accept	0.63	accept			
7		3296 ± 162	3648 ± 133	3305 ± 184	3543 ± 219	3296	3648	3472	249	4.07	2.95	accept	0.10	accept			
8		3715 ± 162	3940 ± 30	4119 ± 394	4096 ± 282	3715	3940	3828	159	4.07	1.59	accept	0.27	accept			
9		4430 ± 313	4566 ± 448	4435 ± 202	4585 ± 159	4430	4566	4498	97	4.07	0.23	accept	0.88	accept			
10		5051 ± 276	4681 ± 241	4807 ± 355	4960 ± 53	4681	5051	4866	262	4.07	1.22	accept	0.36	accept			
ค่าทางสถิติ	Min	494	521	532	1500	3543											
	Max	1868	5051	4681	4807	4960											
	Mean	1199	2693	2734	3192	4296											
	SD	595	1480	1468	1189	614											
ผลการวิเคราะห์ที่ 2 ^{**}	F-table α=0.05	4.07	2.39	2.39	2.66	4.07											
	F	952.17 reject	176.18 reject	175.02 reject	91.36 reject	29.14 reject											
	P-value	0.00 reject	0.00 reject	0.00 reject	0.00 reject	0.00 reject											

หมายเหตุ

*¹การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากความเร็วรอบงานขัด ของ 3 ชุดทดสอบ*²การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงาน ของ 3 ชุดทดสอบ

4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานที่มีผลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง

การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานที่มีผลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง ได้นำผลทดลองที่ได้ในงานวิจัยนี้ มาประมวลผลเพื่อสร้างสมการพยากรณ์

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ พบว่า ความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน มีผลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส และแรงกดปกติ ดังนั้น จึงต้องสร้างสมการด้วยตัวแปรต้น 2 ตัว จากการประมวลผลสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$F_t = 1.46N^{-0.43} f^{0.5} \dots\dots\dots (4.1)$$

$$F_n = 23.5N^{-0.92} f^{0.49} \dots\dots\dots (4.2)$$

- เมื่อ F_t = แรงในแนวเส้นสัมผัส (N)
 F_n = แรงกดปกติ (N)
 N = ความเร็วรอบจานขัด (รอบต่อนาที)
 f = อัตราการป้อนชิ้นงาน (มิลลิเมตรต่อนาที)

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน จากสมการที่ 4.1 ภายใต้เงื่อนไขของความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานที่สามารถเจาะชิ้นงานทรงกลมให้ได้ขนาดที่ต้องการ ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2) เท่ากับ 0.584 นั่นคือ 58.4% ของการเปลี่ยนแปลงแรงในแนวเส้นสัมผัส เป็นผลเนื่องมาจากความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน และจากสมการ ที่ 4.1 พบว่า อัตราการป้อนชิ้นงานจะมีอิทธิพลมากกว่าความเร็วรอบจานขัด โดยเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนชิ้นงานจะทำให้แรงในแนวเส้นสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบจานขัดจะทำให้แรงในแนวเส้นสัมผัสมีค่าลดลง

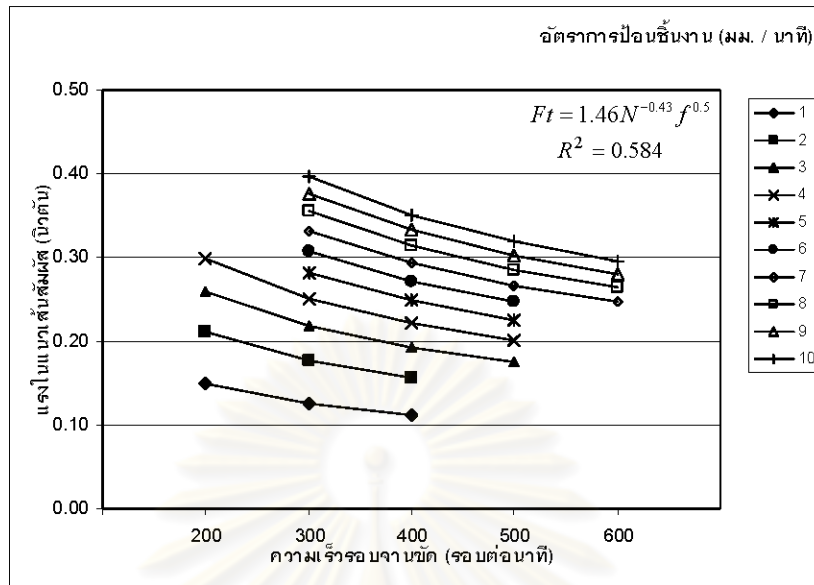
เมื่อพิจารณาสมการที่ 4.2 ภายใต้เงื่อนไขของความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานที่สามารถเจาะชิ้นงานทรงกลมให้ได้ขนาดที่ต้องการ ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.589 นั่นคือ 58.9% ของการเปลี่ยนแปลงแรงกดปกติ เป็นผลเนื่องมาจากความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน พบว่า ความเร็วรอบจานขัดจะมีอิทธิพลต่อแรงกด

ปกติมากกว่าอัตราการป้อนชิ้นงาน เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนชิ้นงานจะทำให้แรงกดปกติมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบจานขัดจะทำให้แรงกดปกติมีค่าลดลง

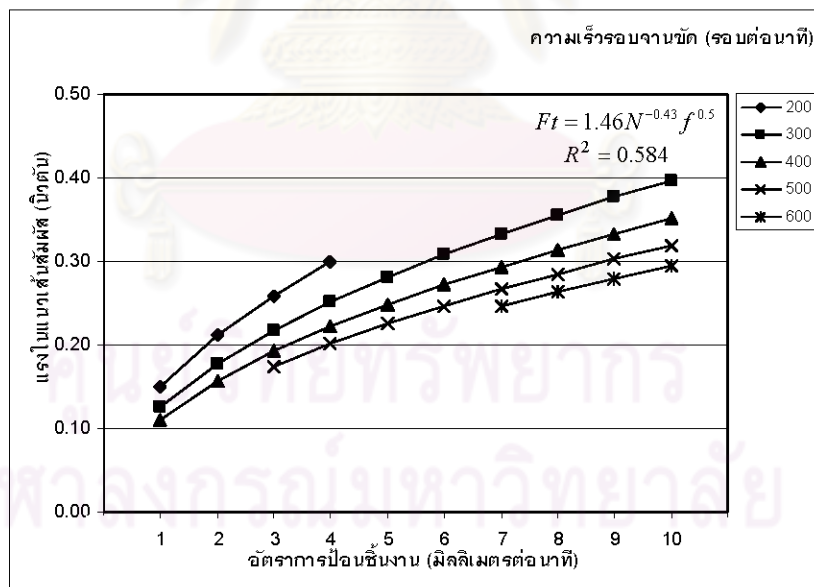
จากสมการที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อแทนค่าด้วยความเร็วรอบจานขัดเท่ากับ 200 ถึง 500 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที ทั้งนี้ได้เลือกเฉพาะค่าของความเร็วรอบจานขัด และอัตราการป้อนชิ้นงานที่สามารถเจาะชิ้นรูชิ้นงานทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตามที่ออกแบบไว้เท่านั้น สามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.21 ถึง 4.24 และพบว่า การเพิ่มความเร็วรอบจานขัดและลดอัตราการป้อนชิ้นงาน ส่งผลให้ทั้งแรงในแนวเส้นสัมผัสและแรงกดปกติมีค่าลดลง



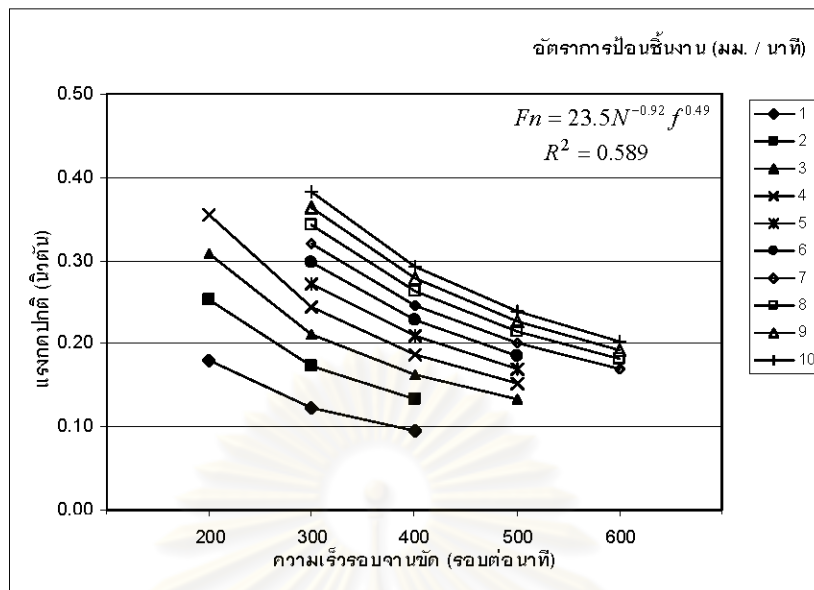
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



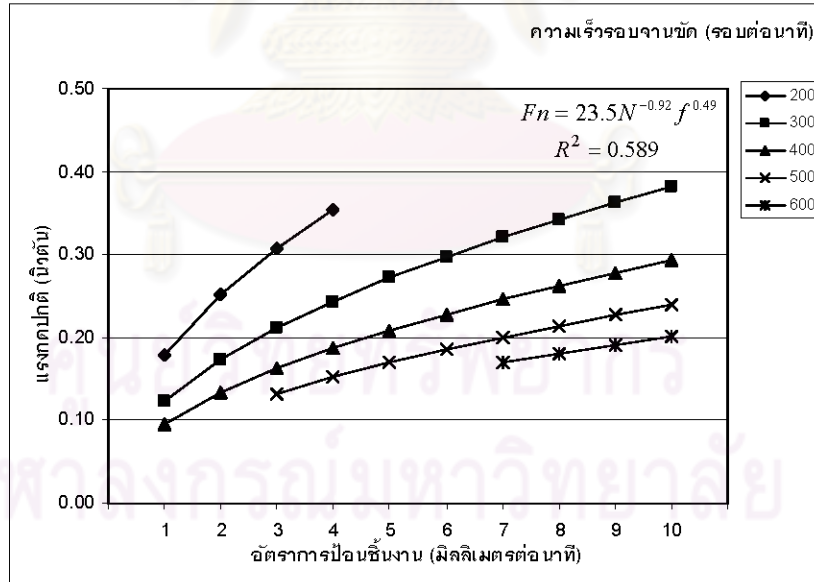
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัสที่คำนวณจาก $Ft = 1.46N^{-0.43} f^{0.5}$ กับความเร็วรอบงานขั้ว ที่อัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัสที่คำนวณจาก $Ft = 1.46N^{-0.43} f^{0.5}$ กับอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่ความเร็วรอบงานขั้วต่างๆ



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดปกติที่คำนวณจาก $F_n=23.5N^{-0.92}f^{0.49}$ กับความเร็วรอบงานขัด ที่อัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ



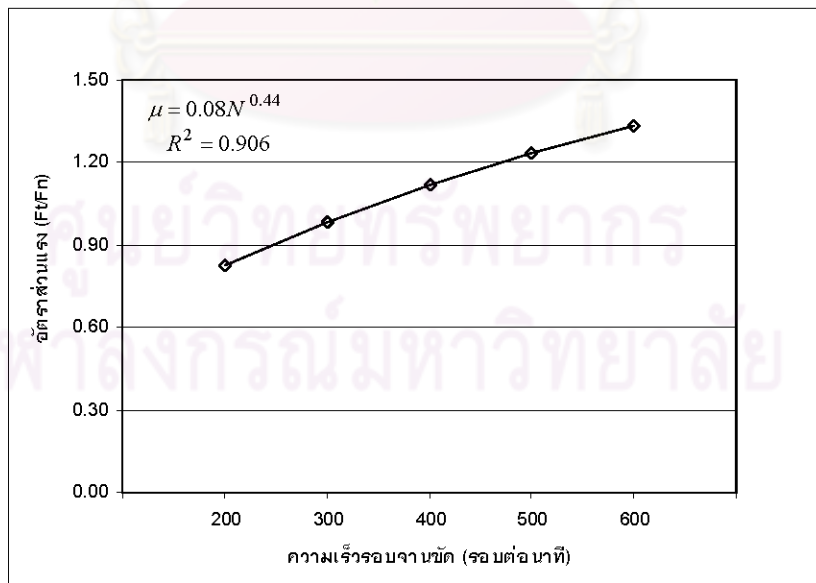
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดปกติที่คำนวณจาก $F_n=23.5N^{-0.92}f^{0.49}$ กับอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่ความเร็วรอบงานขัดต่างๆ

สำหรับการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน ต่อ อัตราส่วนแรง จะใช้เพียงค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนแรงในแต่ละกลุ่มความเร็วรอบงานขัด เนื่องจากได้ พิสูจน์ทางสถิติแล้วว่า อัตราการป้อนชิ้นงาน ไม่มีผลต่ออัตราส่วนแรง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ ความเชื่อมั่น 95% ในขอบเขตของงานวิจัยนี้ จากผลการทดลองสามารถสร้างความสัมพันธ์ ได้ดัง สมการที่ 4.3 ดังนี้

$$\mu = 0.08N^{0.44} \dots\dots\dots (4.3)$$

เมื่อ μ = อัตราส่วนแรง
 N = ความเร็วรอบงานขัด (รอบต่อนาที)

จากสมการที่ 4.3 ภายใต้เงื่อนไขของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานที่ สามารถเจาะรูชิ้นงานทรงกลมให้ได้ขนาดที่ต้องการ ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.906 นั่นคือ 90.6% ของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนแรง เป็นผลมาจากความเร็วรอบงาน ขัด ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.25 โดยใช้ขอบเขตที่ความเร็วรอบงานขัด 200 ถึง 500 รอบต่อนาที ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบงานขัดทำให้อัตราส่วนแรงมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงที่คำนวณจาก $\mu=0.08N^{0.44}$ กับความเร็วรอบงานขัด

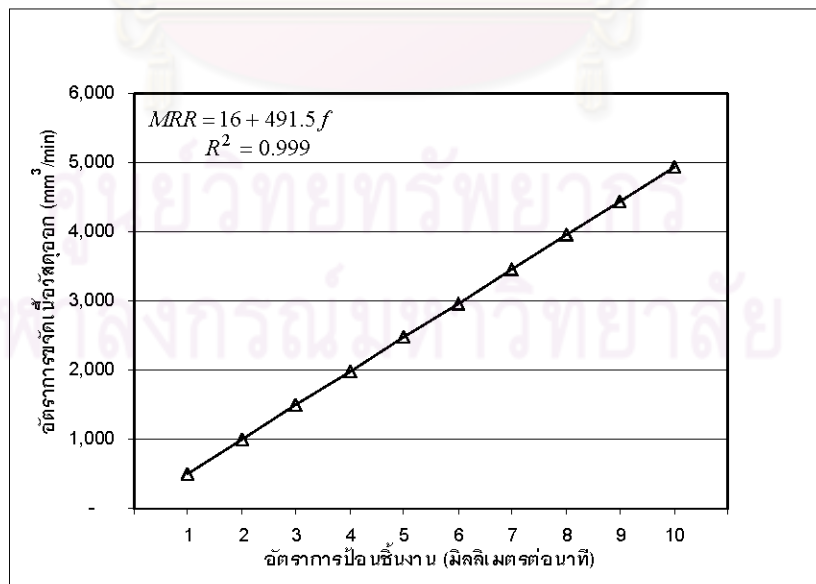
4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนซึ่งมีผลต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก

จากผลการทดลอง พบว่า มีเพียงอัตราการป้อนซึ่งงานเท่านั้นที่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก ในแต่ละกลุ่มอัตราการป้อนซึ่งงานเท่านั้น ที่ถูกนำมาใช้ในการประมวลผลเพื่อสร้างความสัมพันธ์ ได้ดังสมการที่ 4.4

$$MRR = 16 + 491.5f \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

เมื่อ MRR = อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก (ลูกบาศก์เมตรต่อนาที)
 f = อัตราการป้อนซึ่งงาน (รอบต่อนาที)

จากสมการที่ 4.4 ภายใต้เงื่อนไขของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนซึ่งงานที่สามารถเจาะรูซึ่งงานทรงกลมให้ได้ขนาดที่ต้องการ ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.999 นั่นคือ 99.9% ของการเปลี่ยนแปลงอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก เป็นผลมาจากอัตราการป้อนซึ่งงาน ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.26 โดยใช้ขอบเขตที่อัตราการป้อนซึ่งงาน 1 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออกที่คำนวณจาก $MRR=16+491.5f$ กับอัตราการป้อนซึ่งงาน

บทที่ 5 อภิปรายผลการวิจัย

ในบทนี้ ได้อภิปรายผล ที่ได้จากการทดลอง พร้อมทั้งกล่าวถึงปัญหาและอุปสรรค และข้อจำกัดในงานวิจัยนี้

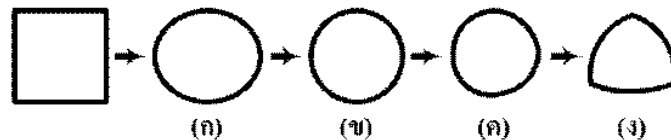
5.1 อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถอภิปรายผล ได้ประเด็นต่างๆ ดังนี้

1. รูปร่างของชิ้นงาน
2. เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม
3. แรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง
4. อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก

1 รูปร่างของชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานที่มีผลต่อการเจียรขึ้นรูปทรงกลม โดยทำการศึกษาความเร็วรอบงานขัด 9 ระดับ คือ 200 ถึง 1000 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนชิ้นงาน 13 ระดับ คือ 1 ถึง 10 20 30 และ 60 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าการเปลี่ยนแปลงสภาวะที่ใช้ในการเจียร ทำให้ได้ชิ้นงานหลังการเจียรที่มีรูปทรงที่แตกต่างกันไป เมื่อพิจารณารูปทรงที่เกิดขึ้นหลังการเจียรในอัตราการป้อนชิ้นงานที่คงที่ และเพิ่มความเร็วรอบงานขัดในการเจียร ทำให้ได้ชิ้นงานที่รูปทรง ดังรูปที่ 5.1 คือ (ก) ทรงรูปไข่ (ข) ทรงกลม (ค) ทรงกลมที่มีผิวบิดเบี้ยว และ (ง) ชิ้นงานทรงกรวย ตามลำดับความเร็วรอบงานขัดที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.1 หน้าตัดของรูปทรงชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเพิ่มความเร็วรอบงานขัด

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน ทำให้ได้ชิ้นงานที่รูปทรงแตกต่างกันไป แต่ที่ความเร็วรอบจานขัด 100 รอบต่อนาที ไม่สามารถที่จะหมุนชิ้นงานได้ เนื่องจากมีความเร็วในการหมุนต่ำ ทำให้แรงที่กระทำต่อชิ้นงานมีไม่มากพอที่จะพาชิ้นงานให้เคลื่อนที่ได้

ที่ความเร็วรอบจานขัด 200 รอบต่อนาที เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานสูงขึ้น ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงรูปไข่ เนื่องจากการอัตราการป้อนชิ้นงานให้เข้าสู่จานขัดอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการกลับตัวต่อเนื่องในบางทิศทางการตัด

เมื่อสามารถเจียรขึ้นรูปชิ้นงานทรงกลม ด้วยความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานใดๆ แล้ว หากเพิ่มความเร็วรอบจานขัด จะทำให้ได้ชิ้นงานทรงกลมที่มีผิวบิดเบี้ยว ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ได้ออกแบบไว้ แต่ผิวโค้งบางส่วนของชิ้นงานจะแห้วหายไป เนื่องจากเนื้อวัสดุบางส่วนโดนเฉือนออกมามากกว่าปกติ ทำให้ระนาบหน้าตัดของชิ้นงานไม่เป็นวงกลม

จากความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานที่ทำให้ได้ชิ้นงานทรงกลม ที่มีผิวบิดเบี้ยว นั้น เมื่อความเร็วรอบจานขัดเพิ่มขึ้น จะทำให้ได้ชิ้นงานหลังการเจียรมีลักษณะเป็นทรงกรวย เนื่องจากชิ้นงานโดนเฉือนออกไปอย่างรวดเร็วในช่วงต้น ทำให้ชิ้นงานมีจุดหมุนที่ไม่ได้อยู่ที่กลางชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดการกลับตัวในบางทิศทางการตัด

2 เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม

ในงานวิจัยนี้ สามารถเจียรเพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตามที่ได้ออกแบบไว้ แต่ทั้งนี้ชิ้นงานทรงกลมบางกลุ่มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ คือ ชิ้นงานที่เจียรขึ้นรูปด้วยอัตราการป้อนชิ้นงาน 20 และ 30 มิลลิเมตรต่อนาที มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.05 ± 0.08 มิลลิเมตร ซึ่งถึงแม้จะมีรูปทรงกลม แต่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกับชิ้นงานที่เจียรขึ้นรูปด้วยอัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.32 ± 0.19 มิลลิเมตร ซึ่งค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของทั้งสองกลุ่มนี้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งนี้ เนื่องมาจากอัตราการป้อนชิ้นงานที่สูง ส่งผลให้ชิ้นงานเคลื่อนที่เข้าสู่จานขัดด้วยความเร็วสูงตามไปด้วย เมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่ไปถึงระยะลึกสิ้นสุด และต้องสั่งการให้หยุดการทำงานของจานขัดทำให้การตอบสนองต่อการสั่งการนั้น ไม่ทันพอดีกับระยะลึกสิ้นสุดที่ต้องหยุดการทำงานของชุดอุปกรณ์การหมุนจานขัด

เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน เนื่องจากปัจจัยเดียวแล้ว พบว่า ทั้งความเร็วรอบจานขัด และอัตราการป้อนชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป ในแต่ละกลุ่มทดสอบ ไม่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากการทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของสองกลุ่มความเร็วรอบจานขัด เช่น เปรียบเทียบกลุ่ม 200 กับ 300 รอบต่อนาที หรือ กลุ่ม 300 กับ 400 รอบต่อนาที เป็นต้น สามารถบอกได้ว่า ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านกลางในแต่ละรอบความเร็วมีค่าเท่ากันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

แม้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลมที่ขึ้นรูปด้วยอัตราการป้อน 1 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที จะมีขนาดที่แตกต่างกันออกไป แต่จากการทดสอบทางสถิติแล้ว พบว่า ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง เป็นไปตามที่คาดหมาย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงสามารถยอมรับชิ้นงานที่มีขนาดเหล่านั้นได้ เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานจะอยู่กับระยะลึกสิ้นสุด โดยระยะลึกสิ้นสุดจะต้องน้อยกว่าขนาดของชิ้นงานลูกบาศก์ก่อนการเจียร จึงจะทำให้ได้ชิ้นงานทรงกลมที่มีขนาดที่ต้องการ

3 แรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง

แรงในแนวเส้นสัมผัสและแรงกดปกติ ที่เกิดขึ้นจากการเจียรชิ้นงานทรงกลม ได้ทำการประมวลผลตั้งแต่ชิ้นงานทรงลูกบาศก์เริ่มถูกเจียรที่ระยะความลึกเจียรเริ่มต้น จนถึงระยะความลึกเจียรสุดท้าย โดยแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการเจียรไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจังหวะการเคลื่อนที่และจังหวะที่ชิ้นงานโดนเฉือนด้วยคมของจานขัด แรงเจียรที่เกิดขึ้น คือ แรงในแนวเส้นสัมผัสและแรงกดปกติ ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0.092 ถึง 0.510 และ 0.078 ถึง 0.568 นิวตัน ตามลำดับ

จากการทดสอบทางสถิติ เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน เนื่องจากความเร็วรอบจานขัด ที่อัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ใดๆ จะให้ผลทดสอบที่แตกต่างออกไป คือ สำหรับแรงในแนวเส้นสัมผัส มีเพียงที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 3 และ 7 มิลลิเมตรต่อนาที เท่านั้นที่พิสูจน์ได้ว่า ความเร็วรอบจานขัดที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส อย่างมีนัยสำคัญที่ 95% ทั้งนี้เป็นเพราะค่าของแรงในแนวเส้นสัมผัสของกลุ่มอัตราการป้อนชิ้นงานกลุ่มอื่นๆ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเพิ่มค่า α ให้เท่ากับ 0.10 จะสามารถบอกได้ว่า ความเร็วรอบจานขัดที่เปลี่ยนแปลงไป มีผลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 90% สำหรับอัตราการป้อนชิ้นงาน 2 ถึง 4 และ 7 ถึง 8 มิลลิเมตรต่อนาที

การวิเคราะห์ความแปรปรวน เนื่องจากความเร็วรอบงานชุด ที่อัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ใดๆ สำหรับแรงกดปกติ ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 4 และ 7 ถึง 8 มิลลิเมตรต่อนาที ที่สามารถบอกได้ว่า ความเร็วรอบงานชุดที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน เนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่ความเร็วรอบงานชุดคงที่ใดๆ สำหรับความเร็วรอบ 200 ถึง 500 รอบต่อนาที พบว่า อัตราการป้อนชิ้นงานจะมีผลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัสและแรงกดปกติ อย่างมีนัยสำคัญที่ 95%

อัตราส่วนแรงที่เกิดจากการเฉียรขึ้นรูปทรงกลม มีค่าอยู่ระหว่าง 0.732 ถึง 2.001 เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เนื่องจากความเร็วรอบงานชุด ที่อัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ใดๆ ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 2 4 8 และ 10 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า ความเร็วรอบงานชุดที่เปลี่ยนแปลงไป มีผลต่ออัตราส่วนแรงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่เมื่อเปลี่ยนค่า α ให้เท่ากับ 0.10 จะสามารถบอกได้ว่า สำหรับทุกกลุ่มอัตราการป้อนชิ้นงาน ความเร็วรอบงานชุดที่เปลี่ยนแปลงไป มีผลต่ออัตราส่วนแรงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 90%

เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน เนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่ความเร็วรอบงานชุดคงที่ใดๆ พบว่า ในทุกกลุ่มความเร็วรอบงานชุด อัตราการป้อนชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป ไม่มีผลต่ออัตราส่วนแรงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้น หรือ กล่าวได้ว่า ในแต่ละกลุ่มความเร็วรอบงานชุด สามารถใช้ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนสำหรับอัตราส่วนแรงของกลุ่มความเร็วรอบงานชุดนั้นได้ เมื่อทดสอบความมีนัยสำคัญ ของค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนแรงระหว่างกลุ่มความเร็วรอบงานชุด พบว่า มีเพียงการทดสอบระหว่างความเร็วรอบงานชุด 400 กับ 500 รอบต่อนาที ที่มีค่าอัตราส่วนแรงเท่ากัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4 อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก

ในงานวิจัยนี้ การเฉียรชิ้นงานทรงลูกบาศก์เพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกลมมีอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออกตั้งแต่ 475 ถึง 5243 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เนื่องจากความเร็วรอบงานชุด ที่อัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ใดๆ พบว่า ความเร็วรอบงานชุดไม่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุออกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน เนื่องจากอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่ความเร็วรอบงานชุดคงที่ใดๆ พบว่า อัตราการป้อนชิ้นงานมีผลต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุออกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

ปัญหาและอุปสรรคในงานวิจัย มีดังนี้

1. การปรับแต่งออกซิไลสโคป โดยใช้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลสูงสุดเท่ากับ 600.60 วินาที สามารถปรับแต่งให้อัตราการเก็บข้อมูลสูงสุดเท่ากับ 100 ตัวอย่างต่อวินาที หรืออาจกล่าวเป็นอีกนัยได้ว่า หากต้องการอัตราการเก็บข้อมูลสูงสุดเท่ากับ 100 ตัวอย่างต่อวินาที สามารถปรับตั้งระยะเวลาในการเก็บข้อมูลสูงสุดเท่ากับ 600.60 วินาทีเท่านั้น เนื่องจากความสามารถของโปรแกรมการคำนวณ Excel ที่รองรับจำนวนแถว (row) ได้เพียงแค่ 65536 แถว
2. การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการเจริญขึ้นรูปทรงกลมภายในประเทศ มีจำนวนจำกัด หรือไม่เปิดเผย ทำให้ไม่สามารถเข้าถึงแหล่งข้อมูล เพื่อการศึกษา วิจัยและพัฒนาได้
3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญขึ้นรูปทรงกลมของต่างประเทศ โดยส่วนมากได้กล่าวถึงเฉพาะวัสดุจำพวกโลหะ และวัสดุเซรามิกชนิดหนาแน่น (Dense ceramics)

5.3 ข้อจำกัดในงานวิจัย

ข้อจำกัดในงานวิจัย มีดังนี้

1. การพิจารณารูปทรงขึ้นงานทรงกลม ได้พิจารณาด้วยสายตา โดยใช้คุณสมบัติของทรงกลม ข้อที่ 2 คือ เส้นรอบขอบ และระนาบตัดของทรงกลม ต้องเป็นวงกลม ดังนั้น หากระนาบตัดของชิ้นงานเป็นวงกลม สามารถระบุได้ว่าเป็นทรงกลม หากว่าระนาบตัดเป็นวงรี วงกลมบิดเบี้ยว และค่อนข้างเป็นสามเหลี่ยม ระบุได้ว่าเป็น ทรงรูปไข่ ทรงกลมที่มีผิวบิดเบี้ยว และทรงกรวยตามลำดับ
2. ในงานวิจัยนี้ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง กับความเร็วรอบจานขัด และอัตราการป้อนชิ้นงาน เฉพาะวัสดุซิลิเกตชนิดพูนที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น ถ้าหากต้องการพยากรณ์แรงเฉื่อยที่เกิดจากการเฉื่อยวัสดุชนิดอื่น ต้องทำการสร้างความสัมพันธ์ด้วยการเพิ่มคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ความหนาแน่นรวม เป็นต้น ไปในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉื่อยกับปัจจัย ซึ่งจะช่วยให้สมการพยากรณ์มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการ หากต้องการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับปัจจัย ให้มีความครอบคลุมหรือมีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น ควรนำวัสดุที่แตกต่างกันมาทำการทดลองเพิ่มเติม แล้วนำมาสร้างความสัมพันธ์ใหม่อีกครั้ง

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้ ได้สรุปผลการวิจัย และกล่าวถึงข้อเสนอแนะ สำหรับการศึกษาการเจริญขึ้นรูปทรงกลมต่อไป

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัย สามารถสรุปเป็นประเด็นหลักๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. วัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัย
2. รูปทรงของชิ้นงานหลังการเจียร
3. แรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง
4. อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก

1 วัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัย สามารถสรุปได้ดังนี้

1.1 วัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัย มีคุณสมบัติเชิงกายภาพ คือ มีซิลิกาเป็นเฟสหลัก ความหนาแน่นรวม 0.23 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นมวลวัสดุ 2.41 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความพรุนตัวร้อยละ 88.80 และขนาดรูพรุน 0.5 ถึง 1.0 มิลลิเมตร

1.2 วัสดุซิลิกาที่นำมาใช้ในงานวิจัย มีคุณสมบัติเชิงกล คือ ความทนแรงอัด 0.65 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ความทนแรงดัดโค้ง 1.97 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และความเครียดแรงดัดโค้ง 0.006 มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร

2 รูปทรงของชิ้นงานหลังการเจียร สามารถสรุปได้ดังนี้

2.1 ชิ้นงานที่ผ่านการเจียร มีรูปทรงที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน โดยมี 4 รูปทรง คือ ทรงรูปไข่ ทรงกลม ทรงกลมที่มีผิวบิดเบี้ยว และทรงกรวย

2.2 งานวิจัยนี้สามารถเจียรขึ้นรูปชิ้นงานทรงกลมวัสดุซิลิกา จากขนาดลูกบาศก์ ให้กลายเป็นชิ้นงานทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตามทีออกแบบไว้ได้ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2.3 กลุ่มชิ้นงานทรงกลมที่มีขนาดตามทีออกแบบไว้ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.32 ± 0.19 มิลลิเมตร

2.4 ในขอบเขตที่สามารถเจียรขึ้นรูปทรงกลมได้ขนาดตามที่ออกแบบไว้ ที่ความเร็วรอบงานชุดใดๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนชิ้นงาน จะไม่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2.5 ในขอบเขตที่สามารถเจียรขึ้นรูปทรงกลมได้ขนาดตามที่ออกแบบไว้ ที่อัตราการป้อนชิ้นงานใดๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบงานชุด จะไม่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2.6 ในขอบเขตที่สามารถเจียรขึ้นรูปทรงกลมได้ขนาดตามที่ออกแบบไว้ ในแต่ละกลุ่มของความเร็วรอบงานชุด ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีค่าเท่ากันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2.7 เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม จะเท่ากับระยะเล็ที่จุดสิ้นสุด

3 แรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง สามารถสรุปได้ดังนี้

3.1 แรงเจียรที่เกิดขึ้นจากการเจียรขึ้นรูปเพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกลมที่มีขนาดที่ต้องการ สามารถวัดค่าได้และคำนวณมาเป็นรูปแบบของค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square) โดยแรงในแนวเส้นสัมผัสมีค่า 0.092 ถึง 0.510 นิวตัน และแรงกดปกติมีค่า 0.078 ถึง 0.568 นิวตัน

3.2 เมื่อความเร็วรอบงานชุดคงที่ ที่ความเร็วรอบงานชุดระหว่าง 200 ถึง 500 รอบต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนชิ้นงาน จะมีผลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส และแรงกดปกติอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.3 เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 3 และ 7 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบงานชุด จะมีผลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.4 เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 4 และ 7 ถึง 8 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบงานชุด จะมีผลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.5 แรงในแนวเส้นสัมผัส และแรงกดปกติ แปรผกผันตามความเร็วรอบงานชุด และแปรผันตามอัตราการป้อนชิ้นงาน คือ เมื่อเพิ่มความเร็วรอบงานชุด และลดอัตราการป้อน จะทำให้แรงในแนวเส้นสัมผัสและแรงกดปกติมีค่าลดลง

3.6 ความเร็วรอบงานชุด (N) และอัตราการป้อนชิ้นงาน (f) มีอิทธิพลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส (F_t) คือ $F_t = 1.46N^{-0.43} f^{0.5}$ ด้วย $R^2 = 0.584$

3.7 ความเร็วรอบงานขัด (N) และอัตราการป้อนชิ้นงาน (f) มีอิทธิพลต่อแรงปกติ (F_n) คือ $F_n = 23.5N^{-0.92}f^{0.49}$ ด้วย $R^2 = 0.589$

3.8 เมื่อต้องการแรงเฉื่อยที่น้อยที่สุด เพื่อป้องกันความเสียหายต่อชิ้นงาน ควรใช้ความเร็วรอบงานขัด 400 รอบต่อนาทีและอัตราการป้อนชิ้นงาน 1 มิลลิเมตรต่อนาที หรือความเร็วรอบที่สูงที่สุด ของอัตราการป้อนชิ้นงานที่ต่ำที่สุด ในขอบเขตที่สามารถเฉื่อยขึ้นรูปทรงกลมได้ โดยเกิดแรงในแนวเส้นสัมผัสและแรงกดปกติ 0.092 และ 0.078 นิวตัน ตามลำดับ

3.9 อัตราส่วนแรง ที่เกิดขึ้นจากการเฉื่อยขึ้นรูปเพื่อให้ได้ชิ้นงานทรงกลมที่มีขนาดที่ต้องการ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.732 ถึง 2.001 นิวตันต่อ/นิวตัน

3.10 ที่ความเร็วรอบงานขัดคงที่ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนชิ้นงาน จะไม่มีผลต่ออัตราส่วนแรงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.11 ในแต่ละกลุ่มของความเร็วรอบงานขัด ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนแรงระหว่างกลุ่มความเร็วรอบงานขัด 400 กับ 500 รอบต่อนาที จะมีค่าเท่ากันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.12 เมื่ออัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ ที่อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 และ 3 ถึง 5 และ 7 และ 9 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบงานขัด จะไม่มีผลต่ออัตราส่วนแรง อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ที่ความเร็วรอบงานขัดนั้น

3.13 ที่ความเร็วรอบงานขัด 200 รอบต่อนาที จะเป็นการเฉื่อยที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด เนื่องจากมีอัตราส่วนแรงที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.732 นิวตันต่อ/นิวตัน

3.14 ความเร็วรอบงานขัด (N) มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนแรง (μ) คือ $\mu = 0.08N^{0.44}$ ด้วย $R^2 = 0.906$

4 อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก ที่เกิดจากเฉื่อยชิ้นงานทรงลูกบาศก์เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานทรงกลมที่มีขนาดที่ต้องการ มีค่าตั้งแต่ 475 ถึง 5243 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที

4.2 ที่ความเร็วรอบงานขัดคงที่ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนชิ้นงาน จะมีผลต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.3 ที่อัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบงานขัด จะไม่มีผลต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.4 อัตราการป้อนชิ้นงาน (f) มีอิทธิพลต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก (MRR) คือ $MRR = 16 + 491.5f$ ด้วย $R^2 = 0.999$

6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ มีข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไปดังนี้

1. การศึกษาผลของระยะลึกต่อการเจียร
2. การศึกษาผลของรัศมีของแผ่นร่องรูปโค้งต่อการเจียร
3. การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาควัสดุขัดสีของกระดาษทรายที่นำมาใช้ในการเจียรขึ้นรูปทรงกลม
4. การศึกษาวัสดุอื่นๆ ในการเจียรขึ้นรูปทรงกลม
5. การศึกษาอิทธิพลของรูปทรงชิ้นงานเริ่มต้น
6. การวัดขนาดชิ้นงาน ด้วยวิธีการอื่นๆ เช่น CMM (Coordinate measuring machine) และ VMM (Vision measuring machine)
7. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรงกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ความหนาแน่นของวัสดุ และขนาดอนุภาควัสดุขัดสี เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. สถิติสำหรับงานวิศวกรรม. เล่มที่ 2, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2540.
- ปัญญา อนุญสมบัติ. การศึกษาวัดโดยเทคนิคดิฟเฟอเรนซ์. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2544.
- ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ. สถิติสำหรับงานวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.

ภาษาอังกฤษ

- Amstead, B.H. Manufacturing processes.. Eighth Edition. New York : John Wiley & sons, 1986.
- Couey, J.A., Marsh, E.R., Knapp, B.R. and Vallance, R.R. Monitoring force in precision cylindrical grinding. Precision Engineering 2005 : 307-314.
- Chaopanich, I., Goyadoolya, K. and Puajindanetr, S.. Spherical Surface Forming Mechanism of Porous Materials via Groove Grinding System. The IE Network Conference 2007, pp 131. 24 - 26 October 2007. Phuket: Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, 2007.
- Dallas, D. B. Tool and manufacturing engineers handbook. New York : McGraw-Hill, 1976.
- DeGarmo E.P., et al.,. Materials and processes in manufacturing. : John Wiley & sons, 2003.
- Gleason, J. What is a Sphere?. [Online]. Micro Surface Engineering Incorporated, 1995. Available from: http://www.precisionballs.com/all_wias2.htm [2007, January 31]
- Hilbert, D. and Cohn-Vossen, S. Geometry and the Imagination. New Jersey : Chelsea, 1952.

Hwang, T.W., Whittenton, E.P., Hsu, N.N., Blessing, G.V. and Evans, C.J. Acoustic emission monitoring of high speed grinding of silicon nitride. Ultrasonics 2000 : 614-619.

Li, Z.C., Lin, B., Xu, Y.S. and Hu, J. Experimental studies on grinding forces and force ratio of the unsteady-state grinding technique. Journal of Materials Processing Technology 2002 : 76-80.

Richard, S. F. and Donald, E. B. Theory and design for mechanical measurements. Fourth edition. New Jersey : John Wiley & Sons, 2006.

Stainko, M., Trmal, G.J. and Zaruba, Z. Automated processing of data monitored during grinding. International Conference Process Control 2005.

Umehara, N. and Kato, K. Magnetic fluid grinding of advanced ceramic balls. Wear 1996 : 148-153.

Webster, J.G. The measurement, instrument and sensors handbook. The electrical engineering handbook series. Florida : CRC press, 1999.

Yankee, H.W. Manufacturing processes. New Jersey : Prentice-Hall, 1979.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

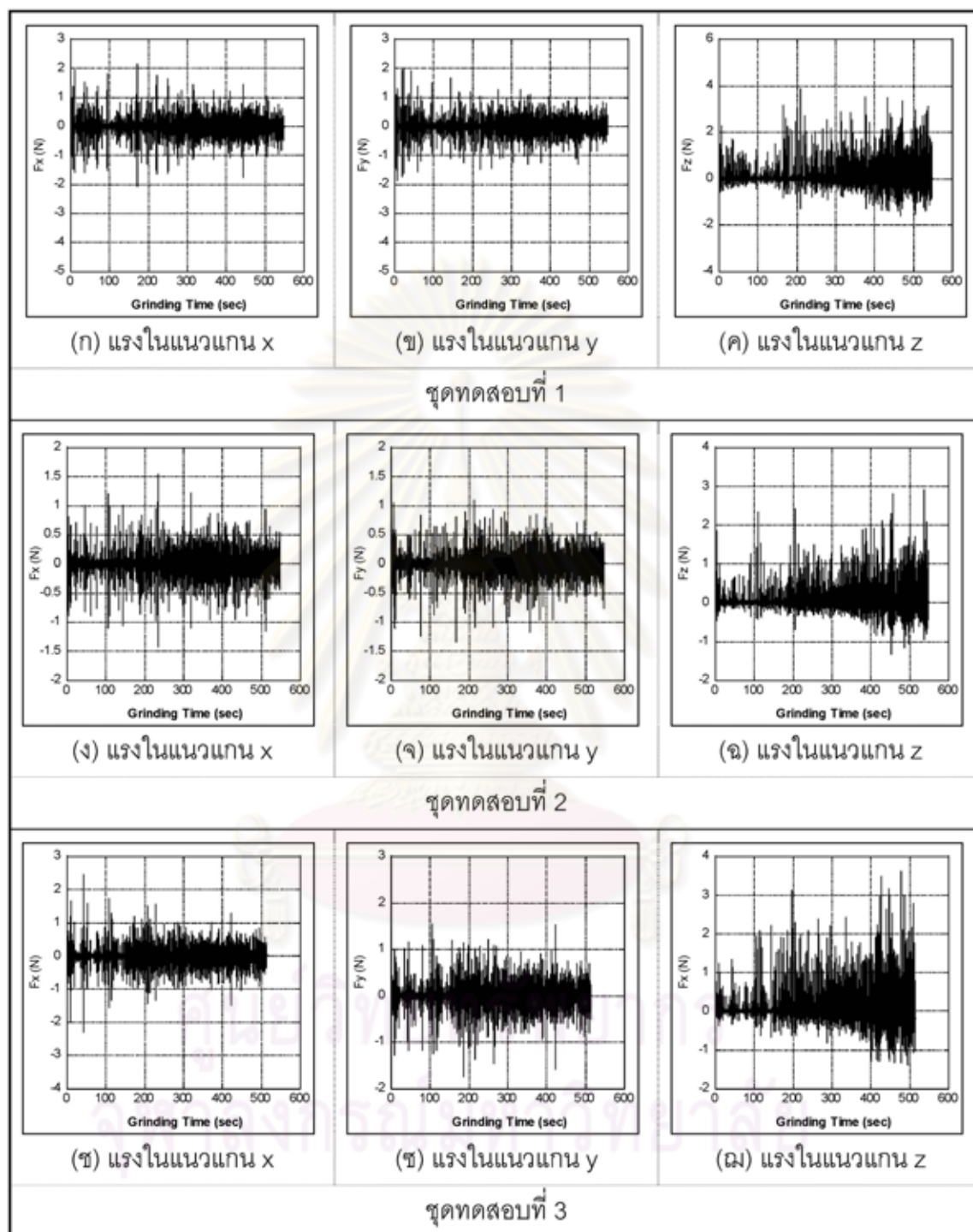
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



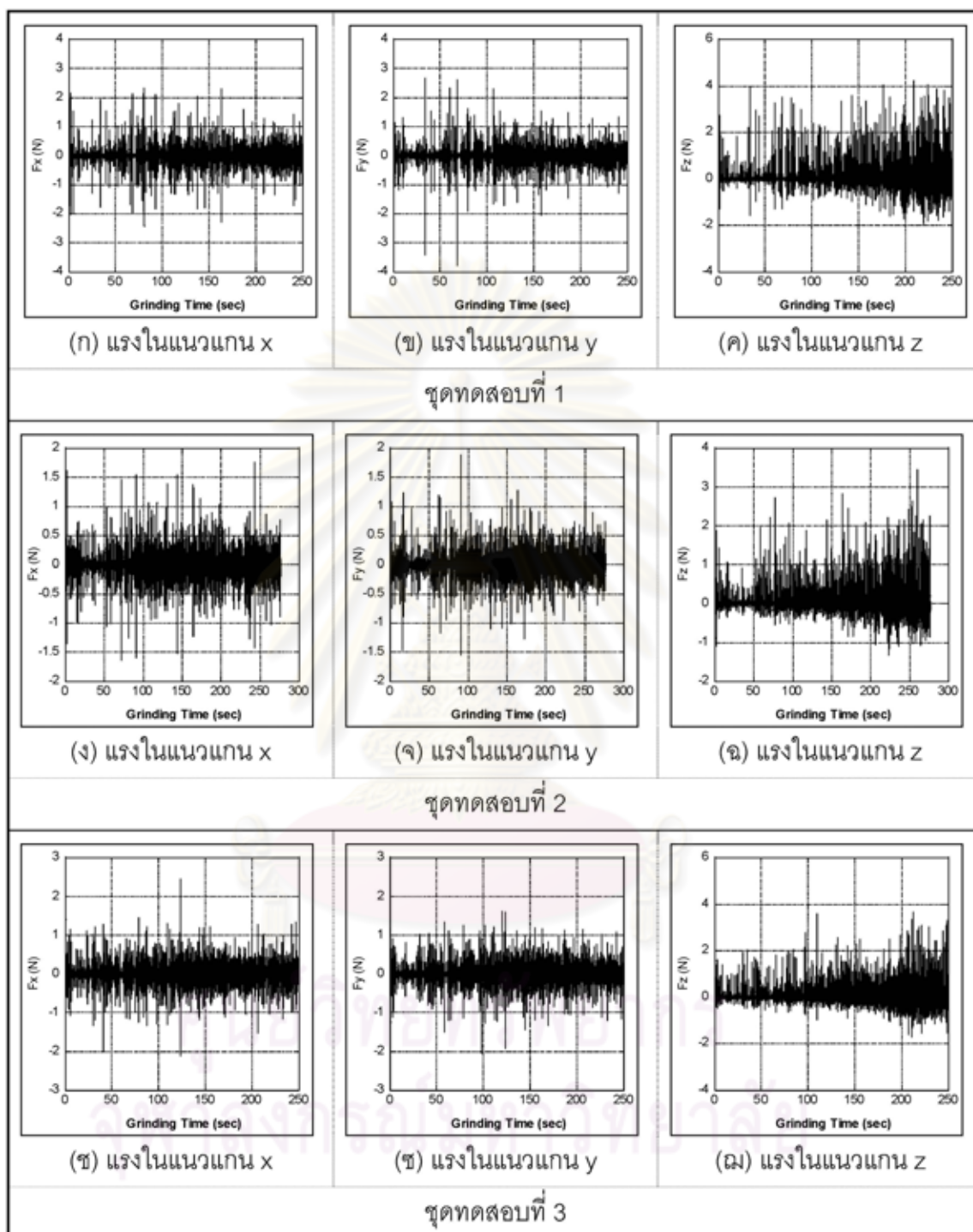
ภาคผนวก ก

ภาพสัญญาณแรงเจียรที่ได้จากการทดลอง

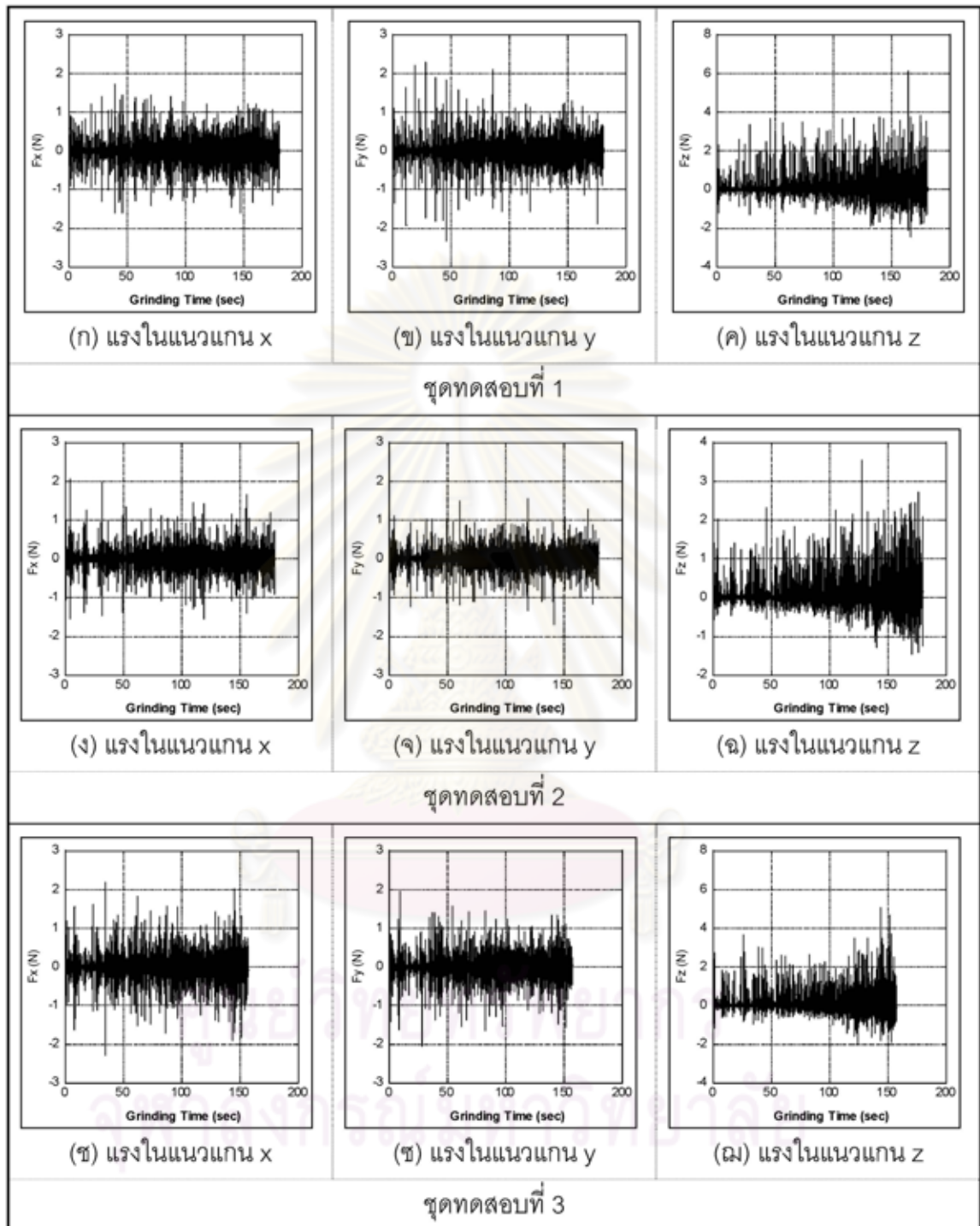
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



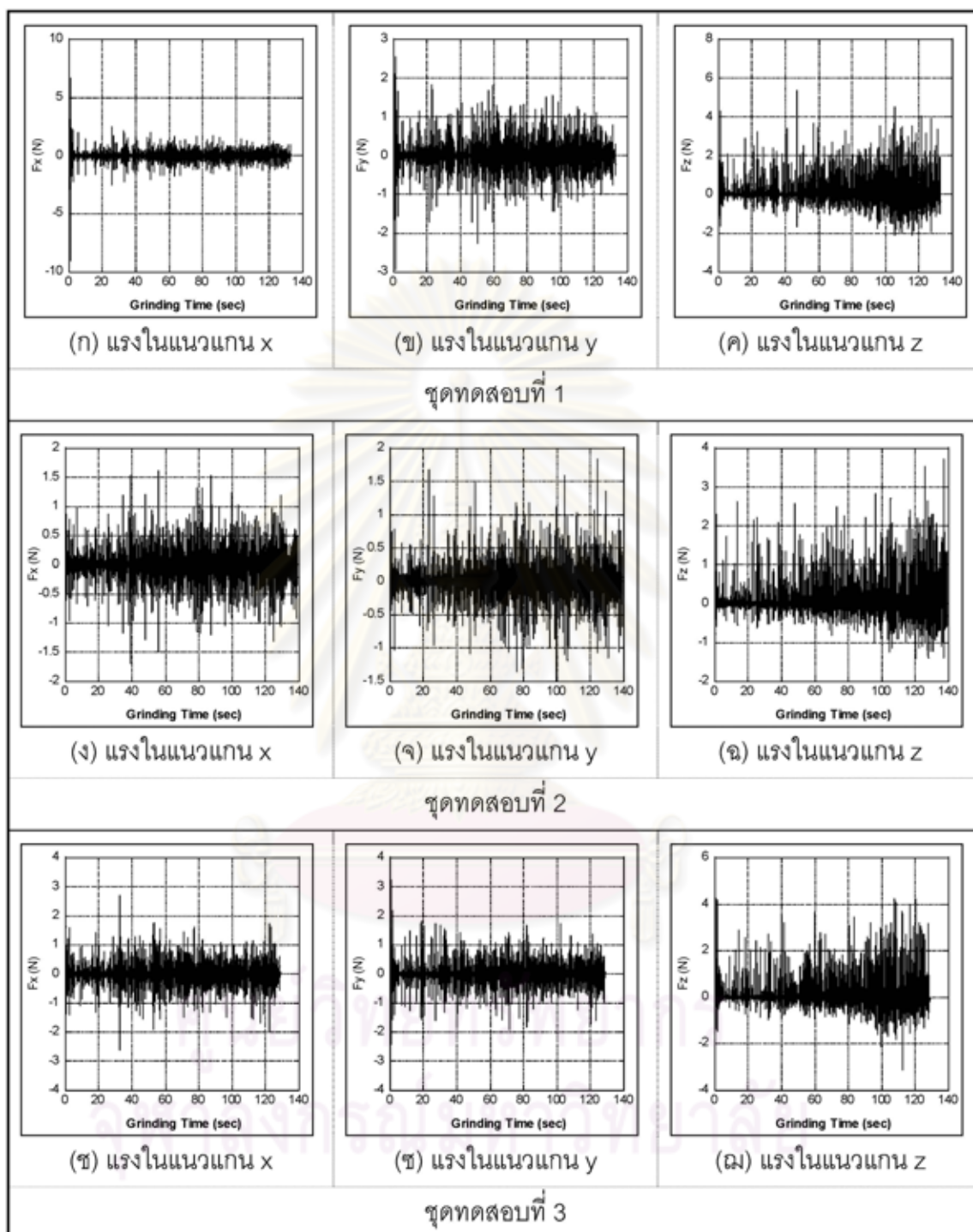
รูปที่ ก.1 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบงานขัด 200 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 มิลลิเมตรต่อนาที



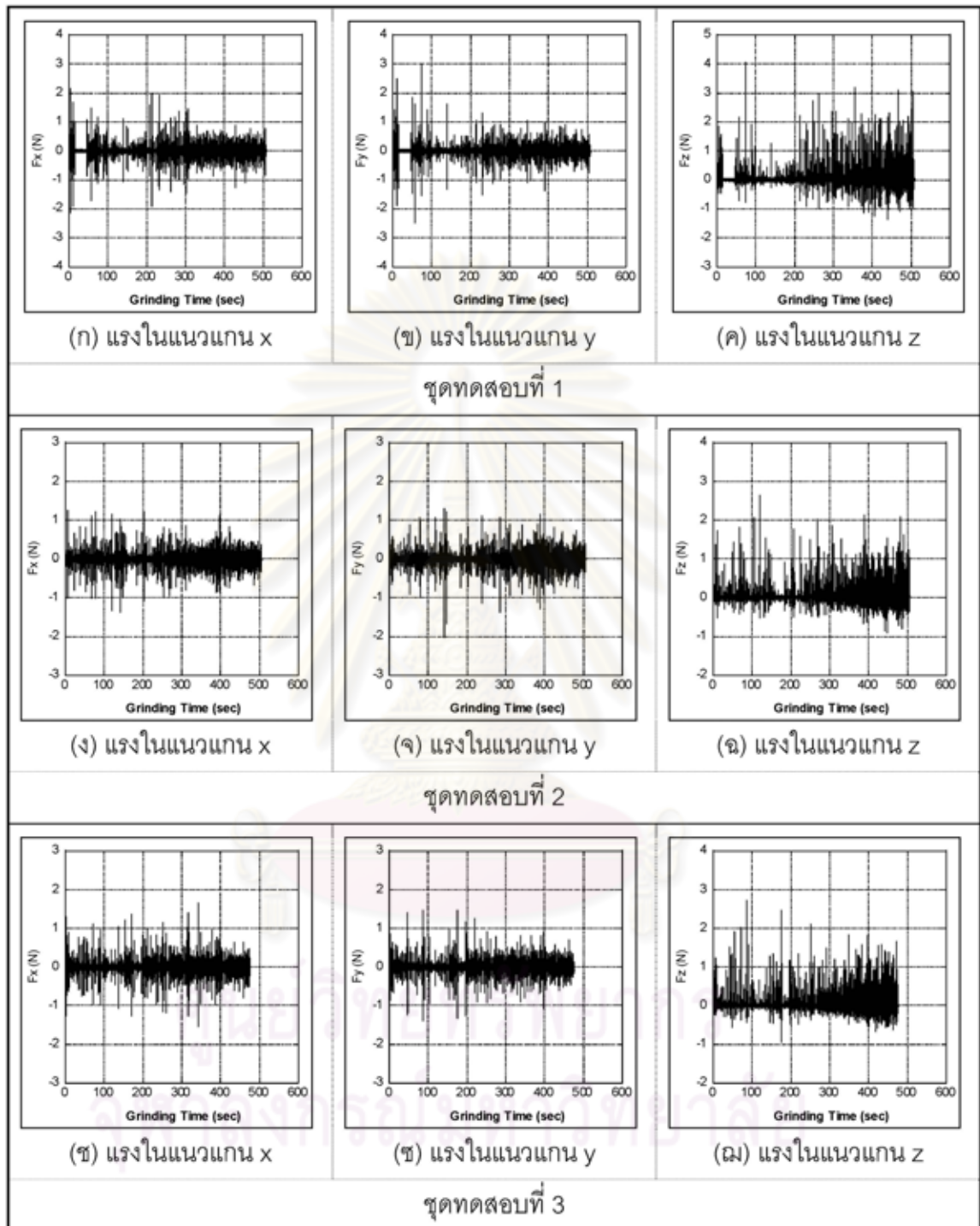
รูปที่ ก.2 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบงานขัด 200 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 2 มิลลิเมตรต่อนาที



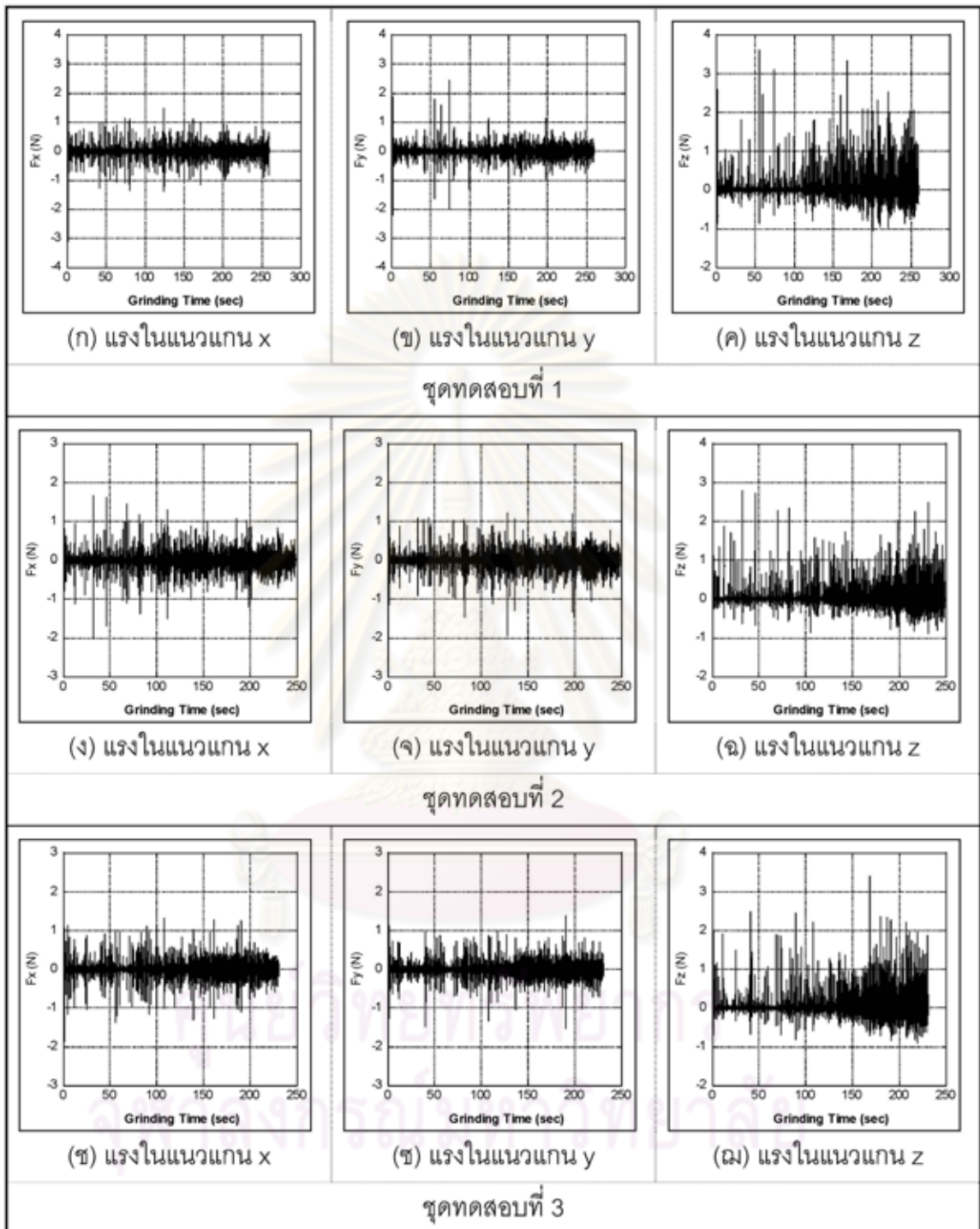
รูปที่ ก.3 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบงานขัด 200 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 3 มิลลิเมตรต่อนาที



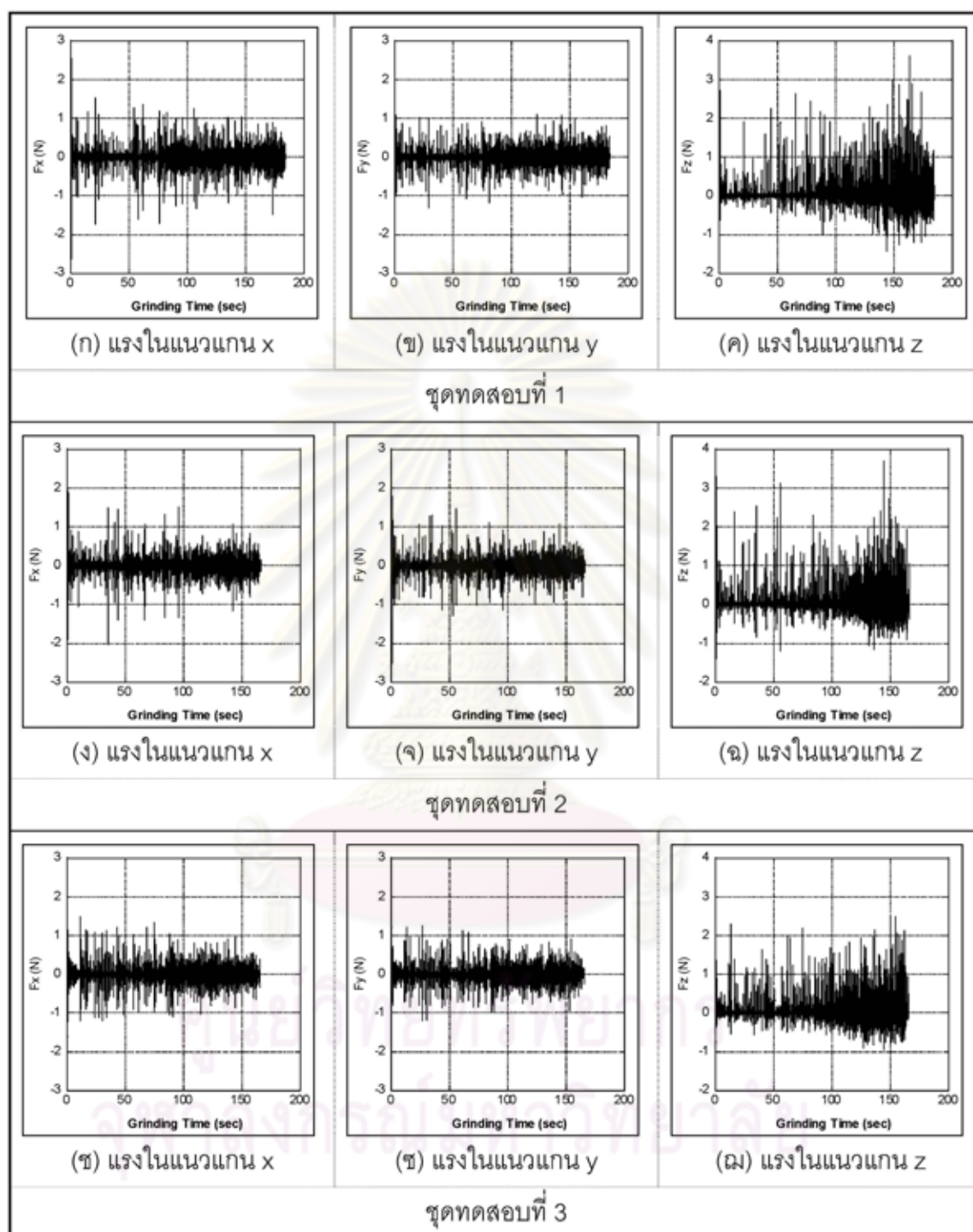
รูปที่ ก.4 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบงานขัด 200 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 4 มิลลิเมตรต่อนาที



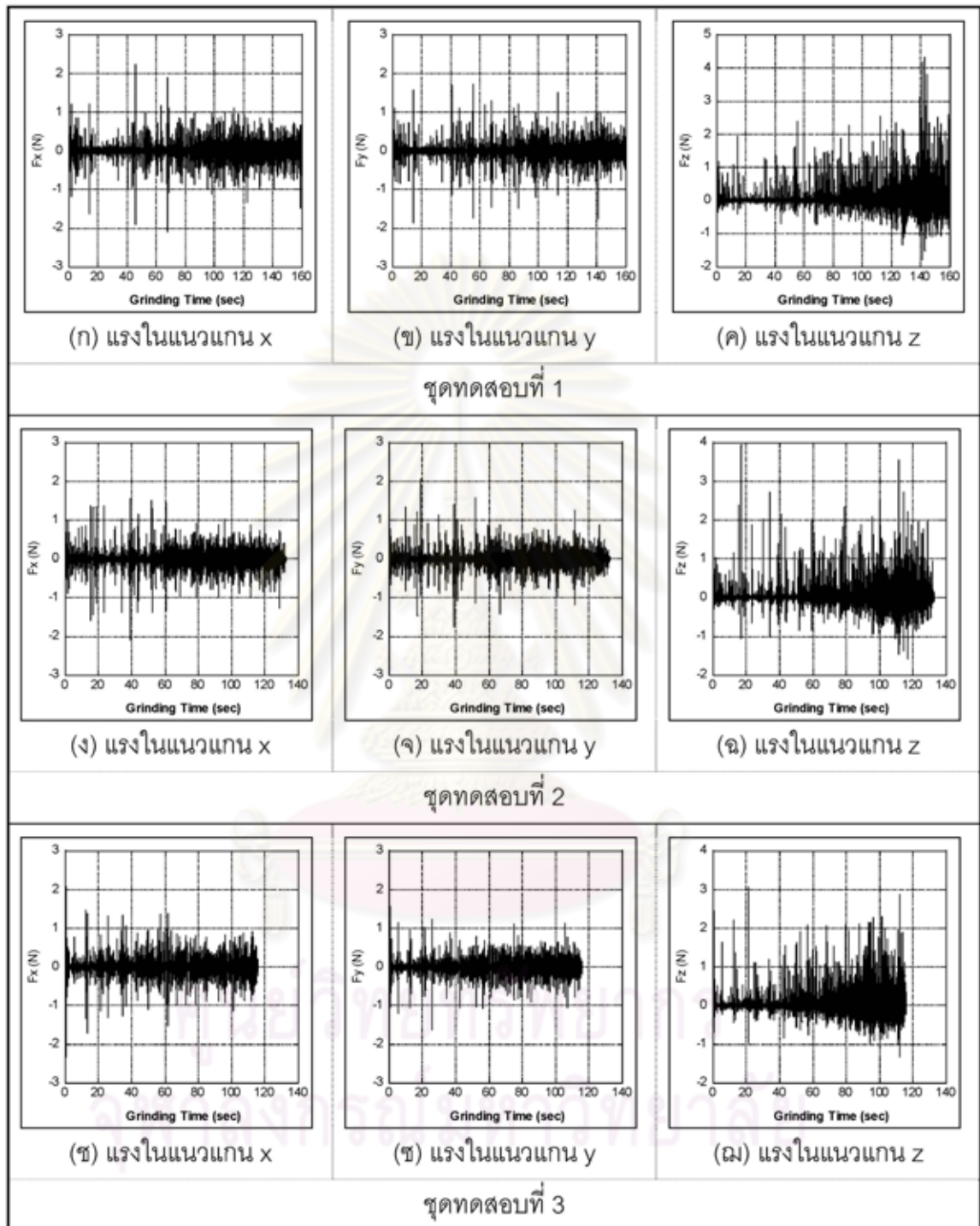
รูปที่ ก.5 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบงานขัด 300 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 มิลลิเมตรต่อนาที



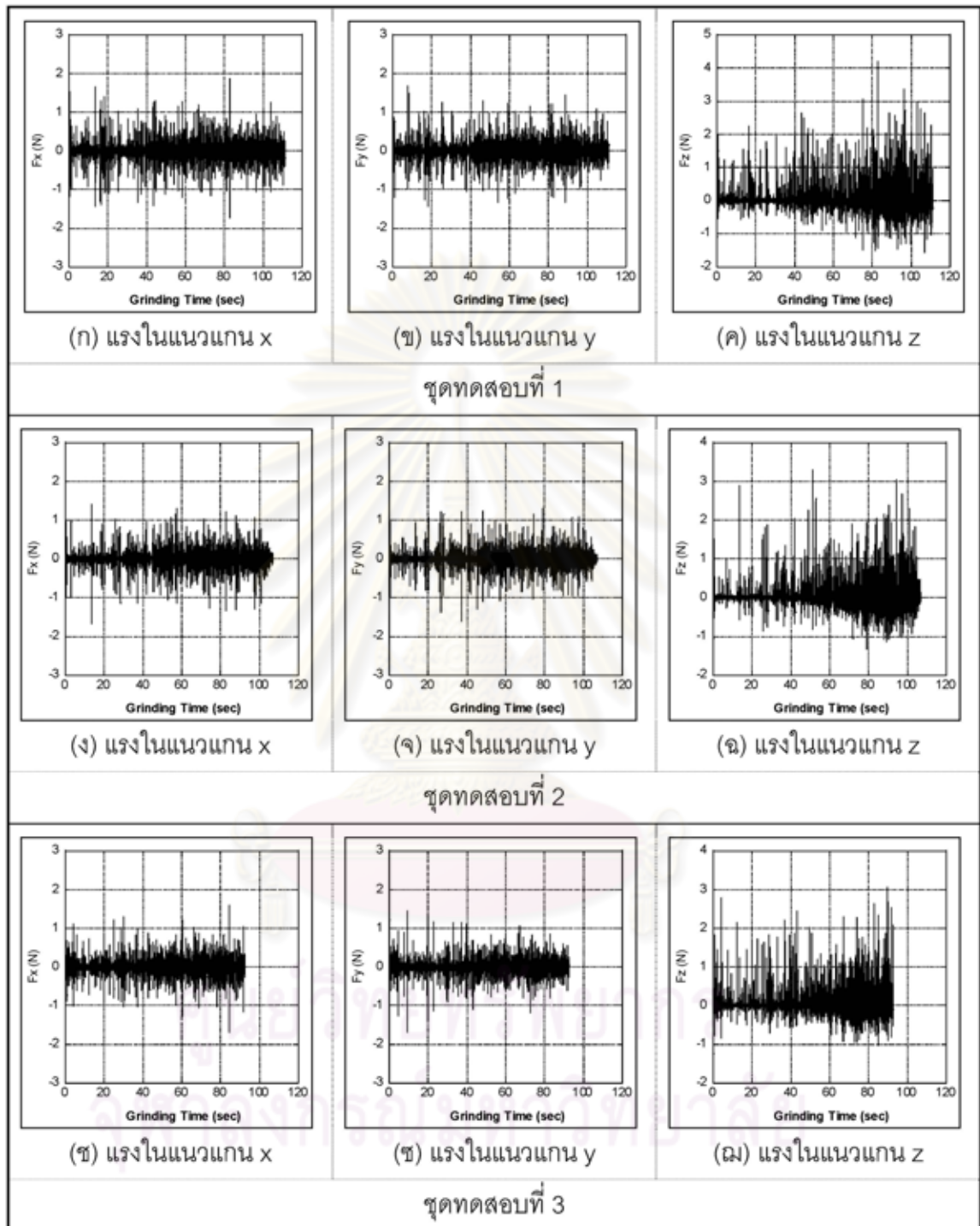
รูปที่ ก.6 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบงานขัด 300 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 2 มิลลิเมตรต่อนาที



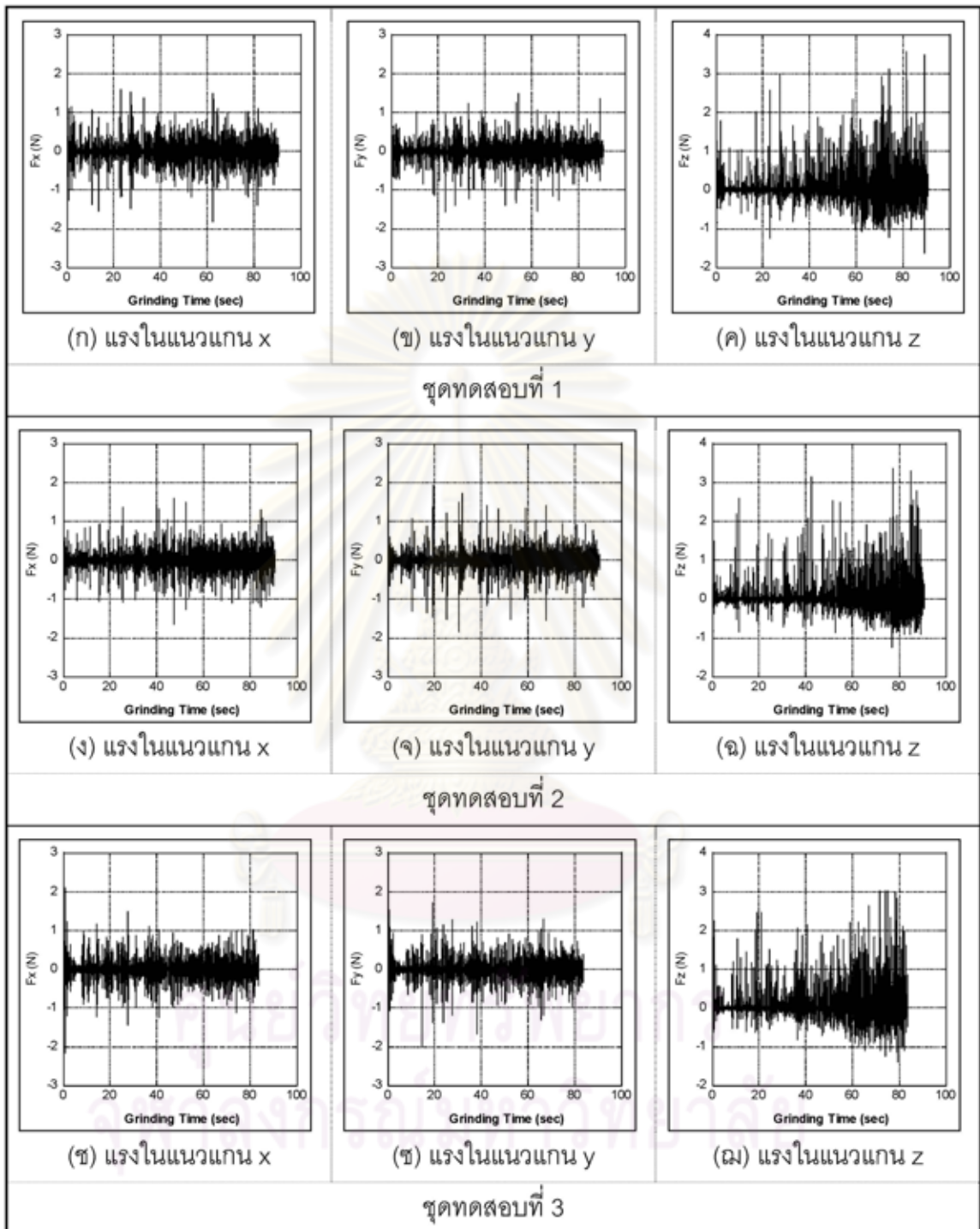
รูปที่ ก.7 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบงานขัด 300 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 3 มิลลิเมตรต่อนาที



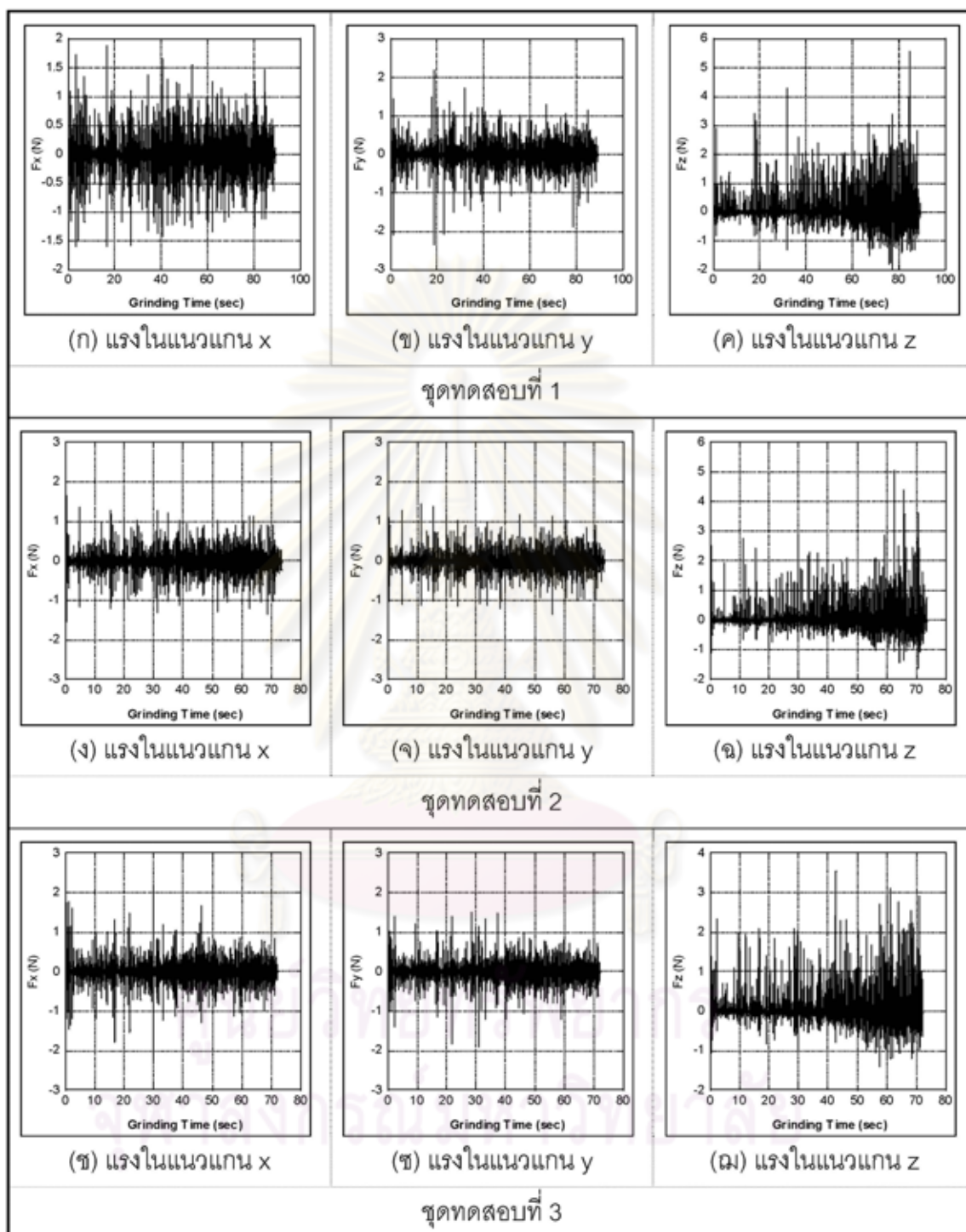
รูปที่ ก.8 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบงานขัด 300 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 4 มิลลิเมตรต่อนาที



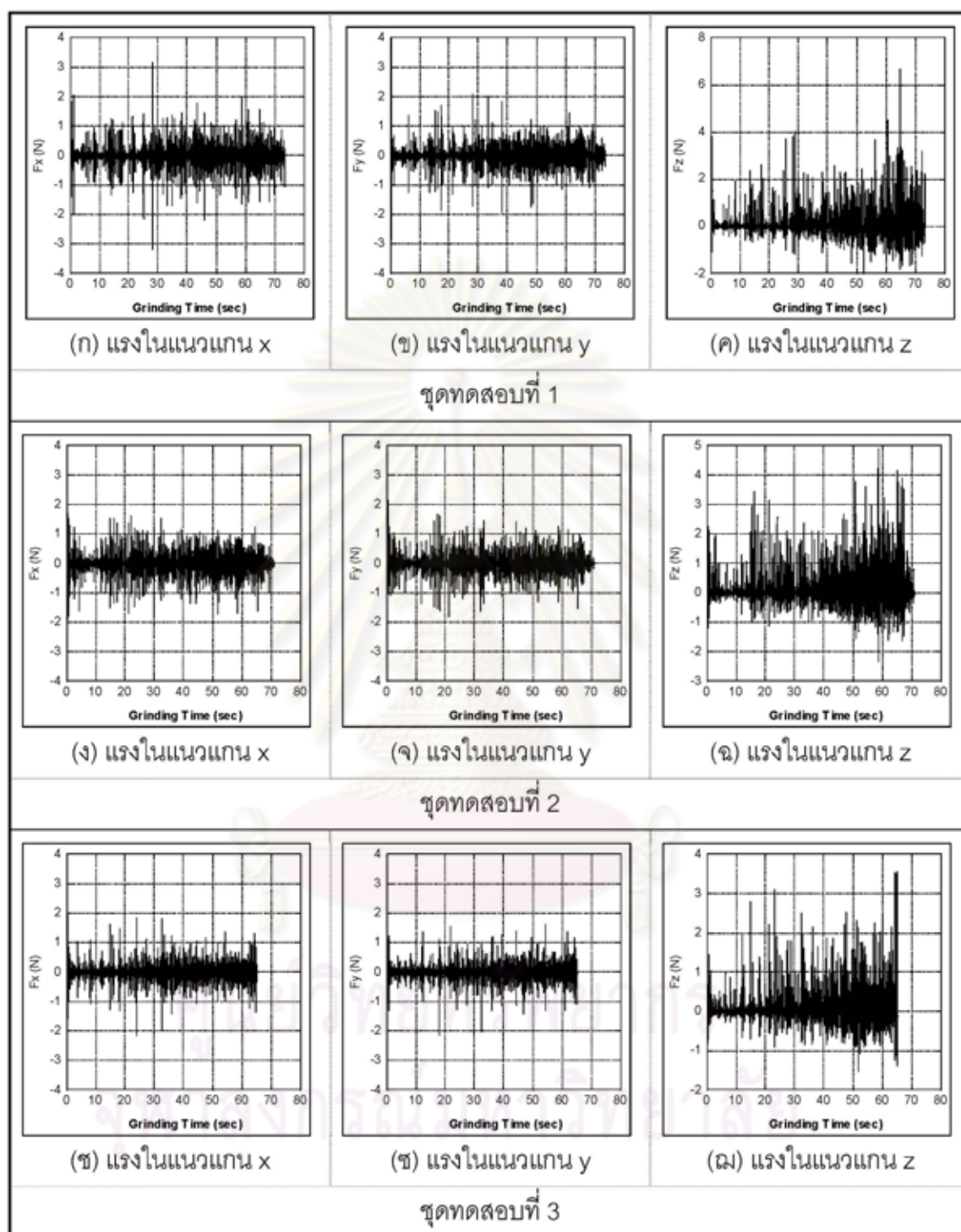
รูปที่ ก.9 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบงานขัด 300 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 5 มิลลิเมตรต่อนาที



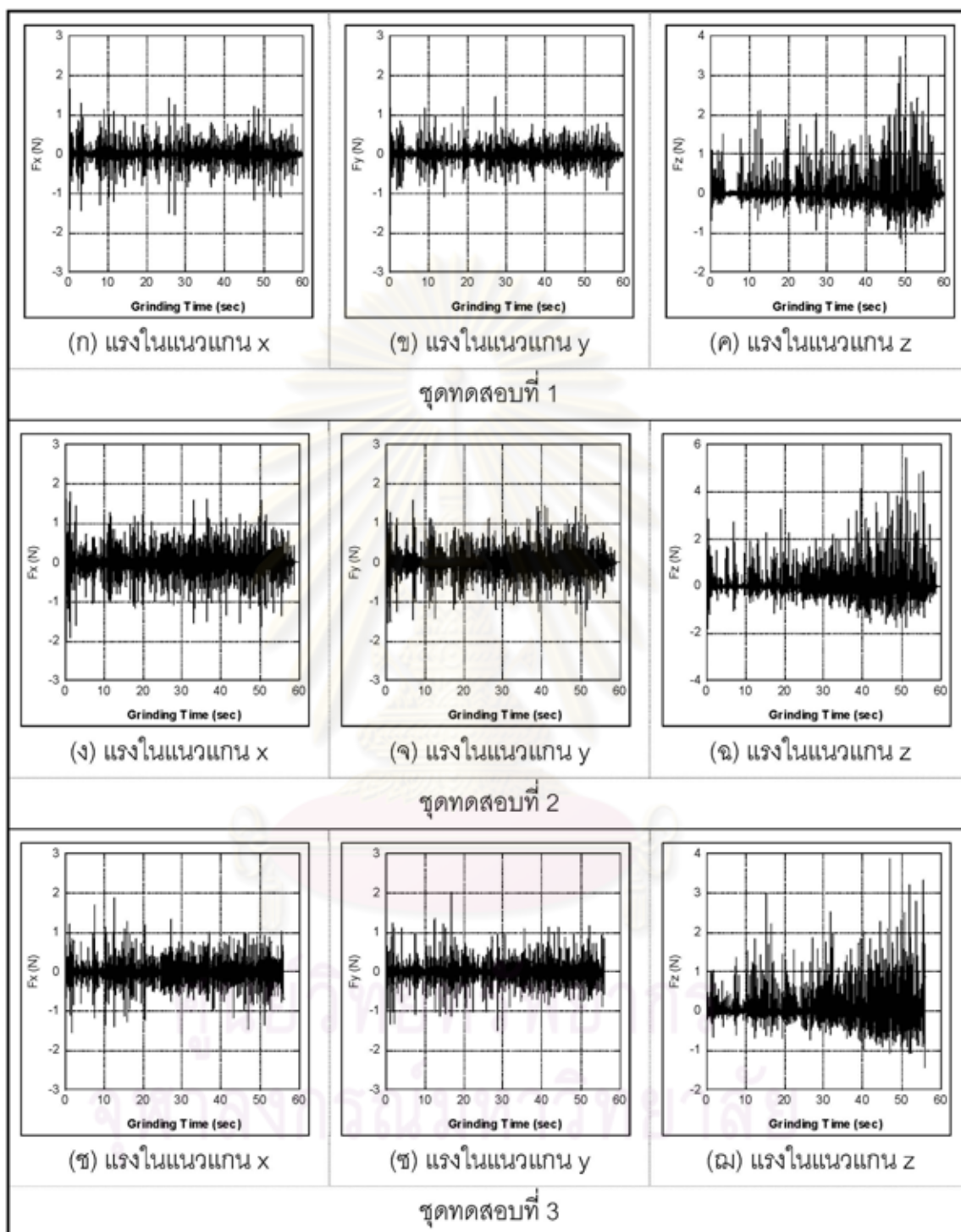
รูปที่ ก.10 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 300 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 6 มิลลิเมตรต่อนาที



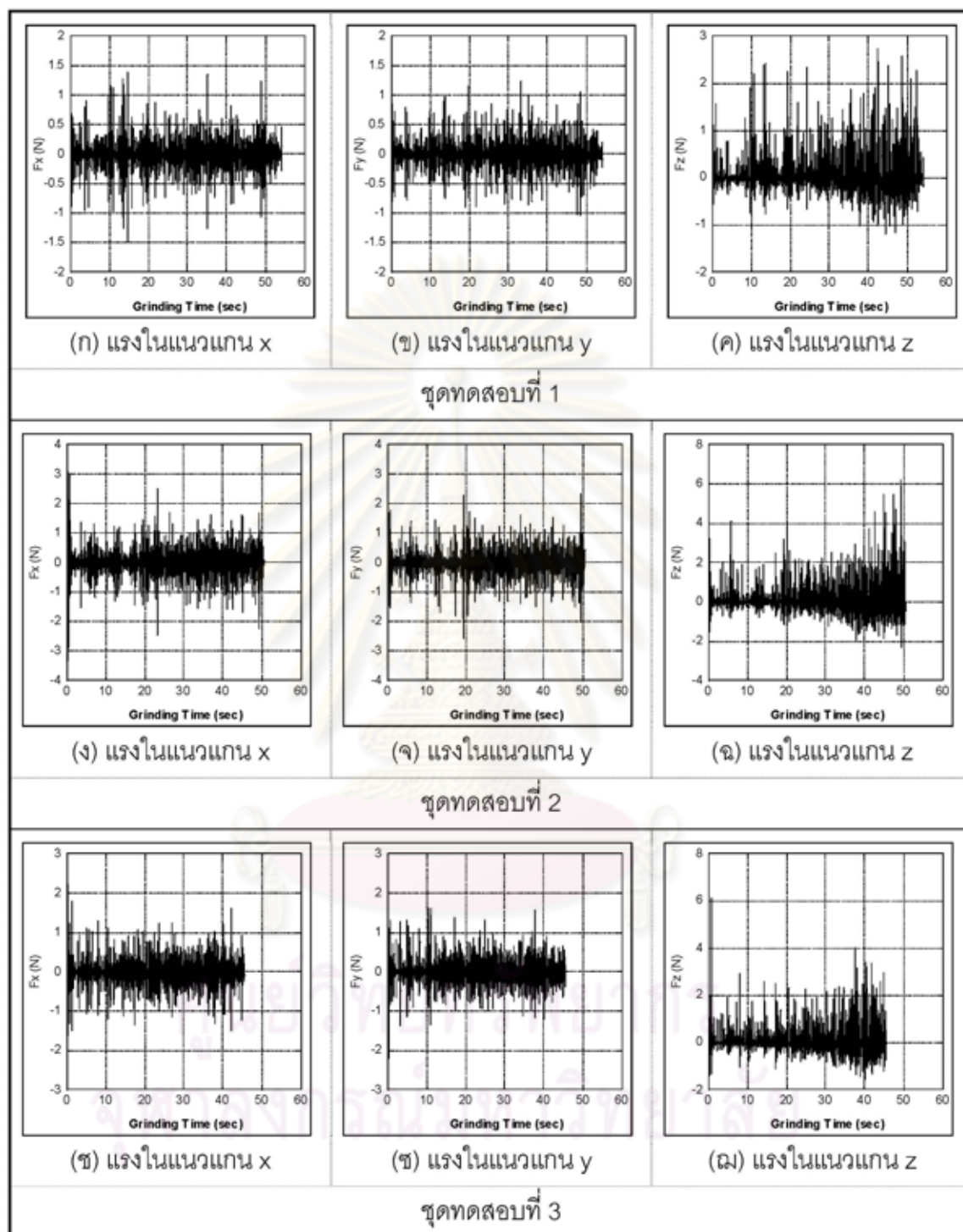
รูปที่ ก.11 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 300 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 7 มิลลิเมตรต่อนาที



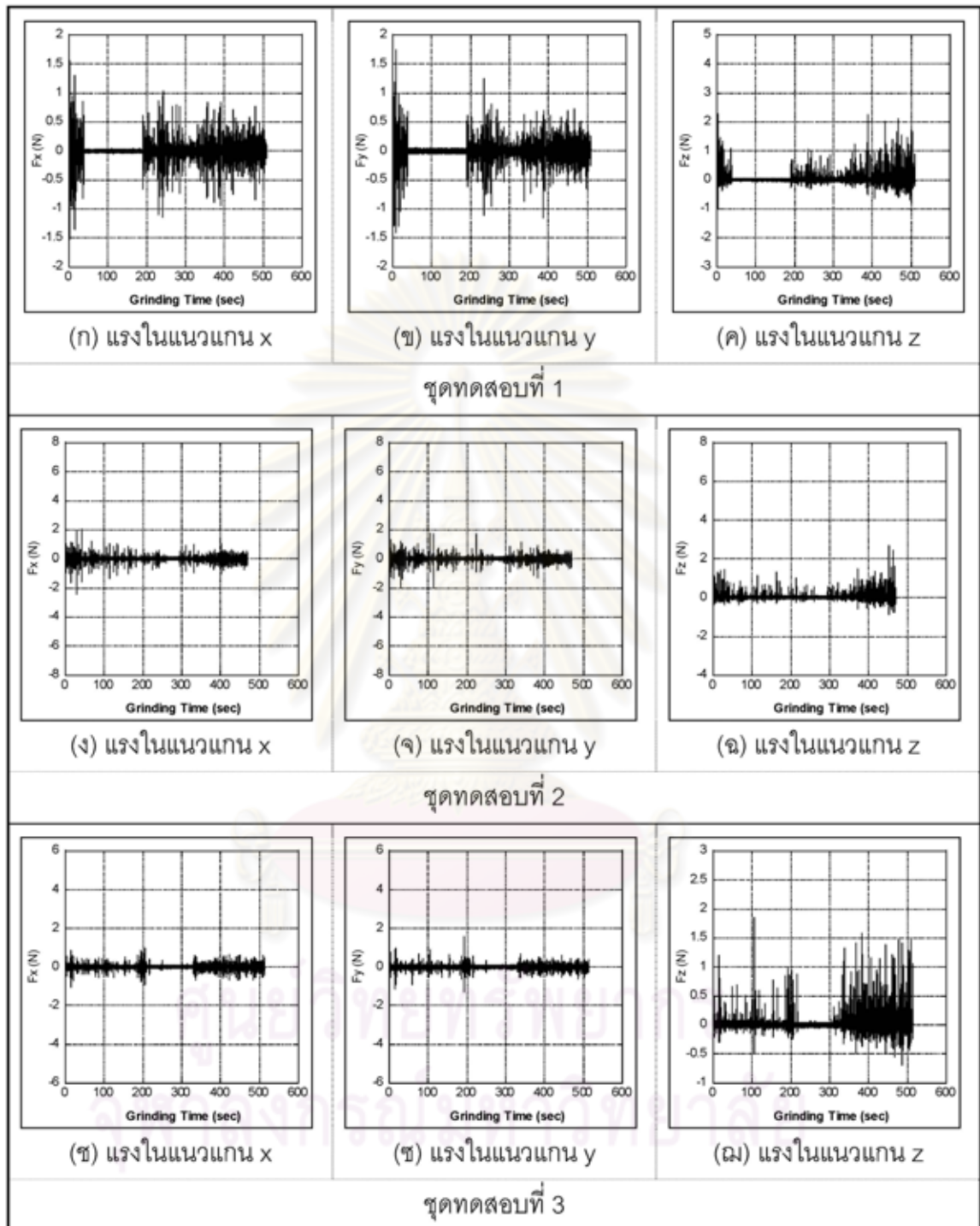
รูปที่ ก.12 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 300 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 8 มิลลิเมตรต่อนาที



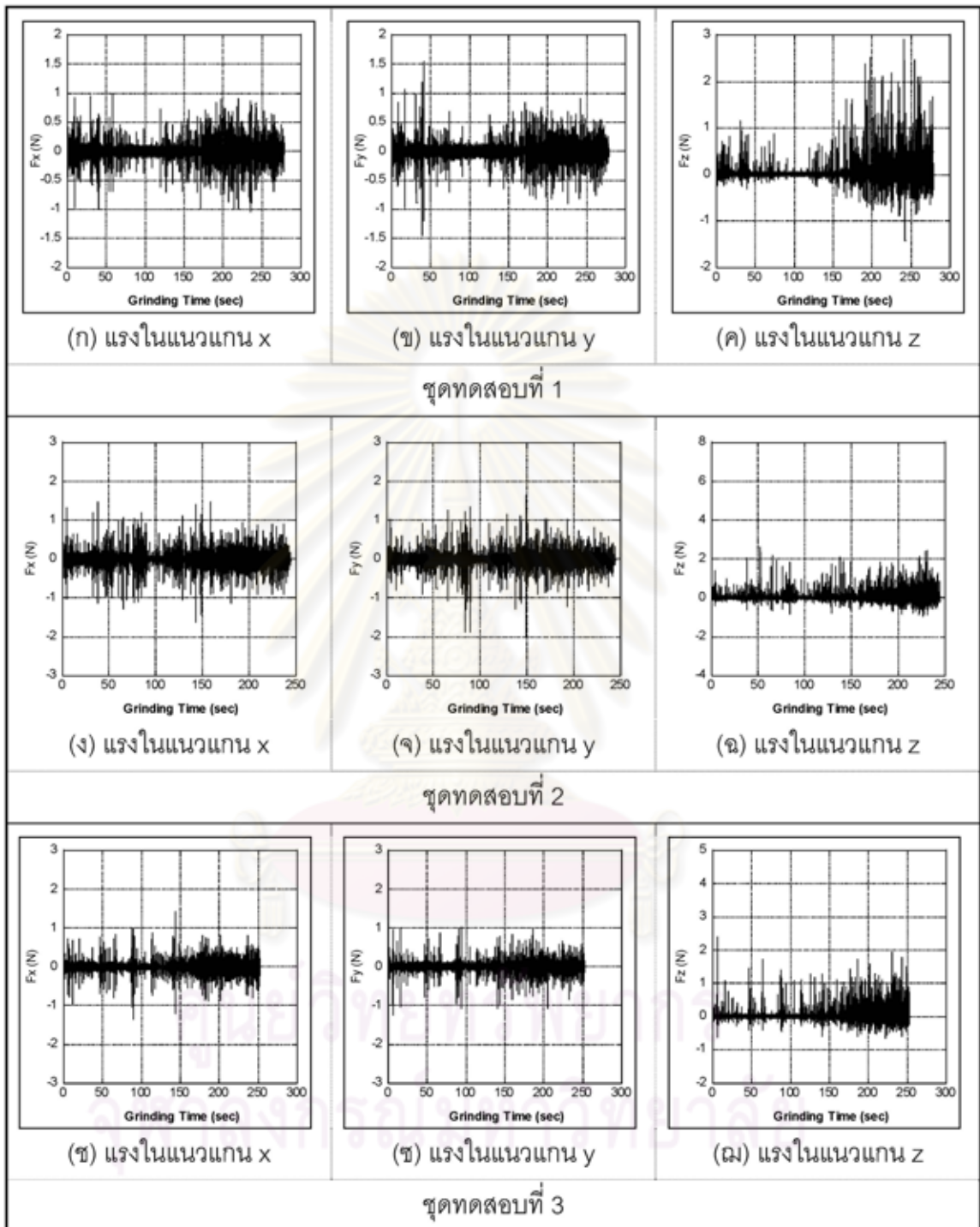
รูปที่ ก.13 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 300 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 9 มิลลิเมตรต่อนาที



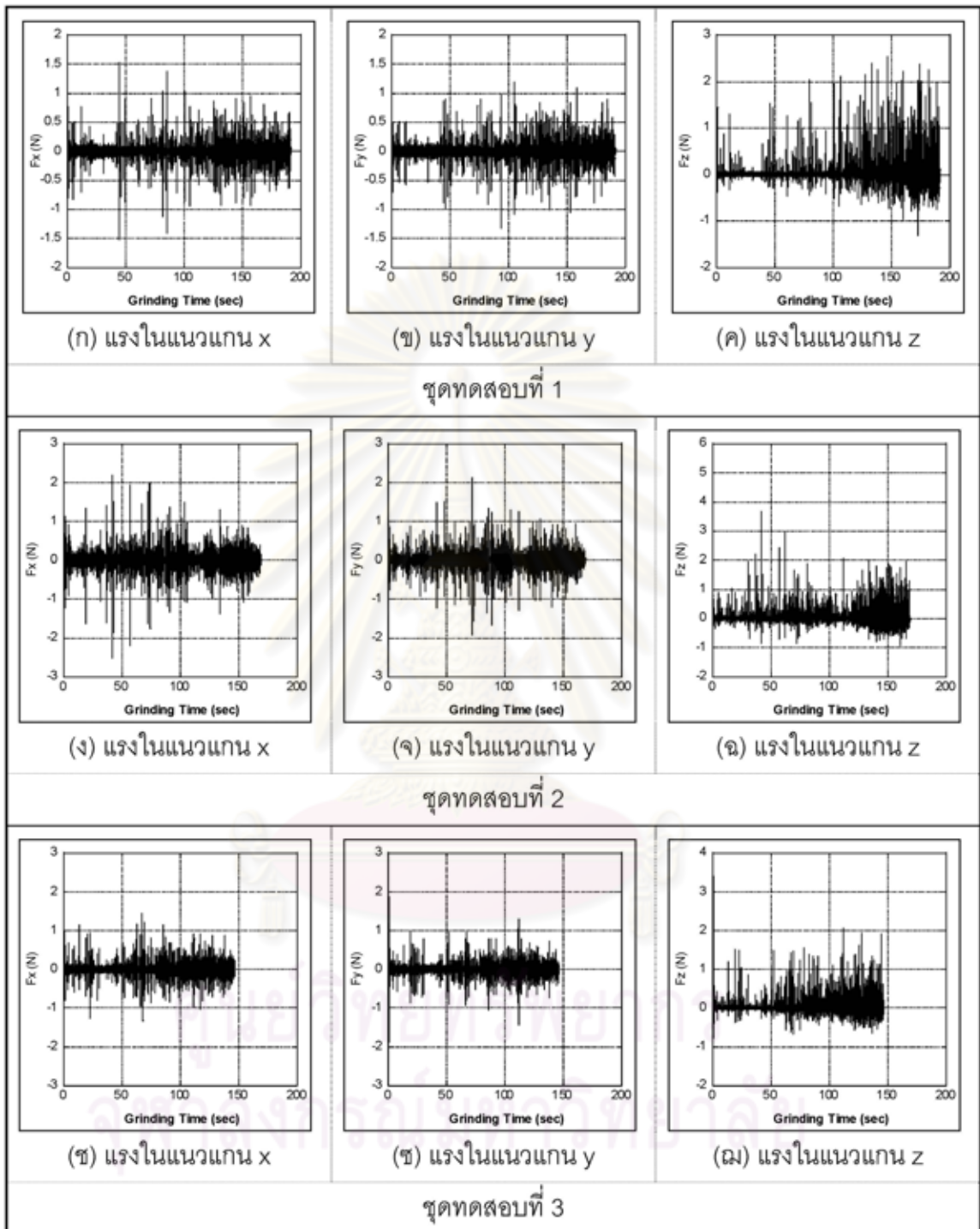
รูปที่ ก.14 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 300 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 10 มิลลิเมตรต่อนาที



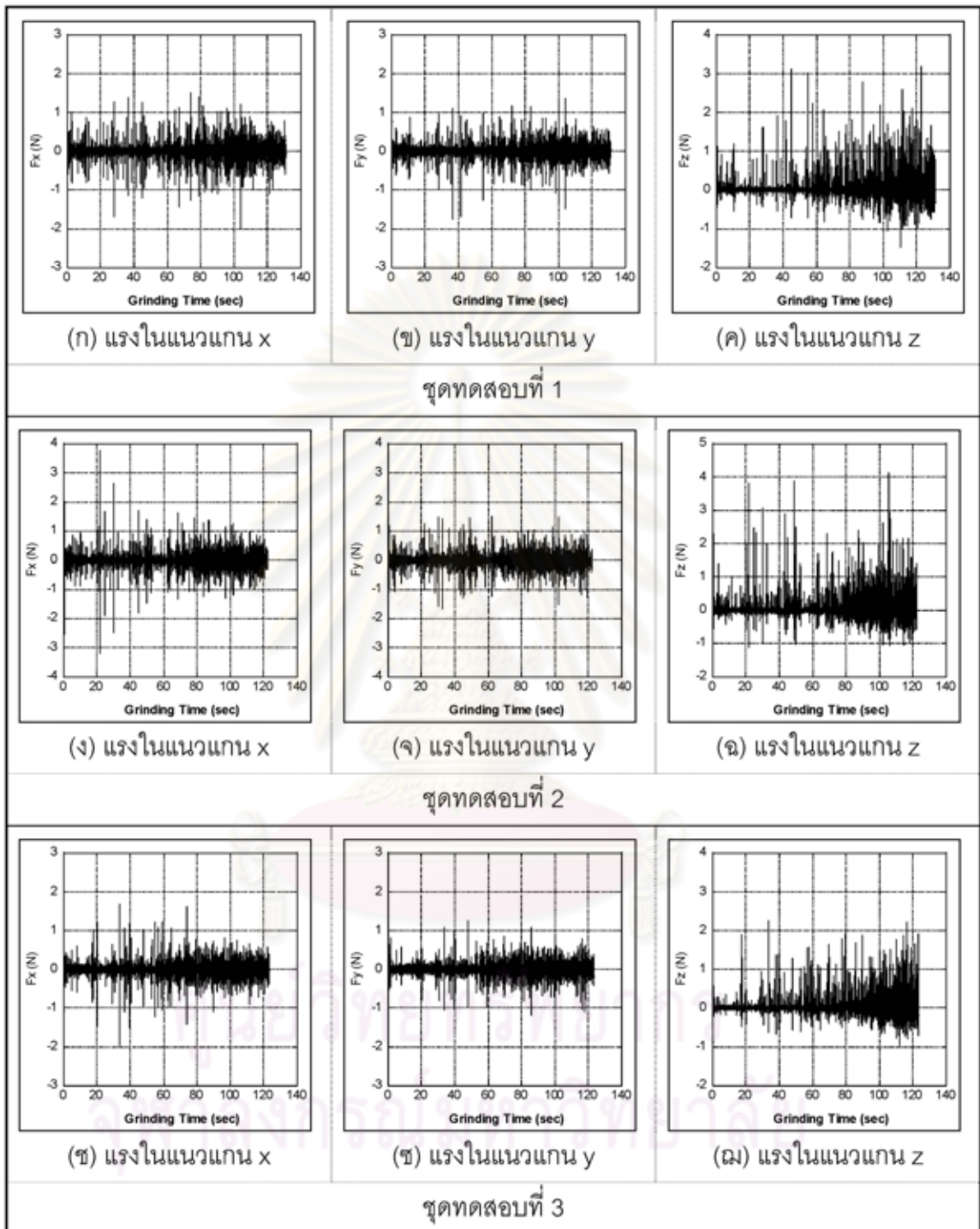
รูปที่ ก.15 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 400 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 มิลลิเมตรต่อนาที



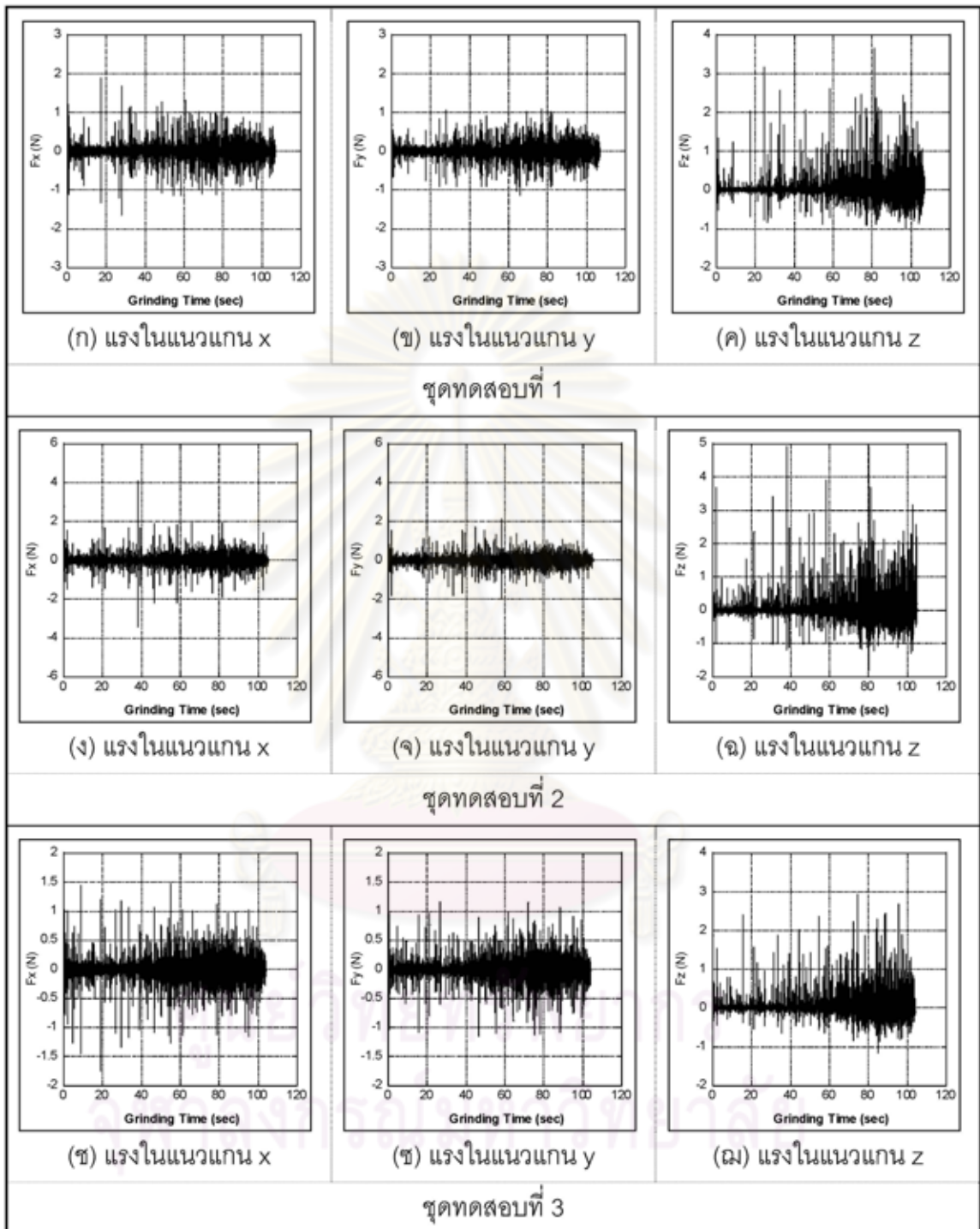
รูปที่ ก.16 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 400 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 2 มิลลิเมตรต่อนาที



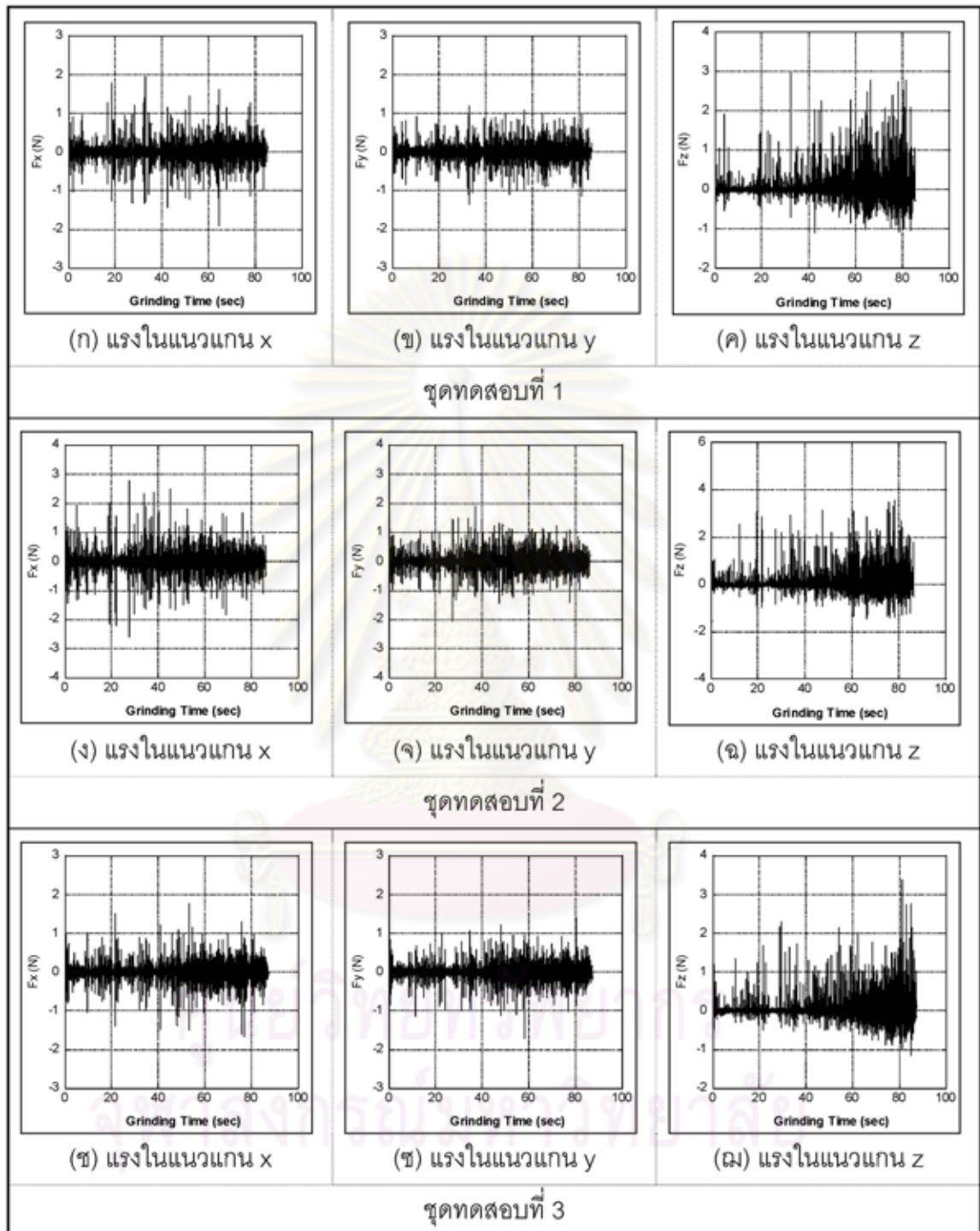
รูปที่ ก.17 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 400 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 3 มิลลิเมตรต่อนาที



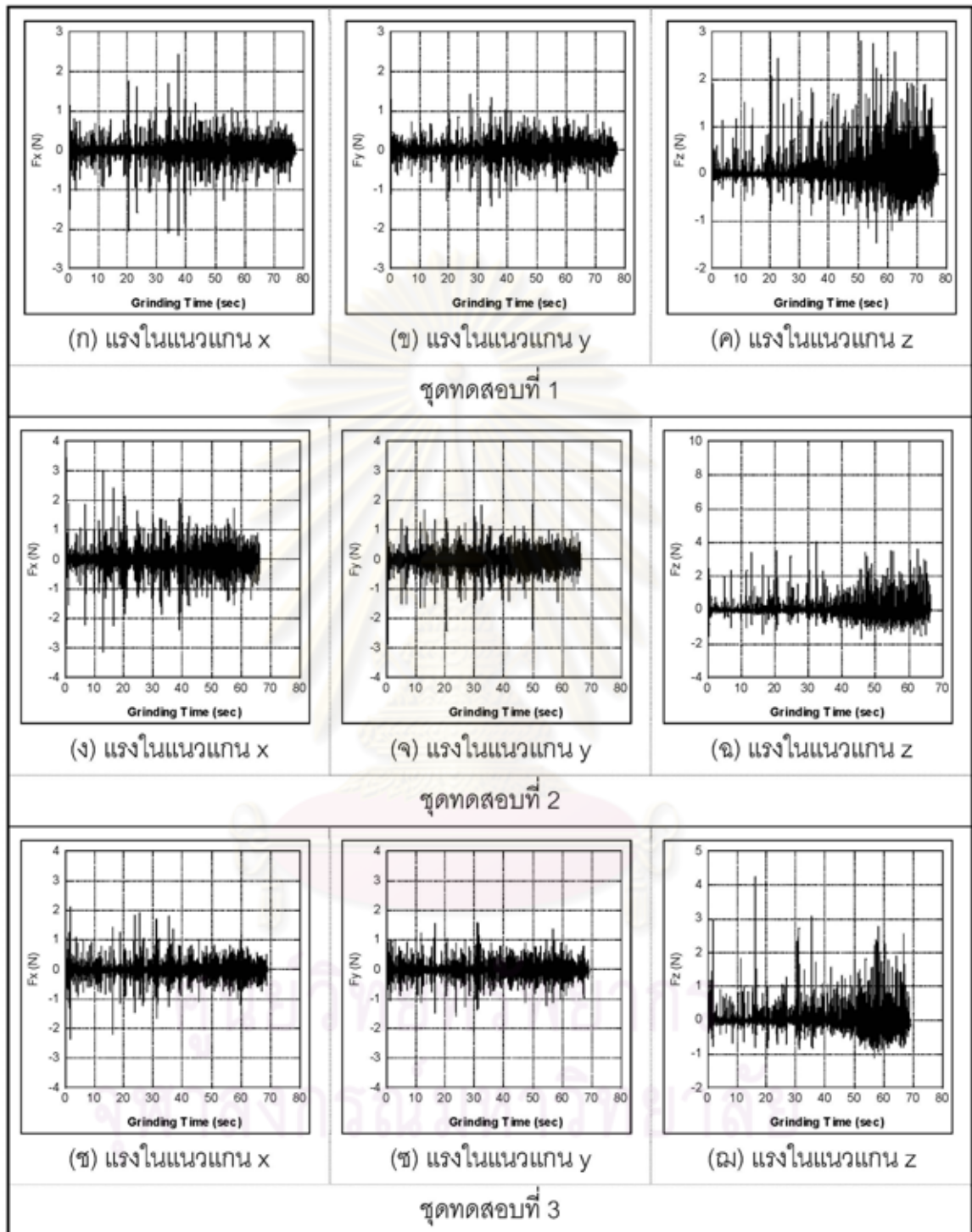
รูปที่ ก.18 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 400 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 4 มิลลิเมตรต่อนาที



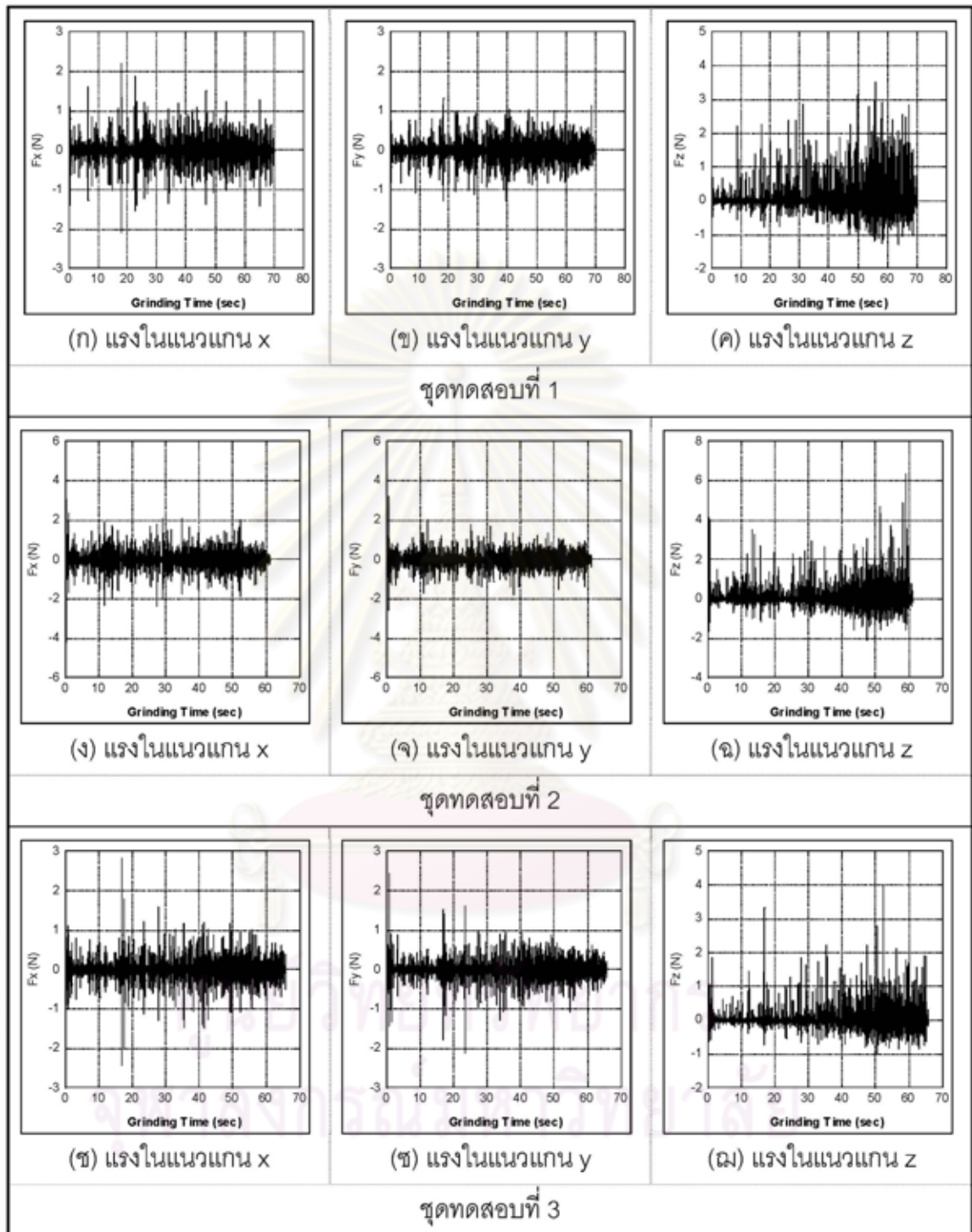
รูปที่ ก.19 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 400 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 5 มิลลิเมตรต่อนาที



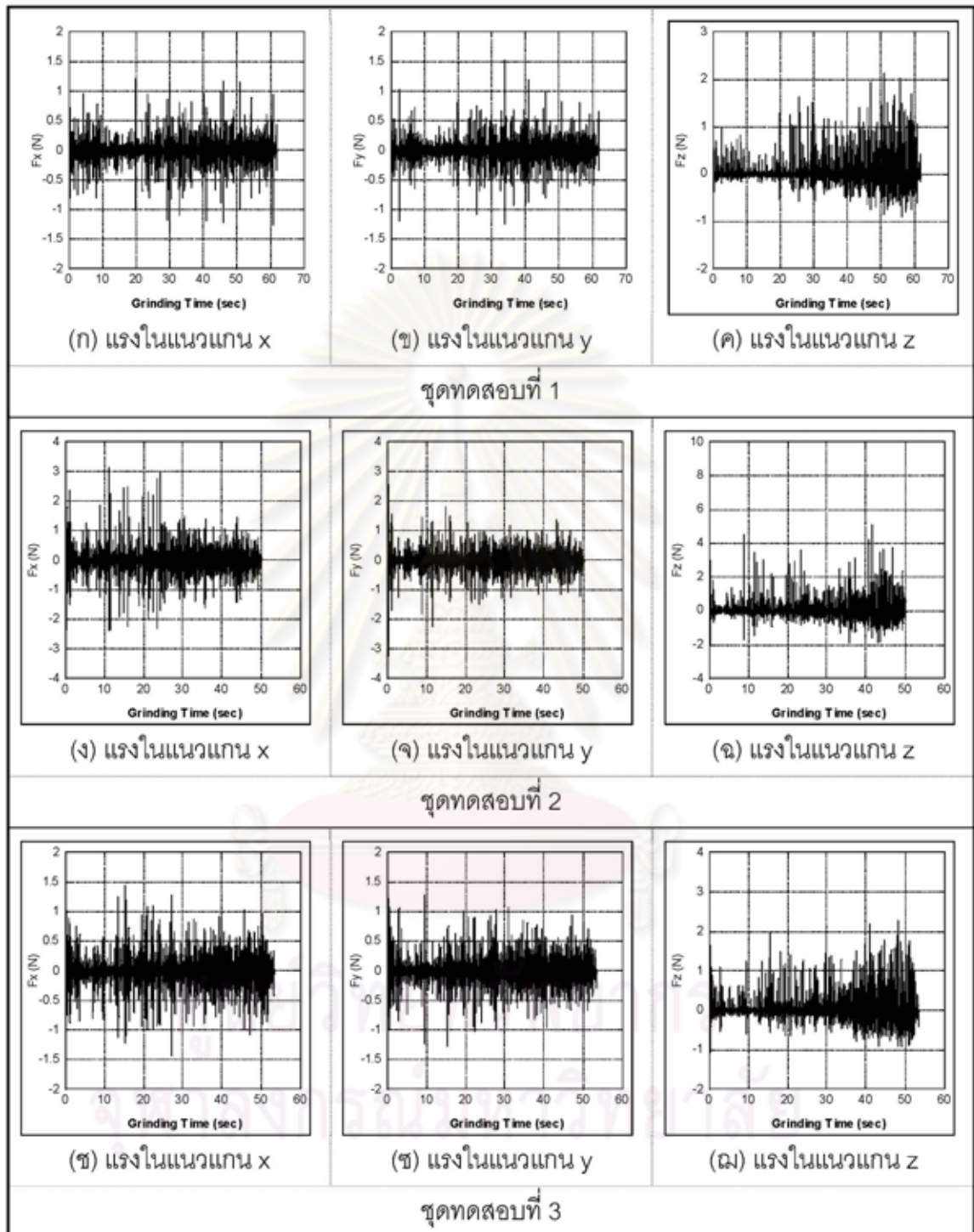
รูปที่ ก.20 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 400 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 6 มิลลิเมตรต่อนาที



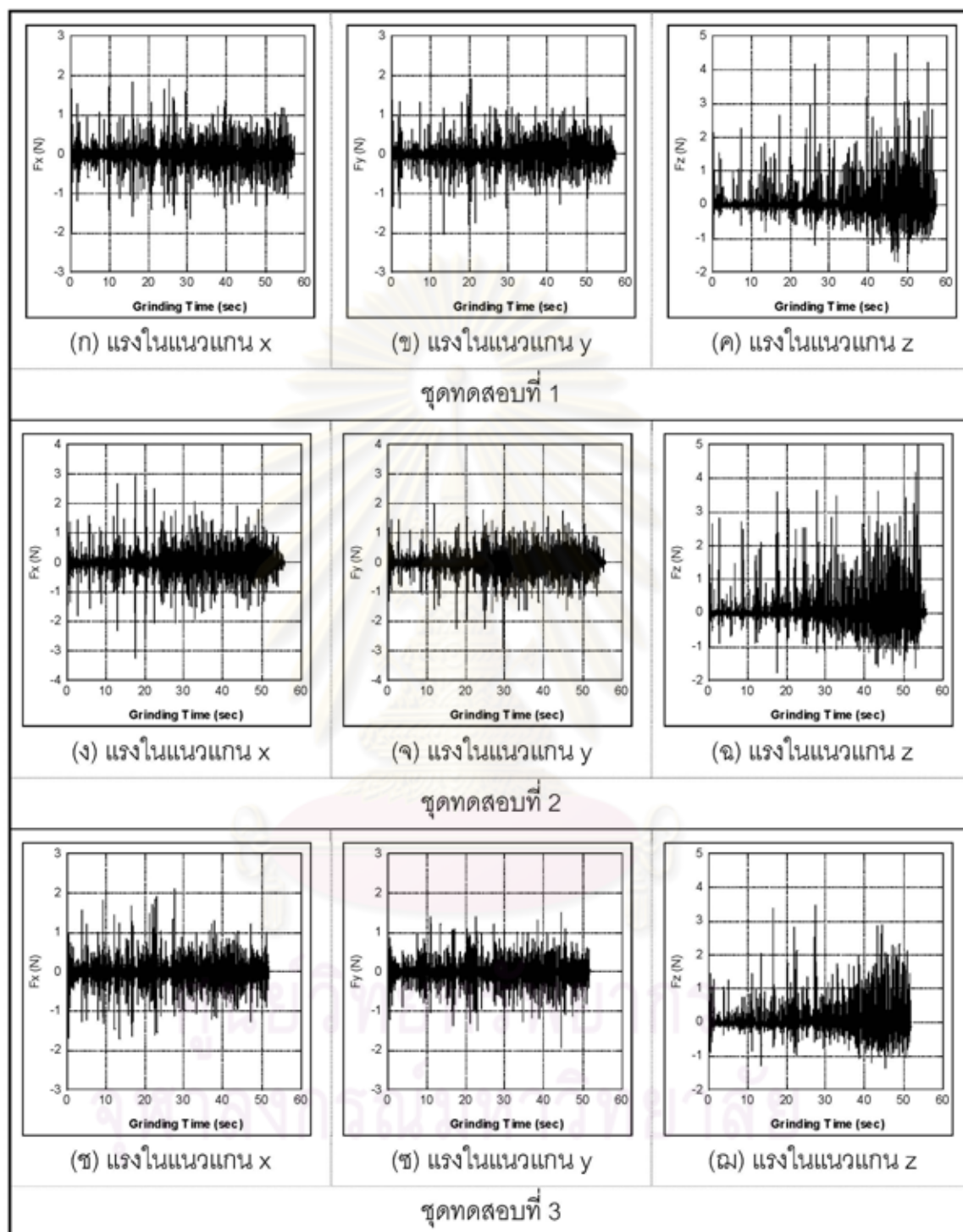
รูปที่ ก.21 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 400 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 7 มิลลิเมตรต่อนาที



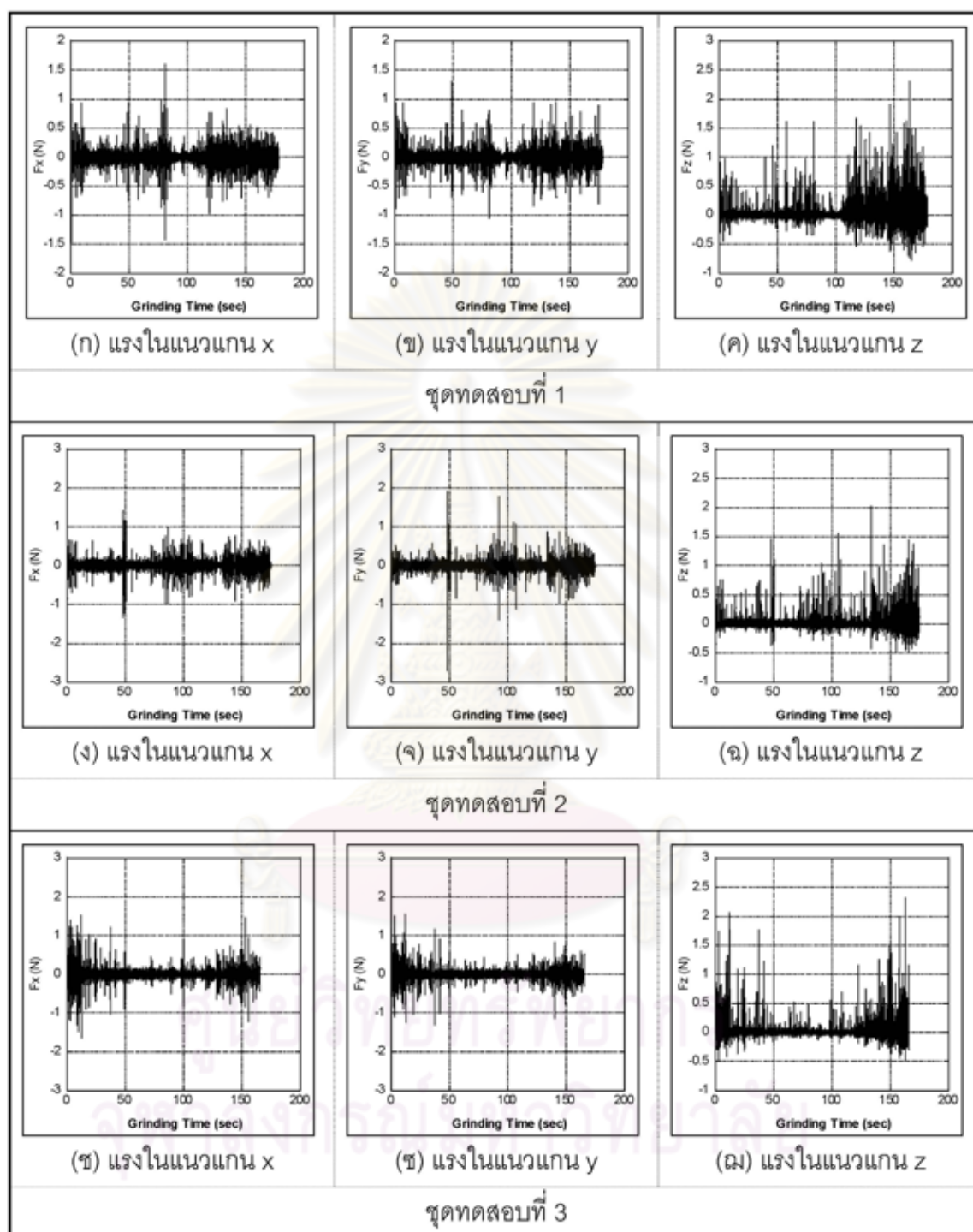
รูปที่ ก.22 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 400 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 8 มิลลิเมตรต่อนาที



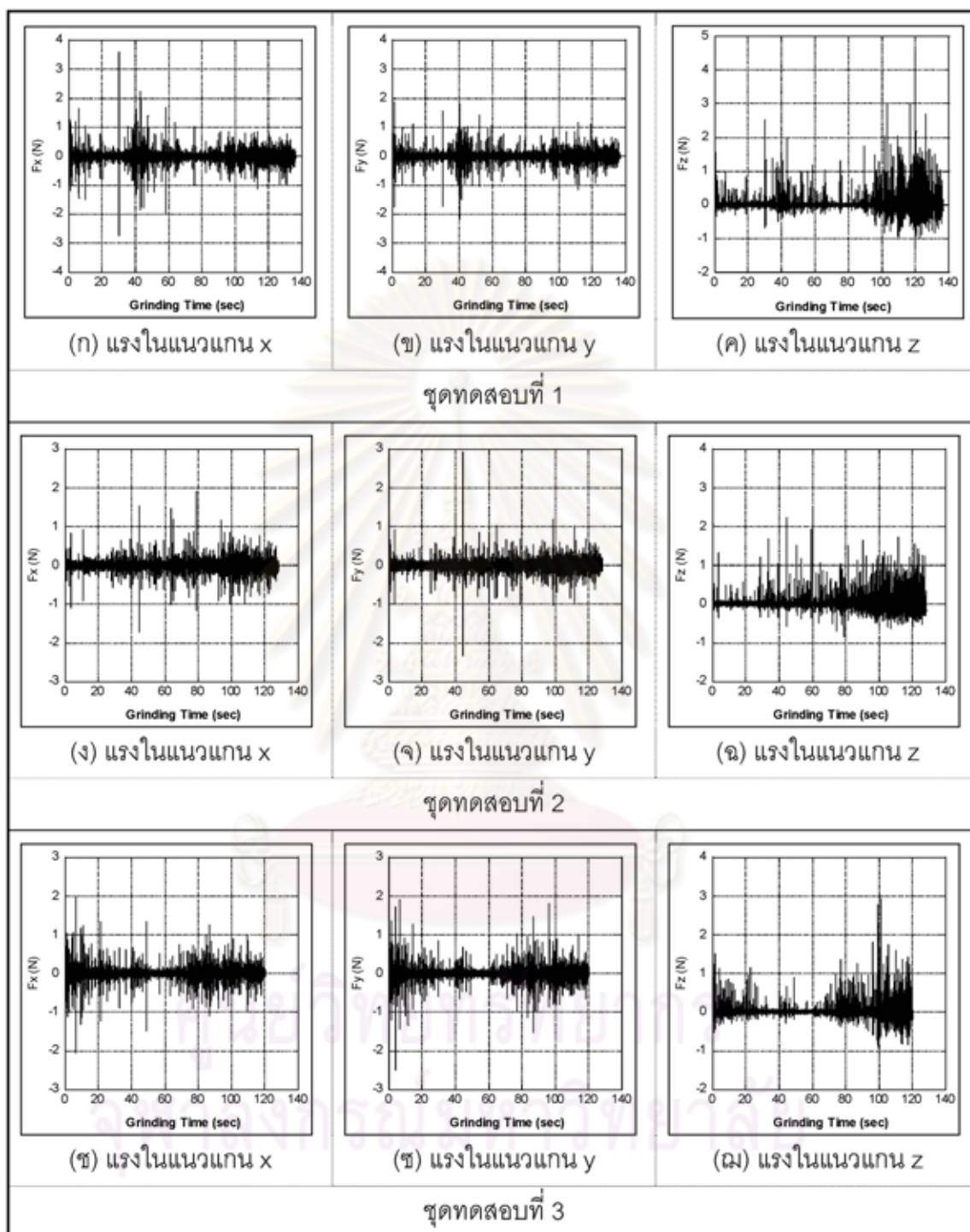
รูปที่ ก.23 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 400 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 9 มิลลิเมตรต่อนาที



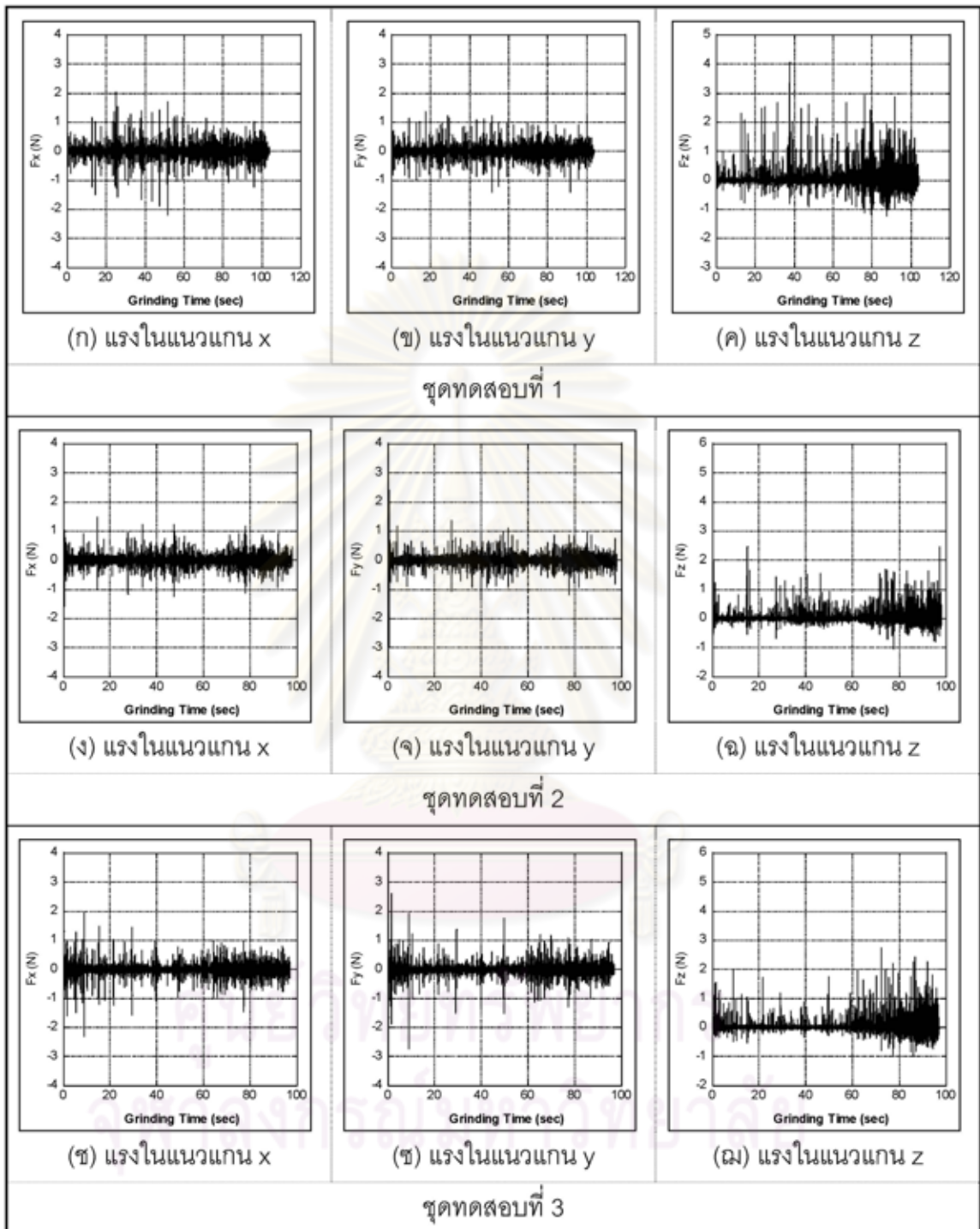
รูปที่ ก.24 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 400 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 10 มิลลิเมตรต่อนาที



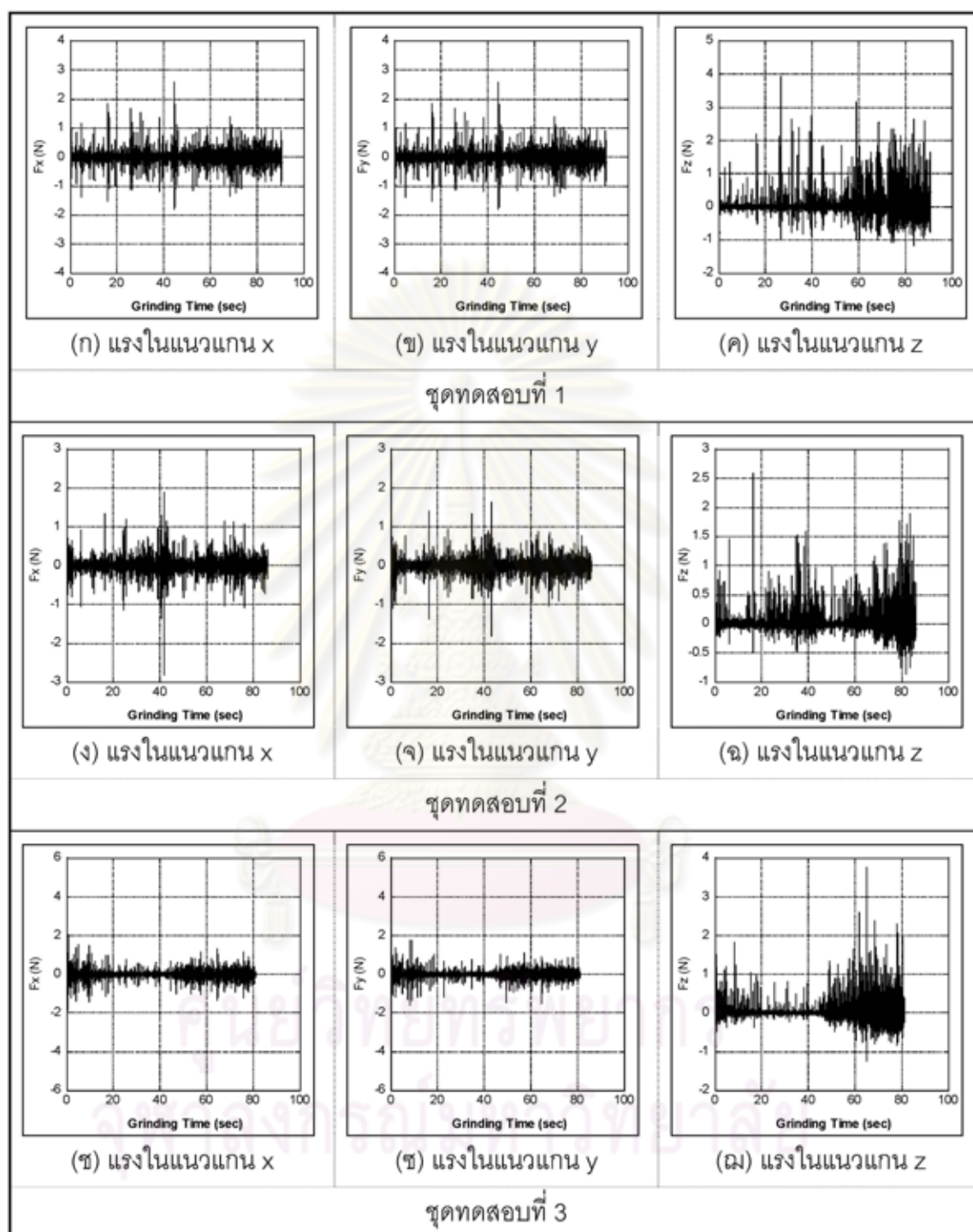
รูปที่ ก.25 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 500 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 3 มิลลิเมตรต่อนาที



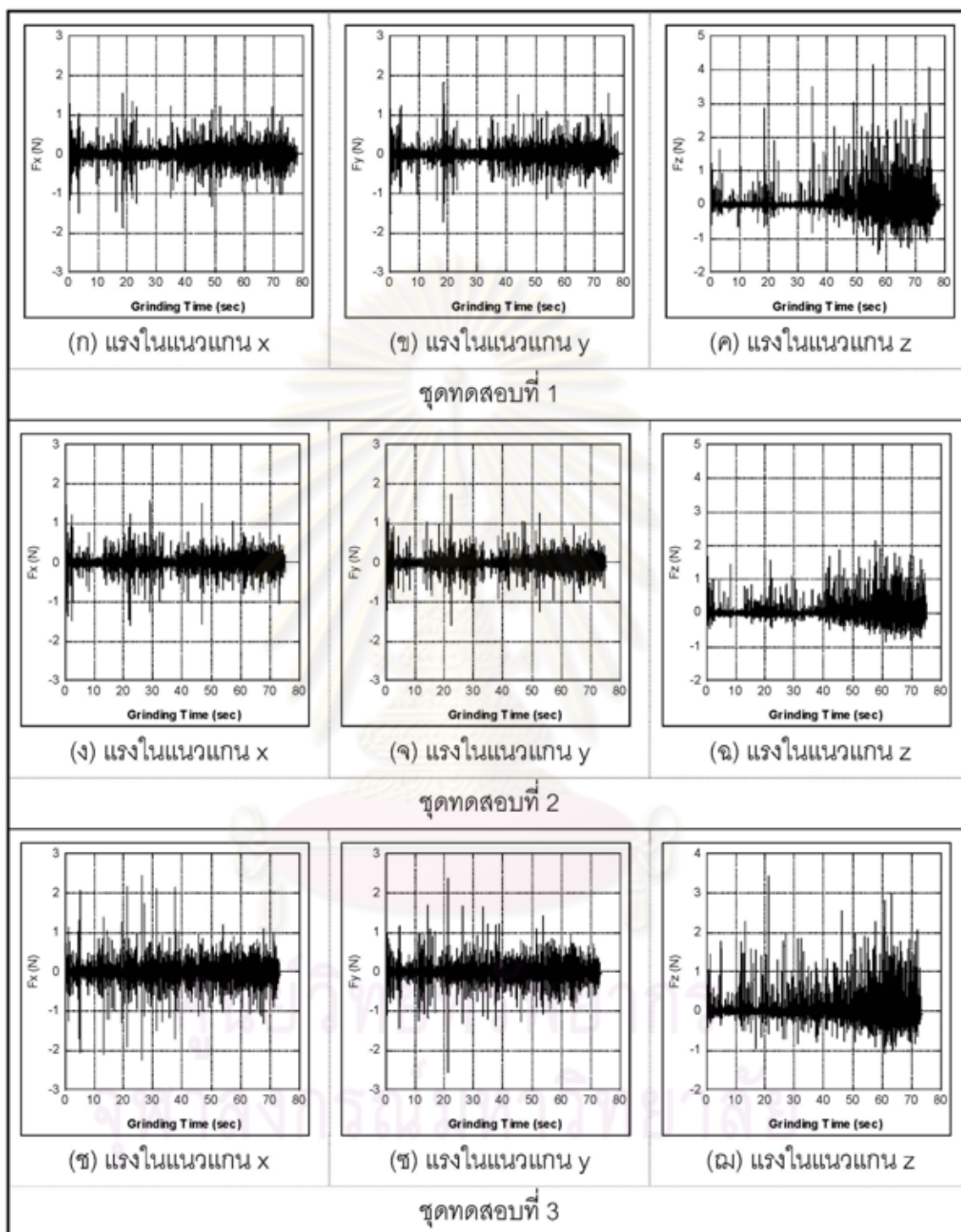
รูปที่ ก.26 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 500 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 4 มิลลิเมตรต่อนาที



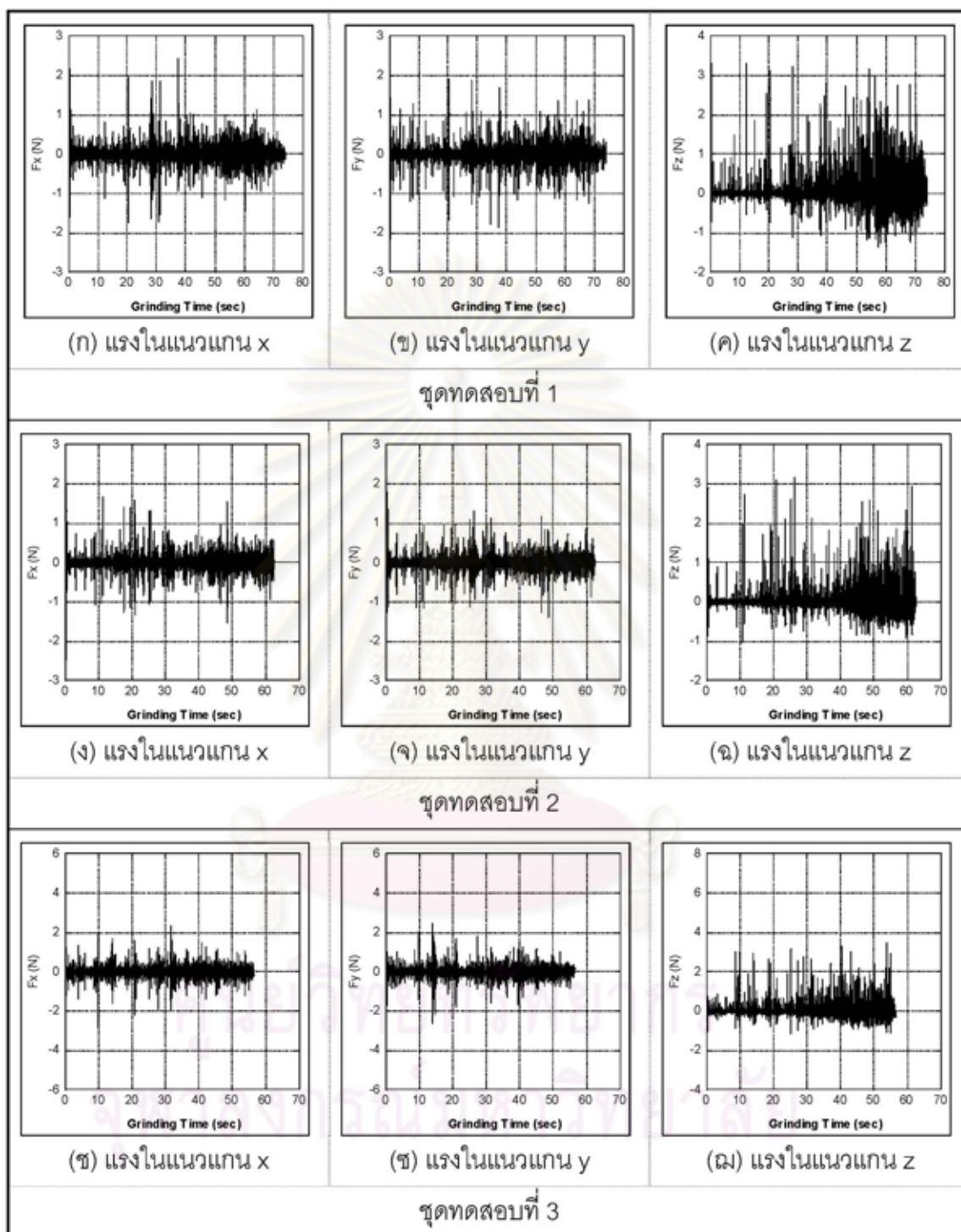
รูปที่ ก.27 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 500 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 5 มิลลิเมตรต่อนาที



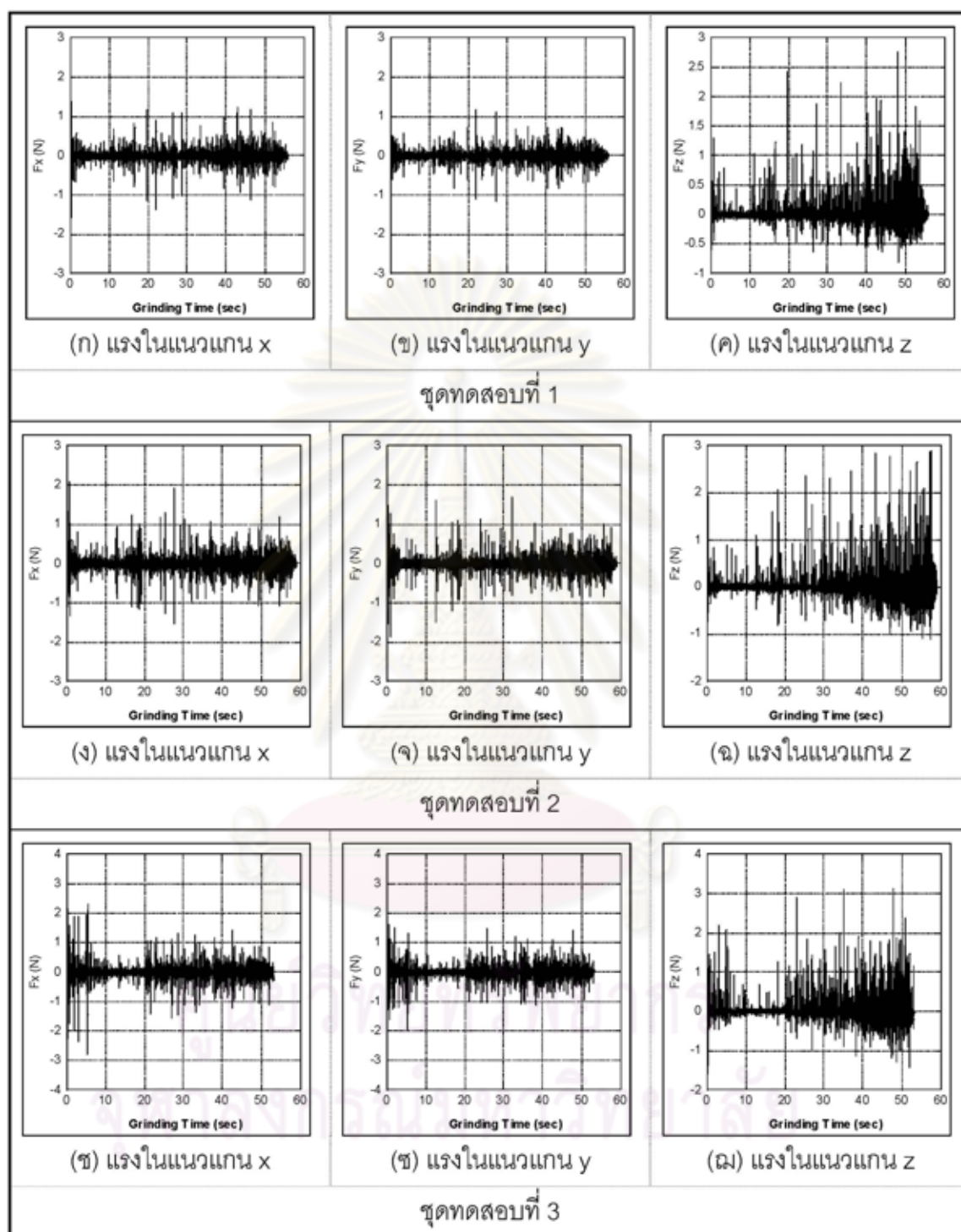
รูปที่ ก.28 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 500 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 6 มิลลิเมตรต่อนาที



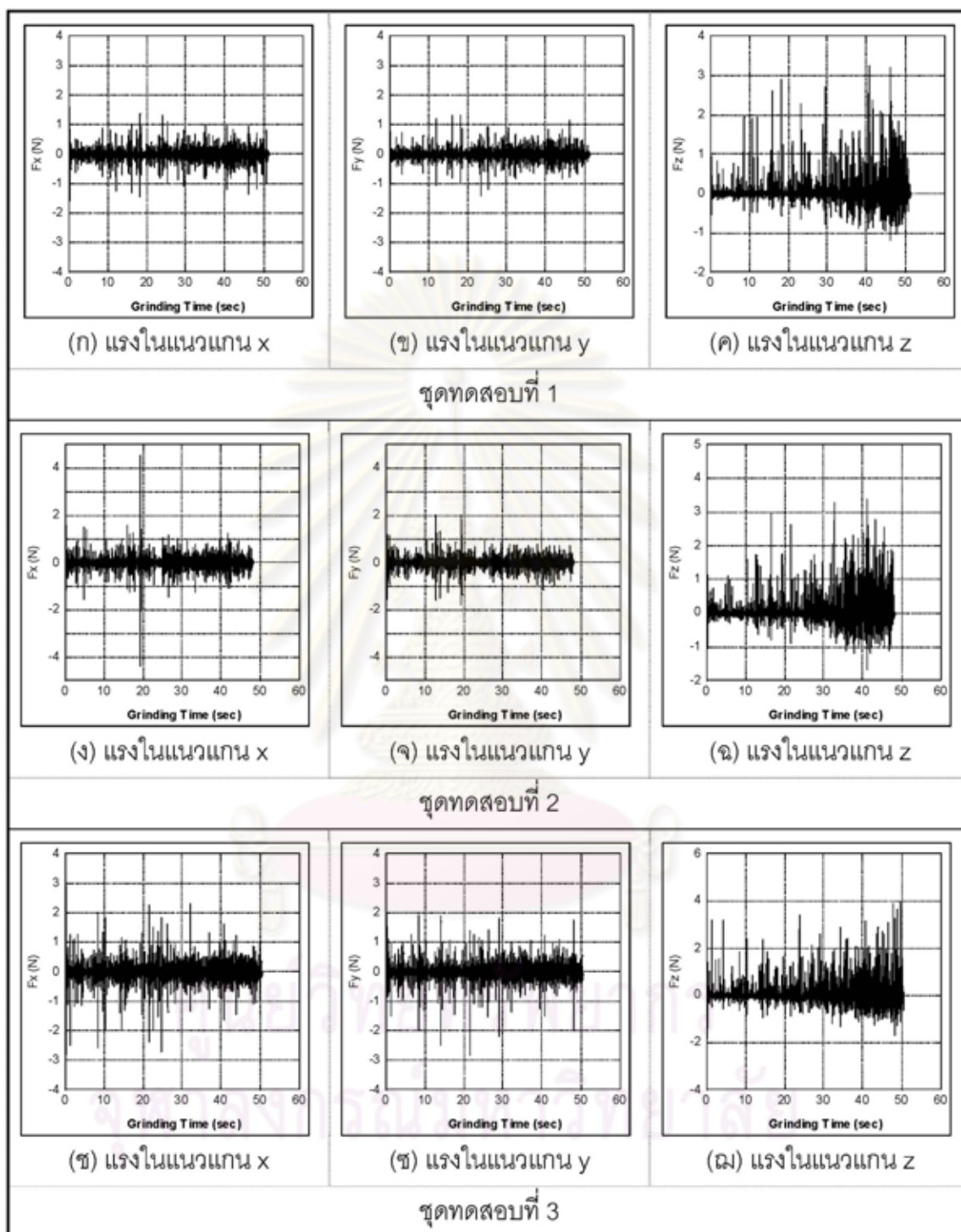
รูปที่ ก.29 สัญญาณแรงเจียรที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 500 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 7 มิลลิเมตรต่อนาที



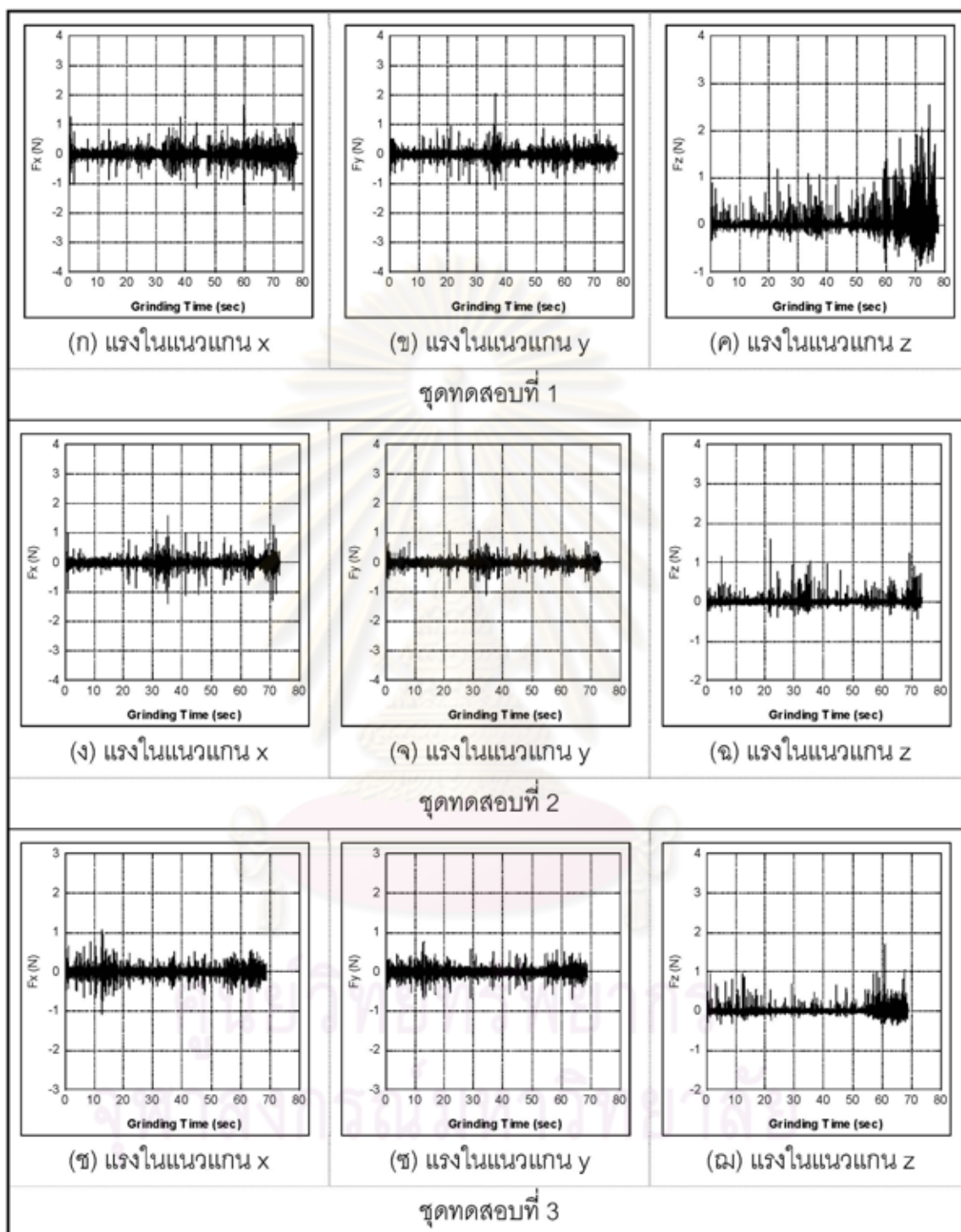
รูปที่ ก.30 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 500 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 8 มิลลิเมตรต่อนาที



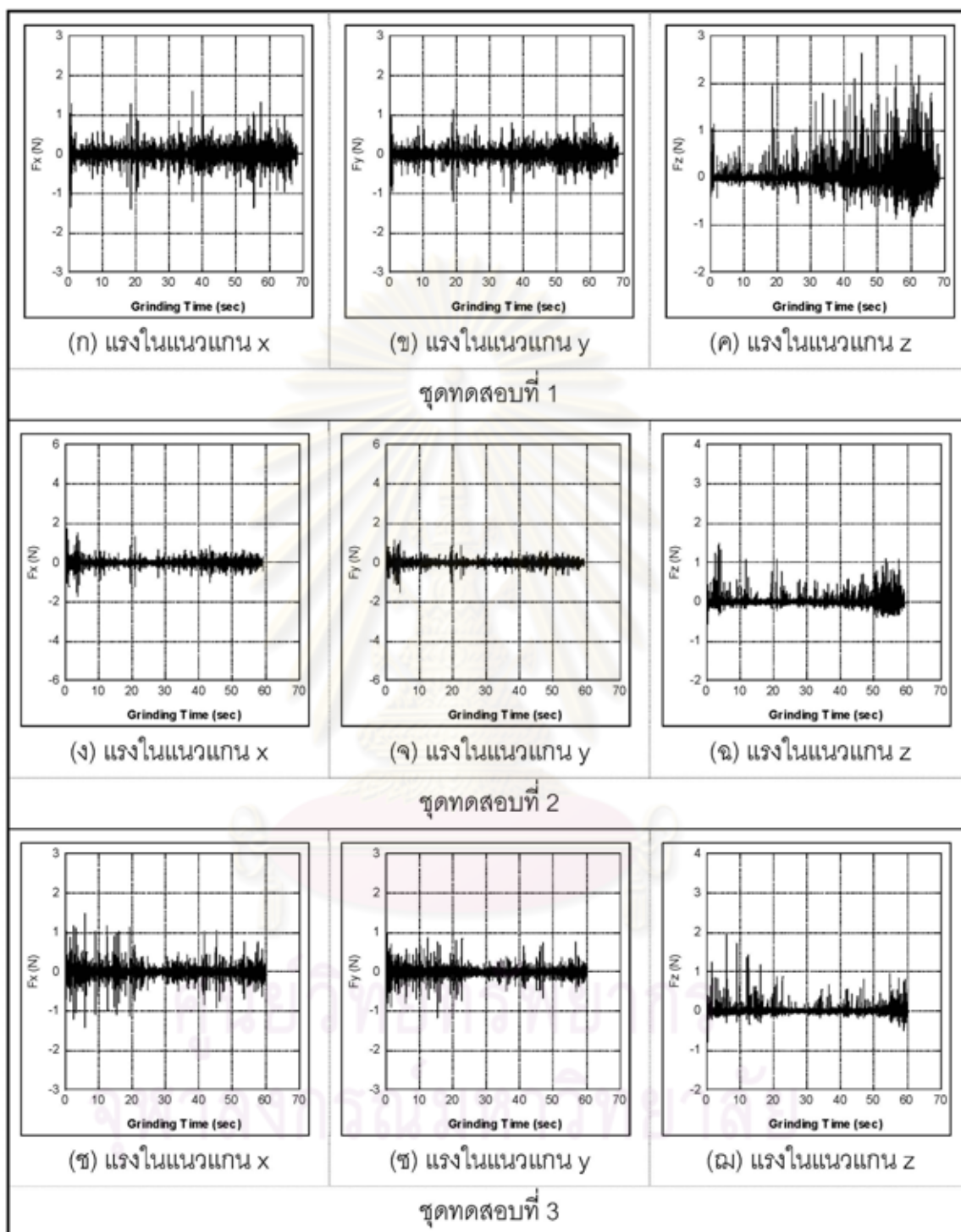
รูปที่ ก.31 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 500 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 9 มิลลิเมตรต่อนาที



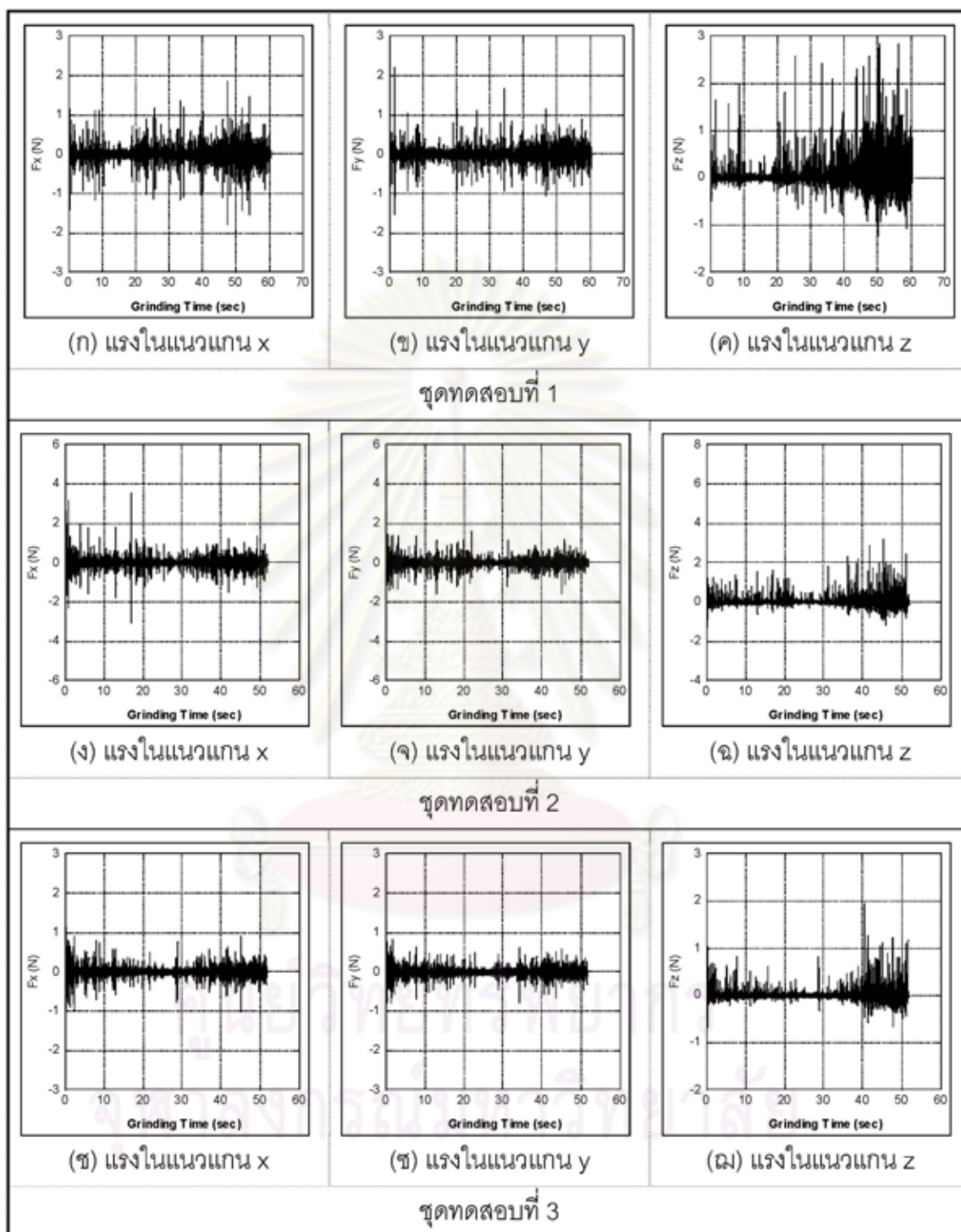
รูปที่ ก.32 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 500 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 10 มิลลิเมตรต่อนาที



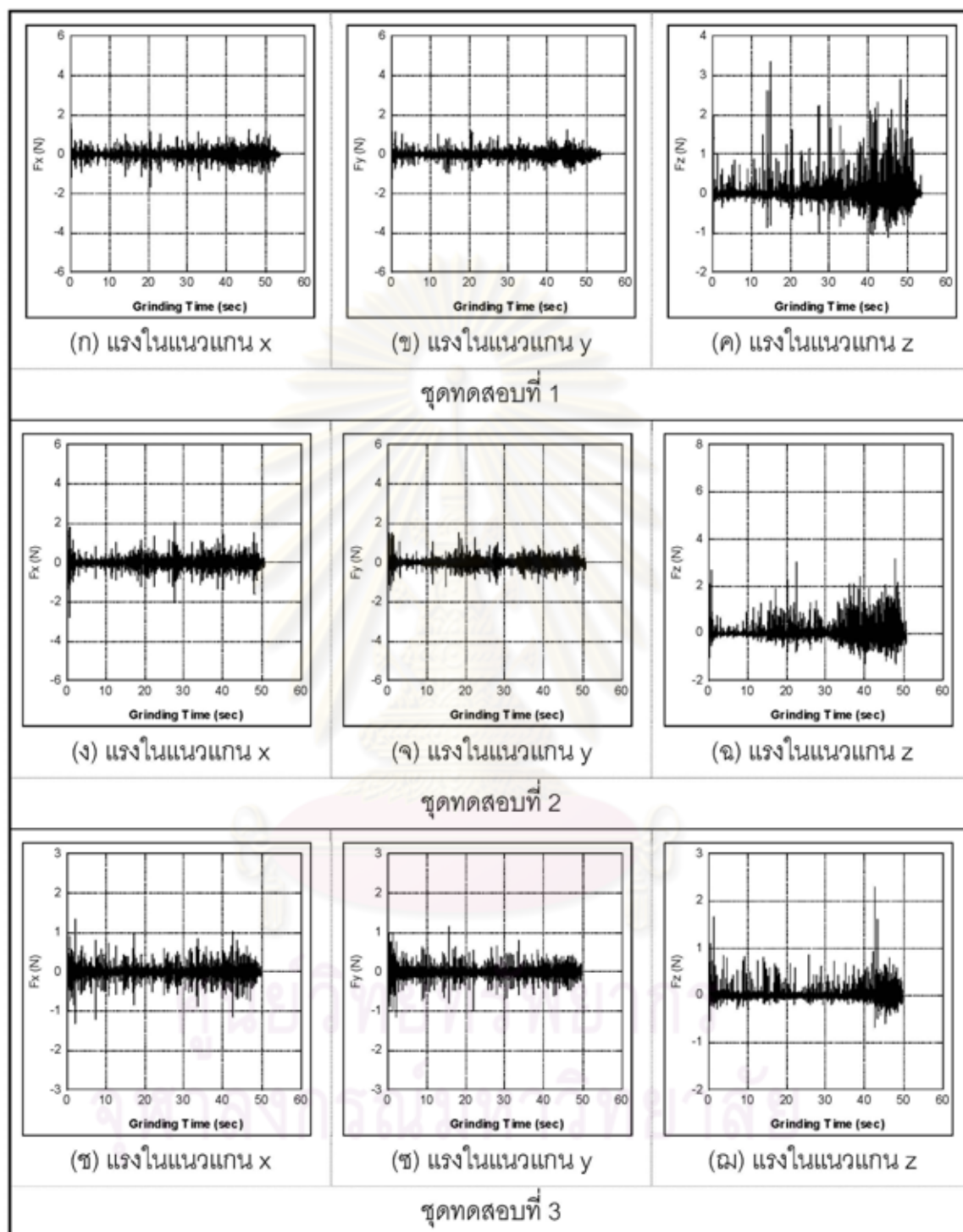
รูปที่ ก.33 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 600 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 7 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ ก.34 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 600 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 8 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ ก.35 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 600 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 9 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ ก.36 สัญญาณแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น ขณะเจียรด้วยความเร็วรอบจานขัด 600 รอบต่อนาที และ อัตราการป้อนชิ้นงาน 10 มิลลิเมตรต่อนาที



ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าของแรงที่วัดได้

ให้อยู่ในรูปแบบค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square; rms)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณค่าของแรงที่วัดได้ ให้อยู่ในรูปแบบค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square; rms)

สำหรับงานวิจัยนี้ เมื่อได้ค่าของความต่างศักย์จากเครื่องออสซิลอโคปแล้ว สามารถนำคำนวณเพื่อให้ได้ค่ารากกำลังสองของแรง มีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

1. คำนวณค่าจากหน่วยความต่างศักย์ (Volt; V) ให้เป็นหน่วยนิวตัน (N)
2. คำนวณค่าแรงในแนวแกน x และ y ให้เป็นแรงในแนวเส้นสัมผัส และ ค่าแรงในแนวแกน z ให้เท่ากับแรงกดปกติ
3. คำนวณค่าของแรงที่เกิดขึ้น ณ เวลาใดๆ ให้เป็นค่ารากกำลังสองเฉลี่ย

จากผลการวิจัย เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงวิธีการคำนวณค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรง ได้แสดงตัวอย่างการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการเจียรด้วยความเร็วรอบจานชุด 300 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนชิ้นงาน 2 มิลลิเมตรต่อนาที จากชุดการทดสอบที่ 2

ข้อมูลที่ได้จากการวัดมีจำนวน 24900 ข้อมูล เนื่องจากความจำกัดของการนำเสนอ จึงได้นำเสนอเพียงจำนวน 30 ข้อมูลแรกเท่านั้น ซึ่งแสดงในตารางที่ ข.1 ที่เรียงลำดับตั้งแต่ข้อมูลที่ 1 ถึง 30 หรือข้อมูลที่เวลา 0.01 ถึง 0.30 วินาที

การคำนวณค่าจากหน่วยความต่างศักย์ให้เป็นหน่วยนิวตัน

ในงานวิจัยนี้ ได้การแปลงหน่วยจากสมการที่ ข.1 ด้วยการนำค่าของความต่างศักย์ที่วัดได้ในหน่วยโวลต์ มาคูณด้วยค่าคงที่สำหรับปัจจัยมาตราส่วนในการก่อกำเนิดแรง (Force generator scale factor, FGSF) ทำให้ได้ค่าของแรงในหน่วยนิวตัน

$$F_{ij} = V_{ij} \times FGSF \dots\dots\dots (ข.1)$$

- เมื่อ
- F_{ij} = แรงในแนวแกน i ณ เวลา j ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 - V_{ij} = ความต่างศักย์แรงที่วัดได้ในแกน i ณ เวลา j ใดๆ มีหน่วยเป็น โวลต์
 - $FGSF$ = ค่าคงที่สำหรับปัจจัยมาตราส่วนในการก่อกำเนิดแรง (10 นิวตัน/โวลต์)
 - i = แนวแกน x y หรือ z
 - j = เวลาใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน

ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างชุดข้อมูลที่ี้ได้จากการวัดและการคำนวณ

No.	Time (sec)	ข้อมูลจากการวัด			ข้อมูลจากการคำนวณ				
		Vx (V)	Vy (V)	Vz (V)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Ft (N)	Fn (N)
1	0.01	0.0013	0.0027	0.0000	0.013	0.027	0.000	0.030	0.000
2	0.02	0.0033	0.0127	0.0100	0.033	0.127	0.100	0.131	0.100
3	0.03	0.0033	0.0367	0.0400	0.033	0.367	0.400	0.368	0.400
4	0.04	-0.0487	0.2713	0.4213	-0.487	2.713	4.213	2.757	4.213
5	0.05	0.0753	-0.2167	-0.0993	0.753	-2.167	-0.993	2.294	-0.993
6	0.06	-0.0253	0.0380	0.0813	-0.253	0.380	0.813	0.457	0.813
7	0.07	0.2320	0.2067	0.3073	2.320	2.067	3.073	3.107	3.073
8	0.08	-0.0267	-0.3360	-0.1667	-0.267	-3.360	-1.667	3.371	-1.667
9	0.09	-0.0827	0.1147	-0.0487	-0.827	1.147	-0.487	1.414	-0.487
10	0.10	0.1800	0.1587	0.1007	1.800	1.587	1.007	2.400	1.007
11	0.11	-0.0960	-0.0913	-0.1473	-0.960	-0.913	-1.473	1.325	-1.473
12	0.12	-0.1080	-0.0240	-0.0607	-1.080	-0.240	-0.607	1.106	-0.607
13	0.13	0.1887	-0.0400	0.0100	1.887	-0.400	0.100	1.929	0.100
14	0.14	-0.0933	0.0747	-0.0560	-0.933	0.747	-0.560	1.195	-0.560
15	0.15	-0.0460	-0.0947	-0.0827	-0.460	-0.947	-0.827	1.053	-0.827
16	0.16	0.0327	0.0233	-0.0780	0.327	0.233	-0.780	0.401	-0.780
17	0.17	-0.0900	0.0480	-0.0440	-0.900	0.480	-0.440	1.020	-0.440
18	0.18	0.0520	-0.1093	-0.0340	0.520	-1.093	-0.340	1.211	-0.340
19	0.19	-0.0973	0.0307	-0.0233	-0.973	0.307	-0.233	1.020	-0.233
20	0.20	0.0840	0.0013	0.0520	0.840	0.013	0.520	0.840	0.520
21	0.21	-0.0440	0.0247	-0.0440	-0.440	0.247	-0.440	0.504	-0.440
22	0.22	-0.0500	-0.0340	0.1267	-0.500	-0.340	1.267	0.605	1.267
23	0.23	0.1893	-0.1387	0.0667	1.893	-1.387	0.667	2.347	0.667
24	0.24	-0.1680	0.0647	-0.0253	-1.680	0.647	-0.253	1.800	-0.253
25	0.25	0.2100	-0.2507	0.0593	2.100	-2.507	0.593	3.270	0.593
26	0.26	-0.2113	0.1787	-0.0853	-2.113	1.787	-0.853	2.767	-0.853
27	0.27	0.0827	0.0113	-0.0653	0.827	0.113	-0.653	0.834	-0.653
28	0.28	-0.0100	0.0087	-0.0547	-0.100	0.087	-0.547	0.132	-0.547
29	0.29	-0.1033	0.0820	-0.0427	-1.033	0.820	-0.427	1.319	-0.427
30	0.30	0.1033	-0.0420	-0.0173	1.033	-0.420	-0.173	1.115	-0.173

จากตารางที่ ข.1 โดยใช้ข้อมูลลำดับที่ 9 การคำนวณค่าความต่างศักย์ เป็นแรงในแนวแกน x y และ z ใช้สมการที่ ข.1 ได้ดังนี้

$$F_{x_9} = -0.0827 \times 10 = -0.827 \text{ นิวตัน}$$

$$F_{y_9} = 0.1147 \times 10 = 1.147 \text{ นิวตัน}$$

$$F_{z_9} = -0.04787 \times 10 = -0.478 \text{ นิวตัน}$$

การคำนวณค่าแรงในแนวแกน x และ y ให้เป็นแรงในแนวเส้นสัมผัส

เมื่อได้ค่าของแรงในหน่วยนิวตัน จึงทำการคำนวณเพื่อให้เป็นแรงในแนวเส้นสัมผัส ดังสมการที่ ข.2 ด้วยแรงในแนวแกน x และ y และ ให้แรงกดปกติเท่ากับแรงในแนวแกน z ดังสมการที่ ข.3

$$Ft_i = \sqrt{Fx_i^2 + Fy_i^2} \dots\dots\dots (ข.2)$$

$$Fn_i = Fz_i \dots\dots\dots (ข.3)$$

เมื่อ Ft_i = แรงในแนวเส้นสัมผัส หรือ แรงลัพธ์ ณ เวลา i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 Fn_i = แรงปกติ ณ เวลา i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 Fx_i = แรงในแนวแกน x ณ เวลา i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 Fy_i = แรงในแนวแกน y ณ เวลา i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 Fz_i = แรงในแนวแกน z ณ เวลา i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 i = เวลา มีหน่วยเป็น วินาที

เมื่อได้ค่า F_{x_9} , F_{y_9} และ F_{z_9} แล้ว นำมาแทนค่าในสมการที่ ข.2 และ ข.3 ทำให้ได้ค่าแรงในแนวเส้นสัมผัส และแรงกดปกติ ที่เวลา 0.09 วินาที

$$\begin{aligned} Ft_9 &= \sqrt{Fx_9^2 + Fy_9^2} \\ &= \sqrt{(-0.827)^2 + (1.147)^2} = 1.41 \text{ นิวตัน} \end{aligned}$$

$$Fn_9 = Fz_9 = -0.487 \text{ นิวตัน}$$

การคำนวณค่าแรง ณ เวลาใดๆ ให้เป็นค่ารากกำลังสองเฉลี่ย

เมื่อได้แรงในแนวเส้นสัมผัสและแรงกดปกติแล้ว สามารถใช้สมการที่ ข.4 ในการคำนวณ เพื่อให้ได้ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรง

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^M F_i^2} \dots\dots\dots (ข.4)$$

- เมื่อ F_{rms} = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรง มีหน่วยเป็น นิวตัน
 i = ลำดับข้อมูล มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง N
 F_i = แรง ณ ลำดับข้อมูล ที่ i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 N = จำนวนข้อมูล

เมื่อได้ค่าแรงในแนวเส้นสัมผัส และแรงกดปกติ ครบทั้ง 24900 ข้อมูลแล้ว จึงนำมา คำนวณด้วยสมการที่ ข.4 เพื่อให้ได้ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงเฉื่อย ดังนี้

$$Ft_{rms} = \sqrt{\frac{1}{24900} \sum_{i=1}^{24900} Ft_i^2} = 0.180 \text{ นิวตัน}$$

$$Fn_{rms} = \sqrt{\frac{1}{24900} \sum_{i=1}^{24900} Fn_i^2} = 0.161 \text{ นิวตัน}$$

จากการทดลองชุดที่ 2 โดยความเร็วรอบจานชุด 300 รอบต่อนาที และอัตราการบิน ชีงงาน 2 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการคำนวณ แรงในแนวเส้นสัมผัส (Ft_{rms}) เท่ากับ 0.180 นิวตัน และแรงกดปกติ (Fn_{rms}) เท่ากับ 0.161 นิวตัน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์สมการเส้นตรง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์สมการเส้นถดถอย

จากผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อที่ 4.2 เมื่อนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม SigmaPlot ได้ผลทางสถิติ ดังนี้

1. แรงในแนวเส้นสัมผัส
2. แรงกดปกติ
3. อัตราส่วนแรง
4. อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก

1. แรงในแนวเส้นสัมผัส

จากผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อที่ 4.2 เมื่อนำมาคำนวณของแรงในแนวเส้นสัมผัส ในรูปแบบของลอการิทึมได้ดังตารางที่ ค.1 ถึง ค.3 และเมื่อใช้โปรแกรม SigmaPlot วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความเร็วยรอบงานขัด (N) และ อัตราการป้อนชิ้นงาน (f) ที่มีอิทธิพลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส (Ft) ได้ผลดังรูปที่ ค.1 เมื่อพิจารณาค่าคงที่ของสมการคือ 0.381 ได้ค่า P-value เท่ากับ 0.316 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่า ค่าคงที่ ไม่มีผลต่อสมการ แต่เมื่อนำสมการถดถอยที่ได้นี้ไปคำนวณด้วยการแทนค่า ทำให้ค่า R^2 ของสมการมีค่าน้อยลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเก็บค่าคงที่นี้ไว้ในสมการ

เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอย พบว่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า สามารถยอมรับสมการถดถอยนี้ได้ ด้วยความเชื่อมั่น 95%

เมื่อนำค่าที่ได้จากสมการถดถอยมาถอดรูปลอการิทึมออก ทำให้ได้ค่าซึ่งเป็นเลขฐานสิบเป็นสมการคือ $Ft = 1.46N^{-0.43}f^{0.5}$ และทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2) จากตารางที่ ค.4 และ ค.5 ทำให้ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.584

ตารางที่ ค.1 ความเร็วรอบงานขัด (N) อัตราการป้อนชิ้นงาน (f) แรงในแนวเส้นสัมผัส (Ft) และแรงกดปกติ (Fn) เมื่อคำนวณให้เป็นค่าในรูปแบบของลอการิทึม ของชุดทดสอบที่ 1

NO.	N (รอบต่อนาที)	f (มม./นาที)	Ft (นิวตัน)	Fn (นิวตัน)	Logarithm			
					ln N	ln f	ln Ft	ln Fn
1	200	1	0.173	0.215	5.298	0.000	-1.755	-1.538
2	200	2	0.255	0.338	5.298	0.693	-1.368	-1.085
3	200	3	0.286	0.391	5.298	1.099	-1.250	-0.939
4	200	4	0.363	0.439	5.298	1.386	-1.013	-0.822
5	300	1	0.151	0.176	5.704	0.000	-1.891	-1.737
6	300	2	0.154	0.177	5.704	0.693	-1.869	-1.731
7	300	3	0.205	0.233	5.704	1.099	-1.586	-1.455
8	300	4	0.214	0.248	5.704	1.386	-1.541	-1.394
9	300	5	0.278	0.318	5.704	1.609	-1.278	-1.147
10	300	6	0.270	0.311	5.704	1.792	-1.311	-1.169
11	300	7	0.321	0.382	5.704	1.946	-1.135	-0.963
12	300	8	0.373	0.429	5.704	2.079	-0.987	-0.847
13	300	9	0.242	0.281	5.704	2.197	-1.421	-1.269
14	300	10	0.249	0.293	5.704	2.303	-1.389	-1.229
15	400	1	0.101	0.092	5.991	0.000	-2.291	-2.387
16	400	2	0.137	0.150	5.991	0.693	-1.987	-1.899
17	400	3	0.153	0.177	5.991	1.099	-1.878	-1.732
18	400	4	0.222	0.223	5.991	1.386	-1.503	-1.500
19	400	5	0.234	0.238	5.991	1.609	-1.453	-1.434
20	400	6	0.262	0.268	5.991	1.792	-1.341	-1.315
21	400	7	0.280	0.277	5.991	1.946	-1.273	-1.282
22	400	8	0.311	0.351	5.991	2.079	-1.168	-1.046
23	400	9	0.223	0.212	5.991	2.197	-1.500	-1.553
24	400	10	0.366	0.379	5.991	2.303	-1.005	-0.971
25	500	3	0.146	0.139	6.215	1.099	-1.924	-1.972
26	500	4	0.227	0.210	6.215	1.386	-1.484	-1.559
27	500	5	0.278	0.268	6.215	1.609	-1.281	-1.316
28	500	6	0.281	0.292	6.215	1.792	-1.268	-1.231
29	500	7	0.262	0.302	6.215	1.946	-1.338	-1.199
30	500	8	0.304	0.343	6.215	2.079	-1.192	-1.070
31	500	9	0.214	0.200	6.215	2.197	-1.541	-1.608
32	500	10	0.274	0.292	6.215	2.303	-1.294	-1.230
33	600	7	0.219	0.194	6.397	1.946	-1.520	-1.642
34	600	8	0.230	0.233	6.397	2.079	-1.469	-1.456
35	600	9	0.271	0.268	6.397	2.197	-1.307	-1.316
36	600	10	0.299	0.279	6.397	2.303	-1.207	-1.277

ตารางที่ ค.2 ความเร็วรอบงานขัด (N) อัตราการป้อนชิ้นงาน (f) แรงในแนวเส้นสัมผัส (Ft) และ
แรงกดปกติ (Fn) เมื่อคำนวณให้เป็นค่าในรูปแบบของลอการิทึม ของชุดทดสอบที่ 2

NO.	N (รอบต่อนาที)	f (มม./นาที)	Ft (นิวตัน)	Fn (นิวตัน)	Logarithm			
					ln N	ln f	ln Ft	ln Fn
37	200	1	0.117	0.135	5.298	0.000	-2.145	-1.999
38	200	2	0.180	0.204	5.298	0.693	-1.716	-1.592
39	200	3	0.225	0.241	5.298	1.099	-1.490	-1.423
40	200	4	0.243	0.285	5.298	1.386	-1.414	-1.254
41	300	1	0.122	0.113	5.704	0.000	-2.106	-2.184
42	300	2	0.180	0.161	5.704	0.693	-1.714	-1.825
43	300	3	0.188	0.218	5.704	1.099	-1.669	-1.522
44	300	4	0.229	0.250	5.704	1.386	-1.475	-1.387
45	300	5	0.246	0.270	5.704	1.609	-1.404	-1.309
46	300	6	0.269	0.285	5.704	1.792	-1.313	-1.256
47	300	7	0.293	0.344	5.704	1.946	-1.226	-1.067
48	300	8	0.390	0.449	5.704	2.079	-0.942	-0.801
49	300	9	0.396	0.488	5.704	2.197	-0.927	-0.718
50	300	10	0.502	0.568	5.704	2.303	-0.689	-0.566
51	400	1	0.131	0.097	5.991	0.000	-2.029	-2.330
52	400	2	0.201	0.178	5.991	0.693	-1.603	-1.725
53	400	3	0.247	0.195	5.991	1.099	-1.397	-1.634
54	400	4	0.289	0.259	5.991	1.386	-1.242	-1.352
55	400	5	0.334	0.326	5.991	1.609	-1.097	-1.121
56	400	6	0.394	0.349	5.991	1.792	-0.932	-1.051
57	400	7	0.456	0.429	5.991	1.946	-0.786	-0.845
58	400	8	0.483	0.456	5.991	2.079	-0.728	-0.786
59	400	9	0.499	0.472	5.991	2.197	-0.695	-0.750
60	400	10	0.510	0.461	5.991	2.303	-0.674	-0.773
61	500	3	0.153	0.099	6.215	1.099	-1.880	-2.315
62	500	4	0.194	0.165	6.215	1.386	-1.639	-1.799
63	500	5	0.219	0.180	6.215	1.609	-1.518	-1.713
64	500	6	0.220	0.164	6.215	1.792	-1.513	-1.808
65	500	7	0.257	0.230	6.215	1.946	-1.360	-1.470
66	500	8	0.278	0.291	6.215	2.079	-1.281	-1.235
67	500	9	0.277	0.284	6.215	2.197	-1.285	-1.258
68	500	10	0.357	0.362	6.215	2.303	-1.029	-1.016
69	600	7	0.196	0.098	6.397	1.946	-1.631	-2.325
70	600	8	0.237	0.131	6.397	2.079	-1.439	-2.035
71	600	9	0.402	0.286	6.397	2.197	-0.912	-1.250
72	600	10	0.380	0.350	6.397	2.303	-0.969	-1.049

ตารางที่ ค.3 ความเร็วรอบงานขัด (N) อัตราการป้อนชิ้นงาน (f) แรงในแนวเส้นสัมผัส (Ft) และแรงกดปกติ (Fn) เมื่อคำนวณให้เป็นค่าในรูปแบบของลอการิทึม ของชุดทดสอบที่ 3

NO.	N (รอบต่อนาที)	f (มม./นาที)	Ft (นิวตัน)	Fn (นิวตัน)	Logarithm			
					ln N	ln f	ln Ft	ln Fn
73	200	1	0.165	0.202	5.298	0.000	-1.803	-1.597
74	200	2	0.236	0.282	5.298	0.693	-1.442	-1.266
75	200	3	0.309	0.368	5.298	1.099	-1.174	-0.998
76	200	4	0.343	0.423	5.298	1.386	-1.071	-0.861
77	300	1	0.121	0.117	5.704	0.000	-2.112	-2.149
78	300	2	0.170	0.180	5.704	0.693	-1.773	-1.712
79	300	3	0.197	0.209	5.704	1.099	-1.624	-1.563
80	300	4	0.241	0.257	5.704	1.386	-1.423	-1.358
81	300	5	0.236	0.265	5.704	1.609	-1.445	-1.328
82	300	6	0.273	0.310	5.704	1.792	-1.298	-1.172
83	300	7	0.301	0.320	5.704	1.946	-1.202	-1.140
84	300	8	0.318	0.333	5.704	2.079	-1.145	-1.099
85	300	9	0.306	0.335	5.704	2.197	-1.185	-1.094
86	300	10	0.364	0.434	5.704	2.303	-1.010	-0.836
87	400	1	0.092	0.078	5.991	0.000	-2.391	-2.551
88	400	2	0.145	0.126	5.991	0.693	-1.929	-2.069
89	400	3	0.181	0.152	5.991	1.099	-1.711	-1.882
90	400	4	0.202	0.197	5.991	1.386	-1.597	-1.625
91	400	5	0.226	0.222	5.991	1.609	-1.487	-1.504
92	400	6	0.261	0.243	5.991	1.792	-1.344	-1.414
93	400	7	0.318	0.289	5.991	1.946	-1.144	-1.240
94	400	8	0.301	0.267	5.991	2.079	-1.200	-1.320
95	400	9	0.293	0.287	5.991	2.197	-1.227	-1.247
96	400	10	0.389	0.363	5.991	2.303	-0.944	-1.015
97	500	3	0.167	0.108	6.215	1.099	-1.790	-2.225
98	500	4	0.223	0.171	6.215	1.386	-1.502	-1.766
99	500	5	0.257	0.209	6.215	1.609	-1.360	-1.565
100	500	6	0.269	0.224	6.215	1.792	-1.312	-1.494
101	500	7	0.324	0.293	6.215	1.946	-1.128	-1.228
102	500	8	0.409	0.361	6.215	2.079	-0.895	-1.018
103	500	9	0.346	0.310	6.215	2.197	-1.063	-1.173
104	500	10	0.423	0.416	6.215	2.303	-0.860	-0.877
105	600	7	0.155	0.104	6.397	1.946	-1.861	-2.262
106	600	8	0.202	0.114	6.397	2.079	-1.599	-2.175
107	600	9	0.184	0.140	6.397	2.197	-1.694	-1.966
108	600	10	0.216	0.139	6.397	2.303	-1.533	-1.976

Multiple Linear Regression

$$\ln Ft = 0.381 - (0.431 * \ln N) + (0.496 * \ln f)$$

N = 108

R = 0.835 Rsqr = 0.698 Adj Rsqr = 0.692

Standard Error of Estimate = 0.196

	Coefficient	Std. Error	t	P	VIF
Constant	0.381	0.378	1.008	0.316	
ln N	-0.431	0.0672	-6.421	<0.001	1.286
ln f	0.496	0.0320	15.532	<0.001	1.286

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	9.350	4.675	121.144	<0.001
Residual	105	4.052	0.0386		
Total	107	13.402	0.125		

Column SSIncr SSMarg

ln N	0.0403	1.591
ln f	9.310	9.310

The dependent variable ln Ft can be predicted from a linear combination of the independent variables:

	P
ln N	<0.001
ln f	<0.001

All independent variables appear to contribute to predicting ln Ft (P < 0.05).

Normality Test (Shapiro-Wilk) Passed (P = 0.060)

Constant Variance Test: Passed (P = 0.313)

Power of performed test with alpha = 0.050: 1.000

รูปที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของความสัมพันธ์ของความเร็วรอบจานขัด (N) และ อัตราการป้อนชิ้นงาน (f) ที่มีอิทธิพลต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส (Ft)

ตารางที่ ค.4 แรงในแนวเส้นสัมผัส (F_t) ที่ได้จากการพยากรณ์ (\hat{Y}_i) ด้วยสมการ
 $F_t = 1.46N^{-0.43} f^{0.5}$ เทียบกับแรงในแนวเส้นสัมผัสที่ได้จากการทดลอง (Y_i) ของค่า
 ลำดับที่ i

No.	N	f	Y_i	\hat{Y}_i	$(Y_i - \bar{Y})^2$	$(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$
1	200	1	0.173	0.150	0.00792	0.01261
2	200	2	0.255	0.212	0.00005	0.00253
3	200	3	0.286	0.259	0.00061	0.00001
4	200	4	0.363	0.299	0.01026	0.00139
5	300	1	0.151	0.126	0.01231	0.01856
6	300	2	0.154	0.178	0.01157	0.00708
7	300	3	0.205	0.218	0.00327	0.00196
8	300	4	0.214	0.251	0.00228	0.00011
9	300	5	0.278	0.281	0.00028	0.00036
10	300	6	0.270	0.308	0.00006	0.00211
11	300	7	0.321	0.332	0.00354	0.00498
12	300	8	0.373	0.355	0.01225	0.00875
13	300	9	0.242	0.377	0.00041	0.01325
14	300	10	0.249	0.397	0.00016	0.01836
15	400	1	0.101	0.111	0.02582	0.02275
16	400	2	0.137	0.157	0.01557	0.01099
17	400	3	0.153	0.192	0.01188	0.00484
18	400	4	0.222	0.222	0.00156	0.00158
19	400	5	0.234	0.248	0.00078	0.00018
20	400	6	0.262	0.272	0.00000	0.00010
21	400	7	0.280	0.294	0.00033	0.00102
22	400	8	0.311	0.314	0.00240	0.00272
23	400	9	0.223	0.333	0.00150	0.00507
24	400	10	0.366	0.351	0.01084	0.00797
25	500	3	0.146	0.175	0.01341	0.00760
26	500	4	0.227	0.202	0.00123	0.00361
27	500	5	0.278	0.226	0.00025	0.00132
28	500	6	0.281	0.247	0.00038	0.00022
29	500	7	0.262	0.267	0.00000	0.00003
30	500	8	0.304	0.285	0.00174	0.00055
31	500	9	0.214	0.303	0.00228	0.00166
32	500	10	0.274	0.319	0.00015	0.00326
33	600	7	0.219	0.247	0.00187	0.00023
34	600	8	0.230	0.264	0.00100	0.00000
35	600	9	0.271	0.280	0.00008	0.00032
36	600	10	0.299	0.295	0.00138	0.00109

ตารางที่ ค.4 แรงในแนวเส้นสัมผัส (Ft) ที่ได้จากการพยากรณ์ (\hat{Y}_i) ด้วยสมการ $Ft = 1.46N^{-0.43} f^{0.5}$ เทียบกับแรงในแนวเส้นสัมผัสที่ได้จากการทดลอง (Y_i) ของค่าลำดับที่ i (ต่อ)

No.	N	f	Y_i	\hat{Y}_i	$(Y_i - \bar{Y})^2$	$(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$
37	200	1	0.117	0.150	0.02097	0.01261
38	200	2	0.180	0.212	0.00673	0.00253
39	200	3	0.225	0.259	0.00133	0.00001
40	200	4	0.243	0.299	0.00035	0.00139
41	300	1	0.122	0.126	0.01964	0.01856
42	300	2	0.180	0.178	0.00668	0.00708
43	300	3	0.188	0.218	0.00541	0.00196
44	300	4	0.229	0.251	0.00109	0.00011
45	300	5	0.246	0.281	0.00027	0.00036
46	300	6	0.269	0.308	0.00005	0.00211
47	300	7	0.293	0.332	0.00099	0.00498
48	300	8	0.390	0.355	0.01633	0.00875
49	300	9	0.396	0.377	0.01788	0.01325
50	300	10	0.502	0.397	0.05778	0.01836
51	400	1	0.131	0.111	0.01700	0.02275
52	400	2	0.201	0.157	0.00366	0.01099
53	400	3	0.247	0.192	0.00021	0.00484
54	400	4	0.289	0.222	0.00072	0.00158
55	400	5	0.334	0.248	0.00519	0.00018
56	400	6	0.394	0.272	0.01743	0.00010
57	400	7	0.456	0.294	0.03749	0.00102
58	400	8	0.483	0.314	0.04880	0.00272
59	400	9	0.499	0.333	0.05621	0.00507
60	400	10	0.510	0.351	0.06145	0.00797
61	500	3	0.153	0.175	0.01196	0.00760
62	500	4	0.194	0.202	0.00457	0.00361
63	500	5	0.219	0.226	0.00182	0.00132
64	500	6	0.220	0.247	0.00174	0.00022
65	500	7	0.257	0.267	0.00003	0.00003
66	500	8	0.278	0.285	0.00025	0.00055
67	500	9	0.277	0.303	0.00022	0.00166
68	500	10	0.357	0.319	0.00909	0.00326
69	600	7	0.196	0.247	0.00438	0.00023
70	600	8	0.237	0.264	0.00061	0.00000
71	600	9	0.402	0.280	0.01960	0.00032
72	600	10	0.380	0.295	0.01384	0.00109

ตารางที่ ค.4 แรงในแนวเส้นสัมผัส (F_t) ที่ได้จากการพยากรณ์ (\hat{Y}_i) ด้วยสมการ $F_t = 1.46N^{-0.43} f^{0.5}$ เทียบกับแรงในแนวเส้นสัมผัสที่ได้จากการทดลอง (Y_i) ของค่าลำดับที่ i (ต่อ)

No.	N	f	Y_i	\hat{Y}_i	$(Y_i - \bar{Y})^2$	$(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$
73	200	1	0.165	0.150	0.00942	0.01261
74	200	2	0.236	0.212	0.00064	0.00253
75	200	3	0.309	0.259	0.00223	0.00001
76	200	4	0.343	0.299	0.00653	0.00139
77	300	1	0.121	0.126	0.01986	0.01856
78	300	2	0.170	0.178	0.00846	0.00708
79	300	3	0.197	0.218	0.00419	0.00196
80	300	4	0.241	0.251	0.00043	0.00011
81	300	5	0.236	0.281	0.00069	0.00036
82	300	6	0.273	0.308	0.00012	0.00211
83	300	7	0.301	0.332	0.00149	0.00498
84	300	8	0.318	0.355	0.00317	0.00875
85	300	9	0.306	0.377	0.00193	0.01325
86	300	10	0.364	0.397	0.01050	0.01836
87	400	1	0.092	0.111	0.02901	0.02275
88	400	2	0.145	0.157	0.01358	0.01099
89	400	3	0.181	0.192	0.00659	0.00484
90	400	4	0.202	0.222	0.00353	0.00158
91	400	5	0.226	0.248	0.00129	0.00018
92	400	6	0.261	0.272	0.00000	0.00010
93	400	7	0.318	0.294	0.00320	0.00102
94	400	8	0.301	0.314	0.00155	0.00272
95	400	9	0.293	0.333	0.00098	0.00507
96	400	10	0.389	0.351	0.01613	0.00797
97	500	3	0.167	0.175	0.00900	0.00760
98	500	4	0.223	0.202	0.00153	0.00361
99	500	5	0.257	0.226	0.00003	0.00132
100	500	6	0.269	0.247	0.00005	0.00022
101	500	7	0.324	0.267	0.00384	0.00003
102	500	8	0.409	0.285	0.02150	0.00055
103	500	9	0.346	0.303	0.00700	0.00166
104	500	10	0.423	0.319	0.02601	0.00326
105	600	7	0.155	0.247	0.01132	0.00023
106	600	8	0.202	0.264	0.00357	0.00000
107	600	9	0.184	0.280	0.00610	0.00032
108	600	10	0.216	0.295	0.00212	0.00109

ตารางที่ ค.5 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการ $Ft = 1.46N^{-0.43} f^{0.5}$

แหล่งความแปรผัน	ผลบวกกำลังสอง		R^2
ค่าเศษเหลือ	$SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	$SS_R = 0.508$	$\frac{SS_R}{SS_T} = 0.584$
รวม	$SS_T = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$	$SS_T = 0.869$	

2. แรงกดปกติ

จากผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อที่ 4.2 เมื่อนำมาคำนวณของแรงกดปกติ ในรูปแบบของลอการิทึมได้ดังตารางที่ ค.1 ถึง ค.3 และเมื่อใช้โปรแกรม SigmaPlot ได้ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบจานขัด (N) และ อัตราการป้อนชิ้นงาน (f) ที่มีอิทธิพลต่อแรงกดปกติ (Fn) มีดังรูปที่ ค.2 โดยทั้งค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของตัวแปรต้นทั้งสอง มี P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าทั้งหมดมีผลต่อสมการเส้นถดถอยนี้

เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอย พบว่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า สามารถยอมรับสมการถดถอยนี้ได้ ด้วยความเชื่อมั่น 95%

เมื่อนำค่าที่ได้จากสมการถดถอยมาถอดรูปลอการิทึมออก ทำให้ได้ค่าซึ่งเป็นเลขฐานสิบเป็นสมการคือ $F_n = 23.5N^{-0.92} f^{0.49}$ และทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) จากตารางที่ ค.6 และ ค.7 ทำให้ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.589

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Multiple Linear Regression

$$\ln F_n = 3.157 - (0.923 * \ln N) + (0.570 * \ln f)$$

N = 108

R = 0.832 Rsqr = 0.692 Adj Rsqr = 0.686

Standard Error of Estimate = 0.241

	Coefficient	Std. Error	t	P	VIF
Constant	3.157	0.464	6.806	<0.001	
ln N	-0.923	0.0825	-11.189	<0.001	1.286
ln f	0.570	0.0392	14.536	<0.001	1.286

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	13.702	6.851	117.744	<0.001
Residual	105	6.109	0.0582		
Total	107	19.811	0.185		

Column	SSIincr	SSMarg
ln N	1.407	7.285
ln f	12.294	12.294

The dependent variable ln F_n can be predicted from a linear combination of the independent variables:

	P
ln N	<0.001
ln f	<0.001

All independent variables appear to contribute to predicting ln F_n (P < 0.05).

Normality Test (Shapiro-Wilk) Failed (P = 0.006)

Constant Variance Test: Passed (P = 0.259)

Power of performed test with alpha = 0.050: 1.000

รูปที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์สมการเส้นถดถอยของความสัมพันธ์ของความเร็วยานยนต์ (N) และ อัตราการป้อนชิ้นงาน (f) ที่มีอิทธิพลต่อแรงกดปกติ (Fn)

ตารางที่ ค.6 แรงกดปกติ (F_n) ที่ได้จากกราฟพยากรณ์ (\hat{Y}_i) ด้วยสมการ $F_n = 23.5N^{-0.92} f^{0.49}$

เทียบกับแรงกดปกติที่ได้จากการทดลอง (Y_i) ของค่าลำดับที่ i

No.	N	f	Y_i	\hat{Y}_i	$(Y_i - \bar{Y})^2$	$(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$
1	200	1	0.215	0.180	0.00226	0.00688
2	200	2	0.338	0.252	0.00571	0.00011
3	200	3	0.391	0.308	0.01656	0.00203
4	200	4	0.439	0.354	0.03134	0.00840
5	300	1	0.176	0.124	0.00746	0.01927
6	300	2	0.177	0.174	0.00728	0.00789
7	300	3	0.233	0.212	0.00085	0.00257
8	300	4	0.248	0.244	0.00021	0.00035
9	300	5	0.318	0.272	0.00305	0.00009
10	300	6	0.311	0.297	0.00234	0.00123
11	300	7	0.382	0.321	0.01422	0.00340
12	300	8	0.429	0.342	0.02765	0.00641
13	300	9	0.281	0.363	0.00035	0.01008
14	300	10	0.293	0.382	0.00091	0.01431
15	400	1	0.092	0.095	0.02909	0.02808
16	400	2	0.150	0.133	0.01271	0.01669
17	400	3	0.177	0.163	0.00732	0.00998
18	400	4	0.223	0.187	0.00155	0.00567
19	400	5	0.238	0.209	0.00058	0.00288
20	400	6	0.268	0.228	0.00004	0.00117
21	400	7	0.277	0.246	0.00022	0.00026
22	400	8	0.351	0.263	0.00792	0.00000
23	400	9	0.212	0.278	0.00258	0.00026
24	400	10	0.379	0.293	0.01348	0.00095
25	500	3	0.139	0.132	0.01521	0.01692
26	500	4	0.210	0.152	0.00272	0.01211
27	500	5	0.268	0.170	0.00003	0.00854
28	500	6	0.292	0.186	0.00088	0.00586
29	500	7	0.302	0.200	0.00153	0.00384
30	500	8	0.343	0.214	0.00647	0.00234
31	500	9	0.200	0.227	0.00386	0.00127
32	500	10	0.292	0.239	0.00090	0.00056
33	600	7	0.194	0.170	0.00475	0.00863
34	600	8	0.233	0.181	0.00085	0.00663
35	600	9	0.268	0.192	0.00003	0.00500
36	600	10	0.279	0.202	0.00027	0.00366

ตารางที่ ค.6 แแรงคดปกติ (F_n) ที่ได้จากทฤษฎีการพยากรณ์ (\hat{Y}_i) ด้วยสมการ $F_n = 23.5N^{-0.92} f^{0.49}$

เทียบกับแรงคดปกติที่ได้จากการทดลอง (Y_i) ของค่าลำดับที่ i (ต่อ)

No.	N	f	Y_i	\hat{Y}_i	$(Y_i - \bar{Y})^2$	$(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$
37	200	1	0.135	0.180	0.01613	0.00688
38	200	2	0.204	0.252	0.00346	0.00011
39	200	3	0.241	0.308	0.00046	0.00203
40	200	4	0.285	0.354	0.00052	0.00840
41	300	1	0.113	0.124	0.02245	0.01927
42	300	2	0.161	0.174	0.01026	0.00789
43	300	3	0.218	0.212	0.00196	0.00257
44	300	4	0.250	0.244	0.00016	0.00035
45	300	5	0.270	0.272	0.00006	0.00009
46	300	6	0.285	0.297	0.00050	0.00123
47	300	7	0.344	0.321	0.00668	0.00340
48	300	8	0.449	0.342	0.03477	0.00641
49	300	9	0.488	0.363	0.05085	0.01008
50	300	10	0.568	0.382	0.09333	0.01431
51	400	1	0.097	0.095	0.02726	0.02808
52	400	2	0.178	0.133	0.00709	0.01669
53	400	3	0.195	0.163	0.00453	0.00998
54	400	4	0.259	0.187	0.00001	0.00567
55	400	5	0.326	0.209	0.00402	0.00288
56	400	6	0.349	0.228	0.00757	0.00117
57	400	7	0.429	0.246	0.02788	0.00026
58	400	8	0.456	0.263	0.03742	0.00000
59	400	9	0.472	0.278	0.04410	0.00026
60	400	10	0.461	0.293	0.03959	0.00095
61	500	3	0.099	0.132	0.02679	0.01692
62	500	4	0.165	0.152	0.00942	0.01211
63	500	5	0.180	0.170	0.00674	0.00854
64	500	6	0.164	0.186	0.00971	0.00586
65	500	7	0.230	0.200	0.00106	0.00384
66	500	8	0.291	0.214	0.00080	0.00234
67	500	9	0.284	0.227	0.00047	0.00127
68	500	10	0.362	0.239	0.00991	0.00056
69	600	7	0.098	0.170	0.02712	0.00863
70	600	8	0.131	0.181	0.01736	0.00663
71	600	9	0.286	0.192	0.00057	0.00500
72	600	10	0.350	0.202	0.00770	0.00366

ตารางที่ ค.6 แแรงคดปกติ (Fn) ที่ได้จากทฤษฎีการพยากรณ์ (\hat{Y}_i) ด้วยสมการ $F_n = 23.5N^{-0.92} f^{0.49}$

เทียบกับแรงคดปกติที่ได้จากการทดลอง (Y_i) ของค่าลำดับที่ i (ต่อ)

No.	N	f	Y_i	\hat{Y}_i	$(Y_i - \bar{Y})^2$	$(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$
73	200	1	0.202	0.180	0.00360	0.00688
74	200	2	0.282	0.252	0.00038	0.00011
75	200	3	0.368	0.308	0.01124	0.00203
76	200	4	0.423	0.354	0.02574	0.00840
77	300	1	0.117	0.124	0.02126	0.01927
78	300	2	0.180	0.174	0.00672	0.00789
79	300	3	0.209	0.212	0.00281	0.00257
80	300	4	0.257	0.244	0.00003	0.00035
81	300	5	0.265	0.272	0.00001	0.00009
82	300	6	0.310	0.297	0.00224	0.00123
83	300	7	0.320	0.321	0.00330	0.00340
84	300	8	0.333	0.342	0.00502	0.00641
85	300	9	0.335	0.363	0.00526	0.01008
86	300	10	0.434	0.382	0.02930	0.01431
87	400	1	0.078	0.095	0.03401	0.02808
88	400	2	0.126	0.133	0.01855	0.01669
89	400	3	0.152	0.163	0.01212	0.00998
90	400	4	0.197	0.187	0.00430	0.00567
91	400	5	0.222	0.209	0.00161	0.00288
92	400	6	0.243	0.228	0.00037	0.00117
93	400	7	0.289	0.246	0.00072	0.00026
94	400	8	0.267	0.263	0.00002	0.00000
95	400	9	0.287	0.278	0.00063	0.00026
96	400	10	0.363	0.293	0.01002	0.00095
97	500	3	0.108	0.132	0.02382	0.01692
98	500	4	0.171	0.152	0.00836	0.01211
99	500	5	0.209	0.170	0.00286	0.00854
100	500	6	0.224	0.186	0.00144	0.00586
101	500	7	0.293	0.200	0.00092	0.00384
102	500	8	0.361	0.214	0.00976	0.00234
103	500	9	0.310	0.227	0.00221	0.00127
104	500	10	0.416	0.239	0.02361	0.00056
105	600	7	0.104	0.170	0.02505	0.00863
106	600	8	0.114	0.181	0.02215	0.00663
107	600	9	0.140	0.192	0.01497	0.00500
108	600	10	0.139	0.202	0.01534	0.00366

ตารางที่ ค.7 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการ $F_n = 23.5N^{-0.92} f^{0.49}$

แหล่งความแปรผัน	ผลบวกกำลังสอง		R^2
ค่าเศษเหลือ	$SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	$SS_R = 0.673$	$\frac{SS_R}{SS_T} = 0.589$
รวม	$SS_T = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$	$SS_T = 1.142$	

3. อัตราส่วนแรง

จากผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อที่ 4.2 เมื่อนำมาคำนวณของแรงในแนวเส้นสัมผัส ในรูปแบบของลอการิทึมได้ดังตารางที่ ค.8 เมื่อใช้โปรแกรม SigmaPlot ได้ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบจานชุด (N) ที่มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนแรง (μ) มีดังรูปที่ ค.3 โดยทั้งค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของตัวแปรต้น มี P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าทั้งหมดมีผลต่อสมการเส้นถดถอยนี้

เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอย พบว่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า สามารถยอมรับสมการถดถอยนี้ได้ ด้วยความเชื่อมั่น 95%

เมื่อนำค่าที่ได้จากสมการถดถอยมาถอดรูปลอการิทึมออก ทำให้ได้ค่าซึ่งเป็นเลขฐานสิบเป็นสมการคือ $\mu = 0.08N^{0.44}$ และทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) จากตารางที่ ค.9 และ ค.10 ทำให้ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.906

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.8 ความเร็วรอบจานซีดี (N) และอัตราส่วนแรง (μ) เมื่อคำนวณให้เป็นค่าในรูปแบบของ
ลอการิทึม

NO.	N (รอบต่อนาที)	μ (นิวตัน/นิวตัน)	Logarithm	
			ln N	ln μ
1	200	0.830	5.298	-0.187
2	300	0.905	5.704	-0.100
3	400	1.067	5.991	0.064
4	500	1.119	6.215	0.112
5	600	1.387	6.397	0.327

Linear Regression					
ln μ = -2.560 + (0.440 * ln N)					
N = 5					
R = 0.957 Rsqr = 0.915 Adj Rsqr = 0.887					
Standard Error of Estimate = 0.067					
	Coefficient	Std. Error	t	P	
Constant	-2.560	0.458	-5.592	0.011	
ln N	0.440	0.0772	5.699	0.011	
Analysis of Variance:					
	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0.145	0.145	32.479	0.011
Residual	3	0.0134	0.00448		
Total	4	0.159	0.0397		
Normality Test (Shapiro-Wilk) Passed (P = 0.559)					
Constant Variance Test: Passed (P = 0.050)					
Power of performed test with alpha = 0.050: 0.769					

รูปที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์สมการเส้นถดถอยของความสัมพันธ์ของความเร็วรอบจานซีดี (N)
ที่มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนแรง (μ)

ตารางที่ ค.9 อัตราส่วนแรง (μ) ที่ได้จากการพยากรณ์ (\hat{Y}_i) ด้วยสมการ $\mu = 0.08N^{0.44}$ เทียบกับอัตราส่วนแรงได้จากการทดลอง (Y_i) ของค่าลำดับที่ i

No.	N	Y_i	\hat{Y}_i	$(Y_i - \bar{Y})^2$	$(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$
1	200	0.830	0.823	0.05374	0.05667
2	300	0.905	0.984	0.02436	0.00597
3	400	1.067	1.117	0.00003	0.00308
4	500	1.119	1.232	0.00327	0.02915
5	600	1.387	1.335	0.10591	0.07489
Sum				0.187	0.170

ตารางที่ ค.10 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการ $\mu = 0.08N^{0.44}$

แหล่งความแปรผัน	ผลบวกกำลังสอง		R^2
ค่าเศษเหลือ	$SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	$SS_R = 0.170$	$\frac{SS_R}{SS_T} = 0.906$
รวม	$SS_T = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$	$SS_T = 0.187$	

4. อัตราการขาดเนื้อวัสดุออก

เมื่อใช้โปรแกรม SigmaPlot ได้ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนชิ้นงาน (f) ที่มีอิทธิพลต่ออัตราการขาดเนื้อวัสดุ (MRR) มีดังรูปที่ ค.4 เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอย พบว่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า สามารถยอมรับสมการถดถอยนี้ได้ ด้วยความเชื่อมั่น 95%

เมื่อนำค่าที่ได้จากสมการ และทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) จากตารางที่ ค.11 และ ค.12 ทำให้ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.999

Linear Regression

$$\text{MRR} = 16.043 + (491.451 * f)$$

N = 10

R = 1.000 Rsqr = 0.999 Adj Rsqr = 0.999

Standard Error of Estimate = 38.673

	Coefficient	Std. Error	t	P
Constant	16.043	26.419	0.607	0.561
f	491.451	4.258	115.424	<0.001

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	19925775.695	19925775.695	13322.686	<0.001
Residual	8	11965.020	1495.628		
Total	9	19937740.716	2215304.524		

Normality Test (Shapiro-Wilk) Passed (P = 0.796)

Constant Variance Test: Failed (P = 0.013)

Power of performed test with alpha = 0.050: 1.000

รูปที่ ค.4 ผลการวิเคราะห์หาค่าการเส้นถดถอยของความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนชิ้นงาน (f) ที่มีอิทธิพลต่ออัตราการจัดเนื้อวัสดุออก (MRR)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.11 อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก (MRR) ที่ได้จากการพยากรณ์ (\hat{Y}_i) ด้วยสมการ $MRR = 16 + 491.5f$ เทียบกับอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออกได้จากการทดลอง (Y_i) ของค่าลำดับที่ i

No.	f	Y_i	\hat{Y}_i	$(Y_i - \bar{Y})^2$	$(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$
1	1	516	508	4855110	4890846
2	2	1005	999	2938306	2958488
3	3	1494	1491	1501219	1509275
4	4	1930	1982	622637	543207
5	5	2505	2474	45631	60283
6	6	2946	2965	51669	60503
7	7	3448	3457	531365	543868
8	8	3968	3948	1559580	1510378
9	9	4504	4440	3185493	2960032
10	10	4875	4931	4646732	4892830
Sum				19937741	19929711

ตารางที่ ค.12 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการ $MRR = 16 + 491.5f$

แหล่งความแปรผัน	ผลบวกกำลังสอง	R^2
ค่าเศษเหลือ	$SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$ $SS_R = 19929711$	$\frac{SS_R}{SS_T} = 0.999$
รวม	$SS_T = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$ $SS_T = 19937741$	

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกฤติศักดิ์ โกยดุลย์ เกิดเมื่อวันที่ 7 เมษายน พ.ศ. 2521 ภูมิลำเนาเดิมจังหวัดพังงา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2543 เข้าทำงานที่ ศูนย์เทคโนโลยี โลหะและวัสดุแห่งชาติ ในปี 2544 ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย หน่วยงานเซรามิกส์ ฝ่ายวิจัยและพัฒนา จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย