

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



247962

การพัฒนาอุปกรณ์แสดงผลและสัญญาณภาวะเบื้องต้นที่มีฟังก์ชันเร่งเขียนในรูปแบบทรงกลม

นายกฤติศักดิ์ โภษะคุลย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



247962

การพัฒนาอุปกรณ์แสดงผลและศึกษาสภาวะปัจจัยที่มีผลต่อแรงเฉื่อยขึ้นรูปทรงกลม



นายกฤติศักดิ์ โกยกุลย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



4 8 7 0 2 1 1 4 2 2

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

Mr. Kritdipuk Goyadoolya

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาอุปกรณ์แสดงผลและศึกษาสภาวะปัจจัยที่มีผล
ต่อแรงเฉื่อยขึ้นรูปทรงกลม

โดย

นายกฤติภัค โกยดุลย์

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

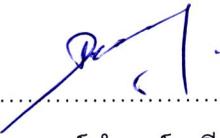
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

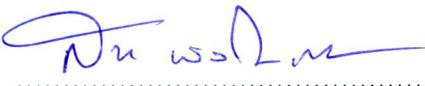
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย)


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


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคี่ก)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สิริง 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.

247962

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
 ซิลิเกตทรงลูกบาศก์ขนาดด้านละ 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 : *Kurt Gulya*
 สาขาวิชา : วิศวกรรมอุตสาหการลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : *Du*
 ปีการศึกษา : 2551

4870211421 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORD : SPHERICAL GRINDING / GRINDING FORCE / SILICATE MATERIAL

KRITDIPIUK 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.

247962

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 (Ft) and normal force (Fn) 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 : *KritdiPIUK*
Field of Study : INDUSTRIAL ENGINEERING Principal Advisor's Signature : *Somchai PUAJINDANETR*
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 พวงเพิกคิก และอาจารย์ ดร.สิริง ปรีชานนท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นเพิ่มเติม เพื่อให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ และทุนอุดหนุนการศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเครื่องทดสอบความล้าและอุปกรณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตขั้นสูงและวิศวกรรมที่เที่ยงตรง และผู้ช่วยวิจัย ที่ได้เอื้อเฟื้อชุดเครื่องมือในการวัดแรงและกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พร้อมทั้งให้คำแนะนำการใช้งานเพื่อให้เหมาะสมกับวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ คำแนะนำ และการอบรมขอขอบพระคุณ ครูไพโรจน์ อนันตะเศรษฐกุล ครูชัยฤทธิ์ ขวัญกลับ ที่ให้ความช่วยเหลือ ความรู้ และทักษะทางช่าง ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ พี่ศิรวิทย์ เซาว์พานิช 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 คุณสิริภัสร์ และ คุณพฤตินาถ ไกยดุลย์ 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 การเจียรไน	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 การเจียรขึ้นรูปทรงกลม	32
2.5.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเจียร	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 การประมวลผลการเจียรขึ้นรูปทรงกลม	74
3.4.1 การตรวจสอบรูปทรงขึ้นงานหลังการเจียร	74
3.4.2 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม	74
3.4.3 การประมวลผลแรงเจียร	75
3.4.4 การประมวลผลอัตราการกำจัดเนื้อวัสดุออก	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 ภาพสัญญาณแรงเจียร์ที่ได้จากการทดลอง	145
ภาคผนวก ข การคำนวณค่าของแรงที่วัดได้ให้อยู่ในรูปแบบค่ารากกำลังสองเฉลี่ย	182
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์สมการเส้นถดถอย	187
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	206

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ชนิดของตัวแปรเชิงกายภาพและตัวแปรเชิงสัญญาณที่ใช้โดยทั่วไป	19
2.2	ลักษณะของการวัดและชนิดของตัวรับรู้	20
2.3	ผลการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน	29
2.4	ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยเดียว	31
3.1	การปรับแต่งค่าของไดนาโมมิเตอร์และเครื่องขยายสัญญาณประจุ	71
3.2	สภาวะปัจจัยของการเจียร	73
4.1	คุณลักษณะของวัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัย	83
4.2	ค่าทางสถิติของความหนาแน่นรวมของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	84
4.3	ค่าทางสถิติของความหนาแน่นมวลวัสดุของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	85
4.4	ค่าทางสถิติของความพรุนตัวของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	85
4.5	ค่าทางสถิติของความทนแรงอัดของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	87
4.6	ค่าทางสถิติของความทนแรงดัดโค้งของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	87
4.7	ค่าทางสถิติของความเครียดแรงดัดโค้งของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	88
4.8	เส้นผ่านศูนย์กลางและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชิ้นงานทั้ง 3 ชุดทดสอบ	92
4.9	ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม	93
4.10	แรงในแนวเส้นสัมผัสทั้ง 3 ชุดทดสอบ	96
4.11	ค่าเฉลี่ยของแรงในแนวเส้นสัมผัส	96
4.12	แรงกดปกติทั้ง 3 ชุดทดสอบ	100
4.13	ค่าเฉลี่ยของแรงกดปกติ	100
4.14	อัตราส่วนแรงทั้ง 3 ชุดทดสอบ	103
4.15	ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนแรง	104
4.16	อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออกในการเจียรขึ้นรูปชิ้นงานทรงกลม	107
4.17	ค่าเฉลี่ยของอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก	108
4.18	ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม	111
4.19	ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม	115
4.20	ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของแรงในแนวเส้นสัมผัส	121
4.21	ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของแรงกดปกติ	122
4.22	ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของอัตราส่วนแรง	123

ตารางที่	หน้า
4.23 ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของอัตราการจัดเนื้อวัสดุออก	126

สารบัญญภาพ

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	เปรียบเทียบการเจียรแบบดั้งเดิมกับการเจียรแบบป้อนความคืบ	10
2.7	ลักษณะของการเจียรแบบจาน	11
2.8	ลักษณะของ เครื่องเจียรแบบ Tool and cutter	12
2.9	ล้อและเม็ดจานขัด	13
2.10	สารขัดถูชนิดสายพาน สารขัดถูชนิดต่างๆ และ เครื่องเจียร	14
2.11	หัวเจียร เมื่อมีการหมุน และการสั่น ของการเจียรแบบ honing	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 หลอดพิกโนมิเตอร์พร้อมฝาปิด	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 บีมไฮโดรลิก	58
3.12 เครื่องทดสอบความล้า	58
3.13 หน้าแปลนส่วนล่างของเครื่องทดสอบความล้า	59
3.14 ภาพรวมการทำงานของมอเตอร์หนัก	59
3.15 มอเตอร์	60
3.16 ชุดตัวปรับไฟฟ้าผกผัน และ ตัวปรับรอบ	60
3.17 หน้าแปลนส่วนบนของเครื่องทดสอบความล้า	60
3.18 หน้าแปลนส่วนบนของเครื่องทดสอบความล้า เมื่อใช้ในการจับยึดมอเตอร์	61
3.19 จานขัดกระดาษทรายต่อเข้ากับแกนของมอเตอร์	61
3.20 กระดาษทรายที่นำมาใช้ติดกับจานหมุน	62
3.21 การทำงานของชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า	62
3.22 ไดนาโมมิเตอร์	63
3.23 หน้าแปลนส่วนล่างของเครื่องทดสอบความล้า เมื่อใช้ในการจับยึดไดนาโมมิเตอร์	63
3.24 เครื่องขยายสัญญาณประจุ	64

รูปที่	หน้า
3.25	ออสซิลโลสโคป 64
3.26	มิติของแผ่นจากรูปโค้ง 64
3.27	เครื่องทดสอบความล้า เมื่อประกอบอุปกรณ์เข้าไปแล้ว 65
3.28	ภาพรวมของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 67
3.29	โครงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ กับเครื่องมือในงานวิจัย 68
3.30	จุดเริ่มต้นการเจียร ที่ระยะความลึก 29.7 มิลลิเมตร 70
3.31	จุดสิ้นสุดการเจียร ที่ระยะความลึก 20.3 มิลลิเมตร 70
3.32	การปรับแต่งไดนาโมมิเตอร์และเครื่องขยายสัญญาณประจุ 71
3.33	การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม 74
3.34	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกน x y และ z กับ แรงในแนวสัมผัส และแรงปกติ 76
4.1	ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD 84
4.2	ชิ้นงานถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 20 เท่า 86
4.3	ชิ้นงานถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งที่กำลังขยาย 50 เท่า 86
4.4	ลักษณะรูปทรงชิ้นงานหลังการเจียร 89
4.5	รูปทรงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเจียร ที่ความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อน ชิ้นงานต่างๆ 90
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชิ้นงานทรงกลม กับความเร็วรอบงานขัด ที่อัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ 93
4.7	แรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน x ขณะเจียรที่ความเร็วรอบงานขัด 300 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนชิ้นงาน 2 มิลลิเมตรต่อนาที 95
4.8	แรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน y ขณะเจียรที่ความเร็วรอบงานขัด 300 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนชิ้นงาน 2 มิลลิเมตรต่อนาที 95
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัส กับความเร็วรอบงานขัด ที่อัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ 97
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัส กับอัตราการป้อนชิ้นงาน ที่ความเร็วรอบงานขัดต่างๆ 97
4.11	แรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน z ขณะเจียรที่ความเร็วรอบงานขัด 300 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนชิ้นงาน 2 มิลลิเมตรต่อนาที 99

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